Jernbaneverket

Simuleringsrapport

Banestrømforsyningen i Oslo-området med trafikkøkninger i forbindelse med ruteplan R2012

Fase 1 - Trafikk og infrastruktur i nær fremtid

Jernbaneverket BTPE juni 2010

Jernbaneverket
Biblioteket

SIMULERINGSRAPPORT

BANESTRØMFORSYNINGEN I OSLO-OMRÅDET MED TRAFIKKØKNING I FORBINDELSE MED RUTEPLAN R2012

Undersøkelse av behov for tiltak i banestrømforsyningen for å tilfredsstille økning av transportarbeidet i årsskiftet 2012/2013

Fase 1 - trafikk og infrastruktur i nær fremtid

Jernbaneverket
Biblioteket

000	Endelig utgave	13.07.2010	FM	FrJ (COWI)	JCS
Rev.	Revisjonen gjelder	Dato	Utarb. av	Kontr. av	Godkj. av

Banestrømforsyning **Simuleringsrapport** **Banestrømforsyningen i Oslo-området med trafikkøkninger i forbindelse med R2012**	Ant. sider	Fritekst 1d	
	191	Fritekst 2d	
		Fritekst 3d	
	Produsent	Frank Martinsen - BTPE	
	Prod. dok. nr.		
	Erstatning for		
	Erstattet av		
Jernbaneverket	Dokument nr.		Rev.
	EB-100776-000		**000**

Sammendrag

Samfunnet har stort behov for å øke transportkapasiteten for tog i det sentrale Østlandet og Oslo-området i årene fremover. NSB har derfor bestilt 50 nye lokaltog av typen FLIRT (***Flinker leichter innovativer Regional-Triebzug).*** Disse togene skal fase ut de aldrende togsettene av Type 69 som nå er rundt 40 år gamle. De nye togsettene har en installert elektrisk ytelse på 6,4 MVA (fra strømavtager) og når disse går som doble sett trekker de altså nærmere 13 MVA. Til sammenligning trekker et sett av Type 69 med seks vogner 3,8 MVA. En ytterligere belastningsøkning vil skje ved at trafikken i Oslo-området økes ved ruteendringen R2012. Ruteplan R2012 vil gi en trafikkøkning på 37 %. Den ekstra kapasiteten som Askerbanen gir skal utnyttes og NSB's ruteleier på Gardermobanen konstrueres for en maksimalhastighet på 200 km/h.

Med disse store trafikkøkningene og nye togene frykter en for at banestrømforsyningen i Oslo-området skal overbelastes. Det som i verste fall kan skje er at de sentrale omformerstasjonene i området belastes mer enn de er dimensjonert for, og at de dermed kobles automatisk ut av overbelastningsvernene. En kan dermed få en kaskade der ett eller flere utkoblede omformeraggregater fører til større belastning på de øvrige og flere aggregater overbelastes og kobles ut. Dette kan skje hurtig og til slutt kan alle de sentrale omformerstasjonene være utkoblet og togtrafikken stanser opp inntil en får startet opp omformeraggregatene på nytt.

Denne rapporten gjør rede for et omfattende arbeid med å finne ut om banestrømforsyningen virkelig vil bli så hardt belastet som fryktet og hvilke tiltak som eventuelt må innføres. Trafikksimuleringer med en stor modell for banestrømforsyningen i det sentrale Østlandet er benyttet som redskap. Modeller for komponenter i banestrømforsyningen, banetraseer, beskrivelse av skiltet hastighet, togene og ruteplanen inngår i en slik simuleringsmodell. I et slikt simuleringsverktøy er det enkelt å endre på parametere og lage forskjellige scenarioer for å se på løsninger i forskjellige situasjoner. Fra før har en gjort en rekke studier med simuleringer for Oslo-området og en har funnet en del tiltak for å forbedre forholdene. Disse tiltakene er relatert til spenningsregulatorene for de roterende aggregatene og endring av karakteristika for de statiske omformerne.

De første simuleringene i dette arbeidet ble gjort med dagens infrastruktur og den fremtidige ruteplanen R2012 og de nye togene for å se hvor stor belastningen virkelig blir. Simuleringene viser at den kortvarige toppbelastningen ved ordinær drift ikke ble så stor at kraftsystemet er i umiddelbar fare for overbelastning. Imidlertid er de gjenværende marginene mot overbelastning små, og for Oslo-området gjelder at ved utfall av ett aggregat samtidig i to av disse stasjonene skal togtrafikken kunne opprettholdes uten problemer. Undersøkelsen viste at dette kravet ikke tilfredsstilles, og at det vil kunne oppstå stor fare for at alle de roterende omformerne vil falle ut (kaskadeutfall), om først to av dem samtidig faller ut.

Undersøkelsene gikk videre ut på å teste en rekke forskjellige tiltak for å kunne tilfredsstille kravet om utfall av aggregater samtidig. Her oppsummeres de viktigste tiltakene og effekten av dem:

- Fallende statikk for spenningsregulatorene for samtlige omformere. Dette gjør at spenningen som omformerne holder, reduseres når den reaktive effekten øker. I neste omgang vil dette føre til bedre fordeling av belastningen mellom omformerstasjonene.

    - Det er funnet at statikken anbefales å være 4 % for Lillestrøm, Jessheim, Smørbekk og Nordagutu omformerstasjoner. For de øvrige stasjoner anbefales den å være 12 %.
    - Ved utfall av ett aggregat i samme stasjon skal statikken øke til det dobbelte.
    - Fallende statikk gir forbedret effektflyt i normal drift og redusert energibehov.
- Redusert tverrsakseereaktans X_q for de statiske omformerstasjonene Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk fører til at disse bidrar med større effekt når belastningen i Oslo-området er stor.
- Omsetningen i transformatoren for fjernledningen inn til Asker reduseres fra dagens 55/16,5 til 54,5/16,5 kV.

Disse tre tiltakene til sammen vil gjøre at en får tilfredsstillende spenning for togene i normal og unormal drift. Det vil si at med utfall av to aggregater, skal spenningen for togene ikke komme under 12,0 kV (i henhold til Teknisk regelverk JD 540). Med gjennomførte tiltak har en også funnet at det sannsynligvis ikke er kritisk om to aggregater faller ut i samme stasjon. Dette vil være en forbedring, fordi en med dagens innstillinger ikke kan opprettholde driften av kraftsystemet i Oslo-området, dersom to aggregater i samme stasjon faller ut i rushtiden. Det er videre forutsatt at full trafikk med 70 % belegg i alle tog og ingen begrensning av pådraget for togene. Det er også forutsatt at Hakavik kraftverk ikke er i drift.

Imidlertid vil spenningen for flere tog kortvarig komme ned mot 12,0 kV ved en unormal driftsituasjon, - selv med ovennevnte tiltak innført. For å forbedre spenningen for togene og redusere sannsynligheten for ugunstige driftssituasjoner, vil følgende tiltak i tillegg være gunstig:

- Øke ytelsen i Hakavik til 15 MW og kjøre kraftverket for fullt i rushtiden morgen og ettermiddag. Tiltaket vil gi kontinuerlig økt kapasitet til Oslo-området og forbedret spenning for togene i en kritisk situasjon.
- Temperatur- og strømbegrenser for de roterende aggregatene. Dette for å forhindre at roterende aggregater skal kunne overbelastes og dermed kobles ut.
    - Tiltaket inkluderer måling av temperatur, strøm og spenning.
    - Dette medfører en belastningsavhengig spenningsreduksjon, som fører til at mer effekt overføres fra de perifere omformerstasjonene til Oslo-området når aggregater faller ut.

I togene kan også gunstige tiltak gjøres som hever spenningen:

- Reaktiv kompensering i de nye togsettene Type 74/75 enten slik som allerede forselått fra produsenten (Stadler).
- Redusert effekt ved lav spenning som fastsatt i normen EN50388. Type 74/75 kan enkelt tilfredsstile denne normen ved at Software parametrers slik, men for eldre tog er dette vanskeligere. Flytogsettene skal modifiseres slik at normen tilfredsstiles.
- Det sies at vanligvis vil de nye FLIRT-togsettene ikke vil ha behov for å utnytte den installerte trekkraften og normalt bare benytte opptil 70 % av effekten. Togene vil da kunne kjøre etter rutene. Om disse og de andre togene ikke fremføres med full trekkraft, spesielt i unormale driftssituasjoner, vil spenningen forbedres for hele Oslo-området.

Et annet tiltak som er under planlegging er anskaffelse av mobile omformeraggregater for beredskapssituasjoner. Disse er ment benyttet i en nødssituasjon for banestrømforsyningen i hele landet generelt, men for Oslo-området spesielt, og vil i utgangspunktet settes i drift i Oslo-området. I en unormal situasjon og potensielle havarier av omformere med

reparasjonstid på 6-8 måneder, vil mobile omformeraggregater redusere problemene med for liten operativ kapasitet. I tillegg vil disse øke spenninger for togene, slik at kjøretiden ikke skal påvirkes. Økt effekt fra Hakavik kraftverk og introduksjon av mobile omformeraggregater er derfor gunstige tiltak for økt kapasitet og økt beredskap for Oslo-området, i tillegg til de øvrige anbefalte tiltak i omformerstasjonene.

Det er altså funnet en serie tiltak for å unngå overbelastning av banestrømforsyningen i Oslo-området ved innføring av de nye togene Type 74/75 og ruteplan R2012. Det anbefales at arbeidet med disse tiltakene starter opp så snart som mulig. Tiltakene kan like godt innføres gradvis av fra nå av og en kan ha måleprogrammer for å se virkningen av tiltakene etter som de innføres ett for ett. Arbeidet med tilgang på økt ytelse fra Hakavik kraftverk, bør også komme i gang snarest.

Selv om de nye togsettene Type 74/75 har en meget stor installert effekt, er det sannsynligvis i like stor grad den ambisiøse ruteplanen R2010 som gjør at tilstanden for banestrømforsyningen i Oslo-området blir anstrengt.

1 INNLEDNING 5

1.1 BAKGRUNN 5
1.2 MÅLSETTING 5
1.3 FORUTSETNINGER 7
1.4 TIDLIGERE STUDIER 8
1.4.1 Målinger og beregninger av banestrømforsyningen i forbindelse med Olympiaden i 1994 - februar 1991 8
1.4.2 Kapasitetsvurderinger for Gardermobanen - februar 1994 8
1.4.3 Trafikksimuleringer av Oslo-området med VISON/OSLO - mars 1995 9
1.4.4 Trafikksimuleringer for Gardermobanen med VISON/OSLO - mars 1996 10
1.4.5 Samkjøringsstudie og trafikksimulering for Oslo-området med SimTrac/SIMPOW utført av ABB - mai 1997 10
1.4.6 Kraftsystemplan for Oslo-området - desember 1999 11
1.4.7 Trafikksimuleringer av Oslo-området - november 2000 12
1.4.8 Beredskapsplan for Oslo-området - juni 2002 13
1.4.9 Utnyttelse av omformerkapasiteten i Oslo-området - februar 2003 13
1.4.10 Utredning av samkjøringen i Oslo-området - oktober 2003 14
1.4.11 Oppsummering av tidligere undersøkelser og tiltak for å forbedre forholdene 14
1.5 FORUTSETNINGER OG METODIKK 16
1.5.1 Konkrete undersøkelser som skal gjøres 16
1.5.2 Metode med stasjonær lastflyt for å undersøke optimale parameterinnstillinger 18

2 KRAV TIL BANESTRØMFORSYNINGEN 20

2.1 KRAV TIL DIMENSJONERING AV BANESTRØMFORSYNING 20
2.2 SIMULERINGER OG DIMENSJONERING AV SYSTEM OG KOMPONENTER 24
2.2.1 Belastning av omformere 24
2.2.2 Marginer mot overbelastning av omformere 25

3 SIMULERINGSMODELLENE 28

3.1 AVGRENSING AV SIMULERINGSOMRÅDE 28
3.2 BANESTRØMFORSYNING 28
3.2.1 Matende trefasenett 28
3.2.2 Omformerstasjoner 29
3.2.3 Spenningsregulering for omformerstasjonene 29
3.3 KONTAKTLEDNINGSANLEGG OG OVERFØRING 30
3.3.1 Konvensjonelt kontaktledningsanlegg 30
3.3.2 Fjernledningssystem 30
3.3.3 AT-system 31
3.3.4 Koblingsbilde 31
3.4 BANEDATA 31
3.4.1 Gradienter og kurver (vertikal og horisontalkurvatur) 32
3.4.2 Adhesjonskoeffisient 32
3.4.3 Tunneler 32
3.4.4 Hastighetsprofil 32
3.5 RUTEPLAN 32
3.6 LOKOMOTIVER OG VOGNMATERIELL 33
3.6.1 Persontog 33
3.6.2 Godstog 33
3.6.3 Trekkraft som funksjon av spenning 34
3.6.4 Tilbakemating av effekt - regenerativ bremsing 35

4 TRAFIKKSIMULERINGER FOR Å UNDERSØKE GRUNNLEGGENDE SAMMENHENGER . 36

4.1 SIMULERING MED 0 % STATIKK I ALLE OMFORMERSTASJONER 36
4.2 SIMULERING MED 12 % STATIKK PÅ PERIFERE OMFORMERSTASJONER 37
4.3 SIMULERING MED 12 % STATIKK I PERIFERE OMFORMERSTASJONER OG UTFALL AV ETT AGGREGAT I ASKER OG HOLMLIA 49
4.4 SIMULERING MED 12 % STATIKK I PERIFERE OMFORMERSTASJONER OG PÅDRAGSREDUKSJON FOR ALLE LOKALTOG TYPE 74/75 53

4.5 SIMULERING MED 12 % STATIKK I PERIFERE OMFORMERSTASJONER OG TOG TYPE 74/75 MED REAKTIV KOMPENSERING ... 59
4.6 SIMULERING MED 12 % STATIKK I PERIFERE OMFORMERSTASJONER OG ØKT YTELSE I HAKAVIK TIL 15 MW ... 62

5 STATISK LASTFLYT OG TILTAK TIL FORBEDRET EFFEKTUTVEKSLING ... 65

5.1 UTGANGSPUNKT FOR UNDERSØKELSENE ... 65
5.2 INNSTILLING AV SPENNINGSREGULATORER FOR SENTRALE OMFORMERSTASJONER ... 68
5.2.1 Fallende statikk på 8 % for de sentrale omformerstasjonene og 12 % for de perifere ... 68
5.2.2 Fallende statikk på 12 % for alle omformerstasjonene ... 70
5.2.3 Fallende statikk på 16 % for de sentrale omformerstasjoner ... 72
5.3 ENDRING AV OMSETNINGEN PÅ TRANSFORMATORER TIL FJERNLEDNINGEN FOR Å FORBEDRE OVERFØRINGSEVNEN MELLOM ASKER OG NORDAGUTU ... 74
5.4 ENDRING AV REAKTANSEN X_Q I LILLESTRØM OG JESSHEIM ... 76
5.4.1 Forsøk med 50 % redusert X_q i Lillestrøm og Jessheim ... 76
5.4.2 Forsøk med 50 % redusert X_q i Lillestrøm og 60 % i Jessheim ... 78
5.5 ENDRING AV REAKTANSEN X_Q I SMØRBEKK ... 80
5.5.1 Forsøk med 50 % redusert X_q i Smørbekk ... 80
5.5.2 Forsøk med 70 % redusert X_q i Smørbekk ... 82
5.5.3 Redusert X_q i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk, mindre statikk for Jessheim Lillestrøm Smørbekk og Nordagutu, men fortsatt 12 % på alle andre omformerstasjoner ... 84
5.6 KONDENSATORBATTERI I OSLO ... 86
5.7 HAKAVIK KRAFTSTASJON UTVIDET TIL 15 MW OG FORSØK MED REAKTIV EFFEKTPRODUKSJON ... 88
5.7.1 15 MW og 3,6 MVAr eller cos φ = 0,97 (kapasitivt) i Hakavik ... 88
5.7.2 10 MVAr eller cos φ = 0,83 (kapasitivt) i Hakavik ... 88
5.8 HAKAVIK UTVIDET TIL 15 MW MED COS Φ = 0,97 (KAPASITIVT) OG SANDE TRANSFORMATORSTASJON I FORTSATT DRIFT ... 91
5.9 UNDERSØKELSER MED AT-SYSTEM I OSLO-OMRÅDET ... 93
5.9.1 AT-system inn mot Eidsvoll via Dovrebanen, Lillestrøm via Kongsvingerbanen, Grefsen mot Gjøvik og Hønefoss, Neslandsvatn og videre langs Sørlandsbanen og Smørbekk videre met Sverige ... 93
5.9.2 AT-system gjennom hele Oslo-området ... 93
5.10 UNDERSØKELSE MED UTFALL AV TO AGGREGATER SAMTIDIG ... 96
5.10.1 Fallende statikk slik at spenningen blir 24 % lavere ved utfall i Asker og Holmlia og normal Xq i Smørbekk ... 96
5.10.2 Fallende statikk slik at spenningen blir henholdsvis 16 % lavere ved utfall i Asker og 24 % Holmlia ... 97
5.10.3 Fallende statikk slik at spenningen blir 28 % lavere ved utfall i Asker og Holmlia ... 98
5.10.4 Fallende statikk slik at spenningen blir 24 % lavere ved utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru ... 100
5.10.5 Fallende statikk slik at spenningen blir 28 % lavere ved utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru ... 100
5.10.6 Mindre statikk for Jessheim, Lillestrøm, Smørbekk og Nordagutu, men fortsatt 12 % på alle andre omformerstasjoner og utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia ... 103
5.11 UNDERSØKELSE MED FORSKJELLIG EFFEKT I HAKAVIK KRAFTVERK OG UTFALL AV TO AGGREGATER SAMTIDIG I HOLMLIA OG ALNABRU ... 103
5.11.1 Ytelse på 10 MW i Hakavik og utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru ... 104
5.11.2 Ytelse på 15 MW i Hakavik og utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru ... 104
5.11.3 Ytelse på 15 MW og utfall av hele Asker omformerstasjon ... 107
5.12 UNDERSØKELSE MED UTFALL OG AT-SYSTEM I OSLO-OMRÅDET ... 109
5.12.1 AT-system over hele Oslo-området og utfall av Asker omformerstasjon ... 109
5.13 UNDERSØKELSE MED UTFALL OG AT-SYSTEM I OSLO-OMRÅDET ... 111
5.13.1 AT-system over hele Oslo-området og utfall av Asker omformerstasjon ... 111
5.13.2 AT-system over hele Oslo-området og utfall av Lillestrøm omformerstasjon ... 113
5.14 OPPSUMMERING ETTER UNDERSØKELSER MED NORMAL- OG UNORMAL DRIFTSITUASJONER MED FORBEDRING AV LASTFLYTEN I OSLO-OMRÅDET ... 115

6 TRAFIKKSIMULERING MED TILTAK FOR Å FORBEDRE SAMKJØRINGEN I OSLO-OMRÅDET ... 117

6.1 SIMULERING MED NORMAL DRIFT ... 117

6.1.1 Simulering med normal driftsituasjon med innføring av tiltakene som en fant i kapittel 5 ... 117
6.1.2 Simulering med normal driftsituasjon og 70 % reduksjon av X_q for Jessheim og Smørbekk ... 122
6.1.3 Simulering med normal driftsituasjon og 4 % fallende statikk i Lillestrøm, Jessheim, Smørbekk og Nordagutu ... 125
6.1.4 Simulering med normal driftsituasjon og Hakavik kraftverk med en produksjon på 15 MW ... 126
6.1.5 Simulering med normal driftsituasjon der Hakavik kraftverk har en produksjon på 15 MW og Sande transformatorstasjon er i drift ... 130
6.1.6 Simulering med normal driftsituasjon og redusert pådrag i togene ... 133
6.2 SIMULERING MED UNORMALE DRIFTSSITUASJONER ... 136
6.2.1 Simulering med utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia ... 136
6.2.2 Simulering med utfall av to aggregater i Asker ... 139
6.2.3 Simulering med utfall av to aggregater i Lillestrøm ... 142
6.2.4 Simulering med utfall av hele Asker omformerstasjon og Hakavik i drift og produksjon på 15 MW ... 145
6.3 SIMULERING MED TILTAK I FORM AV STRØM- OG/ELLER TEMPERATURBEGRENSER I ROTERENDE OMFORMERSTASJONER ... 148
6.3.1 Utfall av to aggregater i Asker og temperaturbegrenser i alle de sentrale roterende omformerne ... 149
6.3.2 Utfall av to aggregater i Asker temperaturbegrenser i alle de sentrale roterende omformerne og Type 74 og 75 med reaktiv kompensering ved lave spenninger ... 153

7 OPPSUMMERING OG VURDERINGER ... 158

7.1 OPPSUMMERING AV RESULTATER FRA UNDERSØKELSENE ... 158
7.2 VURDERINGER AV FORHOLD RUNDT SIMULERINGENE ... 160
7.2.1 Spissbelastningens størrelse og usikkerheter rundt dette ... 160
7.2.2 Vurderinger av behovet for marginer i dette arbeidet og i tidligere arbeid ... 161
7.2.3 Kombinasjonene av alle tiltakene gjør at situasjonen i normal og unormal drift forbedres ... 161
7.2.4 Ny situasjon der en er mye mer avhengig av alle aggregatene i drift ... 162
7.2.5 Fallende statikk gir gunstigst effektflyt i tomgang ... 163
7.2.6 Stabilitet og fallende statikk for spenningsregulatorene ... 163
7.2.7 Lave spenninger vil opptre i Oslo-området og lokomotivførernes kjørestil bør da endres ... 163
7.2.8 Mulig oppjustering av 2-sekundersverdien for roterende aggregater vil ha stor betydning ... 164
7.2.9 Lavere effektbehov i normal drift med trafikk etter ruteplanen ... 164
7.2.10 Trafikkavvik er ikke simulert - allikevel vil tiltakene sørge for at en unngår overbelastning av omformerne ... 165
7.2.11 Feil fasevinkel som funksjon av spenningen for Type 74 og 75 ... 165
7.2.12 Regenerativ bremsing ... 166
7.2.13 Betydningen av Hakavik kraftverk ... 167
7.2.14 Behovet for Sande transformatorstasjon ... 167
7.2.15 Fare for overbelastning av perifere omformere ... 168
7.2.16 Temperatur- og strømbegrenser kan være gunstig også for fjernstrekningene ... 168
7.2.17 Innføring av ruteplan R2012 og praktiske tiltak i banestrømforsyningen ... 168
7.2.18 Forslag til tiltak når enda flere togsett Type 74/75 skal settes i drift ... 169

8 KONKLUSJON OG ANBEFALTE TILTAK ... 170

9 APPENDIKS 1 - MÅLT LASTFLYT UTEN TRAFIKK I OSLO-OMRÅDET ... 172

10 APPENDIKS 2 - FASEVINKLER I OVERLIGGENDE NETT ... 177

11 APPENDIKS 3 - SANNSYNLIGHETSREGNING FOR Å FINNE SANNSYNLIGHET FOR STØRRELSE AV MAKSIMAL EFFEKTBELASTNING I OSLO-OMRÅDET ... 180

12 APPENDIKS 4 - SIMULERING MED RIKTIG ORIGINAL FASEVINKEL FOR TOGSETT TYPE 74/75 ... 190

13 REFERANSER ... 191

1 INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

NSB har behov for å starte utskifting av sin flåte av tog for lokaltrafikk i Oslo-området da dagens materiell av Type 69 er rundt 40 år gamle og nærmer seg enden av sin tekniske levetid. Det er etter nøye vurderinger bestemt at det skal kjøpes 50 nye tog av typen FLIRT, - ***Flinker leichter innovativer Regional-Triebzug***. Disse produseres av den sveitsiske produsenten STADLER. NSB vil gi disse litrabetegnelse Type 74, - for regionaltrafikk, og Type 75, for lokaltrafikk. Innredningen vil være noe forskjellig, men vekten den samme. De nye togene får en installert ytelse på 4500 kW på hjulene, dette er mer enn standard for disse togene som vanligvis har en ytelse på 2600 kW[1]. Grunnen til dette er at det i den norske bestillingen er tre motorboggier, mens to er standard. Disse nye togene skal settes i drift fortløpende og i 2012 vil alle 50 togsettene være i drift.

En annen endring som vil skje dette året er at en ny ruteplan som gir en økning av togtrafikken på 37[2] % skal innføres i Oslo-området. NSBs ruteleier for Gardermobanen konstrueres for maksimal hastighet på 200 km/h og den ekstra kapasiteten som Askerbanen gir er utnyttet. I tillegg er alle flytogene de siste årene oppgradert til togsett med fire vogner. Rutene for samtidige avganger for flytogene er forlenget helt til Drammen.

Det har oppstått frykt for at effektbehovet med de nye togene og de nye rutene vil være større enn banestrømforsyningen i Oslo-området er i stand til å forsyne. Når en tar hensyn til at togene har en virkningsgrad på 70 % for store deler av sitt hastighetsområde og at de ofte vil kjøre i multippel i rushtiden, vil de kunne trekke en elektrisk effekt på nærmere 13 MVA. Dette er en betydelig effekt og tilsammenligning trekker dagens Type 69 med seks vogner 3,84 MVA. En annen ting er at de nye togene er relativt tunge, - over 220 tonn, mens Type 69 til sammenligning er rundt 150 tonn. At de er såpass tunge vil kunne bety at togene får lange akselerasjonsforløp og at de trenger all den installerte ytelsen, spesielt for å komme opp i topphastighet på 200 km/t.

Det en frykter er systemkollaps for banestrømforsyningen. I praksis vil dette skje ved at ett eller flere aggregater, - i Asker, Holmlia, Alnabru eller Lillestrøm, ikke er i drift eller overbelastes slik at de faller ut. Deretter vil belastningen på de gjenværende bli så stor at det ene etter det andre i rask rekkefølge faller ut for overlast, - altså at en får et kaskadeutfall. Faller aggregater i de viktige omformerstasjonene Asker, Holmlia, Alna eller Lillestrøm ut vil nok ikke de nærliggende stasjoner kunne opprettholde trafikken, og om de ikke faller ut vil spenningen kunne bli veldig lav. Det vil sannsynligvis være fare for at overbelastning av kontaktledningene også kan inntreffe.

1.2 Målsetting

Målsettingen med undersøkelsene er å undersøke om den store trafikken i Oslo-området i forbindelse med ny ruteplan i 2012 kan komme til å gi overbelasting av banestrømforsyningen. Forholdene både for normal drift og utfall av ett omformeraggregat i to stasjoner samtidig skal undersøkes. Om togene ikke kan kjøres som normalt i begge disse

[1] Ihht den tyske Wikipedia.

[2] Økningen gjelder kjørte tog killometer, - enhet [tog km]. Det kan bety at både avganger og tilbakelagt strekning øker.

tilstandene, må tiltak gjøres. Viser det seg at selv ikke normal driftsituasjon går bra, må sannsynligvis veldig drastiske tiltak settes i verk. Enten at togene må gis redusert pådrag eller at det nye ruteopplegget ikke kan innføres før banestrømforsyningen blir forsterket. Ett annet tiltak kan være å bygge en eller flere midlertidige omformerstasjoner. Hvis derimot banestrømforsyningen i normal drift viser seg å kunne forsyne trafikken og det er marginer igjen, kan en fokusere på løsninger for å forhindre kraftsystemkollaps ved utfall av omformerenheter. Redundanskravet som er satt for banestrømforsyningen i Oslo-området innebærer at to omformeraggregater skal kunne være ute uten at det får følger for trafikken. En må forsøke å tilfredsstille dette kravet. Det kan være nødvendig å foreta arbeid på et aggregat, selv i rushtiden, og om ett annet aggregat da skulle komme til å falle ut av en eller annen grunn, kan en ikke tillate at dette skal føre til en kritisk situasjon. Altså at de gjenværende overbelastes og faller ut etter ett, - kaskadering og kraftsystemkollaps.

Det som er vesentlig å undersøke i denne sammenhengen er kort sakt bedre utnyttelse av installert ytelse. Følgende tiltak er aktuelle å undersøke:

- Større bidrag fra Lillestrøm omformerstasjon. Denne stasjonen har aldri bidratt særlig mye i forhold til sin store installerte ytelse til trafikken i Oslo-området. Dette til tross for dens korte avstand til Oslo S.
- Større effekt fra Hakavik kraftstasjon. Kan dette kraftverket levere stor effekt i toppbelastningsperiodene vil en kunne dra stor nytte av det.
- Kapasitiv reaktiv effekt fra togene kan redusere den reaktive produksjonen i omformerstasjonene. Eventuelt kan også kondensatorbatterier eller SVC-anlegg gjøre tilsvarende nytte, men kompensering i togene vil være å foretrekke.
- Pådragsbegrensning i de nye togene.
- Bedre reaktiv lastfordeling mellom omformerstasjonene med fallende statikk.
- Begrense spenningen i roterende omformeraggregater når belastningen, og dermed driftstemperaturen, blir for stor. På denne måten kan en oppnå at roterende omformere ikke kan overbelastes. Dermed vil de perifere omformerstasjoner bidra mer når belastningen i Oslo-området er stor og omformere står i fare for å falle ut.
- Forsterke banestrømforsyningen og forbedre lastdelingen mellom omformerstasjonene ved å bygge AT-system.
- Bygge permanent eller midlertidig(e) omformerstasjon(er).

Av disse tiltakene er det alternativet med å bygge ny eller midlertidig omformerstasjon som er vanskeligst å realisere. Dette vil utvilsomt bli et meget kostbart tiltak, spesielt tatt i betraktning den korte tiden en har til rådighet. Heller ikke pådragsbegrensning i togene er særlig ønskelig, spesielt om dette skulle gå ut over gjennomføringen av det nye ruteplanopplegget.

Studien her skal først se på tidligere rapporter og utredninger som er utført. Opp gjennom årene er en rekke undersøkelser gjort og erfaringer fra disse kan en dra nytte av i dette arbeidet. Videre skal det gjøres studier både med trafikksimuleringer og statisk lastflyt for enkelt å undersøke prinsipper. Det vil sannsynligvis kun være aktuelt å gjøre tekniske studier og komme med anbefalinger for tiltak uten at egne økonomiske vurderinger må gjøres. En vil nok enkelt kunne se hvilke tiltak som er enkle og billige å gjennomføre og hvilke som vil bli svært kostbare. I senere studier der en skal se på Oslo-området med nye dobbeltspor med høy hastighet vil det være mer aktuelt med økonomiske vurderinger mellom forskjellige alternativer. Dette fordi en på lengre sikt vil kunne vurdere bygging av nye omformerstasjoner og sanering av gamle.

1.3 Forutsetninger

Ruteplanene er alltid beregnet med 4 % margin, slik at togene i praksis kan kjøre litt saktere enn skiltet hastighet. Dette er ikke inkludert i de ordinære simuleringene. Togene vil derfor komme litt tidligere til stasjonene og få noe lengre oppholdstid. Det er også blitt sakt at de nye lokaltogene skal simuleres med fullt utnyttet trekkraft, selv om det også er antydet at en reduksjon til 2/3 av installert ytelse skal kunne aksepteres i normal drift. Egne undersøkelser på hva dette får å bety vil bli gjort.

Avvik i ruteplan, friksjon for skinnene avhengig av været, forsinkelser, personlig kjørestil for lokomotivfører, samt en rekke andre faktorer som forandrer seg med årstiden og endog fra dag til dag, kan få innvirkning på effektuttaket til et tog. Disse forholdene blir ikke undersøkt spesielt i dette arbeidet, men det forutsettes at de fleste av disse parametrene holder seg til den øvre delen av de normalt forekommende verdier. Det forutsettes med andre ord at en regner konservativt og banestrømforsyningen vil bli undersøkt med gode marginer.

Ved undersøkelse av tiltak og valg av løsninger kan det skje at tiltak kan ha ugunstige effekter. For å velge riktige tiltak settes det opp en prioritert rekkefølge for de sakene det skal tas hensyn til. Forskjellig litteratur setter opp lister, men i forbindelse med banestrømforsyning er denne prioriteringsrekkefølgen relevant:

1. El-sikkerhet - Tiltakene her forutsettes å ikke påvirke dette da en ikke ser for seg tiltak som endrer på fysiske komponenter i infrastrukturen.
2. Stabilitet - Egne studier bør gjøres etter at tiltakene i dette arbeidet er lagt frem. Det som er aktuelt å undersøke er blant annet om det kan oppstå subharmoniske effektpendlinger når nye innstillinger av spenningsregulator i omformerstasjoner og tog gjøres.
3. Dimensjonering i henhold til regelverket - Dette gjelder i første rekke at strømbelastning av seriekomponenter ikke blir for stor og at spenningen for togene blir akseptable. I neste instans handler dette om punktligheten for togene. Kapittel 2 omhandler dette.
4. ENØK - Om det er mulig vil energisparende tiltak være ønskelig, enten som separate tiltak eller som konsekvens av de tiltakene som gjøres primært for å tilfredsstille den ønskede togtrafikken.

Ved undersøkelse av spenninger, strømmer og effekter er det ofte størrelsens påvirkning over tid som er interessant for dimensjonering av komponenter eller for vurdering av en lav spennings innvirking på togfremføringen. Det er blitt praksis å vurdere effekter (aktiv-, reaktiv- eller syneffekt) ved å etterbehandle den simulerte verdien av for eksempel omformereffekt ved å beregne MEAN-verdier for forskjellige tidsperioder:

$$S_{MEAN} = \frac{1}{T} \int_{T_0}^{T_0+T} S\, dt$$

For strømmer og spenninger blir tidsverdier undersøkt med RMS- (Root Mean Square) verdier:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_0}^{T_0+T} I^2\, dt}$$

Videre forutsettes det at ruteplanen gitt fra Utbygging i forbindelse med prosjektet med ruteplan R2012 legges til grunn. Infrastrukturen legges inn i simuleringsmodellen som beskrevet i Banedatabanken og for deler av Askerbanen hentes data direkte fra Utbygging. Ellers vil en i stor grad basere seg på den tidligere modellen for Oslo og resten av banestrekningene som ble simulert for å finne tapene i banestrømforsyningen. I forbindelse med dette arbeidet ble det gjort et grundig arbeid med å kvalitetssjekke og revidere tidligere modeller. Den nye ruteplanen legges inn og et så stort arbeid som en finner tilrådelig brukes til å feilsøke. En egen kollegakontroll utføres også for å avdekke flest mulig feil.

1.4 Tidligere studier

En rekke studier har blitt gjort tidligere og det vil her bli presentert de viktigste funnene i hver rapport. Etterpå vil det bli gjort en oppsummering som først og fremst skal gi innspill på hvilke ting en i dette arbeidet kan legge vekt på for å oppnå forbedringer i dagens banestrømforsyning.

1.4.1 Målinger og beregninger av banestrømforsyningen i forbindelse med Olympiaden i 1994 - februar 1991

NSB Engineering stod for arbeidet med simuleringer og hovedplan for strekningen fra Oslo S til Lillehammer, se [1]. Simuleringer er foretatt ved hjelp av enkle lastflytmodeller der programmet ACCAN har vært brukt. Det har også vært utført statiske lastflytberegninger i et annet program. I dette arbeidet foreslåes det å bygge nye omformerstasjoner på Minnesund og Rudshøgda på 10,0 MVA. For Tangen foreslåes det 7 + 10,0 MVA og for Fåberg 2 x 7,0 MVA. Tydeligvis har ikke disse anbefalingene blitt fulgt. Som en kuriositet kan det nevnes at spenningen for omformerstasjonene forutsettes å være økende med belastningen fra 16,2 til 16,5 kV. Dette vil en i dag si er ugunstig, se [12].

1.4.2 Kapasitetsvurderinger for Gardermobanen - februar 1994

Dette er de første vurderingene for den nye Gardermobanen. Flere kom i årene som fulgte, se [2]. Fremgangsmåten som ble benyttet var å måle belastningen på de eksisterende omformerstasjonene og beregne effektbehovet for de nye togene på den nye banen. Summen av disse belastningene ble brukt som et anslag på den totale belastningen for omformerstasjonene. Seks forskjellige alternativer med nye koblingshus og omformerstasjoner er undersøkt. Utfall av aggregater i stasjonene er også undersøkt. Ut fra denne rapporten er det anbefalt å bygge en ny omformerstasjon på Lillestrøm med en ytelse på 3 x 14 MVA og en på Jessheim på 2 x 14 MVA. Det ble også anbefalt å bygge et nytt koblingshus på Eidsvoll.

Beregning av effektbehovet for den nye banen er gjort ved å studere en dimensjonerende ruteplan der maksimalt effektbehov forutsettes å skje når det er 25 tog på strekningen. Disse togene er oppgitt med et effektbehov basert på om de kjører i "fart i friluft", "akselerasjon", fart i tunnel", "fart i friluft med 10 ‰ stigning" etc. Effektbehovet for togene er beregnet med formlene som gjelder for lastvekt, hastighet, stigning, luftmotstand i tunneler etc. Når dette så er anslått er det utført enkel lastflytberegninger for å finne strømmer og spenningsfall med programmet ACCAN. Omformerstasjonene er modellert slik at de gir ut konstant spenning og faseforskyvning med økende last.

1.4.3 Trafikksimuleringer av Oslo-området med VISON/OSLO - mars 1995

Dette er de første trafikksimuleringene for Oslo-området og programmet VISON/OSLO er benyttet, se [3]. Arbeidet med simuleringene er utført hos British Rail Research i Derby England. Noe av motivasjonen for å gå i gang med denne undersøkelsen var flere hendelser våren 1994 med sammenbrudd i banestrømforsyningen i Oslo-området. Det er utfall i Ski og Holmlia omformerstasjoner som førte til overbelastning av flere omformere og deretter sammenbrudd. For disse trafikksimuleringene er det forutsatt følgende for infrastrukturen og dimensjonerende ruteplan:

- Trafikk på Gardermobanen
- Satsning på nytt materiell
- Ny satsning på Gjøvikbanen
- Høyhastighetsbane Oslo - Kornsjø, med nytt dobbeltspor Oslo - Ski
- Trafikk på Ringeriksbanen
- Nytt dobbeltspor mellom Skøyen og Asker
- Ruteplan R94

Fire grunnmodeller for simuleringene ble undersøkt:

1. Dagens situasjon for datidens Oslo-område som ikke omfatter nytt dobbeltspor Skøyen - Asker, men som inkluderer Gardermobanen og nytt dobbeltspor Ås - Sarpsborg.
2. Dagens situasjon for datidens Oslo-område med Gardermobanen og nytt dobbeltspor Oslo - Sarpsborg
3. Dagens situasjon for datidens Oslo-område med Gardermobanen og nytt dobbeltspor Oslo - Sarpsborg og Skøyen - Asker.
4. Dagens situasjon for datidens Oslo-område med Gardermobanen og nytt dobbeltspor Oslo - Sarpsborg, Skøyen - Asker og Ringeriksbanen.

Simuleringene for modell to viser tilfredsstillende resultater bortsett fra lav effektfaktor for Holmlia omformerstasjon og at om spenningen senkes vil den også kunne tåle utfall av ett aggregat.

Først for trafikkbelastning og infrastruktur som i modell to blir det nødvendig med en ny omformerstasjon i Oslo på 2 x 14 MVA. Uten Holmlia omformerstasjon må omformeren i Oslo være på 3 x 14 MVA. Det er også tydeligvis Holmlia omformerstasjon som er avgjørende her, og det er sett på alternativer med to aggregater og kondensatorbatteri, to aggregater og fallende spenning og tre aggregater.

Med alternativ tre med dobbeltsporet Skøyen - Asker oppnåes jevnere belastning av Asker omformerstasjon og små endringer for de øvrige. Simuleringene for det fjerde resultatet viser at det må vurderes større ytelse i Asker og Hønefoss omformerstasjoner.

Simuleringene i dette arbeidet kunne nok vært interessante for dagens situasjon når en også nå planlegger dobbelspor Oslo - Ski, og både Gardermobanen og Lysaker - Asker er bygget. Altså en situasjon nært grunnmodell 3. Imidlertid er det én stor forskjell, og det er at lokaltog Type 69 er på veg til å fases ut og lokomotiver av typen El16 og El17 ikke lenger brukes i lokaltrafikken. Med andre ord er den reaktive effektflyten noe som kan forventes å bli betydelig mindre med moderne materiell. På grunnlag av denne simuleringsrapporten ble det også laget en hovedplan for Oslo-området og denne anbefaler å bygge SVC-anlegg på Holmlia.

1.4.4 Trafikksimuleringer for Gardermobanen med VISON/OSLO - mars 1996

Nye simuleringer med VISON/OSLO ble utført der en så spesielt på belastningen på Gardermobanen når det innføres doble togsett, se [4]. Ruteplan og forutsetninger for øvrig var som i simuleringene beskrevet i rapporten fra mars 1995. Resultatet fra disse simuleringene er at en ser behovet for en installert ytelse på 3 x 12 MVA i Lillestrøm og at utfall av aggregater i omformerstasjonene på Alnabru, Holmlia eller Asker kan føre til kollaps for hele strømforsyningen i Oslo-området.

I dette arbeidet sies det at SVC-anlegg i Holmlia er for dyrt i forhold til nytten og det anbefales heller andre løsninger. På kort sikt anbefales det at det utvikles regulatorer som styrer ned effekten levert fra roterende omformere når belastningen nærmer seg nominell ytelse. Det anbefales også å se på utvikling av vern som beskytter roterende omformere bedre termisk. På lengre sikt anbefales det å sette inn større omformerkapasitet i Oslo-området og da pekes det på å erstatte Holmlia med en ny statisk omformerstasjon. Det anbefales også å stille inn fasevinkelen på omformerstasjonen på Jessheim slik at den kan overta en større del av belastningen fra Lillestrøm. Samme innstilling av fasevinkelen bør vurderes for Lillestrøm for å avlaste Alnabru og Holmlia.

Ellers anbefales det i arbeidet å utstyre omformerstasjonene i Oslo-området med betydelig større aggregater for å ha god reserve. En egen hovedplan for dette anbefales utarbeidet.

1.4.5 Samkjøringsstudie og trafikksimulering for Oslo-området med SimTrac/SIMPOW utført av ABB - mai 1997

Dette er de første simuleringene der SIMPOW og Simtrac (nå TracFeed) ble benyttet, og undersøkelsene ble gjort av ADtranz med Ann Palesjö, se [5]. Arbeidet var delt inn i to deler, en såkalt samkjøringsstudie og en trafikksimulering. Det er utarbeidet en modell for Oslo-området hvor ytterpunktene er omformerstasjonene i Kongsvinger, Sarpsborg, Asker, Hønefoss, Lunner og Tangen. Fjernledningen er inkludert mellom Sande og Skollenborg. Overliggende trefasenett er også inkludert for å få et riktig bilde av fasevinkler mellom omformerstasjonene. Undersøkelsene har til hensikt å bestemme installert ytelse i de nye omformerstasjonene Lillestrøm og Jessheim, samt se på strategier for å forbedre effektflyten i hele Oslo-området. Nye dobbeltspor Oslo - Ski og Skøyen - Asker er ikke med i vurderingene, heller ikke Ringeriksbanen.

Samkjøringsstudien har gitt følgende innsikt:

- Effektoverføring mellom stasjonene i tomgang er et tegn på at spenningen ikke er likt innstilt i omformerstasjonene eller at det er ulike fasevinkler mellom dem. Undersøkelsene som er utført med lik spenning på 15 kV siden viser ikke stor effektflyt i tomgang og dermed ikke at fasevinklene er forskjellige. Det er ingen problemer med samkjøring i Oslo-området på grunn av forskjellige fasevinkler i overliggende nett.
- Effektflyt ved redusert spenning fra 16,5 til 16,0 kV i stasjoner med statiske omformere viste seg å gi større belastning for Alnabru og Holmlia. De statiske får som forventet et lastavslag.
- Fallende spenningsstatikk i alle stasjoner viser at lasten blir jevnere fordelt mellom stasjonene. Holmlia og Alnabru avlastes, mens Lillestrøm og Jessheim får større belastning. Fallende spenningsstatikk ser ut til å være til stor nytte.
- Undersøkelse med forskyvning av tomgangsvinkelen med +2° i statiske omformerstasjoner viser at disse får økt aktiv effektproduksjon og lavere reaktiv

effekt. I de andre stasjonene minsker den aktive effekten og den reaktive øker. I stasjoner med dårlig effektfaktor betyr dette at den tilsynelatende effekten også øker.

- Forsøk med 30 % større fallende statikk i omformerstasjoner med statiske aggregater. Dette innebærer at de statiske stasjonenes aktive effekt minsker og den reaktive effekten øker. I de andre stasjoner fører dette til økt aktiv effekt og minket reaktiv effekt. I stasjoner med dårlig effektfaktor kommer den tilsynelatende effekten til å minske.
- Undersøkelse av redusert innkoblet effekt i omformerstasjonene viser at ett aggregat mindre i drift gir redusert aktiv effektproduksjon og økt reaktiv. I stasjoner med dårlig effektfaktor øker den avgitte tilsynelatende effekten, mens der effektfaktoren er god skjer det motsatte.

Disse erfaringene er overført til trafikksimuleringene for å få en bekreftelse på at tiltaket er til hjelp. En ruteplan for fremtidig trafikk er benyttet. I simuleringene legges det til marginer på følgende måte: 10 % for dårlig lastfordeling mellom aggregater i samme omformerstasjon og usikkerheter i inndata. For variasjoner i ruteplanen legges det til 10-20 %. For å kompensere for lav tomgangseffekt legges det til en margin på 5 %. Dette gir en samlet margin på 25 % som brukes for alle stasjoner, utenom Jessheim der marginen settes til 35 %. Oppsummert har en funnet følgende:

- En liten fallende statikk for spenningsregulatorene i de hardt belastede stasjonene reduserer effektproduksjonen mye. Dette gjelder stasjonene i Holmlia, Alnabru og Asker. Statikken er innstilt slik at spenningen skal bli 16,3 kV i Holmlia når $Q_{omf} = ½ \times S_{installert}$, 16,38 kV i Alnabru når $Q_{omf} = ½ \times S_{installert}$ og Asker med 16,46 kV når $Q_{omf} = ½ \times S_{intallert}$.
- Med fallende spenningsstatikk i Holmlia og Alnabru og forsøk med redusert ytelse i Lillestrøm og Jessheim kommer en frem til at disse stasjonene trenger de foreslåtte installerte effektene. Det vil si Lillestrøm med 3 x 12 MVA og Jessheim med 2 x 12 MVA.
- Simuleringer med utfall og n-2 kriteriet som gjelder i Oslo-området, viste at om ett aggregat er ute i Holmlia og enda ett faller ut i Asker vil hele denne stasjonen falle ut. Dette fører til utfall av hele systemet. Det anbefales derfor at det tredje aggregatet som kun er til reserve i Asker settes i drift.
- Likeledes vil Holmlia kunne falle ut om ett aggregat i Asker er ute samtidig som et aggregat i Holmlia kobles ut. Hele Oslo-området står da i fare for å falle ut. Tre aggregater normalt i drift i Asker vil hjelpe på denne situasjonen også.
- Verste situasjon for Alnabru er om ett aggregat i Alnabru og ett aggregat i Lillestrøm er ute samtidig. Dette fører til at marginene mot overbelastning blir små.
- Lillestrøm omformerstasjon har sitt verste tilfelle om ett aggregat er ute her samtidig med utfall i Jessheim.
- Jessheim har verste situasjon om to aggregater i Lillestrøm er ute.
- Marginene er lagt til for disse vurderingene for utfall.
- Et forsterkningstiltak som anbefales er shuntkondensatorer for å levere reaktiv effekt.

I dette arbeidet er ikke noen ny Oslo omformerstasjon vurdert eller funnet nødvendig.

1.4.6 Kraftsystemplan for Oslo-området - desember 1999

Kraftsystemplanen, se [6], er den første studien av Oslo-området der Jernbaneverket selv utfører trafikksimuleringer med det da nyanskaffede SIMPOW/Simtrac. Simuleringene

bygger videre på modellene fra ADtranz sine simuleringer for Gardermoen og Oslo-området fra 1997. Det ble sett på effektbehovet for 2001, 2005 og 2010. Det er nye Nationaltheatret stasjon, dobbeltspor Skøyen - Asker og Oslo - Ski, samt Ringeriksbanen som er de aktuelle fremtidige endringene i infrastrukturen som setter behovet for undersøkelsene. Disse utbyggingene muliggjør nye ruteplaner som er antatt å komme i 2001, 2005 og 2010 og som legges til grunn som dimensjonerende. Togmateriellet som ble brukt i simuleringene er det samme som i dag. Også for omformerstasjonene er bestykningen den samme som i dag, og i Asker forutsettes det at bestykningen er 2 x 10 + 5,8 MVA.

Fra 2005 viser simuleringene et økt effektbehov som foreslås dekket med en ny omformerstasjon i, eller nært, Oslo sentrum. Eventuelt kan Holmlia erstattes av en større stasjon med statiske aggregater. Ringeriksbanen som var forutsatt å komme i 2007 viste ikke behov for mer installert ytelse i nærliggende stasjoner. Marginene ved dimensjonering av banestrømforsyningen er 20 % og det er tatt høyde for trafikkprognoser 5 - 10 år frem i tid.

1.4.7 Trafikksimuleringer av Oslo-området - november 2000

Kraftsystemplanen omtalt i avsnitt 1.4.6 anbefalte at det ble etablert en stor omformerstasjon i Oslo-området, men ga ingen spesifikk anbefaling på hvor. Nye trafikksimuleringer året etter ble ferdig i november 2000 og ga en klar anbefaling på at den nye stasjonen bør ligge sentralt med innmating mot Oslo S, se [7]. Beregningene inkluderer Gardermobanen, nye dobbeltspor Oslo - Ski og Skøyen - Asker. Ruteplanen som er brukt er ikke en nøyaktig utarbeidet rutemodell, men mengde tog og sammensetning av togene er basert på "Norsk Jernbaneplan 1998-2007".

Det er utført samkjøringsstudie der statiske laster er koblet til rett ved omformerstasjonene og en har funnet ut følgende:

- Senter av Oslo-området er tungt lastet og i periferien er omformerstasjonene lett lastet. Fasevinklene er forskjellige mellom de forskjellige stasjonene og dette fører til aktiv effektflyt inn mot Oslo og en reaktiv effektflyt ut.
- Holmlia omformerstasjon overfører mye reaktiv effekt mot Smørbekk og Sarpsborg.
- Ved å koble ut ett aggregat i Smørbekk reduseres den reaktive effektflyten. Dette viser at om en har innkoblet ytelse som står i forhold til effektbehovet reduseres reaktiv effektoverføring.
- En finner også ut at X_q for en statisk omformerstasjon kan brukes aktivt for å påvirke effektoverføringen. Redusert X_q i Smørbekk får produksjonene av aktiv effekt til å øke. Reaktiv effekt blir samtidig redusert.

Det er undersøkt tre aktuelle plasseringer av en ny Oslo omformerstasjon; - Holmlia, Lodalen eller Skøyen. For de tre plasseringene er tomgangsflyten undersøkt og det er forutsatt en høylastsituasjon for kraftnettet på trefasesiden. En finner at Holmlia med trafikk vil ha en tendens til å ikke ta på seg så mye aktiv effekt, men vil produsere mye reaktiv effekt. Skøyen vil komme til å ta på seg mye aktiv effekt. Med en ny stasjon i Lodalen vil det overføres effekt mellom denne og Lillestrøm, samt at den vil tendere mot lavt bidrag av aktiv effekt. I forhold til å redusere effektutvekslingen med Lillestrøm er Skøyen et bedre alternativ enn Lodalen.

Trafikksimuleringene som er utført gir følgende konklusjoner for omformerstasjonene i Oslo-området:

- Nye Oslo omformerstasjon anbefales bygget med 3 x 18 MVA aggregater sentralt og med innmating mot Oslo S. Vinkelkarakteristikken bør være som for et Q48 aggregat og spenningskarakteristikken bør være flat.
- Alnabru omformerstasjon kan på sikt fjernes.
- Holmlia kan beholde de to Q48 aggregatene og et kondensatorbatteri på ca 4 MVAr installeres ved stasjonen. Spenningsreguleringen anbefales fra 16,5 kV i tomgang til 16,3 kV ved full last.
- Asker omformerstasjon og belastningen her beskrives som vanskelig å vurdere siden ruteplanen er urealistisk for dette området.

1.4.8 Beredskapsplan for Oslo-området - juni 2002

Bane Energi utarbeidet en beredskapsplan, og Bane Partner fikk i oppdrag å undersøke hvilken konsekvens et utfall av Lillestrøm og Jessheim samtidig ville få. Se [8]. Simuleringen er gjort med en ruteplan som skulle tilsvare trafikksituasjonen slik den var da og ettermiddagsrushet er brukt som case. Det viser seg at Alnabru og Holmlia omformerstasjoner blir overbelastet. Meget lave spenninger for togene oppstår også.

1.4.9 Utnyttelse av omformerkapasiteten i Oslo-området - februar 2003

Et stort arbeid ble lagt ned i å undersøke om de tidligere foreslåtte forsterkninger av Oslo-området er riktige anbefalinger, all den tid den samlede installerte effekt i området er stor, se [9]. Selv med utfall av ett aggregat i to omformerstasjoner samtidig, med fremtidig trafikk og nye dobbeltspor, samt marginer tillagt, er samlet ytelse stor. Riktignok har en på dette tidspunktet funnet ut at de fremtidige ruteplanene som var benyttet i de tidligere studiene var for krevende. Når det gjelder omformerkapasitet er samlet installerte effekt er stor.

Ruteplanen som legges til grunn er den som ble forutsatt å være dimensjonerende i 2005. Det er inkludert dobbeltspor Asker - Skøyen og Oslo - Ski. På regiontogstrekningene er motorvognsett av type 69 erstattet med type 72. De frigjorte type 69 togsettene er delvis benyttet til å forlenge togene på strekningen Sandvika - Ski.

Det at installert ytelse er stor i forhold til trafikken, men at periodevis høy belastning av omformerstasjoner oppstår, gjør at utnyttelsen av aggregatene ikke er høy. Spesielt ved utfall av aggregater vil de gjenværende i samme stasjon belastes hardt, samtidig som nabostasjoner gjerne er moderat belastet. Løsningen på dette kan være en begrenserfunksjon i spenningsregulatorene som reduserer spenningen når stasjonens belastning har vært langvarig stor. De første undersøkelsene angående dette ble gjort i en Masteroppgave utført av Steinar Danielsen, se [14]. Simuleringer for å undersøke dette videre ble utført av Bane Partner og delt inn i fire delrapporter. Her er det oppsummert resultatet fra hver av de fire.

Den første delrapporten poengterer at begrenserfunksjonen vil ha stor nytte, men problemet vil være lave spenninger for togene i en avvikssituasjon. Det ser ut til å være behov for 3 x 10 MVA i Asker med den tidligere dimensjonerende ruteplanen, men utarbeidelse av en ny ruteplan kan redusere behovet til 2 x 10 + 5,8 MVA. SVC-anlegg eller oppdeling av kl-anlegget sør for Holmlia anbefales ikke. En ny regulatortype anbefales for Asker, Holmlia og Alnabru. En studie som ser på potensialet for å redusere energitapet anbefales.

I den andre delrapporten simuleres det med brudd mellom samkjøringen for Holmlia og Ski. Simuleringsresultatene viser en redusert belastning, imidlertid vil Holmlia stå i fare for å

overbelastes om antatte feilmarginer legges til. Også kortvarige strømtopper som oppstår ved Holmlia kan forårsake at overstrømsreleene kobler ut stasjonen. Asker kan stå i fare for å overbelastes når samkjøringen kobles ut. Det anbefales derfor å utruste den med 3 x 10 MVA aggregater.

Den tredje delrapporten hadde til hensikt å verifisere den termiske modellen for en begrensningsfunksjon i spenningsregulatorene. Den skulle også verifisere SIMPOW sin modellering av magnetisk metning i synkronmaskinene ved målinger. Målingene viser jevnt over en feil på rundt 10 °C lavere temperatur i forhold til simuleringsmodellen.

Den fjerde delrapporten tar opp igjen tråden fra den første delrapporten og nå simuleres det med spenningsregulatorer med begrensere i Asker, Holmlia og Alnabru. Det settes inn en ytelse på 2 x 10 MVA i Asker og trafikkbelastningen er den samme som tidligere ruteplan. Det viser seg at aggregatene med utrustning for begrensning av spenningen unngår overbelastning ved utfall av ett aggregat på 10 MVA i Holmlia og Asker. Spenningen i Oslo-området blir imidlertid lavere enn 11,0 kV og tilfredsstiller således ikke gjeldende krav. Intensjonen med lavere spenning og effektflyt fra utenforliggende områder ser ut til å være oppfylt. Ett til aggregat på 5,8 MVA i Asker foreslås for å bøte på den lave spenningen.

1.4.10 Utredning av samkjøringen i Oslo-området - oktober 2003

Den siste arbeidet som så langt er gjort for Oslo-området er en samkjøringsstudie der en har plassert ut laster som representerer målte verdier for belastningen av omformerstasjonene, se [10]. Det er forsøkt å sammenligne resultatene med laster ved henholdsvis omformerstasjonene og ute på matestrekningene. Ved å plassere lastene ute på matestrekningene får en inkludert kontaktledningstapene. Tidligere arbeid har gitt optimistiske resultater når det gjelder bedre utnyttelse av den store installerte ytelsen i Oslo-området. Det ser ut til at den tidligere konklusjonen om å bygge en ny stor omformer ved Oslo S ikke er riktig og undersøkelsene her skal gi svar på både om kombinasjon av flere strategier kan redusere tapene i banestrømforsyningen. Det som skal undersøkes som strategier for å oppnå dette er:

- Gjøre omformerstasjonene i Oslo-området stivere. Dette kan gjøres ved hjelp av kjøreplanen for stasjonene slik at de sentrale stasjonene har flest mulig aggregater i drift og de perifere færrest mulig.
- Justering av X_q (vinklekarakteristikken) i statiske omformerstasjoner.
- Begrensning av magnetiseringsstrømmen for aggregatene med stor belastning.
- Endring av spenningsregulatorenes statikk slik at denne blir fallende.

Det ble ikke gjort noen trafikksimuleringer og for å finne mer ut om besparelsene anbefalte rapporten å utføre dette. Da bør det gjøres endringer på X_q (vinkelkarakteristikk), kjøreplan og eventuelt spenningskarakteristikken (fallende statikk). Algoritmer for å endre disse automatisk anbefales også å undersøkes videre.

1.4.11 Oppsummering av tidligere undersøkelser og tiltak for å forbedre forholdene

Her følger en punktvis oppsummering av tidligere erfaringer og hovedfunn fra de tidligere undersøkelsene:

- Tidligere simuleringer anbefaler en ny stor omformer i Oslo med de betingelser som er lagt til grunn. Det er imidlertid høyst usikkert å bestemme behovet for denne nå. Dette fordi tidligere undersøkelser og forutsetninger er så forskjellige fra dagens (i 2012) situasjon. Det ble blant annet lagt til grunn Gardermobanen og nye dobbeltspor på strekningene Oslo - Sarpsborg og Skøyen - Asker. Videre er det lokaltog av type 69 og lokomotiver av typen El16 og El17. Egne simuleringer i dette arbeidet kan en dermed fastslå som helt nødvendige.
- Det er blitt anbefalt å se på muligheten til å utvikle regulatorer som kan beskytte aggregatene bedre mot termisk overbelastning. Dette ved at effekten styres ned når belastningen nærmer seg nominelle verdier. Spenningen vil reduseres og omkringliggende omformerstasjoner som er lettere belastet vil kunne bidra mer.
- Det anbefales å stille inn fasevinkelen på omformerstasjonen på Jessheim slik at den kan overta en større del av belastningen fra Lillestrøm.
- Innstilling av grunnfasevinkelen bør vurderes for statiske omformerstasjoner for å avlaste Alnabru og Holmlia. Undersøkelse med forskyvning av tomgangsvinkelen med +2° i Lillestrøm og Jessheim viser at disse får økt aktiv effektproduksjon og lavere reaktiv effekt. I de andre stasjonene minsker den aktive effekten og den reaktive øker. I stasjoner med dårlig effektfaktor betyr dette at den tilsynelatende effekten også øker.
    - Dette vil kunne føre til effektflyt i tomgang og dette tiltaket vil derfor sannsynligvis ikke være særlig gunstig.
- Effektflyt i tomgang viser at enten er spenningsregulatorene feil innstilt eller så er det faseulikhet i overliggende kraftnett.
- Dessverre viser nye målinger i dag, 12 år etter, at dette ikke er tatt til følge og at det fremdeles utveksles mye effekt mellom omformerne. Se appendiks 1 og [13]. Tiltaket er dermed fremdeles aktuelt å gjennomføre.
- Effektflyt ved redusert spenning fra 16,5 til 16,0 kV i stasjoner med statiske omformere viste seg å gi større belastning for Alnabru og Holmlia. De statiske får som forventet et lastavslag.
- Fallende spenningsstatikk i alle stasjoner viser at lasten blir jevnere fordelt mellom stasjonene. Holmlia og Alnabru avlastes, mens Lillestrøm og Jessheim får større belastning. Fallende spenningsstatikk ser ut til å være til stor nytte.
- Forsøk med 30 % større fallende statikk i omformerstasjoner med statiske aggregater. Dette innebærer at de statiske stasjonenes aktive effekt minsker og den reaktive effekten øker. I de andre stasjoner fører dette til økt aktiv effekt og minket reaktiv effekt. I stasjoner med dårlig effektfaktor kommer den tilsynelatende effekten til å minske.
- Undersøkelse av redusert innkoblet effekt i omformerstasjonene viser at ett aggregat mindre i drift gir redusert aktiv og økt reaktiv effektproduksjon. I stasjoner med dårlig effektfaktor øker den avgitte tilsynelatende effekten, mens der effektfaktoren er god skjer det motsatte.
- I trafikksimuleringer er det benyttet i en studie fra mai 1997 er det lagt til grunn følgende usikkerhetsmarginer: 10 % for dårlig lastfordeling mellom aggregater i samme omformerstasjon og usikkerheter i inndata. For variasjoner i ruteplanen legges det til 10-20 %. For å kompensere for lav tomgangseffekt legges det til en margin på 5 %. Dette gir en samlet margin på 25 % som brukes for alle stasjoner, utenom Jessheim der marginen settes til 35 %.
    - Det er i regelverket laget lignende marginer, se kapittel 2.

- Endring av X_q for en statisk omformerstasjon kan brukes aktivt for å påvirke effektoverføringen. Redusert X_q får effektproduksjonen til å øke.
- Oppdeling av nettet er forsøkt som et tiltak for å bøte på stor effektutveksling mellom omformerstasjoner i Oslo-området og perifere som er lite belastet. Dette ser ikke ut til å være gunstig.
- Egne undersøkelser viser at beste forhold for å unngå effektutveksling mot perifere omformerstasjoner, er å kjøre med flest mulig aggregater innkoblet i Oslo og færrest mulig utenfor.

1.5 Forutsetninger og metodikk

På grunnlag av erfaringer fra tidligere simuleringer er det noen tiltak som peker seg ut som spesielt gunstige. Dette går først og fremst på bedre utnyttelse av omformerkapasiteten i Oslo-området. Tiltak for å få større bidrag fra Lillestrøm og Jessheim vil også være nyttig. Oppdeling av nettet, justering av grunnfasevinkelen i statiske omformerstasjoner, og forskjellig innstilt tomgangsspenning forkastes som tiltak.

1.5.1 Konkrete undersøkelser som skal gjøres

Det anses som svært sannsynlig at flere tiltak må gjøres samtidig og det forutsettes i første omgang at det ikke er mulig å utvide antallet omformeraggregater i Oslo-området. Nedenfor er det listet opp hvilke undersøkelser som planlegges å gjøres. Metodikken er slik at tiltakene er listet opp i rekkefølge slik at de enkleste kommer først og de vanskeligst og mest kostbare til slutt. Når en har funnet passende tiltak avsluttes undersøkelsene, da det i dette arbeidet (fase 1) synes unødvendig å undersøke de mest kostbare alternativene. Mer omfattende og kostbare tiltak blir sett på i senere arbeid (fase 2 og 3).

Grunnleggende undersøkelser:

- Situasjonen i 2012 med dagens banestrømforsyning uten spesielle tiltak og normal driftsituasjon
  - Simulering med ruteplan planlagt for 2012 og nye tog.
  - Uten Hakavik kraftverk, som planlegges renovert og sannsynligvis vil være ute av drift.
  - Undersøke med både 0 og 12 % statikk i perifere omformerstasjoner og flat statikk i Oslo-området. Det vil si at Asker, Holmlia, Alnabru, Lillestrøm og Jassheim har dagens innstilt statikk. Alle stasjoner skal ha 16,5 kV spenning i tomgang slik som regelverket stadfester.
- Samtidig utfall av ett aggregat i to omformerstasjoner i Oslo-området.
  - Dagens innstilling av spenningsregulatorer slik at det er 5 % stabilisering for aggregatene i alle stasjoner.
- Redusert pådrag for alle lokal- og IC-tog med enkle eller doble Type 74/75 sett.
  - Undersøke om dette får noen praktisk betydning i Oslo-området der maksimalhastigheten uansett ikke er veldig stor.
- Styring av cos φ slik at togene av Type 74/75 leverer reaktiv effekt ved normal spenning og dermed reduserer omformerstasjonenes produksjon av reaktiv effekt.

Undersøkelser av tiltak for å redusere effektbehovet og forbedre samkjøringen av omformerstasjonene. Når ett tiltak viser seg å føre frem viderebringes parametrene for dette til

neste undersøkelse. Belastning for togene fra trafikksimuleringen uten tiltak benyttes. Statisk lastflyt for å se på prinsipper og normal drift:

- Spenningsregulatorer med fallende statikk for spenningsregulatorene i omformerstasjonene
  - 12 % for de perifere og 8 % for de sentrale stasjonene; - Asker, Holmlia, Alnabru, Lillestrøm og Jessheim.
  - 12 % for de perifere og 12 % for de sentrale stasjonene; - Asker, Holmlia, Alnabru, Lillestrøm og Jessheim.
  - 12 % for de perifere og 16 % for de sentrale stasjonene; - Asker, Holmlia, Alnabru, Lillestrøm og Jessheim.
- Undersøke om endret omsetning i transformatorene i fjernledningen kan forbedre effektutvekslingen mellom Nordagutu og Asker.
- Test med økning eller reduksjon av X_q for Lillestrøm omformerstasjon for å få denne til å levere mer effekt til Oslo-området.
- Endringer av X_q for Jessheim omformerstasjon for å se om også denne kan levere mer effekt til Oslo-området.
- Endringer av X_q for Smørbekk omformerstasjon for å se om også denne kan avlaste Holmlia omformerstasjon.
- Kondensatorbatteri i sentrum av Oslo-området.
- Innføring av AT-system.
  - AT-system inn til Oslo-området. Nærmere bestemt fra Dovrebanen mot Eidsvoll, Lillestrøm via Kongsvingerbanen, Grefsen fra Gjøvikbanen, Smørbekk mot Sverige og Neslandsvatn videre langs Sørlandsbanen.
  - AT-system for hele Oslo-området, unntatt Østre linje, Randsfordbanen, Sørlandsbanen mellom Asker og Neslandsvatn.

Undersøkelse der flere av de beste tiltakene samtidig tas i bruk:

- For eksempel vil en ha tro på at endret X_q for statiske omformerstasjoner og fallende statikk for spenningsregulatorene vil ha stor betydning. Her kan en undersøke både normal drift og tilfelle med utfall av aggregater.
  - Kombinasjon av utfall i forskjellige stasjoner
- Undersøkelse med produksjon fra Hakavik kraftstasjon. Test med både 10 og 15 MVA installert ytelse her.

Noen av disse tiltakene er relativt enkle eller i det minste mulig å innføre i løpet av noen få år, mens AT-system, økt ytelse fra Hakavik og kondensatorbatteri i Oslo, er kostbare tiltak som krever mye planlegging. Om ingen av dem er tilstrekkelige må en undersøke om løsning er en midlertidig omformerstasjon i sentrum av Oslo-området.

Trafikksimuleringer for å undersøke om tiltakene har den ønskede virkningen:

- Undersøke de (eller eventuelt det) beste tiltakene og trafikksimulering med både normal drift og utfall av to omformeraggregater.
  - Undersøkelse både med og uten tiltak i togene, spesielt er det ønskelig å undersøke med og uten pådragsbegrensning og virkningen av styring av cos φ.
  - Undersøke både utfall av ett aggregat i to omformerstasjoner og med to aggregater i samme stasjon.
- Undersøke om begrenserfunksjon, se [14], i spenningsregulatorene til de sentrale roterende omformerne har positiv virkning.

- Undersøkelse med de beste tiltakene ovenfor og i tillegg funksjon for begrensning i spenningsregulatorene i Asker, Holmlia og Alnabru for å redusere spenningen ved stor belastning og utfall.
- Forsøk med termisk begrensning og med strømbegrenser hver for seg.
- Kombinasjon av begge begrensningsfunksjonene.
- Undersøke både utfall av ett aggregat i to omformerstasjoner og med to aggregater i samme stasjon.

Det skal i utgangspunktet ikke fokuseres på optimering for fjernledningen, da dette er et omfattende arbeid som krever en egen undersøkelse. Bare om en ser at det flyter ugunstige store reaktive effekter får en eventuelt gjøre noen tiltak for å bøte på dette.

1.5.2 Metode med stasjonær lastflyt for å undersøke optimale parameterinnstillinger

Stasjonær lastflyt der en ser på effektutveksling mellom tog og omformerstasjoner uten trafikksimuleringer er en forenklet metode som gjør at en kan få gjort mange undersøkelser raskt. En vil her fortrinnsvis analysere én lastflytsituasjon og det er situasjonen når effektuttaket er størst i Oslo-området, det vil si innenfor omformerstasjonene Asker, Holmlia, Alnabru og Lillestrøm. Ved å gjøre en trafikksimulering først, med normale driftsforhold og dagens innstilling av regulatorer etc., finner en tidspunktet for maksimalt uttatt effekt i området. For dette tidspunktet finner en så aktiv og reaktiv effekt fra alle avganger til omformerstasjoner, samt spenning ved stasjonene.

Neste spørsmål er da om en skal se på effektflyten for et øyeblikk eller for en periode. En mener på grunnlag av tidligere erfaringer og diskusjoner at 2-sekundersverdien, som er å sammenligne med en momentanverdi, er for usikker til å gjøre studier rundt. Bare små forskyvninger av togenes posisjoner og effektopptak vil sannsynligvis føre til store endringer. 6-minuttersverdien (MEAN-verdi) er dermed en mer sikker gjennomsnittsverdi og har tidligere vært undersøkt. Allikevel er det i praksis slik at det er den kortvarige 2-sekundersverdien som er dimensjonerende for omformerstasjonene. Denne verdien kan nok også variere mye, selv for samme omformerstasjon og togtrafikk.

For å finne effekten som togene på hver matestrekning forbruker, både innenfor Oslo-området og på de perifere strekningene, ser en på 6-minuttersverdien av all effekt fra omformerstasjonene på det tidsrommet der maksimalt effektopptak ble registrert. Denne effekten ekvivaleres til to aggregerte laster som hver har halvparten av samlet effektopptak og disse plasseres på fjerdedelen av matestrekningen ut fra omformerstasjonene. Se Figur 1-1 som illustrerer dette. Bare aktiv effektopptak registreres på denne måten, da den reaktive effekten som flyter er et resultat av fasevinklene mellom omformerstasjonene. Dette så lenge spenningen er over 15 kV slik at togene ikke mater ut eller trekker reaktiv effekt. Dette gjelder selvsagt ikke for lokaltogene av Type 69 som trekker reaktiv effekt og som må inkluderes for seg.

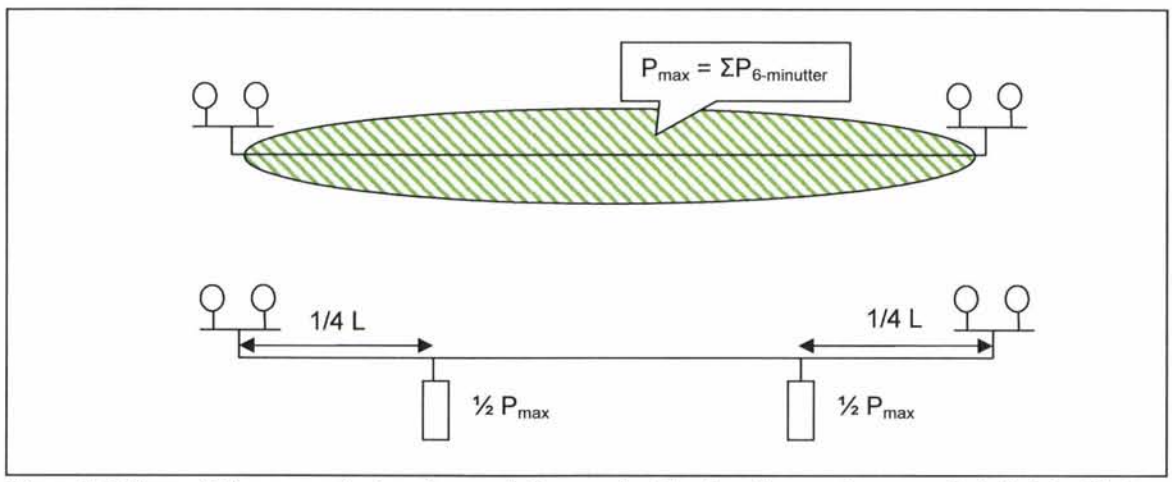
En svakhet med dette er at samlet effektopptak for 6-minuttersverdien også vil inkludere tapene i kontaktledningen. Når en så lager de aggregerte lastene vil summen av tapene som oppstod i 6-minuttersverdien vil tapene representeres dobbelt opp, ved at de er inkludert både i selve lastene og på nytt som tap i kontaktledningen. For å bøte på dette lar en lastene ha en avhengighet av spenningen, slik at effektopptaket til lastene reduseres ned faktoren 2. Dette gir en liten effektreduksjon og vil kompensere noe av denne feilen. Å finne ut eksakt hvor

mye feil dette gir, vil være for mye arbeid til at det er nødvendig å gjøre i denne sammenheng. Tross alt skal metoden bare gi like sammenligningsforhold for forskjellige tiltak og trafikksimuleringer i etterkant skal bekrefte disse stiliserte undersøkelsene. Mer om dette i kapittel 5.

For lastene som legges inn langs matestrekningene må det legges inn faktorer som beskriver forholdet for reduksjon av effektopptaket som funksjon av spenningen. Formelen nedenfor viser disse sammenhengene i SIMPOW og ved å sette MP og MQ til ønskede verdier oppnåes en oppførsel som ligner på togene. En setter NQ = NP = 0 fordi frekvensen ikke kommer til å variere når en forutsetter statisk lastflyt.

$$P = P_0'\left(\frac{U}{U_0}\right)^{MP} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{NP} \qquad Q = Q_0'\left(\frac{U}{U_0}\right)^{MQ} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{NQ}$$

Der:
P'_0 og Q'_0 er initiell last fra OPTPOW-løsningen,
U_0 og f_0 er henholdsvis initiell spenning og frekvens også fra OPTPOW-løsningen.



Figur 1-1 Fremstilling av prinsipp for modell som skal brukes for analyser med statisk lastflyt. Ved at en kjenner summen av effektforbruket inne på et område eller matestrekning (øverst), kan en lage en statisk modell der effekten er konsentrert til to laster (nederst).

2 KRAV TIL BANESTRØMFORSYNINGEN

Simuleringene skal påvise at visse kvalitetskriterier overholdes. For eksisterende og nye anlegg er det forskjellige kriterier med hensyn på laveste spenning. I tillegg må ikke matestasjoner, kontaktledning, sugetransformatorer, filterimpedanser, etc. overbelastes. For vurderingene i dette arbeidet forutsettes det at spenningen i normal drift vil være meget gode og at dette ikke trenger noen egne undersøkelser. Bare i tilfeller med driftsavvik, - utfall av omformeraggregater, kan det forventes at spenningen kan bli lav. Strømføringsevnen til seriekomponenter forutsettes også å være tilfredsstillende da det er mange parallelle strømføringsveier i Oslo-området. Imidlertid vil det bli gjort undersøkelser på strømmene som går gjennom avgangene i Oslo koblingshus, da dette planlegges å bygges nytt, se avsnitt 4.2.

2.1 Krav til dimensjonering av banestrømforsyning

For dimensjonering av banestrømforsyningen vedtatt følgende regler for prosjektering i JD 546, og her er deler av kapittelet om generelle krav til energiforsyningen gjengitt:

Generelle Krav til Energiforsyningen

For tog fremført med elektrisk trekkraftmateriell er den elektriske energiforsyningens kvalitet viktig for å kunne holde ruteplanen. Med den elektriske energiforsyningen menes både banestrømforsyningsanlegg og kontaktledningsanlegg for levering av elektrisk energi helt fram til togets strømavtaker.

Med *normal trafikk* menes:

- Trafikk i henhold til den til enhver tid gjeldende ruteplan, inklusive ekstratog kjørt innenfor rammene av restkapasitet, og de til enhver tid gjeldende ruteplanforutsetninger for vurderinger i forhold til vedlikeholdsregelverket
- Fremtidig trafikkprognose (se avsnitt 2.6) for vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket

Begrepet trafikk omfatter både ruteplan, togsammensetning/trekkraft og togvekt.

Med *normal infrastruktur* menes:

- Drift av og forhold ved infrastrukturen som lagt til grunn under prosjektering av opprinnelig anlegg, det gjelder både
  - -koblingsbilde i overføringsnett,
  - -tilgjengelig og installert ytelse i matestasjoner,
  - -samkjøring av matestasjoner samt
  - -bruk av andre banestrømforsyningsanlegg (kondensatorbatterier etc).

Med overføringsnett menes kontaktledning, mateledning, fjernledning og AT-ledninger.

Overordnet krav

a) Kvaliteten på den elektriske energiforsyningen skal ved *normal infrastruktur* ikke være en begrensning for *normal trafikk*.

b) *Normal infrastruktur* skal utvikles slik at kvaliteten på den elektriske energiforsyningen ikke blir begrensende for *normal trafikk*.

c) Kvaliteten på den elektriske energiforsyningen skal tilpasses de andre infrastrukturelementene slik at infrastrukturen, samlet sett, blir mest mulig optimal på kort og lang sikt sett i forhold til både drift-, vedlikeholds- og investeringskostnader samt

kapasitet og tilgjengelighet for togframføring.

Spenningskrav

a) Spenningen på togs strømavtaker skal ikke underskride verdiene gitt i tabell 5.1.
   1. Dersom den vurderte trafikken ikke inkluderer endringene angitt i avsnitt 0 punkt a)3.1 og b)3.1 er bør-kravene i tabellen å oppfatte som skal-krav.
   2. Vurdering av spenning:
      2.1. Med kortvarig spenning menes laveste effektivverdi av spenning som måles på togs strømavtaker. Ett sekund er godkjent samplingsintervall.
      2.2. Med langvarig spenning menes gjennomsnitt av effektivverdi av spenning over en periode av 2 minutter som måles på togs strømavtaker.
      2.3. Med gjennomsnittlig spenning menes $U_{mean\ useful}$ for tog (train) og område (zone) som definert i EN 50388.

Tabell 5.1 *Krav til spenning. Alle tall i kV.*

	Type krav	Kortvarig	Langvarig	Gjennomsnitt
Normalt krav	Vedlikehold	Skal ≥ 12,0 Bør ≥ 12,5	Bør ≥13,5	Skal ≥13,5
	Prosjektering	Skal ≥13,0	Skal ≥14,0	Skal ≥14,0
Redusert krav	Vedlikehold	Skal ≥11,0	Skal ≥12,0	Skal ≥13,5
	Prosjektering	Skal ≥12,0	Skal ≥12,0	Skal ≥13,5

Krav til behandling av driftsituasjoner (redundanskrav):

a) Det stilles *normalt krav* til spenning i *normale driftsituasjoner* og i *normale driftsituasjoner med endringer som ofte kan forventes*.
   1. Den elektriske energiforsyningen skal ikke medføre forstyrrelser, forsinkelser og begrensninger for togtrafikken.
   2. Med *normal driftsituasjon* menes:
      2.1. *Normal trafikk*
      2.2. *Normal infrastruktur*
      2.3. Vedlikehold hvor *normal infrastruktur* kan opprettholdes
   3. Med *normale driftsituasjoner med endringer som ofte kan forventes* menes for eksempel:
      3.1. Trafikk:
         3.1.1. Forsinkelser i togtrafikken som en normalt kan forvente.
         3.1.2. Enkelttilfeller av bytte av trekkraft.
         3.1.3. Enkelttilfeller av ekstra vogner i persontog.
         3.1.4. Enkelttilfeller av øket lastvekt for godstog dersom operativ ruteplanlegger tillater dette.
         3.1.5. Ekstratog på baner med baneprioritet 1, 2 og 3.
      3.2. Infrastruktur:
         3.2.1. Uforutsett utfall/stans av en mateenhet i en matestasjon i Oslo-området. Med Oslo-området menes banestrekningene med baneprioritet 1 i og rundt Oslo.

b) Det stilles *redusert krav* til spenning i *avvikssituasjoner*.
   1. Forsinkelser og begrensninger i togtrafikken bør unngås ved vurderinger i forhold til vedlikeholdsregelverket
   2. Forsinkelser og begrensninger i togtrafikken skal unngås ved vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket
   3. Med *avvikssituasjoner* menes for eksempel:
      3.1. Trafikk:
         3.1.1. Ekstratog på baner med baneprioritet 4 og 5.

3.2. Infrastruktur:
3.2.1. Feil i matestasjon hvor matestasjonen ikke kontinuerlig kan mate ut 100 % av stasjonens installerte ytelse fordelt på alle utgående linjeavganger.
3.2.2. Samtidig utfall/stans av en mateenhet i to forskjellige matestasjoner i Oslo-området.
3.3. Vedlikehold:
3.3.1. Planlagt vedlikehold av overføringsnett eller andre seriekomponenter (kondensatorbatteri etc.) som ikke hindrer togframføringen fysisk.
3.3.2. Planlagt vedlikehold av matestasjoner hvor matestasjonen ikke kontinuerlig kan mate ut etterspurt effekt fordelt på alle utgående linjeavganger.

4. Kravene vedrørende planlagt vedlikehold anses også som oppfylt dersom vedlikeholdet kan legges til perioder med liten trafikk slik at *normalt krav* til spenning kan opprettholdes for de togene som på det tidspunktet er i trafikk.

c) Det stilles redusert krav til spenning i unormale driftsituasjoner.
1. Forsinkelser og begrensninger i togtrafikken bør begrenses/reduseres ved vurderinger i forhold til vedlikeholdsregelverket
2. Forsinkelser og begrensninger i togtrafikken skal begrenses/reduseres ved vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket
3. Med *unormale driftsituasjoner* menes for eksempel:
3.1. Trafikk:
3.1.1. Oppløsning etter masseforsinkelse i henhold til gjeldende rutiner
3.2. Infrastruktur:
3.2.1. Alvorlig feil i matestasjon hvor matestasjonen ikke kontinuerlig kan mate ut 50 % av stasjonens installerte ytelse fordelt på alle utgående linjeavganger.
3.2.2. Utfall av energiforsyning til en matestasjon
3.2.3. Brudd i samkjøringen, både planlagt og uforutsett, mellom matestasjoner som følge av brudd i samkjøringen i trefasenettet.
3.2.4. Uforutsett brudd på samkjøringen eller elektrisk øydannelse på grunn av brudd i overføringsnett og andre seriekomponenter (kondensatorbatteri etc.) som ikke fysisk hindrer togframføringen på de(n) elektriske øyen(e).
Med elektrisk øydannelse menes seksjonering av overføringsnett som fører til at banestrekninger eller deler av banestrekninger isoleres elektrisk fra samkjøringen med resten av nettet.
3.3. Vedlikehold av infrastruktur:
3.3.1. Større vedlikehold av matestasjoner hvor begrensning i ytelsen er nødvendig, for eksempel bytte av roterende aggregater.
4. Begrensning/reduksjon av forsinkelser og begrensninger i togtrafikken som følge av lav spenning på togs strømavtaker kan for eksempel være:
4.1. Strategiske, taktiske og/eller operative disponeringer i trafikken.
4.2. Optimalisering av seksjoneringsmuligheter.
4.3. Etablering av flere mulige matingsveier.
4.4. Planlegging av vedlikehold.

d) Det stilles ikke krav til spenningen i berørt(e) seksjon(er) i *situasjoner der togtrafikk ikke er mulig*.
1. Energiforsyningens nedetid i *situasjoner der togtrafikk ikke er mulig* skal reduseres mest mulig
2. Med *situasjoner der togtrafikk ikke er mulig* menes for eksempel:
2.1. Trafikk:
2.1.1. Stående feil/kortslutning i rullende materiell.
2.2. Infrastruktur:
2.2.1. Regionalt kraftsystemutfall med manglende energiforsyning til to eller flere nærliggende matestasjoner.
2.2.2. Brudd i samkjøringen, både planlagt og uforutsett, i overføringsnett som

fysisk hindrer togframføringen.

2.2.3. Utilsiktet utløsning av nødfrakobling

2.3. Vedlikehold:

2.3.1. Annet vedlikehold (ikke energiforsyningen) som hindrer fysisk togframføringen.

Tilgjengelighetskrav

a) Den elektriske energiforsyningens nedetid per år for togframføring i henhold til *normal trafikk med endringer som ofte kan forventes* bør ved vurderinger i forhold til vedlikeholdsregelverket, og skal ved vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket, være mindre enn gitt i tabell 5.2.

1. Tilgjengelighetskravene gjelder forstyrrelser og begrensninger i togtrafikken på grunn av feil med og vedlikehold av den elektriske energiforsyningen. Feil og avbrudd som kan lastes togselskap eller deres aktivitet regnes i utgangspunktet ikke med ved beregning av nedetid.
2. Den elektriske energiforsyningens nedetid per år for togframføring i henhold til *normal trafikk med endringer som ofte kan forventes* på grunn av enkelthendelser bør tilfredsstille verdiene gitt i tabell 5.3.
3. Nedetiden på grunn av enkelthendelser kan fravikes dersom systemets totale nedetid ikke økes. Vurderingene som legges til grunn for dette skal dokumenteres.

Tabell 5.2Krav til maksimal nedetid med ulike konsekvenser oppgitt i timer per spormil per år

Baneprioritet	a) Tillatt tid for feil uten konsekvenser for togtrafikken	b) Tillatt tid for redusert krav til spenning hvor forsinkelser og begrensninger i togtrafikken unngås	c) Tillatt tid for redusert krav til spenning hvor forsinkelser og begrensninger i togtrafikken begrenses/ reduseres	d) Tillatt tid uten krav til spenning i berørt(e) seksjon(er) hvor togtrafikk ikke er mulig
1: Oslo-området	5	13	0,5	0,5
1-3	-	22	0,7	0,5
4-5	-	43	1,4	1,0

Belastningskrav (strøm-/effektkrav)

a) Ved vurdering av energiforsyningens belastning skal det tas høyde for usikkerheter i vurderingene, avvikssituasjoner og fremtidig trafikkøkning.

1. Normale driftsituasjoner, normale driftsituasjoner med endringer som ofte kan forventes, avvikssituasjoner og unormale driftsituasjoner skal ikke føre til at den elektriske energiforsyningens anlegg og komponenter overbelastes. Margin/reserve mot tillatt belastning av komponenter og systemer bør være minst 5 %.
2. I normale driftsituasjoner bør det ved vurderinger i forhold til vedlikeholdsregelverket og skal det ved vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket legges til grunn minst 10 % reserve/margin for å ta høyde for trafikken i normale driftsituasjoner med endringer som ofte kan forventes og i avvikssituasjoner dersom dette ikke er inkludert i trafikkprognosen.
3. Ved vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket skal det både i normale driftsituasjoner, normale driftsituasjoner med endringer som ofte kan forventes, avvikssituasjoner og unormale driftsituasjoner tillegges ytterligere minst 20 % reserver/margin for å ta høyde for trafikkøkning utover trafikkprognosene.
4. Ved vurderinger i forhold til prosjekteringsregelverket av komponenter/anlegg med lang levetid samt dyr og vanskelig oppgradering/utbytting bør det vurderes ytterligere reserver/marginer.

5. Vurdering av belastningen bør på grunn av variasjonen omfatte både kortvarige og langvarige belastninger.
6. Vurderingene som legges til grunn skal dokumenteres.

2.2 Simuleringer og dimensjonering av system og komponenter

2.2.1 Belastning av omformere

Tabell 2-1 nedenfor viser den tillatte belastningsgraden for Jernbaneverkets roterende omformeraggregater. Av hensyn til redundans i strømforsyningen og nødvendig ytelse er det i de fleste omformerstasjoner installert to eller flere aggregater.

Tabell 2-1 Belastning av roterende omformeraggregater. For maks 2 sekunders belastning oppgitt i MVA er det forutsatt 15 kV som base.

Aggregat Type	Maks 6 min belastning [MVA]	Maks time belastning [MVA]	Maks 2sek belastning [A]	Maks 2 sek belastning [MVA]
ASEA Q24	4,8	3,1	450	6,75
ASEA Q38	8	5,8	625	9,375
Nebb 7,0 MVA	11	7,0	825	12,375
ASEA Q48/ Nebb 10,0 MVA	14	10	1180	17,7

Definisjonen av disse verdiene er som følger:

- Timebelastningen er aggregatenes nominelle ytelse (kontinuerlig belastning). Maksimal tillatte temperatur oppnås for aggregatet.
- Maksimal 6 minutters belastning defineres som aggregatenes/stasjonenes termiske overbelastbarhet. Denne verdien stiller for de roterende aggregatene krav til at belastningen forut for maksimalbelastningen har vært under grunnlasten som er ca. halve 6 minutters verdien. Om dette er oppfylt vil maksimalt tillatte temperatur oppnås, som om aggregatet var belastet med nominell effekt i en time.
- Maksimal 2-sekunders verdi er aggregatenes maksimale strømbelastbarhet. Denne grensen er satt etter starttrinnet for generatorens overstrømsvern. Dersom denne grenseverdien overskrides vil det kunne føre til at overstrømsvernet kobler ut stasjonen.

Aggregatene vil selvsagt belastes med stadig varierende verdier. Innenfor for eksempel maksimal 6 minutters verdi kan derfor belastningen tillates å overskride fastsatt verdi, hvis belastningen senere innenfor denne perioden er tilsvarende mye under. Således er det gjennomsnittsbelastningen innenfor den aktuelle tidsperioden som er av betydning. Det samme gjelder for 1-times og 2-sekunders belastning[3].

[3] For 2-sekunders belastningen gjelder at strømmen må være over kritisk verdi sammenhengende i 2 sekunder. Grunnen er at dette er en verdi som gjelder for et overstrømsrele. Formelt sett er det derfor ikke riktig at en beregner en gjennomsnittelig (RMS) 2-sekundersverdi. SIMPOW kan heller ikke i den modusen som brukes for trafikksimuleringer være i stand til å beregne riktig momentane verdier som med sikkerhet kan si om releet vil løse ut eller ikke.

2.2.2 Marginer mot overbelastning av omformere

I avsnitt 1.4.5 ble det henvist til trafikksimuleringer i en studie fra mai 1997 der det er lagt til grunn følgende usikkerhetsmarginer: 10 % for dårlig lastfordeling mellom aggregater i samme omformerstasjon og usikkerheter i inndata. For variasjoner i ruteplanen legges det til 10-20 %. For å kompensere for lav tomgangseffekt legges det til en margin på 5 %. Dette gir en samlet margin på 25 % som brukes for alle stasjoner, utenom Jessheim der marginen settes til 35 %.

Regelverket JD 546 sier ikke noe om noen av disse marginene, bortsett fra endringer i trafikken som ofte kan forventes å forekomme. Det er i regelverket også stadfestet at en margin på 5 % skal legges til mot høyeste tillatte belastning, denne marginen kan dermed oppfattes som en usikkerhetsmargin. Denne marginen på 5 % dekker da det som ovenfor er satt som margin mot dårlig lastfordeling mellom aggregater og usikkerhet i inndata og kompensering for lav tomgangseffekt, dette tilsamen utgjør 15 %. Ikke i noe senere arbeid er disse marginene nevnt og de vil ikke heller her bli tatt til følge, men det kan være interessant å merke seg disse marginene og resonnementene rundt dem.

I et eget notat kalt "Redundanskriteriet - Vurdering av marginer for belastningen og overholdelse av tilgjengelighetskrav for roterende og statiske omformerstasjoner i banestrømforsyningen (EB.800095)", har en kommet frem til visse belastningsmarginer for roterende omformere som et supplement til teknisk regelverk. Disse marginene tar utgangspunkt i overbelastbarheten til omformerstasjoner og hvor mye de kan belastes før det oppstår fare for overbelastning av det (de) gjenværende aggregatet(r) ved utfall av det første. Nedenfor er Tabell 2-2 og Tabell 2-3 hentet ut fra dette notatet og det er markert med rødt hvilke marginer som er relevante å benytte i dette arbeidet. Dette gjelder for banestrømforsyningen der det er ca 40 eller 80 km mellom omformerstasjonene. Her vil dette være relevant å undersøke for de perifere omformerstasjonene.

For stasjonene i Oslo-området har en benyttet et eget kriterium som sier at utfall av to aggregater samtidig skal kunne tillates. Det er ikke krav om at utfall av to aggregater i samme omformerstasjon skal kunne aksepteres. Ved utfall av to samtidige aggregater vil effektfordeling mellom stasjonene og sørge for at ikke flere aggregater faller ut for overlast. Dette vel og merke om marginene er store nok. Egne simuleringer må gjøres i hvert enkelt tilfelle for å se om ruteplan og togmateriell ikke overbelaster de gjenværende aggregatene. Hadde en kunnet ha brukt marginene og belastningsgrensene i Tabell 2-2 og Tabell 2-3 ville en vært nokså sikker på at selv utfall av ett aggregat i alle stasjoner kunne tillates, men så store marginer som dette har en ikke lenger mulighet for å benytte i Oslo-området sin del. Her vil en for øvrig omtale Oslo-området som området mellom omformerstasjonene Asker, Holmlia, Alnabru og Lillestrøm.

Her vil det ikke legges til 20 % reserve/margin for å ta høyde for trafikkøkning ut over dimensjonerende ruteplan (JD 546 avsnitt 2.5). Imidlertid vil margin på 5 % mot høyeste tillatte belastningsgrense for systemer og komponenter legges til, samt margingen på 10 % for å ta høyde for trafikken i normale driftsituasjoner med endringer som ofte kan forventes å forekomme. Imidlertid vil det bli utført egne simuleringer for en del tenkte alvorlige avvikssituasjoner som bør kunne takles og da vil ikke marginen på 20 % legges til, bare den på 5 %. Ved simulering med normal drift og ved utfall av to aggregater samtidig i Oslo-området vil en da undersøke at det er minst 15 % margin mot overbelastning for alle stasjoner. Altså at belastningen for en stasjon ikke skal overskride 85 %. Skulle en ha laget et kriterium for å anslå om det er fare for overlast når en kjenner belastningen i normal drift, vil en altså være på den helt sikre siden om belastningen er 42,5 - 50 % for en stasjon med to aggregater.

Om belastningen er over dette må en gjøre egne simuleringer og er belastningen over 85 % finnes det marginer i normal drift, men en kan ikke vite sikkert om utfall kan tåles. Ved simulering med utfall av aggregat(er) skal etter dette ingen stasjoner belastes over 85 %, bare om det innføres tiltak som umuliggjør overbelastning (som i statiske omformere) kan en tillate større belastning. I presentasjonen av resultatene i tabeller markeres det med rødt og uthevete tall når det er fare for overbelastning av en omformerstasjon. Sorte tall brukes der belastningen er stor, men der det er statiske omformere som ikke kan overbelastes.

I tillegg til krav vedrørende belastningen av omformerstasjonene, strømbelastning av seriekomponenter og spenningen for togene, får en sette som krav at tiltakene en innfører ikke fører til urimelige høyere energiforbrukt i normal drift. Forhåpentligvis vil tiltakene tvert om føre til lavere totalt energiforbruk, men dette får en undersøke i hvert enkelt tilfelle.

Tabell 2-2 Tillatt belastningsgrense for 2-sekunders strømverdi, 6-minutters og 1-times effekt av belastningen for omformerstasjoner med to aggregater. Grenser angitt med intervall er nedre tall bør-verdi og øvre tall er skal-verdi. Redundansverdiene gjelder for hele stasjonen. Tall med rødt er marginene som er relevante å benytte i dette arbeidet.

Dimensjoneringsgrunnlag for stasjoner med to aggregater		Redundans uten marginer	Margin	Redundans grense
Eksisterende omformerstasjon med roterende aggregater	Målinger og registreringer der en kjenner normalt forekommende høyeste belastning og sjeldne spissbelastninger.	50 %	5 %	**47,5 - 50 %**
	Simuleringer med dimensjonerende ruteplan.	50 %	5 + 10 %	**42,5 - 50 %**
	Simuleringer eller beregning for verste normalt forekommende trafikksituasjon.	50 %	5 %	**47,5 %**
Dimensjonering av ny omformerstasjon med roterende aggregater	Simuleringer med dimensjonerende ruteplan.	50 %	5 + 10[1] %	**42,5[2] %**
	Simuleringer eller beregning for verste normalt forekommende trafikksituasjon.	50 %	5[1] %	**47,5[2] %**
Eksisterende omformerstasjon med statiske aggregater	Målinger og registreringer der en kjenner normalt forekommende høyeste belastning og sjeldne spissbelastninger.	50 %	5 %	**47,5 - 50 %**
	Simuleringer med dimensjonerende ruteplan.	50 %	5 + 10 %	**42,5 %**
	Simuleringer eller beregning for verste normalt forekommende trafikksituasjon.	50 %	5 %	**47,5 %**
Dimensjonering av ny omformerstasjon med statiske aggregater	Simuleringer med dimensjonerende ruteplan.	50 %	5+10+20 % eller mer	**32,5 %**
	Simuleringer eller beregning for verste normalt forekommende trafikksituasjon.	50 %	5+20 % eller mer	**37,5 %**
	Simuleringer eller beregning for verste normalt forekommende trafikksituasjon med prognose for fremtidig trafikkvekst	50 %	5 %	**47,5 %**

1) Margin på 20 % for fremtidig trafikkvekst gir for stor ubenyttet installasjon og sløyfes for mobile aggregater. Imidlertid bør en ved planlagging av stasjoner med roterende aggregater ta hensyn til at fremtidige utvidelser kan bli nødvendig.

2) For omformerstasjoner som sjeldent utsettes for store trafikkbelastninger kan mindre marginer verders.

Tabell 2-3 Tillatt belastningsgrense for 2-sekunders strømverdi, 6-minutters og 1-times effekt av belastningen for omformerstasjoner med tre aggregater. Grenser angitt med intervall er nedre tall bør-verdi og øvre tall er skal-verdi. Tall med rødt er marginene som er relevante å benytte i dette arbeidet.

Dimensjoneringsgrunnlag for stasjoner med tre aggregater		Redundans uten marginer	Margin	Grense
Eksisterende omformerstasjon med roterende aggregater	Målinger og registreringer der en kjenner normalt forekommende høyeste belastning og sjeldne spissbelastninger.	67 %	5 %	**64 - 67 %**
	Simuleringer med dimensjonerende ruteplan.	67 %	5 + 10 %	**57 - 67 %**
	Simuleringer eller beregning for verste normalt forekommende trafikksituasjon.	67 %	5 %	**67 %**
Dimensjonering av ny omformerstasjon med roterende aggregater	Simuleringer med dimensjonerende ruteplan.	67 %	5 + 10[1] %	**57[2] %**
	Simuleringer eller beregning for verste normalt forekommende trafikksituasjon.	67 %	5[1] %	**64[2] %**
Eksisterende omformerstasjon med statiske aggregater	Målinger og registreringer der en kjenner normalt forekommende høyeste belastning og sjeldne spissbelastninger.	67 %	5 %	**64 - 67 %**
	Simuleringer med dimensjonerende ruteplan.	67 %	5 + 10 %	**57 %**
	Simuleringer eller beregning for verste normalt forekommende trafikksituasjon.	67 %	5 %	**64 %**
Dimensjonering av ny omformerstasjon med statiske aggregater	Simuleringer med dimensjonerende ruteplan.	67 %	5+10+20 % eller mer	**44 %**
	Simuleringer eller beregning for verste normalt forekommende trafikksituasjon.	67 %	5+20 % eller mer	**50 %**
	Simuleringer eller beregning for verste normalt forekommende trafikksituasjon med prognose for fremtidig trafikkvekst	67 %	5 %	**64 %**

1) Margin på 20 % for fremtidig trafikkvekst gir for stor ubenyttet installasjon og sløyfes for mobile aggregater. Imidlertid bør en ved planlagging av stasjoner med roterende aggregater ta hensyn til at fremtidige utvidelser kan bli nødvendig.

2) For omformerstasjoner som sjeldent utsettes for store trafikkbelastninger kan mindre marginer verders.

3 SIMULERINGSMODELLENE

I dette kapittelet beskrives kort de modeller som anvendes i simuleringen og inndata for disse. Mange av modellene som er med i simuleringen er meget avanserte standardmodeller som er definert i SIMPOW og TracFeed og det henvises til manualene for disse programmene. En stor datamengde er hentet fra Jernbaneverkets egen database. Det vil bli altfor omfattende om alle disse dataene skulle beskrives i denne simuleringsrapporten.

3.1 Avgrensing av simuleringsområde

Følgende grenser for kjøreveien er valgt:

- **Nelaug omformerstasjon ved km 281,5**
- **Hønefoss omformerstasjon ved km 96,8 (over Roa)**
- **Gjøvikbanen til Gjøvik ved km 124,2**
- **Fåberg omformerstasjon ved km 191,7**
- **Kongsvinger omformerstasjon ved km 99,3**
- **Sarpsborg omformerstasjon ved km 104,7**

I tillegg er Vestfoldbanen og Bratsbergbanen inkludert, i tillegg til Østre linje på Østfoldbanen og godssporene i Oslo-området. Skifteområdet ved Filipstad og Loenga er derimot ikke inkludert og togenes bevegelse her var heller ikke kjent da dimensjonerende ruteplan ble utarbeidet.

Banestrekningene er modellert med den relevante infrastruktur slik som kurvatur, skiltet hastighet, tunneler og kontaktledningsnett. Det er ikke lagt inn randsonelaster ved ytergrensene av simuleringsmodellene, da modellen istedenfor er gitt stor utstrekning.

3.2 Banestrømforsyning

3.2.1 Matende trefasenett

Undersøkelser av overliggende kraftnett på Sørlandsbanen, se [15], viste at overliggende nett og fasevinklene her spilte liten rolle for effektutveksling mellom omformerstasjonene. Lignende undersøkelse er gjort for Oslo-området for å fastslå om fasevinklene også her er av underordnet betydning, se appendiks 1, der målinger julaften 2008 er utført. Målingene er utført denne spesielle kvelden fordi det da ikke er noen tog i trafikk. Dessverre ble målingene ikke helt vellykkede, men en kan uansett se at det er relativt mye effekt som utveksles. For å finne ut av om effektutvekslingene virkelig skyldes overliggende fasevinkler er det utført egne undersøkelser av Statnett, se [13]. Med de fasevinkler som Statnett har funnet for matepunktene til omformerstasjonene er det i appendiks 2 utført lastflytberegninger for å se hvor stor effekt som kan forventes å flyte mellom stasjonene. Som en ser er effektflyten ikke særlig stor, men en har uansett tatt med fasevinklene i simuleringsmodellen som er benyttet her.

Tabell 3-1 nedenfor viser verdiene som er benyttet for overliggende nett. Linjeimpedans, fasevinkler og spenning for Asker, Holmlia, Alnabru, Lillestrøm og Jessheim er de som er funnet av Statnett og situasjonen i overliggende nett som er den mest vanlige er benyttet. Fasevinklene til de øvrige stasjonene er forutsatt ikke å være særlig annerledes og vinklene til

den nærmeste av omformerstasjonene i Oslo er benyttet. Når det gjelder linjeimpedansen har Statnett oppgitt disse for omformerne i Oslo, og for de perifere omformerne er gamle data benyttet. I noen tilfeller hadde en ikke oppdaterte datasett og da er det kun benyttet antagelsesverdier, - disse omformerstasjonene har linjeimpedans uten desimaler. Sannsynligvis har fasevinklene så liten betydning at de kunne vært helt ignorert og likeså med linjeimpedans for innmatingene.

Tabell 3-1 Spenning, fasevinkle og impedans for overliggende nett til omformerstasjonene. Alnabru er benyttet som referanse og negativt fortegn betyr at stedet ligger etter i fase i forhold til generatorene i nettet.

Sted	Spenning [kV]	Fasevinkel	Impedans [Ω]
Asker	22	-6,5°	0,04+j0,05
Holmlia	48	-2,8°	0,065 +j0,06
Alnabru	48	0°	0,025 +j0,025
Lillestrøm	48	-6,0°	0,01 +j0,03
Jessheim	66	-2,6°	0,03+j0,10
Tangen	66	-2,6°	0,897+j1,037
Rudshøgda	66	-2,6°	0,078+j0,09
Fåberg	66	-2,6°	0,0+j1,0
Smørbekk	50	-2,8°	0,0+j1,0
Sarpsborg	47	-2,8°	0,04 +j0,05
Kongsvinker	66	-6,0°	0,191+j0,275
Lunner	130	0°	0,0+j1,0
Hønefoss	22	0°	1,0+j3,0
Nordagutu	66	-6,5°	0,0+j1,0
Skoppum	22	-6,5°	0,0+j1,0
Larvik	66	-6,5°	1,0+j3,0
Nelaug	66	-6,5°	0,17+j0,35

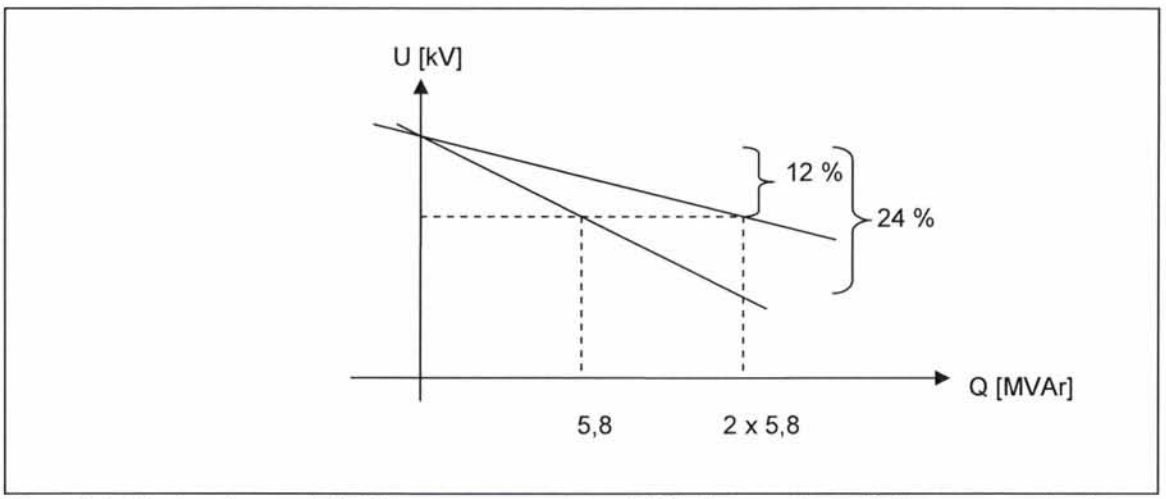
3.2.2 Omformerstasjoner

For omformerstasjonenes aggregater er både motor og generator modellert med såkalte 5. ordens modeller. Det vil si at det er 5 differensialligninger som beskriver transient oppførsel. Parametere som beskriver mekaniske egenskaper, samt elektromagnetiske parametere for stator og rotor er inngangsdata til SIMPOW. Magnetisk metning er ikke inkludert. På grunn av begrensede tilgjengelige data er ikke parametere som angår dynamiske egenskaper for transienter med varighet kortere enn 1 sekund fullgodt beskrevet. Dette vil imidlertid spille liten rolle da så korte tidsforløp ikke er av interesse i denne typen undersøkelser. Belastingsavhengige tap for omformeraggregatene er inkludert i SIMPOW's standard modeller og heller ikke sett på som noe problem. Dette er uansett ikke store verdier og det er effektflyten i fullast som skal undersøkes.

3.2.3 Spenningsregulering for omformerstasjonene

For å få ønsket karakteristikk for en omformerstasjons spenning er det i de første simuleringene benyttet stabilisering på 5 % mellom aggregatene i stasjonene Asker, Holmlia, Alnabru, Lillestrøm og Jessheim. Disse stasjonene har i tillegg flatt spenningsstatikk, - altså en statikk på 0 %. De første undersøkelsene gjøres med disse innstillingene, men det gjøres egne undersøkelser der en ser på andre innstillinger der fallende statikk innføres. For de øvrige stasjonene blir det i de fleste simuleringene benyttet fallende statikk på 12 % uten

kompoundering, slik som anbefalt i [12]. Nedenfor viser Figur 3-1 fallende statikk for en stasjon med to aggregater på 5,8[4] MVA før og etter utfall av det ene.



Figur 3-1 Illustrasjon av definisjonen av spenningsstatikk før og etter utfall av aggregater i en stasjon med to aggregater på 5,8 MVA. I normal drift er statikken 12 % og ved utfall hele 24 %.

3.3 Kontaktledningsanlegg og overføring

3.3.1 Konvensjonelt kontaktledningsanlegg

I simuleringene kun med kontaktledningsanlegg er det benyttet målte verdier i henhold til tabellen i dokument nr EK.101748-00.

For Oslo-tunnelen er det planlagt å fjerne dagens kl-anlegg og sette opp kontaktledningsskinne. Kontaktledningsskinnen vil representere en betydelig lavere impedans enn konvensjonelt kl-anlegg og det er derfor valgt å sette inn denne nye impedansen selv om strekningen er kort. Dagens kl-anlegg har en impedans på $Z = 0{,}22 + j0{,}19\ \Omega/km$. Det er i [11] beregnet resistansen for skinnetype UIC 54 når det påtrykkes vekselspenning på 16 2/3 Hz og denne er funnet til 0,04 Ω/km. Skinnene er parallellkoblede og dermed fåes 0,02 Ω/km. En vil forutsette at med strømskinner blir reaktansen upåvirket, men at det er resistansen som endres. Resistansen i dagens konvensjonelle anlegg er $R = 0{,}22 - 0{,}02 = 0{,}20\ \Omega/km$ (resistans i kontaktledning fratrukket skinnenes motstand).

Strømskinnen har et ekvivalent kobbertverrsnitt på 1400 mm^2 og sammenlignet med vanlig kontaktledning med 150 mm^2 blir tverrsnittet og dermed blir resistansen omentrent en tiendepart så stor, og dermed fåes 0,02 Ω/km. Dermed vil total resistans bli $R_{tot} = 0{,}02 + 0{,}02 = 0{,}04\ \Omega/km$. Dermed blir den totale impedansen i Oslo-tunnelen $Z = 0{,}04 + j0{,}19\ \Omega/km$.

3.3.2 Fjernledningssystem

For 55 kV fjernledning på Sørlandsbanen er impedansen som er benyttet vist i

[4] For aggregater på 5,8 MVA (Q38) gjelder alle parametere med pu-base på 4,0 MVA, men en nominell ytelse på 5,8 MVA er satt. Dette gir muligheter for missforståelser når det skal oppgies merkelast for aggregatene ved full last der spenningen skal ha angitt fall (statikk). Det spesifiseres her at 5,8 MVAr er brukt som fullast der ønsket spenningsfall skal oppstå. Se for øvrig avsnitt 1.4 i rapporten referert til i [12].

Tabell 3-2, og baserer seg på beregninger foretatt av Jøsok Prosjekt i 2007. Ytelse for transformatorer (basert på parametere fra prøveprotokollene) til fjernledningen og innstillingene for disse er vist i Tabell 3-3.

Tabell 3-2 Impedans og driftskapasitans for de forskjellige avsnittene av fjernledingen mellom Asker og Neslandsvatn. Nominell spenning for anlegget er 55 kV.

Linjeavsnitt	Impedans [Ω]	Driftskapasitans [nF]
Neslandsvatn - Nordagutu	45,82+j17,24	628
Nordagutu - Skollenborg	30,74+j11,56	458
Skollenborg - Sundet	6,44+j1,74	134
Sundet - Asker	13,5+j6,52	820
Sundet - Hakavik	5,52+j2,56	114
Hakavik - Sande	12,44+j6,00	180

Tabell 3-3 Impedans og omsetning for transformatorene til fjernledningen.

Transformator	Ytelse [MVA]	Kortslutningsimpedans [ohm]	Omsetning [kV/kV]
Neslandsvatn	8,0	0,57/3,7	55,0+3x0,5/16,5
Nordagutu	8,0	0,58/4,5	57,0/16,5
Asker	8,0	0,87/6,16	55,0/16,5
Skollenborg	2 x 2,5	1,36/6,32	55/16,0
Sande (mulig fjerning)	2 x 2,5	1,31/6,3	55/16,0

3.3.3 AT-system

Der det utføres undersøkelser med AT-system forutsettes det at ledertverrsnitt for NL og PL ledere er 381 mm^2 og at faseavstanden er 1 m. Impedansen er da 0,039 + j0,049 forutsatt at kun "loop-impedansen" benyttes, - med andre ord ser en bort fra impedansen i kontaktledningen i system med seksjonert kl-anlegg. For Oslo-området sin del er det mulig at andre systemer kan velges, for eksempel kan en tenke seg en kombinasjon av dagens systemer med sugetransformatorer og at AT-systemet kobles i parallell mot disse. Dette er ikke undersøkt. Det er også mulig at det i tunneler kan benyttes kabler som i tett forlegning vil kunne ha mindre impedans.

3.3.4 Koblingsbilde

Det er benyttet normalt koblingsbilde slik at alle hovedspor er elektrisk forbundet med hverandre. I normal drift er imidlertid godssporet fra Alna til Grefsen ensidig matet fra Alnabru. Godssporet fra Alnabru til Loenga er også ensidig matet fra Alnabru. Slik er det også i simuleringen.

3.4 Banedata

Banedata er blant annet avgjørende for å beregne togenes kjøremotstand og i TracFeed tas det hensyn til alle forholdene etter formelen:

$$F_{kjøre} = F_{stigning} + F_{kurve} + F_{motstand} = F_{stigning} + F_{kurve} + F_{rulle} + F_{luft}$$

Der kraften for stigning fremkommer av $F_{stigning} = g \cdot M \cdot S/1000$ der M er togets totale masse og S er stigningen i promille. F_{kurve} er beskrevet i avsnitt 3.4.1, F_{rulle} og F_{luft} er størrelser som kommer frem i formelen som vanligvis har formen: $F_{motstand} = A + B \cdot v + C \cdot V^2$, se avsnitt 3.5

3.4.1 Gradienter og kurver (vertikal og horisontalkurvatur)

Disse data er hentet fra banedatabanken. I disse simuleringene er bare vertikalkurvatur tatt med da horisontalkurvatur har liten betydning og gir unødvendig mye data.

3.4.2 Adhesjonskoeffisient

For å bestemme adhesjonen benytter TracFeed Curtius og Knifflers formel:

$$Adhesjonskoefisienten = 0{,}161 + \frac{7{,}5}{44 + v}$$

Denne formelen med faktoren 0,161 gir forholdene for gode adhesjonsforhold og er benyttet her.

3.4.3 Tunneler

For tunnelene er luftmotstanden økt med en faktor på 2 i forhold til fri strekning. Dette tallet kan nok variere noe, men for tog som kjører i moderat fart får det ikke stor betydning. Beregning av eksakte tall vil være arbeidskrevende og er ikke gjort.

3.4.4 Hastighetsprofil

For simuleringene er det benyttet to ulike hastighetsprofiler; normal og plusshastighet. Bare godstogene følger normalhastighet. For togtypene gjelder for øvrig:

- Type 69 holder 130 km/t som maksimalhastighet.
- Type 70 og 72 holder 160 km/t som maksimalhastighet.
- Type 71, 73 holder 200 km/t som maksimalhastighet.
- Godstogene holder normalhastighet, men har 90 km/t som maksimal hastighet.

På Gardermobanen holder alle togene 160 km/h gjennom Lillestrøm stasjon, selv om det er skiltet for 210 km/t gjennom hele området. Dette i henhold til dagens hastighetsreduksjon. For øvrig er det på de fleste steder skiltet for redusert hastighet gjennom stasjonsområdene.

3.5 Ruteplan

Det er benyttet den ruteplanen som er utviklet for ruteomleggingen som skal skje i 2012. Denne har en økning av togtrafikken på 37 % (økning av [tog km]) ved at kapasiteten som den nye Askerbanen har er utnyttet. NSB sine ruteleier for Gardermobanen konstrueres for en (maksimal) hastighet på 200 km/t. Flytogene kjører mellom Gardermoen og Drammen (som i dag.) Det forutsettes at de nye togene Type 74 og 75 kjøres på følgende linjer:

- Linje 002, Drammen - Askerbanen - Oslo - Romeriksporten - Lillestrøm - GMB - Lillehammer.

- Linje 003, Skien - Larvik-Drammen-Askerbanen-Oslo-Romeriksporten-Lillestrøm-GMB-Eidsvoll
- Linje 440, Drammen - Askerbanen - Oslo S - Romeriksporten - Lillestrøm - Hovedbanen - Dal.
- Linje 450, Kongsberg - Drammen - Askerbanen - Oslo - Romeriksporten - Lillestrøm - GMB - Eidsvoll.
- Linje 460, Spikkestad - Oslo S - Romeriksporten - Lillestrøm - Kongsvinger.
- Linje 500, Lysaker - Oslo - Ski (Østfoldbanen)
- Linje 510, Lysaker - Oslo S - Kolbotn - Ski (Østfoldbanen).

Det er benyttet doble togsett av Type 74 og 75 i henhold til materiellturneringsplanenen fra NSB. På de øvrige lokallinjene går det togsett av Type 69 og Type 72. Fjerntogene er satt opp med lokomotiv og vogner eller med Type 73, men disse togene er ikke med i den ruteplanen som er utarbeidet. Det er mulig at ruteplanen må justeres for å få disse togene med. For de få godstogene som er med i simuleringene er det valgt El 16 lokomotiver. Også for godstogene er det mulig at ruteplanen må justeres noe i ettertid. Her har det viktigste vært å få med noen av disse fjerntogene og godstogene som er realistisk at vil gå. For øvrig viser vedlegg 1 alle rutene som er med i simuleringen og valgt materiell.

Når det gjelder tomtog og skifting av disse på Filipstad er dette detaljer som enda ikke er bestemt. Det er derfor ikke simulert med tog som kjører mellom Skøyen og Filipstad. Heller ikke skifting i forbindelse med lasting og lossing av tog på Alnabru terminalen er inkludert. Dette skjer gjerne med veldig lav hastighet og da vil også effektopptaket være veldig lite.

3.6 Lokomotiver og vognmateriell

For å beregne togenes opptatte effekt må til enhver tid krefter bestemt av banedata og togenes trekkraft samt en rekke andre størrelser beregnes fortløpende. Vedlegg 2 viser dokumentasjon for togmodellen for Type 74/75 som er med i simuleringen.

3.6.1 Persontog

Lokaltogene er modellert med standard modeller i TracFeed, der blant annet masse, rullefriksjon, adhesjonsfaktorer, trekkraftkurve, akselerasjonsbegrensning, styring av fasevinkel, effektbegrensning ved lav spenning, hjelpekraft og flere andre ting er lagt inn.

Alle persontogene er forutsatt å ha et belegg på 70 til 80 % og et relativt høyt behov for hjelpekraft for oppvarming. Imidlertid er dette parametere som ikke påvirker effektopptaket vesentlig. Alle togene er gitt en akselerasjonsbegrensning på 1,0 m/s^2 og retardasjon på 0,85 m/s^2, med unntak av Type 74/75 som tillates å retardere med 1,0 m/s^2. For langdistansetogene er det benyttet lokomotiv El18 med åtte B7 vogner. Alle de moderne lokomotivene og motorvognene (ikke El14, El16 og Type 69) har mulighet for reaktiv kompensering som funksjon av spenningen, - utmating av reaktiv effekt er vanlig ved lave spenninger og forbruk av reaktiv effekt ved høye spenninger. Denne funksjonen er benyttet for noen av togene, men ikke i stor grad.

3.6.2 Godstog

Godstogene har mer eller mindre de samme modellene som persontogene, men tillates kun å akselerere med 0,5 m/s^2 og en retardasjon på 0,45 m/s^2 er dessuten angitt. Lastvekten er 800 tonn og det benyttes El16 lokomotiver for alle godstogene unntatt for kalktogene på

Breviklinjen som er satt opp med El14 lokomotiver. Godstogene gis muligheten for å rulle i nedoverbakke, det vil si at i fall over 15 ‰ vil det ikke bli gitt pådrag ved hastighetsøkninger. Tilleggsbetingelser er at rulling skjer når toget har en fart over 40 km/t og distansen til skiltet som angir større hastighet er 1 km eller mindre foran toget.

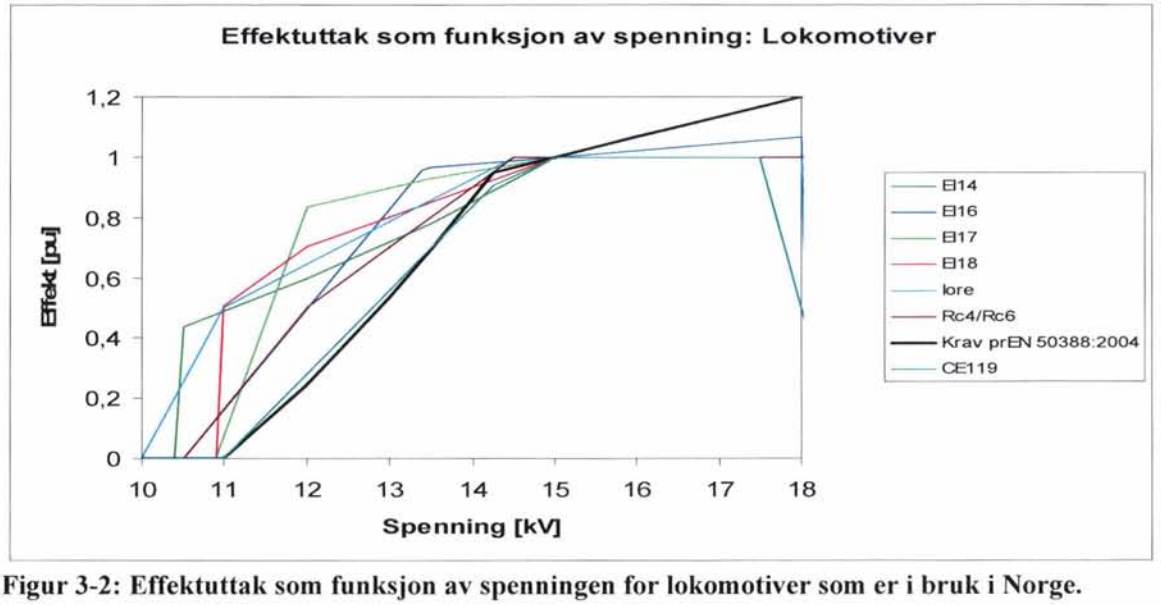
3.6.3 Trekkraft som funksjon av spenning

Trekkraftmateriellets prestasjonsevne reduseres normalt når spenningen minker. For eldre materielltyper vil trekkraftreduksjonen være direkte definert av fysiske og elektriske begrensninger i traksjonsutrustningen. For nyere materiell vil fremdeles fysiske og elektriske begrensninger være gjeldende, men kun indirekte da spenningsavhengigheten gjerne defineres gjennom enhetens programvare.

EN 50388 pkt. 7 stiller krav til spenningsavhengighet på nytt trekkraftmateriell. Dette for å ivareta stabile driftsbetingelser i svak banestrømforsyning eller i unormale driftsituasjoner. Begrensningen skal være automatisk.

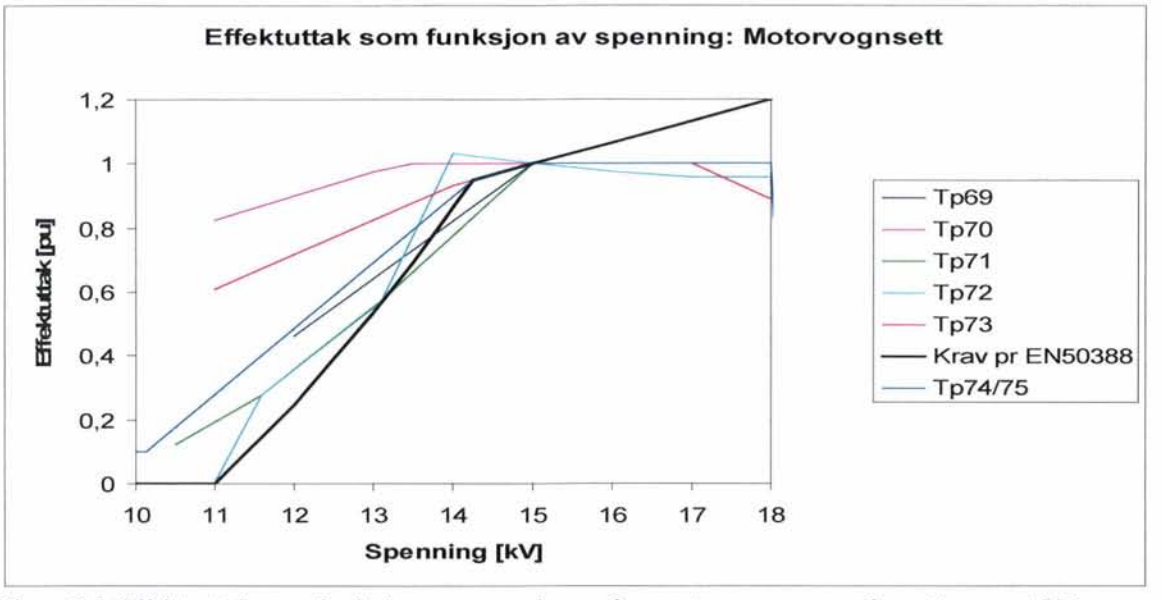
Figur 3-2 og Figur 3-3 viser makismalt effektuttak (gjennom strømavtaker) som funksjon av spenningen for et utvalg av henholdsvis lokomotiver og motorvogner som trafikkerer (eller kan være aktuelle for) norske spor. Kurvene forutsetter at virkningsgrad og tilleggsuttak holdes konstant. Inntegnet er også EN 50388 sitt krav til effektbegrensning som funksjon av spenningen for nytt materiell. Kravet i EN 50388 er omregnet fra strøm til effekt.

I simuleringene som er gjort her er begrensninger i henhold til EN50388 ikke innført for noen av togene, heller ikke de nye togene av Type 74/75. Imidlertid skal flytoget Type 71 innføre begrensning etter kravet i løpet av 2010 og diskusjoner skal gjøres med STADLER angående begrensning for Type 74/75[5]. I Oslo-området kan disse begrensningene etter EN50388 spille en stor rolle i unormale driftsituasjoner, men at simuleringene utføres uten betyr at resultatene blir konservative.



Figur 3-2: Effektuttak som funksjon av spenningen for lokomotiver som er i bruk i Norge.

[5] Diskusjoner vil bli gjort mellom BTPE og STADLER i løpet av våren 2010.



Figur 3-3 Effektuttak som funksjon av spenningen for motorvogner som benyttes mest i Norge.

3.6.4 Tilbakemating av effekt - regenerativ bremsing

Togene skal i forhold til gjeldende begrensinger i Network Statement ikke mate tilbake mer enn 5 MW. Denne grensen er satt på grunn av impedansreelenes mulighet til å detektere en kortslutning samtidig som et tog bremser regenerativt. Togsettene Type 74/75 har muligheten til å bremse med samme effekt på hjulene som i traksjon og med dobbelt sett kan de mate tilbake så mye som 6,3 MW. En lar modellen for Type 74/75 som benyttes i simuleringene her ha denne grensen da det sannsynligvis vil kunne økes i senere studier av dette.

4 TRAFIKKSIMULERINGER FOR Å UNDERSØKE GRUNNLEGGENDE SAMMENHENGER

4.1 Simulering med 0 % statikk i alle omformerstasjoner

Nedenfor viser
Tabell 4-1 den maksimale oppståtte belastningen som opptrer for alle omformerstasjoner i simuleringen med flat statikk for samtlige aggregater. Som en ser blir en rekke av omformerstasjonene høyt belastet, både de perifere og de sentrale stasjonene. En legger spesielt merke til at de sentrale omformerstasjonene er jevnt høyt belastet, ved at både 2-sekunders, 6-minutters og 1-timesverdiene er høye og i prosent nokså like. Dette i stor kontrast til de perifere stasjonene der det for de fleste stasjoner er markert forskjell på kort og langvarig belastning. Spesielt blir Jessheim og Lillestrøm meget høyt belastet kortvarig og det er neppe mulig å endre så mye på lastflytforholdene at dette endres. Siden de statiske aggregatene her ikke kan overbelastes kan det se ut til at en må tillate denne store belastningen, men en må undersøke om dette får betydning for spenningen ved utfall.

Selv om egne undersøkelser med utfall av aggregater må gjøres er 2-sekundersverdien av belastningen for Asker, Holmlia og Lillestrøm faretruende høy. Alnabru er noe mindre belastet og kan sikkert få avlastning fra Holmlia og Lillestrøm ved utfall av aggregater. Spesielt er det overraskende å se at Tangen, Smørbekk, Skoppum og Larvik blir så høyt belastet. Her vil utfall av ett aggregat kunne føre til at det andre aggregater også faller for overlast. Det gjøres ikke flere undersøkelser for dette alternativet med flat statikk. Med 12 % fallende statikk i både de perifere og de sentrale omformerstasjonene er det muligheter for at alle får en lavere maksimalbelastning og at de fordeler effekten mellom seg bedre.

Tabell 4-1 Belastning av omformerstasjonene. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for de kritiske tidsperiodene. Trafikksimulering med dagens forhold med konstant spenning.

Belastning av omformerstasjonene								
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	Strøm 2-sek		Effekt 2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	**3 x 10**	3,006	85	50,924	27,758	66	21,148	70
Holmlia	**2 x 10**	1,714	73	28,940	16,616	59	14,709	74
Alnabru	**2 x 10**	1,422	60	23,497	13,501	48	11,273	56
Lillestrøm	**3 x 12**	2,648	**104**	43,428	21,086	-	17,215	48
Jessheim	**2 x 12**	1,581	**93**	26,088	14,784	-	11,935	50
Tangen	**2 x 5,8**	0,899	**72**	14,799	4,952	31	3,612	31
Rudshøgda	**3,1**	0,671	**149**	11,197	3,800	**79**	1,972	**64**
Fåberg	**2 x 5,8**	0,580	46	9,556	3,152	20	1,979	17
Smørbekk	**2 x 12**	1,250	**74**	20,353	11,017	-	9,460	39
Sarpsborg	**1 x 12**	0,506	60	8,340	5,026	-	4,040	17
Kongsvinger	**1 x 5,8**	0,603	97	9,567	3,797	24	2,333	20
Lunner	**1 x 5,8**	0,658	105	10,288	7,123	45	4,142	36
Hønefoss	**1 x 5,8**	0,300	24	4,884	2,913	18	2,262	19
Nordagutu	**2 x 7**	0,761	46	12,556	6,975	32	5,120	37
Skoppum	**2 x 5,8**	1,121	**90**	18,478	9,006	56	5,230	45
Larvik	**2 x 5,8**	0,815	**65**	13,399	5,483	34	3,666	32

4.2 Simulering med 12 % statikk på perifere omformerstasjoner

Nedenfor viser Tabell 4-2 maksimalt oppstående belastninger for omformerstasjonene når alle unntagen Asker, Holmlia, Alnabru, Lillestrøm og Jessheim har fallende statikk på 12 %. De nevnte sentrale stasjonene har flat statikk, mens Rudshøgda blir gitt 16 %. Som en kan se er belastningen nå noe lavere for samtlige perifere omformerstasjoner, spesielt for 2-sekundersverdiene er forskjellene store. Til tross for dette er fremdeles Tangen, Smørbekk, Skoppum og Larvik mye belastet. Når det gjelder de sentrale omformerstasjonene er belastningen uendret eller litt større, og en må i dette arbeidet fokusere på tiltak som kan forbedre dette. Spesielt ser en at Asker er så mye belastet at en ikke har mye av de 15 % margin som en må kreve, og det uten utfall. Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk er også mye belastet kortvarig, men disse statiske omformerne vil gå i strømgrense og ikke kunne overbelastes. En legger også her merke til at de sentrale roterende omformerne er nokså jevnt belastet ved at kort- og langvarige verdier av effekten er nokså like i prosent. Tiltak som kan avlaste de perifere omformerstasjonene må også gjøres, og i avsnitt 4.4 er det undersøkt hva pådragsreduksjon i motorvognene Type 74/75 vil bety. Tabell 4-3 viser energiforbruket for trafikken i hele området som er undersøkt, og målingen er gjort for kraftforsyningen inn til omformerstasjonene. Som en ser blir forbruket på 302 MWh i de tre timene som er simulert.

I Figur 4-1 til Figur 4-5 er det vist belastningen som opptrer fra litt før klokken 15:00 når rushtiden starter til den ender klokken 18:00, for henholdsvis Asker, Holmlia, Alnabru, Lillestrøm og Jessheim. Kurvene viser at belastningen bygger seg opp til et maksimum rundt klokken 16:15 for Asker og Alnabru, de andre stasjonene ser ikke ut til å ha et slikt tydelig maksimum. Imidlertid ser alle omformerstasjonene ut til å få et tydelig maksimum for sin 1-timesbelastning rundt klokken 16:40, unntaket er Jessheim der maksimalbelastningen ser ut til å komme etter 17:00.

Figur 4-6 viser enlinjeskjemaet for Oslo-området når belastningen innenfor Asker, Holmlia, Alnabru og Lillestrøm er på sitt høyeste. Det er piler som viser hvorledes effektflyten er når belastningen er på sitt største for Oslo-området klokken 16:13:22 for momentanverdien av belastningen, og klokken 16:13:37 for 6-minuttersverdien. Den samlede toppbelastningen, inkludert tap, i det skraverte området er 108,7 MW. Det er en egen tabell som viser belastningen for de relevante omformerstasjonene for disse tidspunktene. En ser at det er først og fremst de sentrale omformerstasjonene Asker, Holmlia, Alnabru og Lillestrøm som dekker effektbehovet. Asker er mest belastet og en kunne ha forventet at de andre nære stasjonene, - Nordagutu, Holmlia, Alnabru og Lillestrøm skulle ha kunne bidratt mer. Bidraget fra de andre nabostasjonene Smørbekk, Jessheim og Nordagutu er heller liten, dette til tross for at de ved dette tidspunktene er lite belastet. En legger også merke til at spesielt Asker, Alnabru og til dels Holmlia er belastet omtrent like mye nå, som den maksimalbelastningen som oppstår for omformerne hver for seg, se Tabell 4-4 som viser tidspunkt for toppbelastningen for de fem undersøkte situasjonene.

Når Asker, Holmlia og Lillestrøm er belastet på sitt meste, se henholdsvis Figur 4-7 til Figur 4-10, ser belastningen inn mot Oslo-området ut til å være heller moderat mens omformerstasjonene hver for seg må mate mye effekt ut av Oslo-området. Det ser også ut til at ved tidspunktet når hver av disse stasjonene har sin maksimalbelastning, er de andre stasjonene i selve Oslo-området lite eller moderat belastet. Det bør være mulig å få omformerstasjonene til å fordele effekten mellom seg bedre, spesielt de fire som ligger innenfor det en her omtaler som Oslo-området.

Når det gjelder bidraget fra andre perifere stasjoner når de sentrale omformerstasjonene har sin maksimalbelasting ser en at bidraget fra nabostasjonene utenfor Oslo-området er heller lite. Spesielt er det overraskende at Nordagutu ikke vil levere mer effekt over fjernledningen når Asker har sin maksimale belastning, se Figur 4-7. Det kan være interessant å regne ut den "elektriske avstanden" mellom Asker og Nordagutu for å få en forklaring på den dårlige effektutvekslingen. Fjernledningens impedans mellom Nordagutu, Skollenborg, Sundet og Asker er til sammen Z_{fj} = 50,68+j19,82 ohm. Referert til 15 kV-nivå fåes; $(15,5/55)^2$ x (50,68+j19,82) = 4,03+j1,57 Ohm. I tillegg kommer transformatorenes kortslutningsimpedans, for Nordagutu er denne nominelt er = 0,6 % og ex = 4,5 %, ytelsen er 8 MVA og spenningen 16,5 kV, og omregnet til 15 kV blir denne: X = 0,045 x 16500^2/8 000 000,0 = 1,53 Ohm. For transformatoren i Asker med er = 0,87 % og ex = 6,16 %, ytelsen er 8 MVA og spenningen 16,5 kV, fåes på samme måte: X = 0,0616 x 16500^2/8000000 = 2,096 Ohm. En ser bort fra resistansen i transformatorene og finner den samlede impedansen over fjernledningen til $Z_{fj\ og\ tr}$ = 4,03+j5,20 Ohm. Med en typisk kontaktledningsimpedans på 0,19+j0,20 Ohm/km tilsvarer dette 24 km med vanlig kl-anlegg. Så kommer det i tillegg at fjernledningen og kontaktledingen parallellkoblet. Impedansen for hele kl-anlegget fra Asker til Nordagutu er: 17,4+j20,17, og med de to linjene parallellkoblet fåes $Z_{fj,\ tr\ og\ kl}$ = 3,26+j4,14 ohm. Dette blir det samme som om det kun var 19 km mellom Asker og Nordagutu og en skulle ha kunnet forventet mye større effektutveksling mellom dem, - mulig at problemet kan være forskjellig innstilling av transformatorenes omsetning. I avsnitt 3.3.2 kan se at omsetningen for de to transformatorene er nokså forskjellige, med 57,0/16,5 kV for Nordagutu og 55,0/16,5 kV for Asker. Det er mulig at de heller burde vært helt like og at statikken til spenningsregulatorene også burde vært lik.

Mest kritisk er nok allikevel tidspunktet da toppbelastningen opptrer. Når den opptrer på 108,7 MW og 37,8 MVAr (som gir 115,1 MVA) er det igjen 36 % av den totale omformerytelsen på 178 MVA (når en regner med 16,5 kV spenning for alle omformerne og ser på 2-sekundersverdien) for de fire stasjonene i Oslo-området. Hvis en da mister ett aggregat på Lillestrøm og ett av de roterende på 10 MVA utgjør dette 33,47 MVA, for å eksemplifisere med utfallet som betyr størst tap av ytelse, og en har mistet omentrent 19 % og står igjen med 144,5 MVA. Det er da ca 80 % belastning av den gjenstående effektreserven og marginen mot overbelastning er oppfylt, og det uten bidrag fra omformerstasjonene nærmest Oslo-området. Dermed burde dette gå bra med utfall om effektfordelingen er jevn, men i praksis er nok forholdene ikke så ideelle, og i avsnitt 4.3 blir dette undersøkt med utfall av ett aggregat i Asker og ett i Holmlia.

Tabell 4-2 Belastning av omformerstasjonene. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for de kritiske tidsperiodene. Trafikksimulering med dagens forhold, men med 12 % fallende statikk for spenningen for de perifere omformerstasjonene.

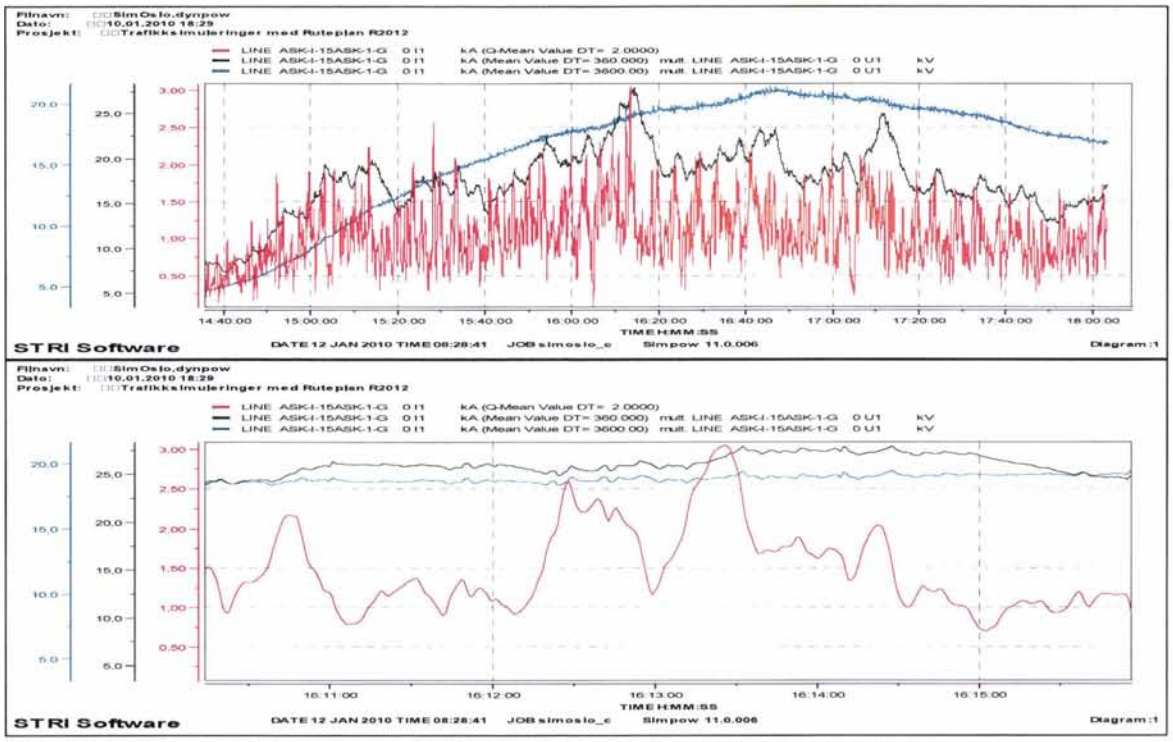
Belastning av omformerstasjonene								
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	Strøm 2-sek		Effekt 2-sek	Effekt 6-minutter		Effekt 1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	**3 x 10**	3,046	86	50,188	27,941	67	21,402	71
Holmlia	**2 x 10**	1,757	74	28,991	16,613	59	14,704	74
Alnabru	**2 x 10**	1,438	61	23,764	13,738	49	11,480	57
Lillestrøm	**3 x 12**	2,651	**104**	43,441	20,730	49	17,021	47
Jessheim	**2 x 12**	1,587	**94**	26,183	15,120	54	11,836	49
Tangen	**2 x 5,8**	0,824	66	12,500	5,145	32	3,560	31
Rudshøgda	**3,1**	0,337	75	4,533	2,164	45	1,171	38
Fåberg	**2 x 5,8**	0,574	46	9,050	3,117	19	1,967	17
Smørbekk	**2 x 12**	1,226	72	19,719	10,877	39	9,619	40
Sarpsborg	**1 x 12**	0,494	58	8,004	4,904	35	3,853	32
Kongsvinger	**1 x 5,8**	0,495	79	7,355	3,643	46	2,275	39
Lunner	**1 x 5,8**	0,495	79	7,090	5,763	72	3,532	61
Hønefoss	**1 x 5,8**	0,293	23	4,657	2,866	36	2,285	39
Nordagutu	**2 x 7**	0,587	36	9,305	5,912	27	4,381	31
Nelaug	**2 x 5,8**	0,574	46	8,892	6,399	40	3,176	27
Skoppum	**2 x 5,8**	0,917	**73**	14,100	7,716	48	4,723	41
Larvik	**2 x 5,8**	0,732	59	11,359	5,076	32	3,567	61

Tabell 4-3 Sum energiforbruk til omformerstasjonene (målt på trefasesidene) for hver av timene som er simulert.

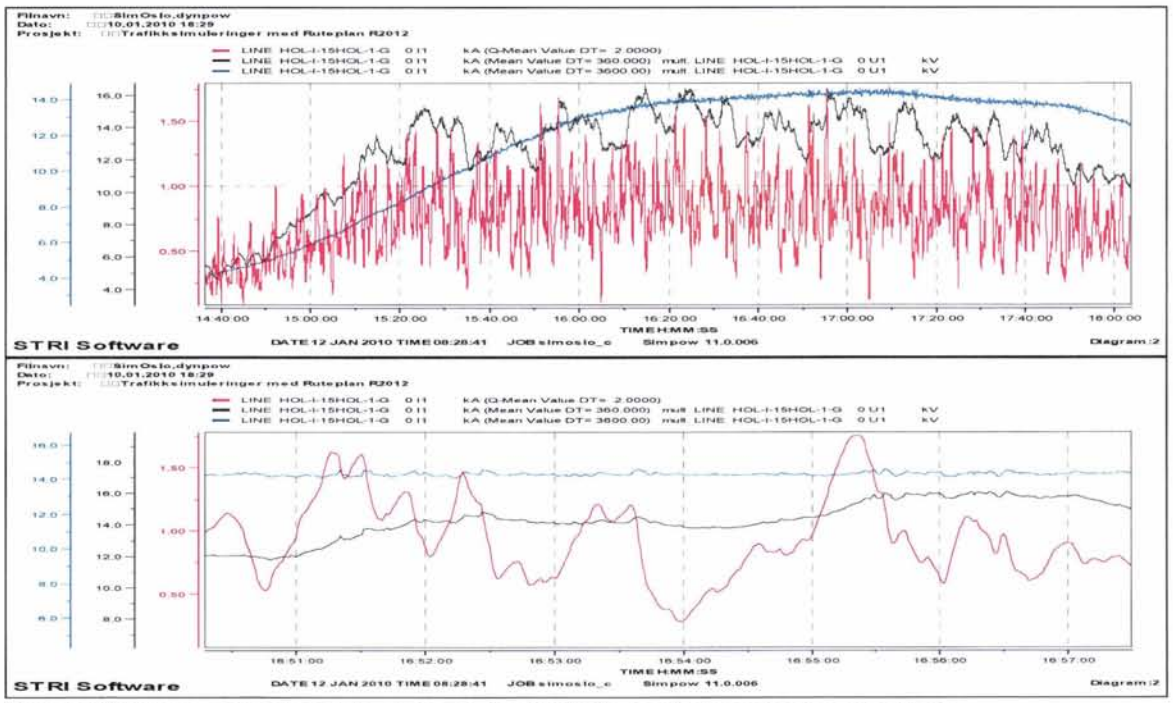
Periode	Energi til Matestasjoner [MWh]		
	Inn	Ut	Sum
Kl 15-16	103,72	-0,02	103,69
Kl 16-17	103,72	-0,02	103,69
Kl 17-18	94,87	-0,07	94,80
Sum	***302,30***	***-0,11***	***302,19***

Tabell 4-4 Klokkeslett for maksimalt oppstående effektbehov for hver av de viktigste omformerstasjonene og selve Oslo-området.

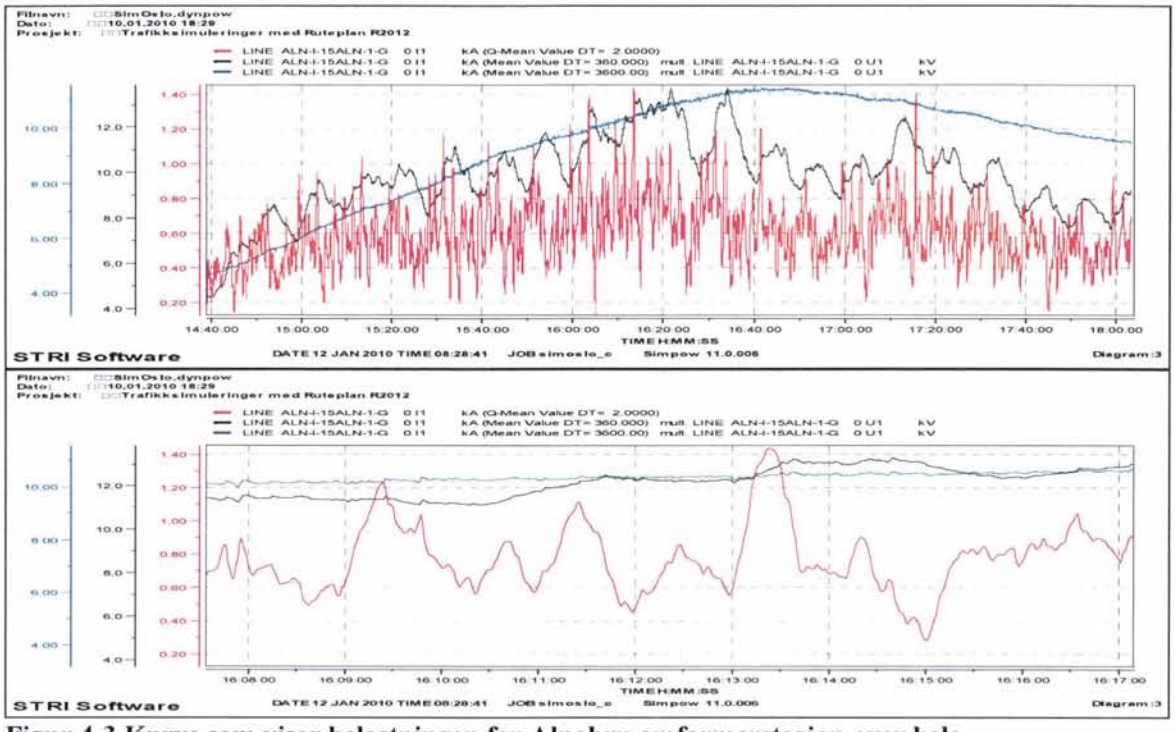
Omformerstasjon	Tidspunkt for høyeste leverte effekt [hh:mm:ss]		
	2-sekundersverdi	6-minuttersverdi	1-timesverdi
Oslo-området	16:13:22	16:13:39	-
Asker	16:13:25	16:13:32	16:45:28
Holmlia	16:55:22	16:14:42	16:09:27
Alnabru	16:13:23	16:21:35	16:46:38
Lillestrøm	17:15:32	15:53:54	17:15:49



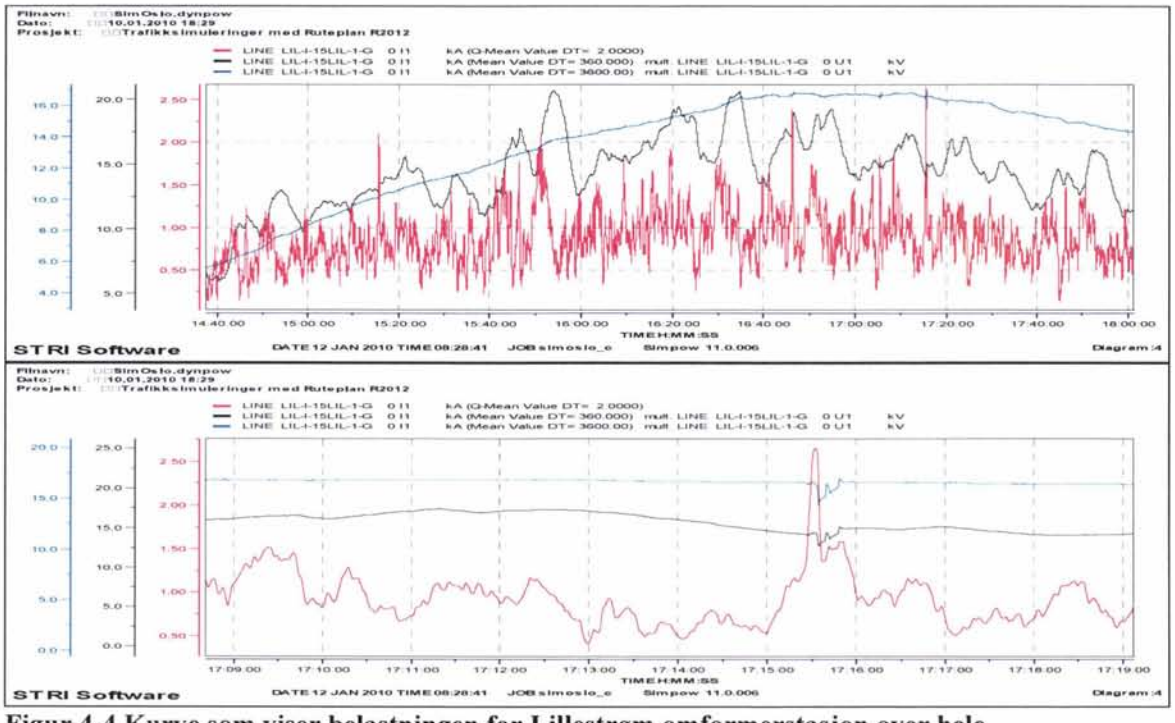
Figur 4-1 Kurve som viser belastningen for Asker omformerstasjon over hele simuleringsperioden (øverst) og for perioden med høyest belastning (nederst). Rød kurve viser RMS verdi for strømmen og svart og blå kurve er henholdsvis MEAN verdi av 6-minutters og 1-timesverdi av effekten.



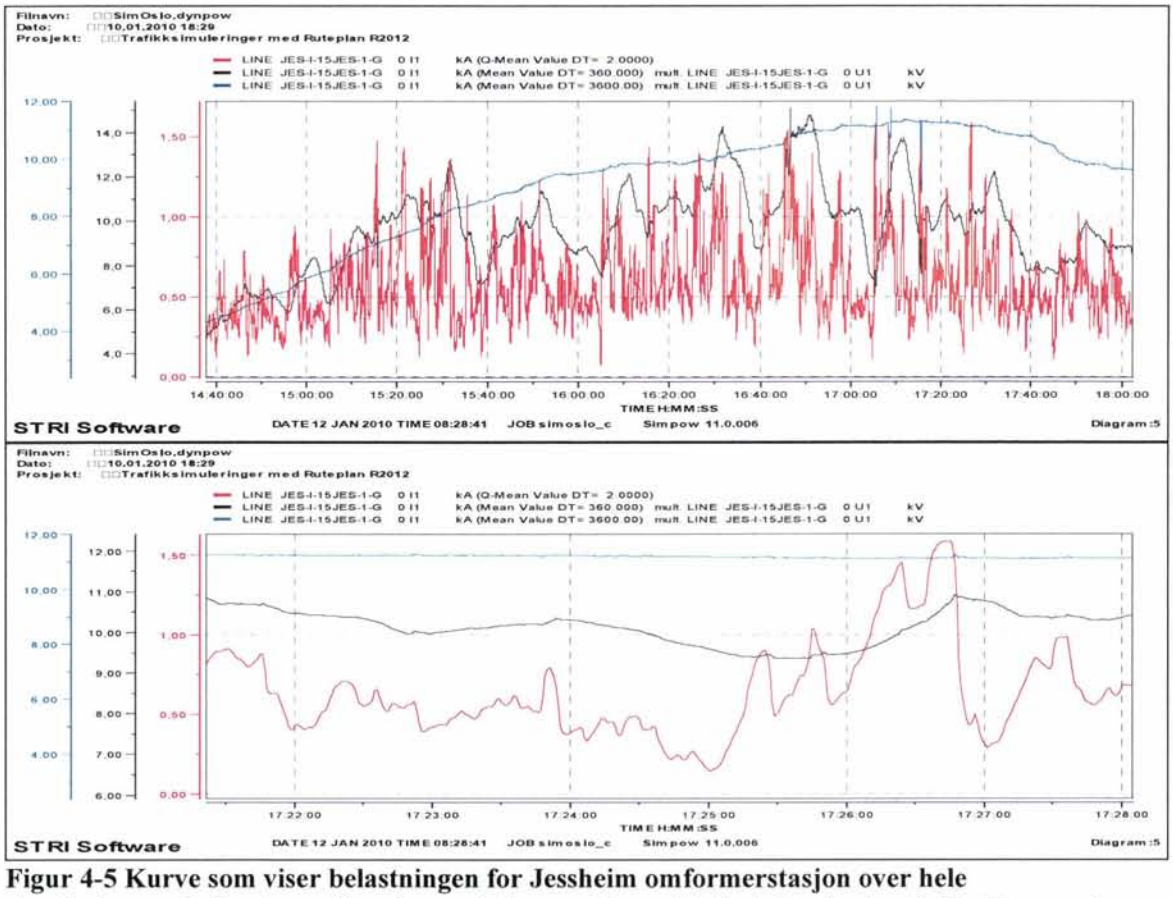
Figur 4-2 Kurve som viser belastningen for Holmlia omformerstasjon over hele simuleringsperioden (øverst) og for perioden med høyest belastning (nederst). Rød kurve viser RMS verdi for strømmen og svart og blå kurve er henholdsvis MEAN verdi av 6-minutters og 1-timesverdi av effekten.



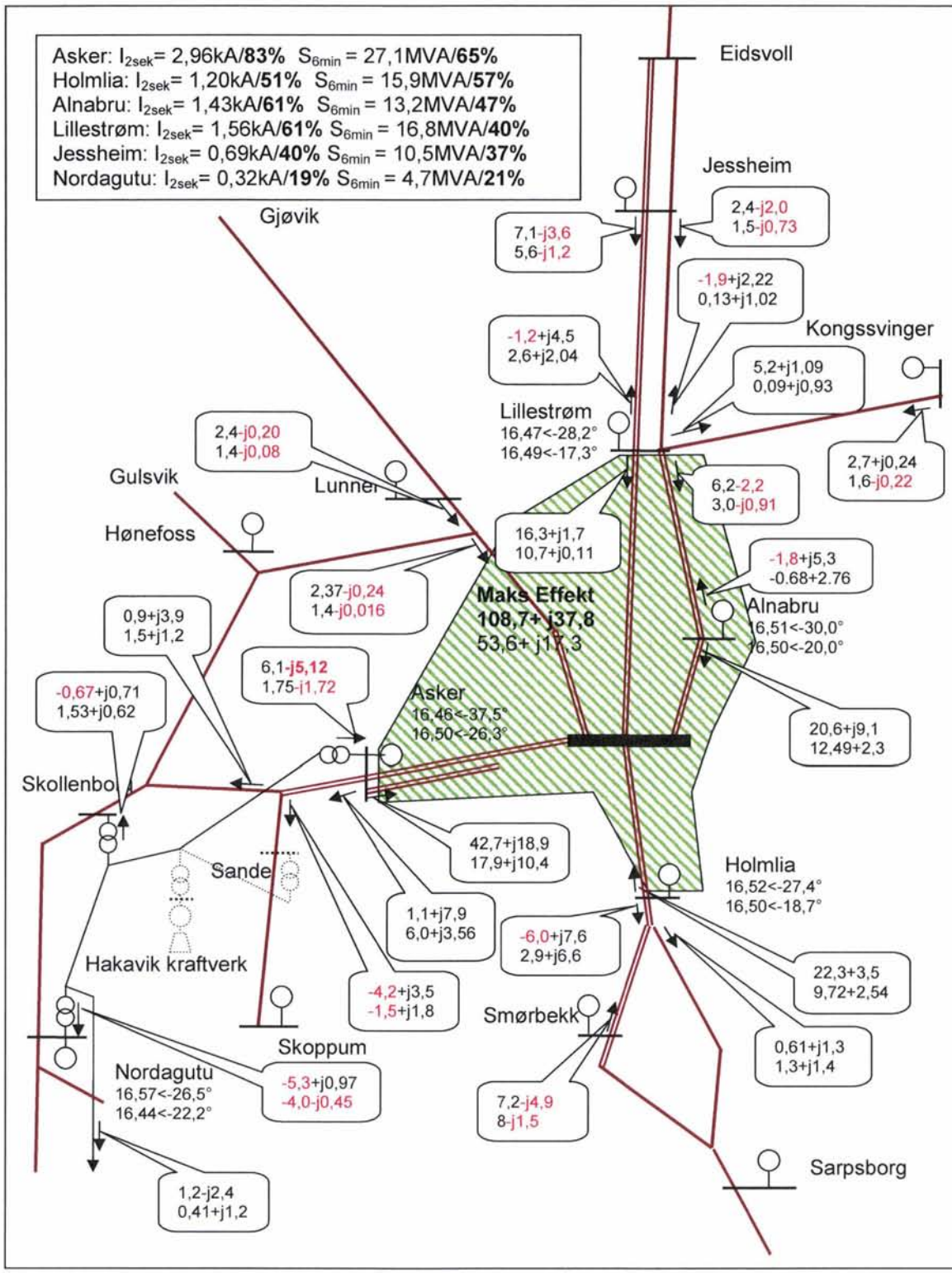
Figur 4-3 Kurve som viser belastningen for Alnabru omformerstasjon over hele simuleringsperioden (øverst) og for perioden med høyest belastning (nederst). Rød kurve viser RMS verdi for strømmen og svart og blå kurve er henholdsvis MEAN verdi av 6-minutters og 1-timesverdi av effekten.



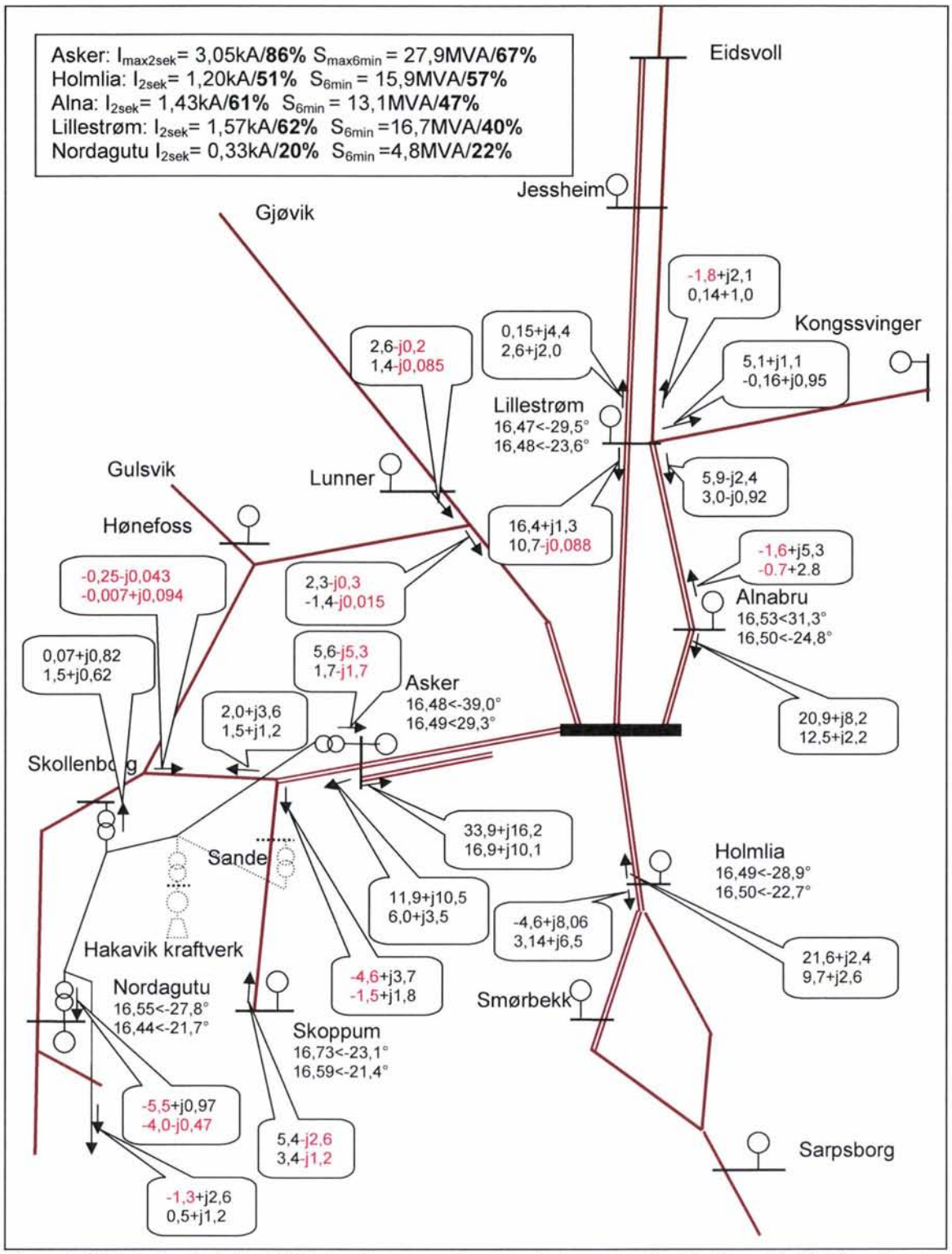
Figur 4-4 Kurve som viser belastningen for Lillestrøm omformerstasjon over hele simuleringsperioden (øverst) og for perioden med høyest belastning (nederst). Rød kurve viser RMS verdi for strømmen og svart og blå kurve er henholdsvis MEAN verdi av 6-minutters og 1-timesverdi av effekten.



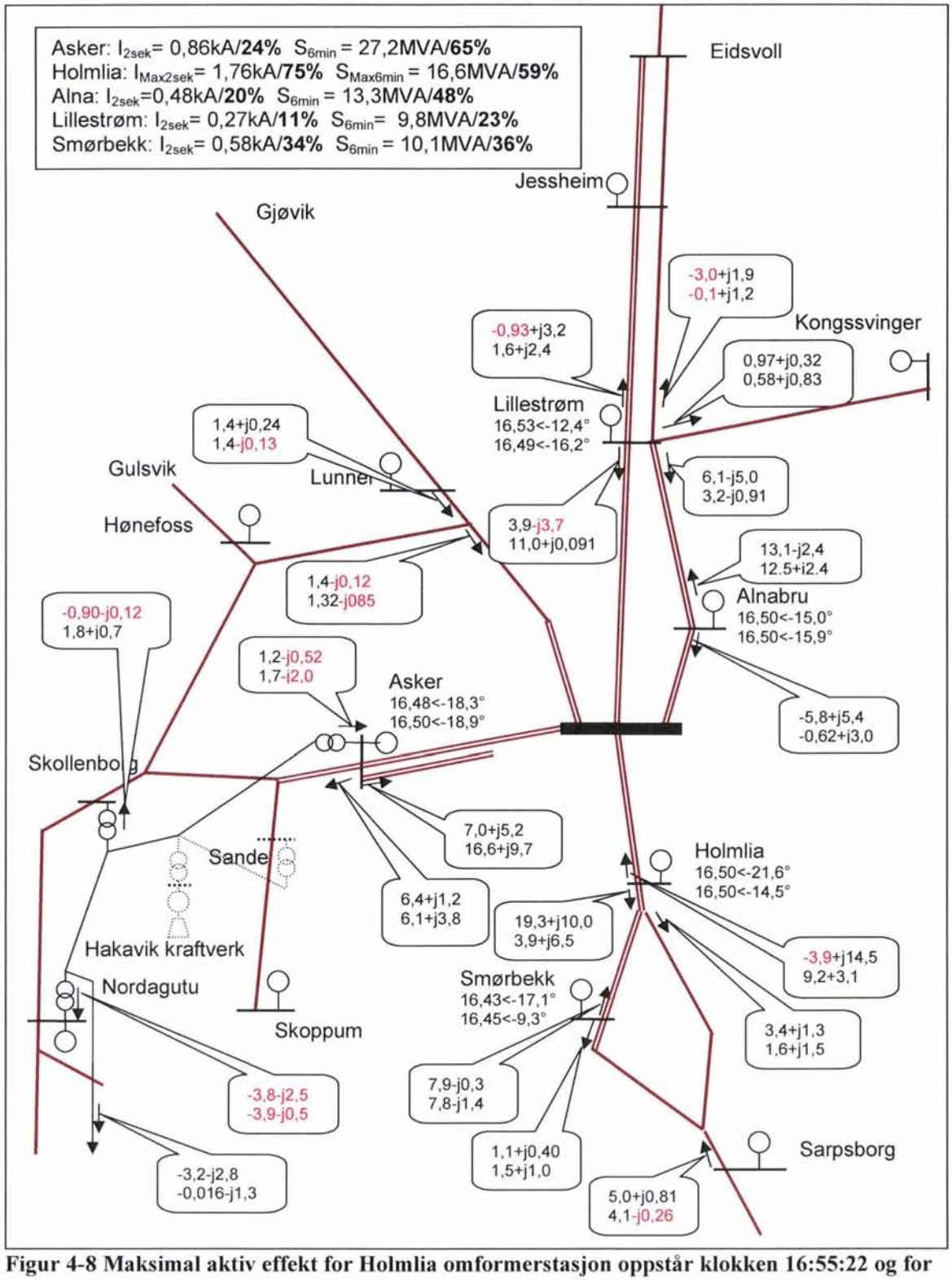
Figur 4-5 Kurve som viser belastningen for Jessheim omformerstasjon over hele simuleringsperioden (øverst) og for perioden med høyest belastning (nederst). Rød kurve viser RMS verdi for strømmen og svart og blå kurve er henholdsvis MEAN verdi av 6-minutters og 1-timesverdi av effekten.



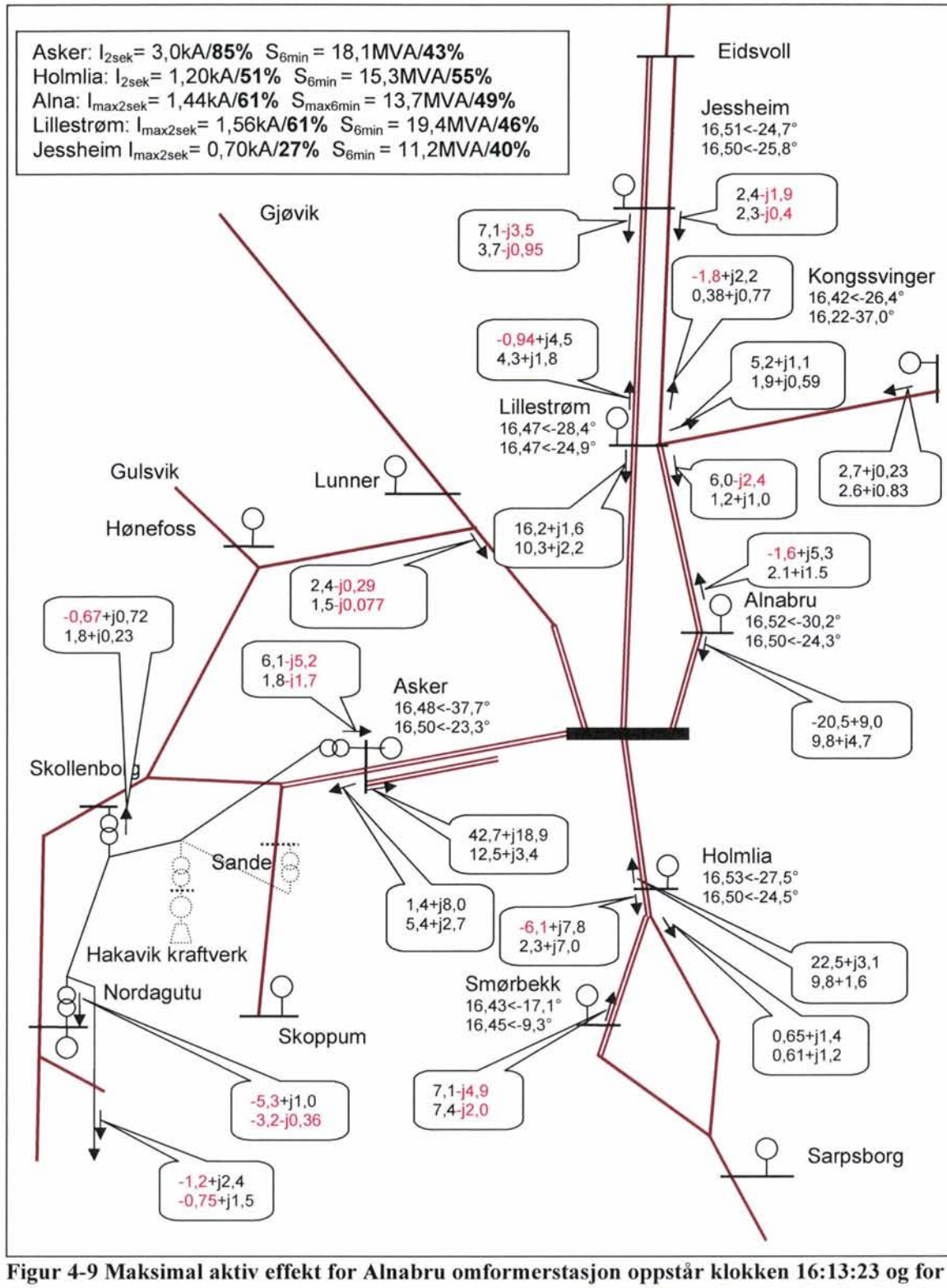
Figur 4-6 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området oppstår klokken 16:13:22 og for 6-minuttersverdi opptrer maksimalverdien klokken 16:13:37. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.



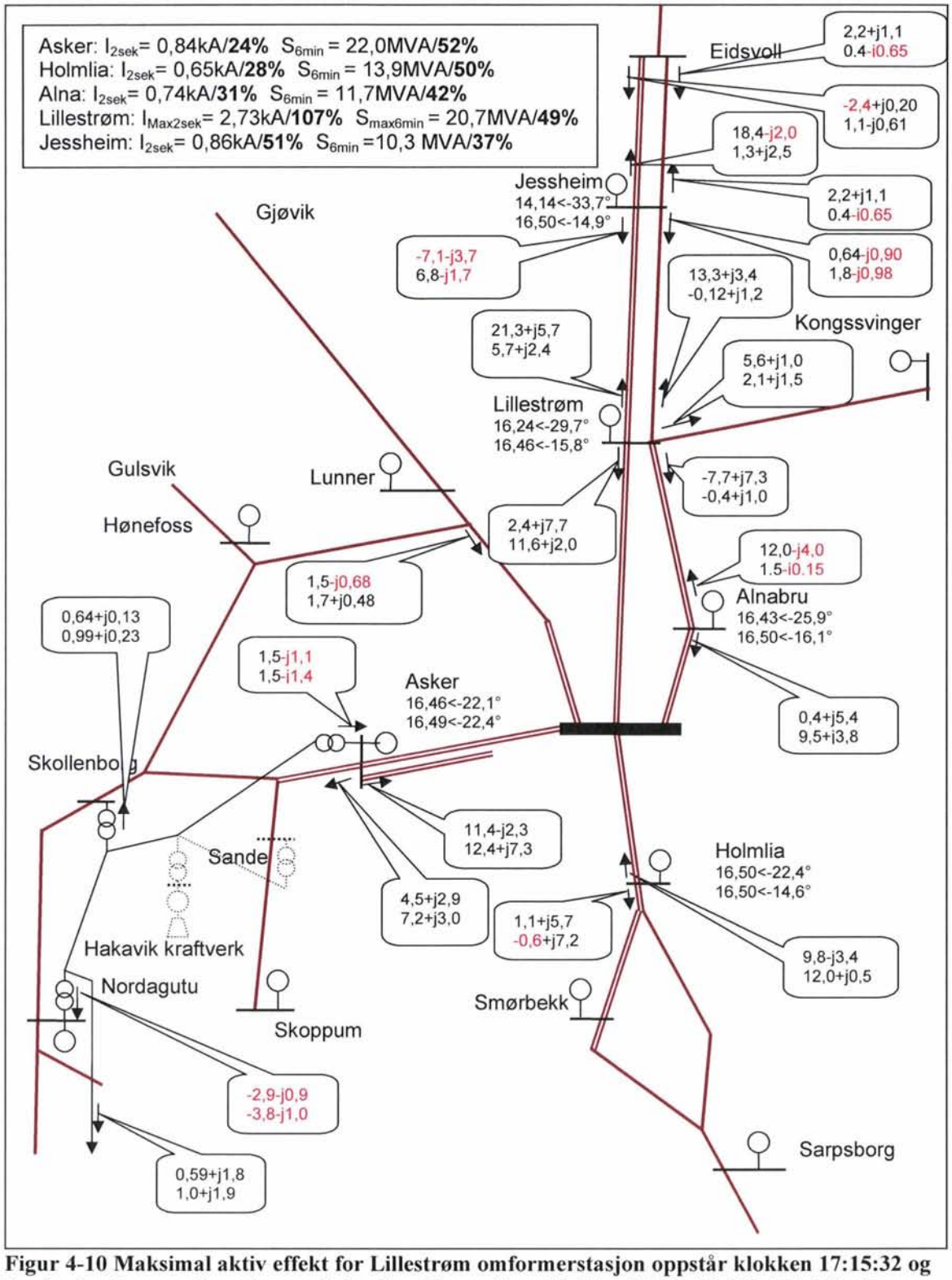
Figur 4-7 Maksimal aktiv effekt for Asker omformerstasjon oppstår klokken 16:13:25 og for 6-minuttersverdi opptrer maksimalverdien klokken 16:13:32. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.



Figur 4-8 Maksimal aktiv effekt for Holmlia omformerstasjon oppstår klokken 16:55:22 og for 6-minuttersverdi opptrer maksimalverdien mellom klokken 16:14:42. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.



Figur 4-9 Maksimal aktiv effekt for Alnabru omformerstasjon oppstår klokken 16:13:23 og for 6-minuttersverdi opptrer maksimalverdien mellom klokken 16:21:35. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.



Figur 4-10 Maksimal aktiv effekt for Lillestrøm omformerstasjon oppstår klokken 17:15:32 og for 6-minuttersverdi opptrer maksimalverdien mellom klokken 15:53:54. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

Tabell 4-5 Maksimalt forekommende strømbelastning på en del utvalgte avganger fra omformerstasjoner i Oslo-området. RMS-verdi av strømmen og prosentvis belastning i forhold til tillat strøm for hvert tidsintervall. Det er antatt 600 A som nominell strøm for Gardermobanens kl-anlegg fordi en ikke kjenner tillat strømbelastning for tidsintervallene.

Avgang	Nom strøm	10 sek RMS	[%]	1 min RMS	[%]	6 min RMS	[%]	10 min RMS	[%]	30 min RMS	[%]	1 time RMS	[%]
Asker - øst Drammensba 1	600	0,607	20,2	0,401	32,1	0,310	38,8	0,274	36,5	0,231	35,6	0,211	35,2
Asker - øst Drammensba 2	600	0,545	18,2	0,386	30,8	0,285	35,7	0,267	35,6	0,236	36,4	0,212	35,4
Asker - øst Askerbanen 1	600	1,261	42,0	0,896	71,7	0,576	72,0	0,518	69,1	0,450	69,3	0,370	61,6
Asker - øst Askerbanen 2	600	0,993	27,0	0,811	35,8	0,447	51,3	0,411	46,8	0,351	48,0	0,312	52,0
Holmlia - nord Østfoldbanen 1	600	0,854	28,5	0,653	52,3	0,469	58,7	0,419	55,9	0,377	57,9	0,360	59,9
Holmlia - nord Østfoldbanen 2	600	0,632	21,1	0,435	34,8	0,334	41,7	0,301	40,1	0,283	43,5	0,268	44,6
Alnabru - vest Hovedbanen 1	600	0,743	24,8	0,556	44,4	0,429	53,6	0,410	54,7	0,365	56,1	0,334	55,6
Alnabru - vest Hovedbanen 2	600	0,636	21,2	0,476	38,1	0,394	49,2	0,365	48,7	0,343	52,8	0,321	53,6
Alnabru - øst Hovedbanen 1	600	0,551	18,4	0,300	24,0	0,189	23,6	0,168	22,4	0,150	23,0	0,137	22,8
Alnabru - øst Hovedbanen 2	600	0,641	21,4	0,174	13,9	0,144	18,0	0,121	16,1	0,112	17,2	0,112	18,7
Lillestrøm - vest Gardermob 1	600	0,730	24,3	0,641	51,3	0,470	58,7	0,446	59,5	0,395	60,8	0,357	59,6
Lillestrøm - vest Gardermob 2	600	0,973	32,4	0,901	72,0	0,512	64,0	0,445	59,3	0,400	61,5	0,342	56,9
Lillestrøm - vest Hovedbanen 1	600	0,400	13,3	0,245	19,6	0,159	19,9	0,144	19,2	0,128	19,7	0,120	20,0
Lillestrøm - vest Hovedbanen 2	600	0,477	15,9	0,265	21,2	0,165	20,6	0,138	18,4	0,117	18,0	0,109	18,2

Tabell 4-6 Maksimalt forekommende strømbelastning på en del utvalgte avganger for Koblingshus Oslo S. RMS-verdi av strømmen for noen utvalgte tidsperioder er vist.

Avgang	1 minutt RMS	10 min RMS	30 min RMS	1 time RMS
Østfoldbanen 1	0,390	0,250	0,218	0,206
Østfoldbanen 2	0,413	0,276	0,260	0,244
Drammensbanen 1	0,767	0,564	0,477	0,415
Drammensbanen 2	0,826	0,516	0,437	0,388
Gjøvikbanen 1	0,221	0,131	0,102	0,091
Gjøvikbanen 2	0,179	0,113	0,090	0,079
Hovedbanen 1	0,425	0,305	0,282	0,270
Hovedbanen 2	0,476	0,352	0,317	0,295
Gardermobanen 1	0,927	0,445	0,411	0,353
Gardermobanen 2	0,362	0,201	0,164	0,148

4.3 Simulering med 12 % statikk i perifere omformerstasjoner og utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia

Nedenfor viser Tabell 4-7 hvordan belastningen av omformerstasjonene blir når en har samtidig utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia. Stabiliseringen for disse aggregatene er 5 % og ved utfall av ett aggregat og full belastning vil spenningen i Asker og Holmlia bli henholdsvis 2,7 og 5 % lavere enn i normal drift. Som en ser blir 2-sekunders- og 1-timesverdiene for Asker og Holmlia så store at overbelastning av de gjenværende aggregatene i samme stasjon sannsynligvis vil skje raskt. Dernest er det stor fare for at også Alnabru vil bli overbelastet, mens for Lillestrøm som ikke kan overbelastes, er det likegyldig om blir belastet opp mot 100 %. Allikevel er det høyst sannsynlig at spenningen vil bli så lav at togfremføringen vil stoppe opp eller måtte fortsette med sterk pådragsbegrensing. En annen fare er at noen av overstrømsvernene kobler ut sine respektive kontaktledningsavganger.

Av Figur 4-11 og Figur 4-12 kan en se hvordan belastningsforløpet for henholdsvis Asker og Holmlia blir. Sammenlignes dette med tilsvarende diagrammer i avsnitt 4.2 ser kurvene meget like ut i form. Men det er allikevel visse endringer i toppverdiene, og av verdiene for 2-sekunders- og 6-minuttersverdier av belastningen ser en at lasten har blitt fordelt på de andre omformerne. Høyeste belastning er tydelig økt for Alnabru, Lillestrøm, Smørbekk og Nordagutu, se Tabell 4-7 nedenfor og sammenlign med den i avsnitt 4.2. Endringen av belastningen i Asker er ikke særlig stor, men i Holmlia er den betydelig.

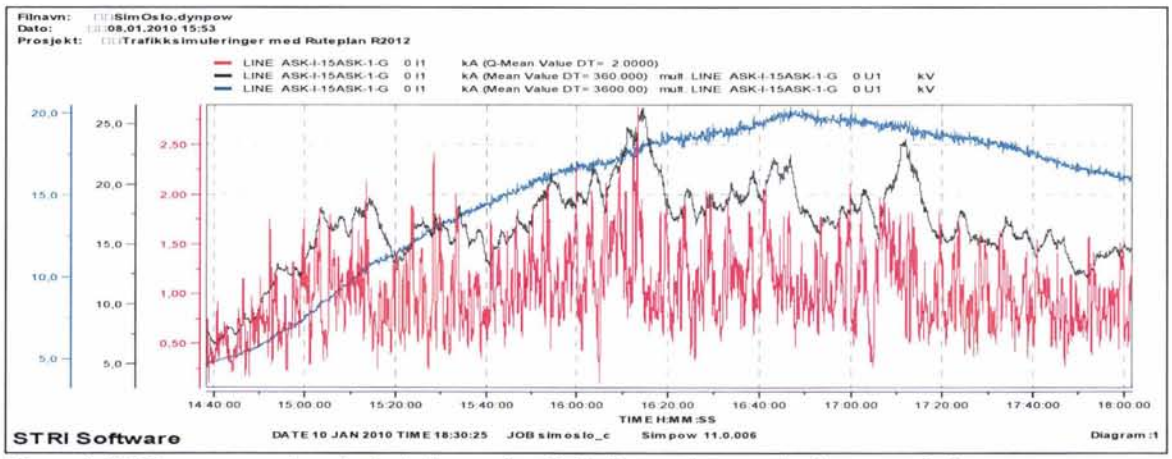
Figur 4-13 viser enlinjeskjemaet for Oslo-området og effektflyten som skjer når effektopptaket for området er på sitt største. Som en ser er det maksimale effektopptaket nesten helt uforandret. Dette tyder på at spenningen holder seg konstant, fordi togene ville ha redusert effektopptaket om spenningen ble noe særlig under 15 kV, noe som heller ikke er overraskende. Av enlinjeskjemaet ser en noe mer effekt flyter fra alle omformerstasjoner utenfor Oslo-området, men ikke spesielt mye.

Dessverre er altså bidragene fra de omkringliggende omformerstasjonene allikevel ikke nok til å forhindre overbelastning. Også denne gangen ser en at Nordagutu bidrar veldig lite for å avlaste Asker i en kritisk situasjon, noe som er overraskende fordi Nordagutu er så lite belastet når Asker er svært høyt belastet. En må søke å finne tiltak som kan endre på dette.

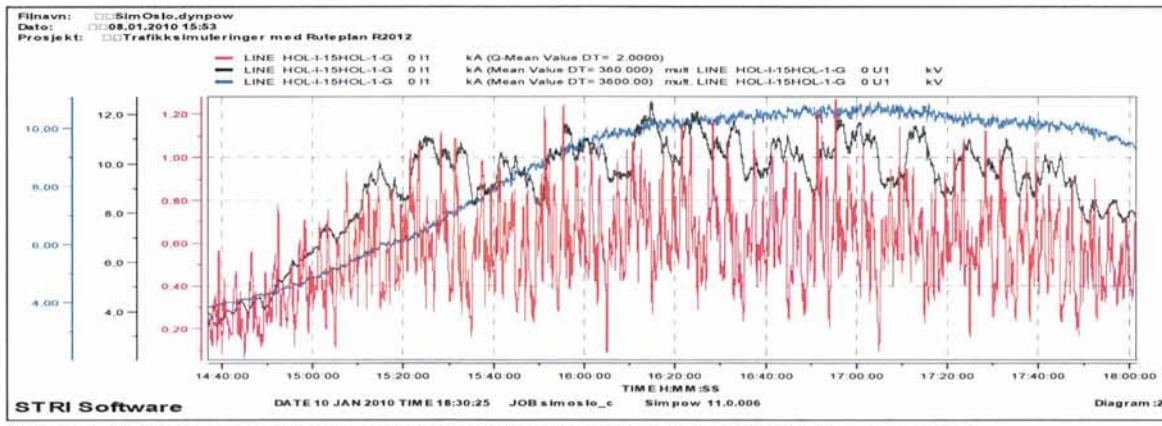
I Tabell 4-8 er det vist spenningen for alle de togene som får spenning under 12,0 kV som er regelverkets krav i en slik unormal driftsituasjon. Ved avrunding av tallene ser en at det egentlig bare er for tog 1683 og 1686 at spenningen kommer under kravet, med en verdi på henholdsvis 11,7 og 11,9 kV. En får se om det finnes tiltak som kan bøte på dette i de neste kapitlene.

Tabell 4-7 Belastning av omformerstasjonene. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for de kritiske tidsperiodene. Trafikksimulering med dagens forhold, men med 12 % fallende statikk for spenningen for de perifere omformerstasjonene. Utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia.

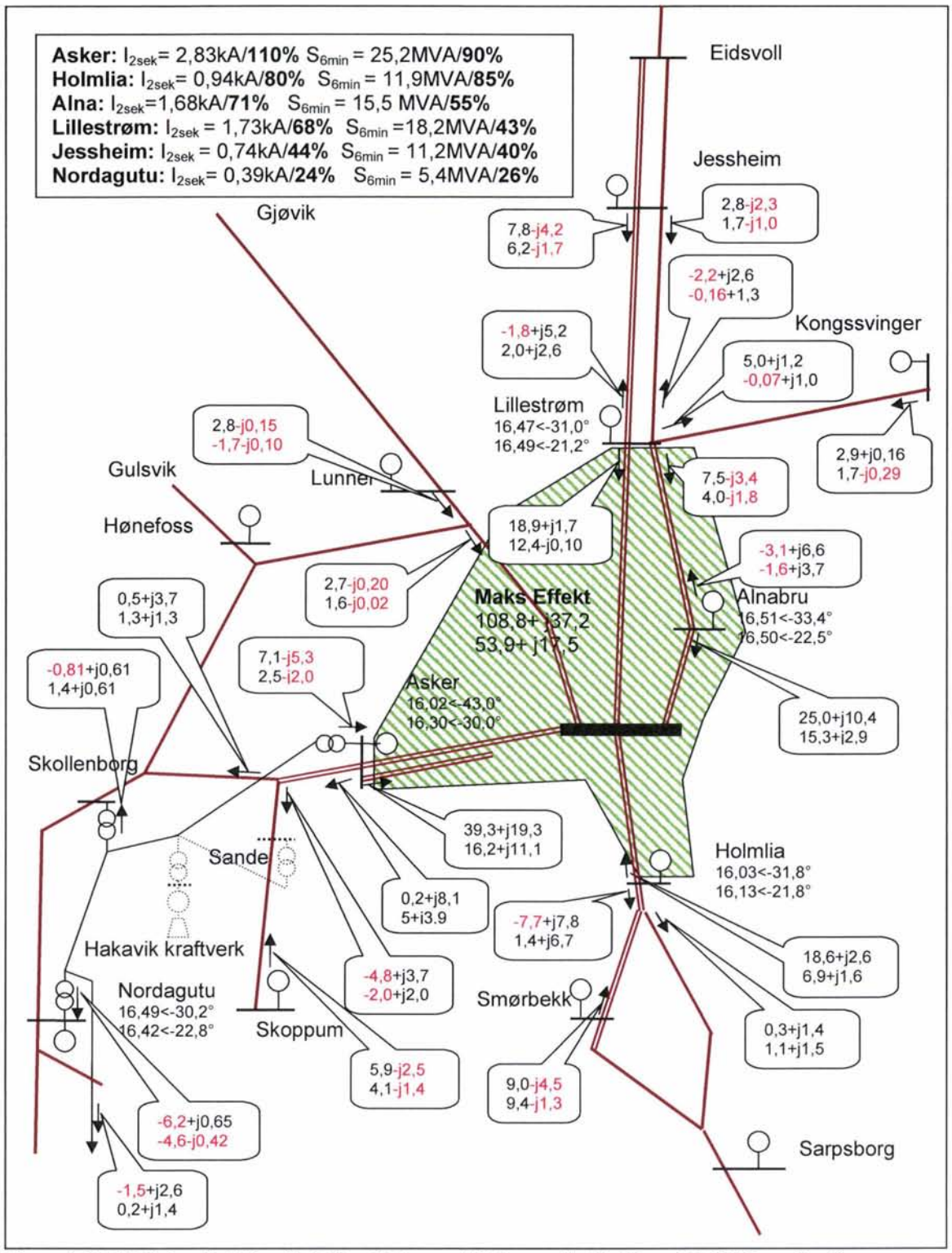
Høyeste belastning av omformerstasjonene								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	2 x 10	2,876	122	46,375	26,362	94	20,365	102
Holmlia	1 x 10	1,268	107	19,910	12,533	90	10,883	109
Alnabru	2 x 10	1,947	82	32,420	15,726	56	13,898	69
Lillestrøm	3 x 12	2,523	99	39,891	22,181	53	18,721	52
Jessheim	2 x 12	1,598	94	26,350	15,192	54	12,804	53
Tangen	2 x 5,8	0,827	66	12,558	5,235	33	3,676	32
Rudshøgda	3,1	0,339	75	4,562	2,196	46	1,202	39
Fåberg	2 x 5,8	0,575	46	9,068	3,177	20	2,035	18
Smørbekk	2 x 12	1,344	79	21,545	12,202	44	10,247	43
Sarpsborg	1 x 12	0,515	61	8,359	5,295	38	4,470	37
Kongsvinger	1 x 5,8	0,500	80	7,420	3,713	46	2,371	41
Lunner	1 x 5,8	0,498	80	7,138	5,868	73	3,674	63
Hønefoss	1 x 5,8	0,317	25	5,032	2,993	37	2,451	42
Nordagutu	2 x 7	0,642	39	10,157	6,549	30	4,875	35
Skoppum	2 x 5,8	0,943	75	14,520	8,139	51	5,066	44
Larvik	2 x 5,8	0,731	59	11,409	5,179	32	3,753	65



Figur 4-11 Kurve som viser belastningen for Holmlia omformerstasjon over hele simuleringsperioden. Rød kurve viser RMS verdi for strømmen og svart og blå kurve er henholdsvis MEAN verdi av 6-minutters og 1-timesverdi av effekten.



Figur 4-12 Kurve som viser belastningen for Holmlia omformerstasjon over hele simuleringsperioden. Rød kurve viser RMS verdi for strømmen og svart og blå kurve er henholdsvis MEAN verdi av 6-minutters og 1-timesverdi av effekten.



Figur 4-13 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området oppstår klokken 16:13:23 og for 6-minuttersverdi opptrer maksimalverdien mellom klokken 16:13:39. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

Tabell 4-8 Tog som får lavere spenning enn 12,0 kV i simuleringen. Materielltype og antall enheter for hvert tog.

Tog	Minimum spenning under 12 kV RMS [kV]	
	1 sekund	2 minutter
1683 Type 75_2	**11,73**	15,00
1686 Type 75_1	**11,93**	15,00
532 Type 75_2	**11,95**	14,54
47 Type 73_2	**11,96**	14,60

4.4 Simulering med 12 % statikk i perifere omformerstasjoner og pådragsreduksjon for alle lokaltog Type 74/75

Det kan være interessant å se om pådragsreduksjon i lokaltogene av Type 74/75 får stor betydning for effektuttaket som skjer. En gir disse togene lov til kun å ta ut 70 % av sin installerte effekt, noe som sannsynligvis vil påvirke kjøretiden lite. Det viser seg at det samlede maksimale effektopptaket og tap i Oslo-området blir på kun 95,8 MW og 35,9 MVAr for momentanverdi og 52,9 MW og 17,1 MVAr for 6-minuttersverdien. Endringen er altså kun rundt 12,8 MVA eller 11 % og altså ikke i nærheten av den store reduksjonen som er gjort for den ene typen tog. Nedenfor viser Tabell 4-9 at dette påvirker spissbelastningen av omformerne i Oslo-området nokså lite, men nok til at en kommer innefor de marginer en har satt. Om dette allikevel skulle være nok til å fjerne faren for utfall av alle sentrale aggregater ved utfall av to aggregater er nok tvilsomt.

Spesielt ser en at Asker og Lillestrøm er blitt lavere belastet, og ser en på belastningen som funksjon av tiden, se henholdsvis Figur 4-14 og Figur 4-15, er det tydelig at kurven for 2-sekundersverdien er blitt noe endret. Det er nå færre store kortvarige belastningstopper. Formen til de andre kurvene derimot ser ut til å være nokså uforandret.

En skulle ha forventet at en endring av tillatt pådrag for de nye lokaltogene skulle ha ført til en større endring av maksimal belastning. For å se på hva som skjer når effekten for togene reduseres tar en ut tog på den strekningen der dette får størst betydning og analyserer dem. Uten tvil vil det være den strekningen gjennom Oslo der togene kjører med størst fart og i stigning at dette får spesielt stor betydning, derfor ser en på et enkeltsett (tog 329) og et dobbeltsett (tog 331), se henholdsvis Figur 4-16 og Figur 4-17. Her ser en at effekten som togene trekker blir betydelig redusert, spesielt i Romeriksporten fra km 45 til 58 blir effektuttaket betydelig lavere. Dette er som forventet, - i Romeriksporten tillates høy hastighet, samtidig som det er stor stigning og forhøyet luftmotstand. Tar en i betrakting den kjøretiden dette tar vil dette bety flere minutter med lavere effekt. Som en også ser blir akselrasjonen heller ikke mye påvirket på mye av strekningen, mest betydning får det i Romeriksporten. Tilsvarende blir hastigheten lite påvirket andre steder enn i nettopp Romeriksporten.

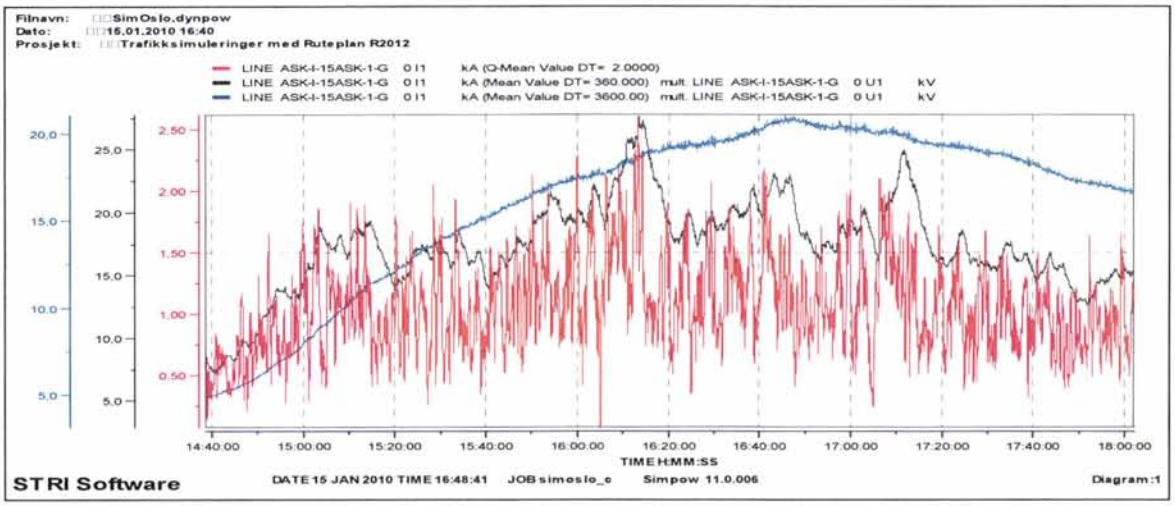
Det er av spesiell interesse å se på hva denne effektreduksjonen får av betydning for kjøretiden og i Figur 4-18 og Figur 4-19 er kjøretid og tilbakelagt distanse vist for henholdsvis tog 329 og 331. Det er svart kurve som viser kjøretiden mellom Asker og Lillestrøm uten pådragsreduksjon og rød med. Den blå kurven viser rutetabellens tid for ankomst og avgang. Betydningen av redusert effektuttak er altså svært liten og som en ser er toget foran ruten flere steder. Bare ved ankomst Skøyen er ruten lagt opp med veldig liten slakk, og forskjellen med og uten pådragsreduksjon er også her liten.

Grunnen til at en ikke ser større endring for omformernes spissbelastning med denne nokså store pådragsreduksjonen, er nok at det tross alt ikke er mer enn anslagsvis 12 tog inn i Oslo-området i den aktuelle tiden. Når disse togene har en viss togfølgetid er ikke sannsynligheten for at de trekker stor effekt samtidig, dessuten vil spredningen være stor.

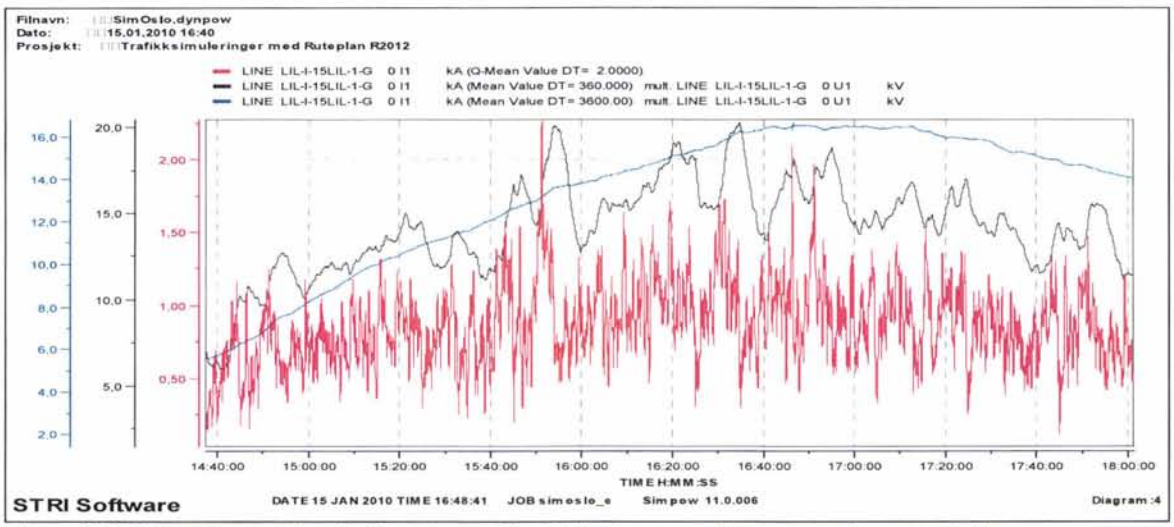
Konklusjonen blir altså at en kan innføre pådragsbegrensing uten at det får særlig stor betydning for kjøretiden, og dessverre heller ikke stor betydning for toppbelastningen. For øvrig er belastningen fremdels stor for omformerstasjonene på Skoppum og Larvik.

Tabell 4-9 Belastning av omformerstasjonene. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for de kritiske tidsperiodene. Trafikksimulering med dagens forhold, men med 12 % fallende statikk i de perifere omformerstasjonene og pådragsreduksjon på 30 % i togesettene av Type 74/75.

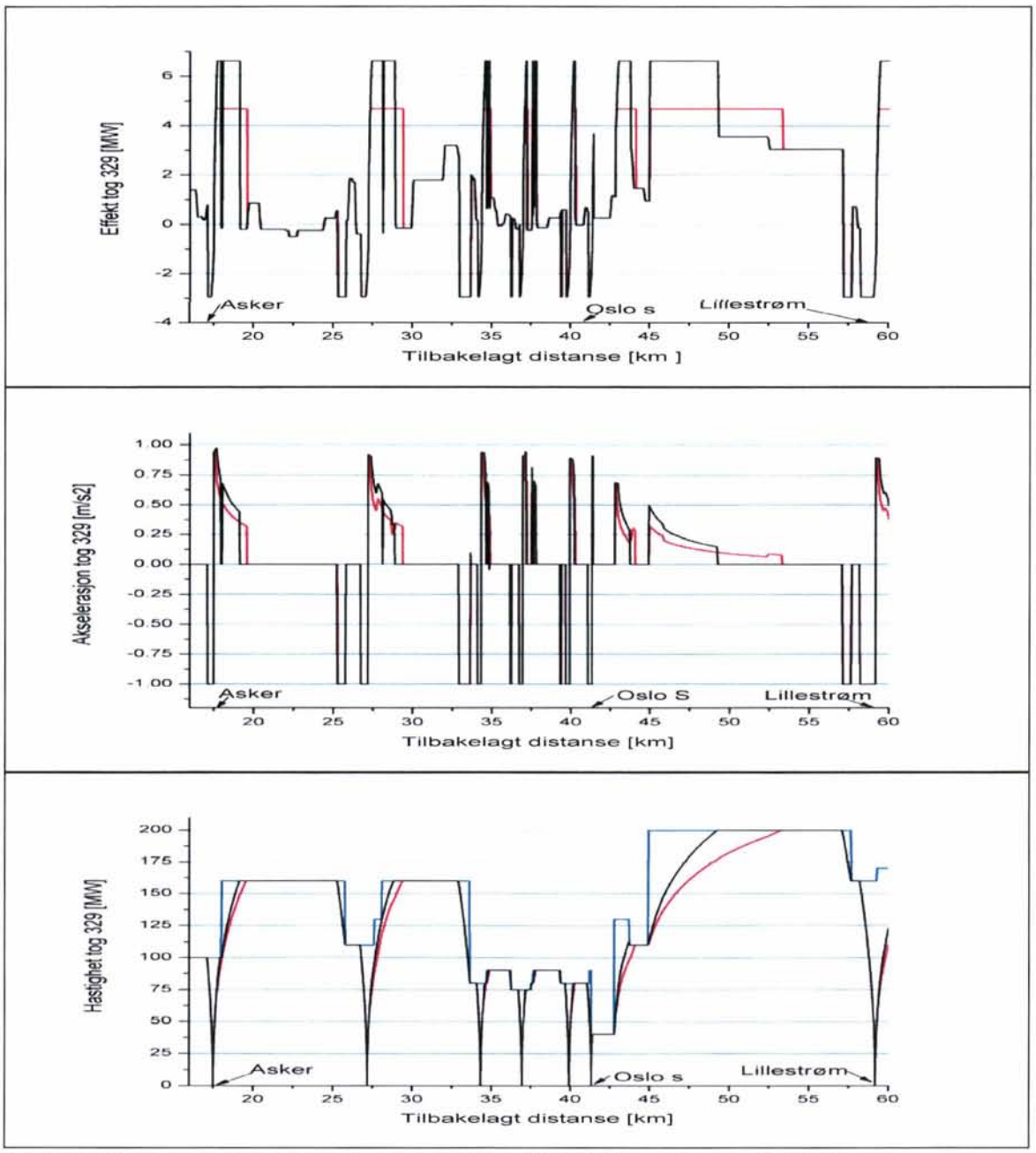
Belastning av omformerstasjonene								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	**3 x 10**	2,599	73	42,940	27,595	66	21,034	70
Holmlia	**2 x 10**	1,741	74	28,764	16,490	59	14,598	73
Alnabru	**2 x 10**	1,391	59	23,005	13,541	48	11,377	57
Lillestrøm	**3 x 12**	2,267	**89**	37,512	20,266	48	16,673	46
Jessheim	**2 x 12**	1,588	**94**	26,147	15,025	54	11,590	48
Tangen	**2 x 5,8**	0,621	50	9,689	4,933	31	3,427	30
Rudshøgda	**3,1**	0,296	66	4,149	2,090	44	1,147	37
Fåberg	**2 x 5,8**	0,507	41	8,099	3,048	19	1,940	17
Smørbekk	**2 x 12**	1,212	**71**	19,475	11,226	40	9,576	40
Sarpsborg	**1 x 12**	0,486	57	7,903	4,915	35	3,865	32
Kongsvinger	**1 x 5,8**	0,494	31	7,349	3,670	46	2,259	39
Lunner	**1 x 5,8**	0,493	79	7,053	5,772	72	3,517	61
Hønefoss	**1 x 5,8**	0,287	23	4,537	2,859	36	2,264	39
Nordagutu	**2 x 7**	0,597	36	9,458	5,890	27	4,343	31
Skoppum	**2 x 5,8**	0,888	**71**	13,645	7,661	48	4,657	80
Larvik	**2 x 5,8**	0,658	**53**	10,294	5,028	31	3,542	61



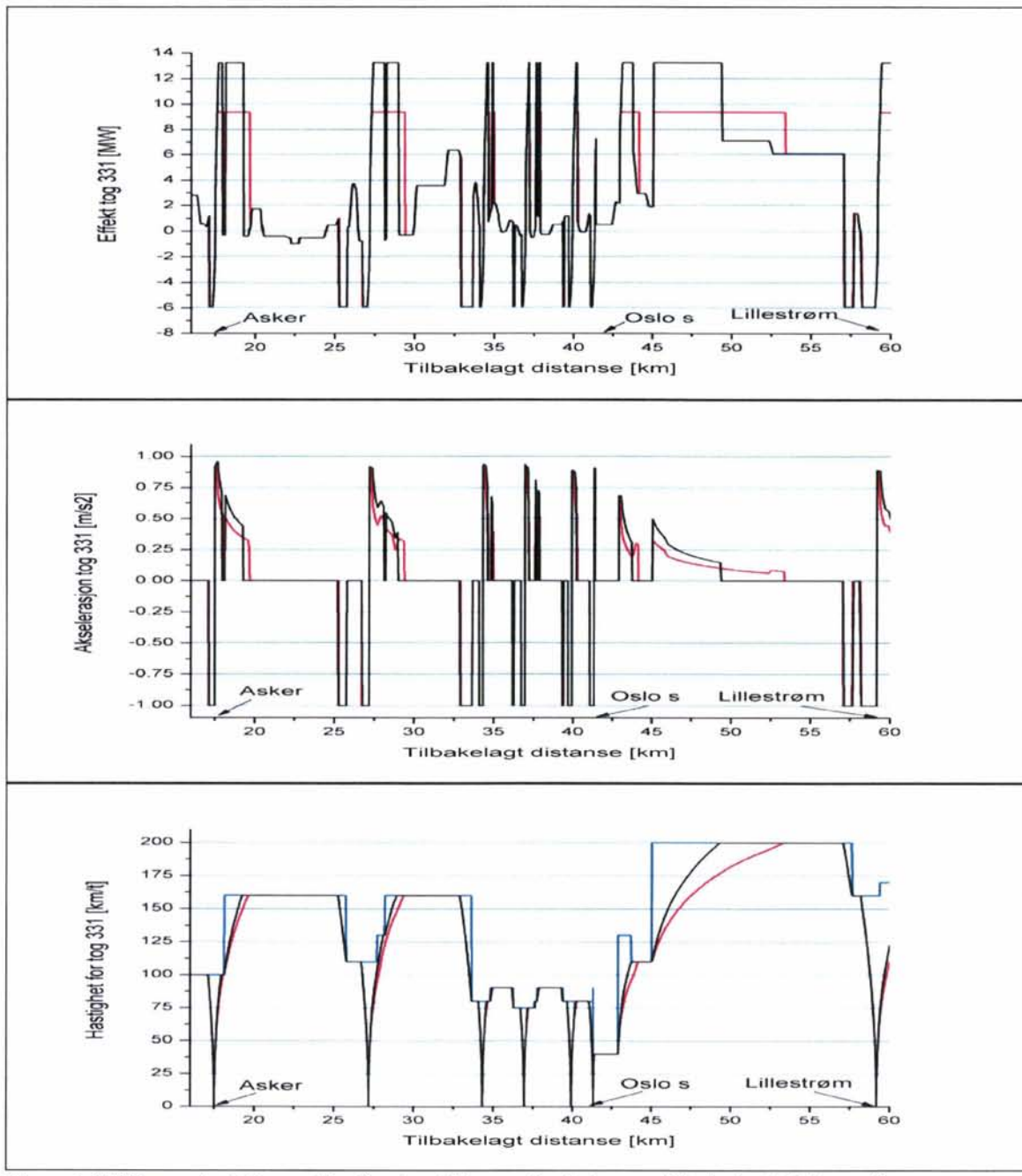
Figur 4-14 Kurve som viser belastningen for Asker omformerstasjon over hele simuleringsperioden. Rød kurve viser RMS verdi for strømmen og svart og blå kurve er henholdsvis MEAN verdi av 6-minutters og 1-timesverdi av effekten.



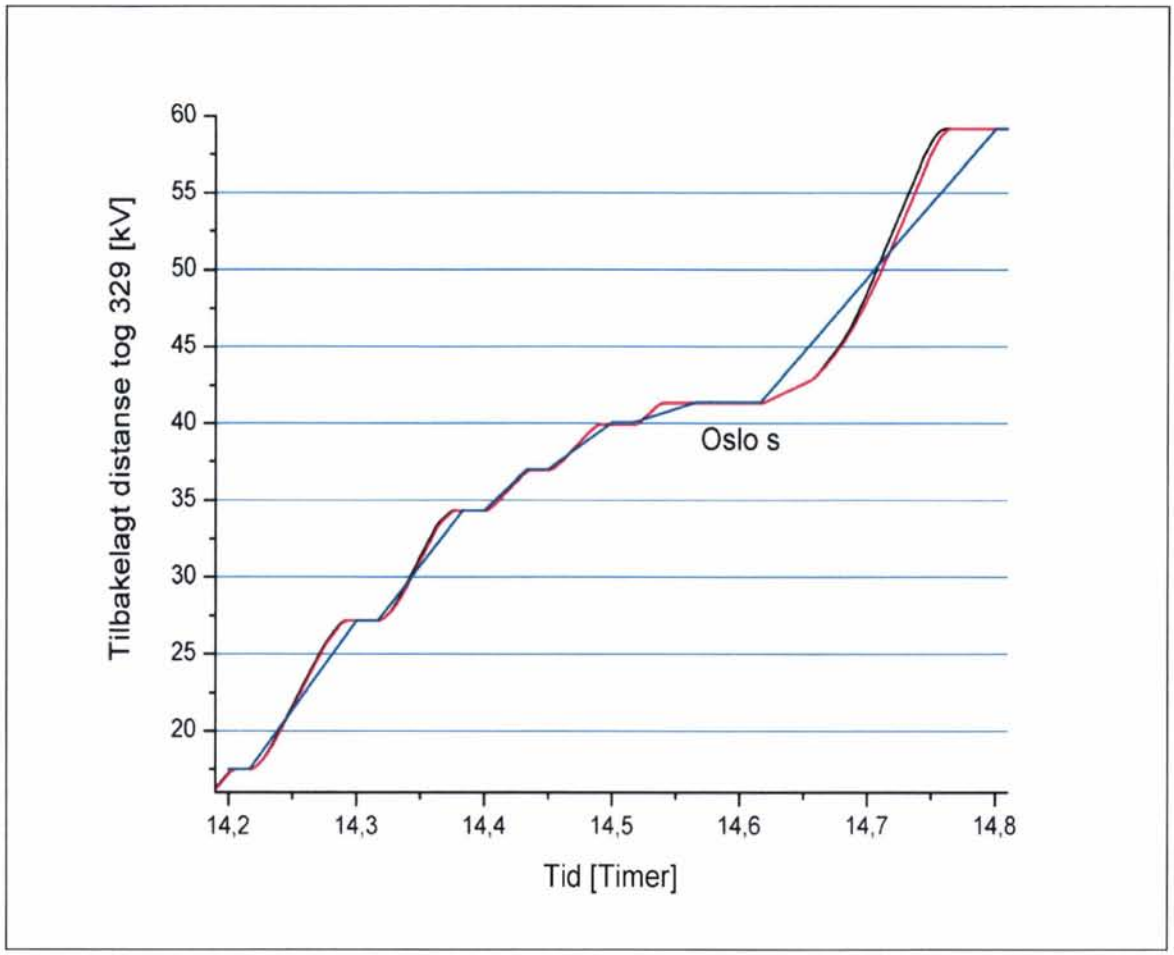
Figur 4-15 Kurve som viser belastningen for Lillestrøm omformerstasjon over hele simuleringsperioden. Rød kurve viser RMS verdi for strømmen og svart og blå kurve er henholdsvis MEAN verdi av 6-minutters og 1-timesverdi av effekten.



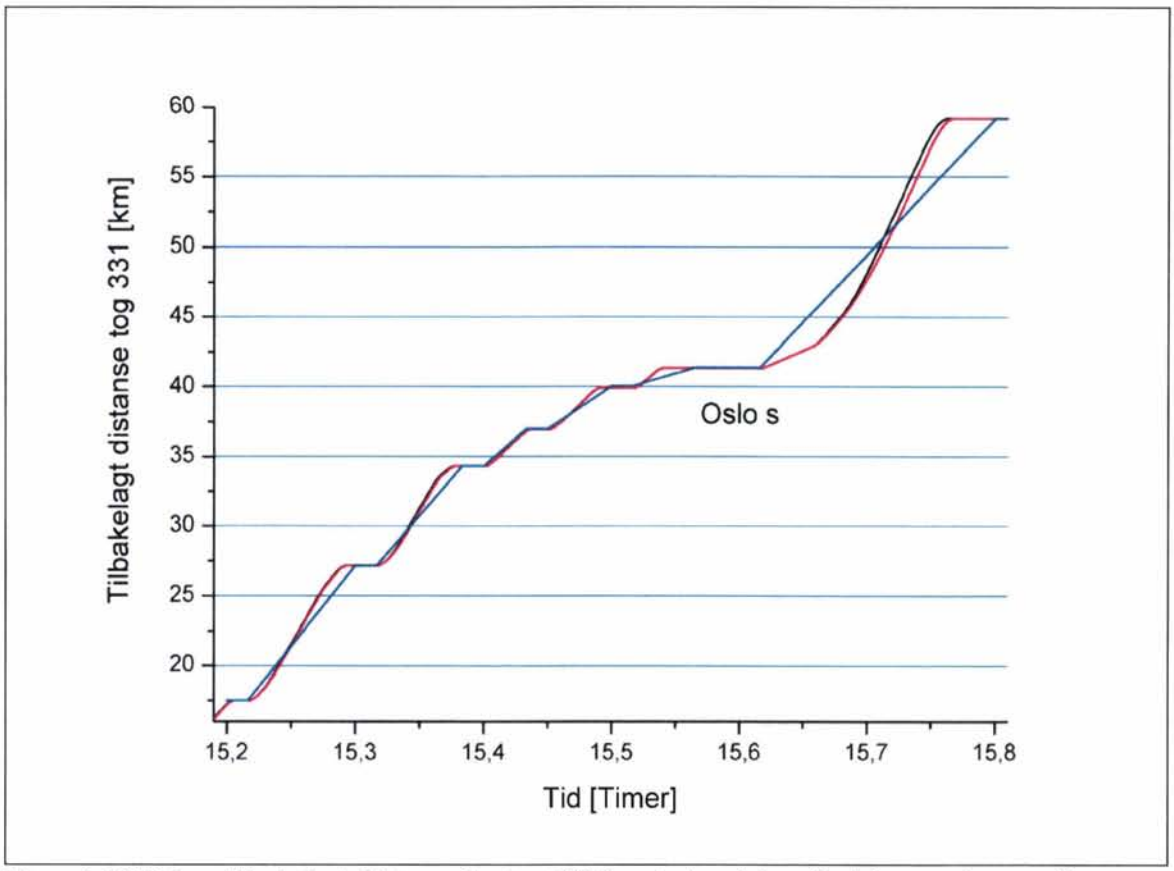
Figur 4-16 Noen utvalgte verdier for tog 329 som funksjon av tilbakelagt distanse fra startposisjon. Sort kurve viser verdiene uten pådragsbegrensning og rød kurve der bare 70 % av ytelsen kan benyttes. Blå kurve viser skiltet hastighet.



Figur 4-17 Noen utvalgte verdier for tog 331 som funksjon av tilbakelagt distanse fra startposisjon. Sort kurve viser verdiene uten pådragsbegrensning og rød kurve der bare 70 % av ytelsen kan benyttes. Blå kurve viser skiltet hastighet.



Figur 4-18 Tid og tilbakelagt distanse for tog 329 fra startposisjon. Sort kurve viser verdiene uten pådragsbegrensning og rød kurve der bare 70 % av ytelsen kan benyttes. Blå kurve viser teoretisk forflytning i henhold til ankomst- og avgangstid.



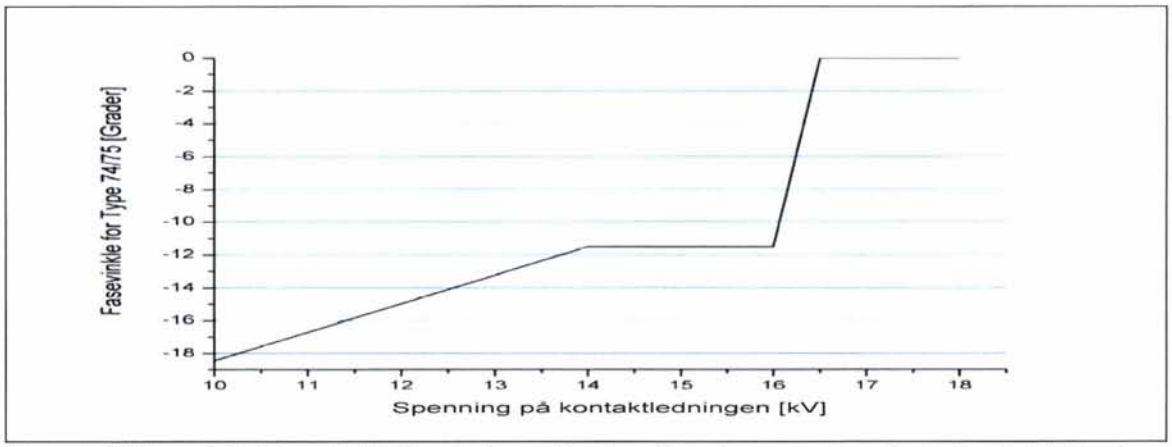
Figur 4-19 Tid og tilbakelagt distanse for tog 329 fra startposisjon. Sort kurve viser verdiene uten pådragsbegrensning og rød kurve der bare 70 % av ytelsen kan benyttes. Blå kurve viser teoretisk forflytning i henhold til ankomst- og avgangstid.

4.5 Simulering med 12 % statikk i perifere omformerstasjoner og tog Type 74/75 med reaktiv kompensering

Det antas at utnyttelsen av omformerstasjonene kan bedres om alle tog av Type 74 og 75 får reaktiv kompensering. I Figur 4-20 er det vist hvorledes togene vil styre fasevinkelen når spenningen på strømavtageren varierer i denne simuleringen. Som en ser begynner den reaktive kompenseringen så høyt som ved den spenningen som er settverdi for spenningsregulatorene i omformerne, altså 16,5 kV. Da bidrar togene med å kompensere reaktiv effekt selv når spenningen er normal. Ved en spenning på 16,0 kV er cos $\varphi = 0{,}98$ og ved 10 kV er den cos $\varphi = 0{,}95$. Kompenseringen er altså ikke veldig stor ved de spenninger som typisk oppstår i Oslo-området, og selv ved lave spenninger som oppstår ute på fjernstrekningene er heller ikke dette mye.

I Tabell 4-10 ser en den høyeste belastningen som oppstår på omformerstasjonene, og når dette sammenlignes med belastningen som oppstod før tiltakket ble testet, se avsnitt 4.2, ser en at forskjellene ikke ble særlig store. Det er først og fremst Asker, Alnabru, Lillestrøm, Jessheim og Tangen som belastes noe mindre for 2-sekunderssverdiene. For de andre omformerstasjonene er endringene små. Figur 4-21 viser effektflyten for Oslo-området og heller ikke her er endringene store. Noen avganger har fått noe mindre reaktiv effekt enn tidligere, men for de fleste avganger er det ingen endring. Den største endringen ser en for fasevinklene for flere omformerstasjoner, som nå har fått betydelig mindre verdi for kortvarig

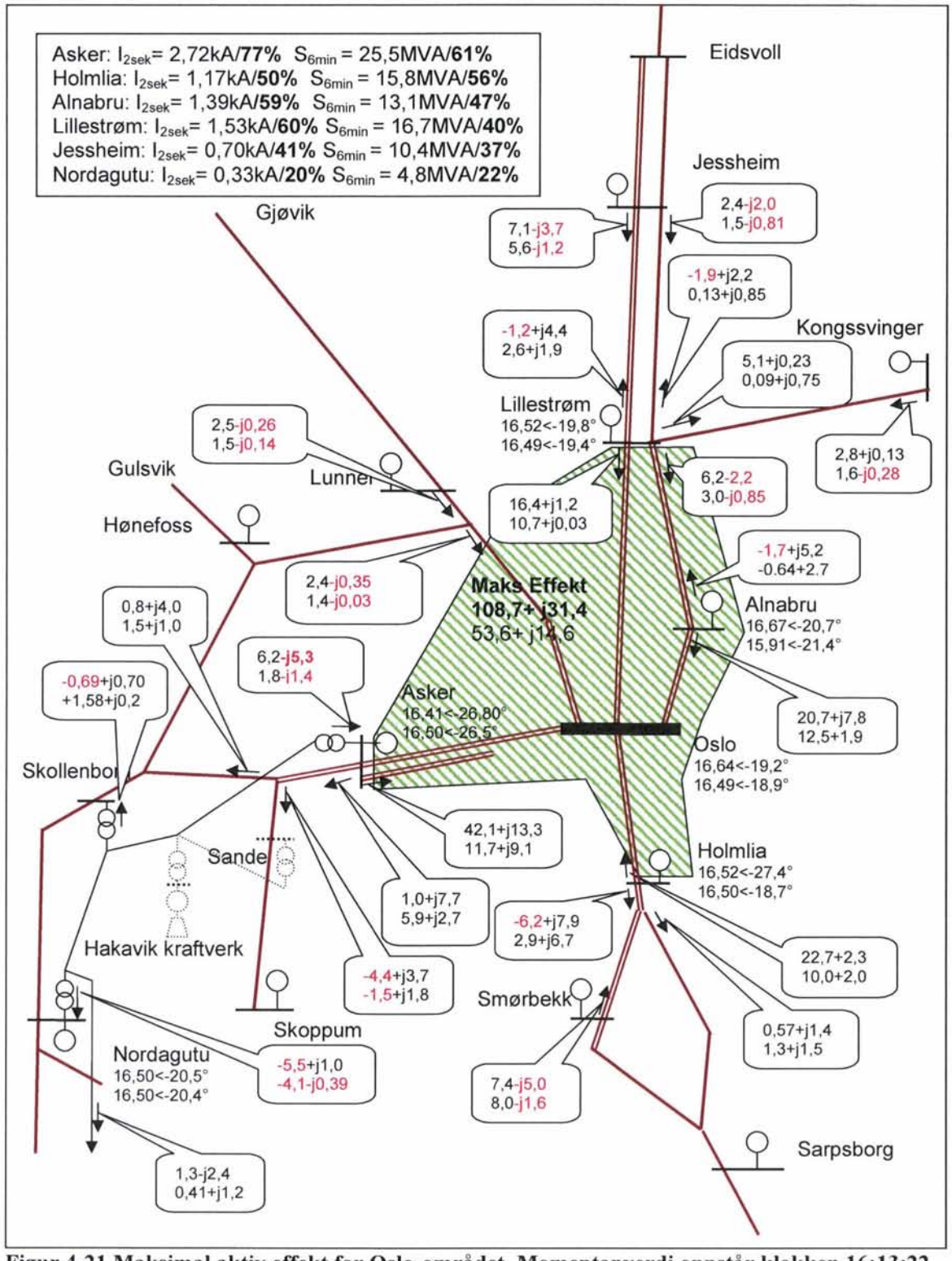
belastning. Endringen ser altså ut til å være minimal og det er nok nødvendig å gi enda større kompensering for å få noe lavere reaktiv belastning. På den annen side kan ikke cos φ sies å være særlig stor i utgangspunktet. Dette tiltaket vil nok ha større betydning i en unormal driftsituasjon med lave spenninger.



Figur 4-20 Fasevinkel benyttet i simuleringen for å undersøke om en kan forbedre lastflyten i normal drift om togsettene Type 74/75 selv kan bidra med reaktiv effekt.

Tabell 4-10 Belastning av omformerstasjonene. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for de kritiske tidsperiodene. Trafikksimulering med dagens forhold, men med 12 % fallende statikk i de perifere omformerstasjonene og reaktiv kompensering i togsettene Type 74/75.

Belastning av omformerstasjonene - Reaktiv kompensering i Type 74/75								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	3 x 10	2,784	79	45,972	26,147	62	20,188	67
Holmlia	2 x 10	1,752	74	28,923	16,454	59	14,559	73
Alnabru	2 x 10	1,588	67	26,328	13,420	48	11,320	57
Lillestrøm	3 x 12	2,386	94	38,965	20,107	48	16,634	46
Jessheim	2 x 12	1,517	89	25,012	14,290	51	11,741	49
Tangen	2 x 5,8	0,751	60	11,743	4,984	31	3,485	30
Rudshøgda	3,1	0,347	77	4,929	1,991	41	1,123	36
Fåberg	2 x 5,8	0,596	48	9,640	3,228	20	2,019	17
Smørbekk	2 x 12	1,227	72	19,743	11,063	40	9,924	41
Sarpsborg	1 x 12	0,496	58	8,036	4,881	35	3,854	32
Kongsvinger	1 x 5,8	0,495	31	7,361	3,631	45	2,281	39
Lunner	1 x 5,8	0,494	79	7,076	5,746	72	3,534	61
Hønefoss	1 x 5,8	0,280	22	4,414	2,834	35	2,272	39
Nordagutu	2 x 7	0,591	36	9,491	5,840	27	4,397	31
Nelaug	2 x 5,8	0,570	46	8,847	6,392	40	3,207	28
Skoppum	2 x 5,8	0,933	75	14,586	7,533	47	4,653	80
Larvik	2 x 5,8	0,702	56	11,080	4,881	31	3,572	62



Figur 4-21 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området. Momentanverdi oppstår klokken 16:13:22 og for 6-minutters effekt opptrer maksimal verdi klokken 16:13:39. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

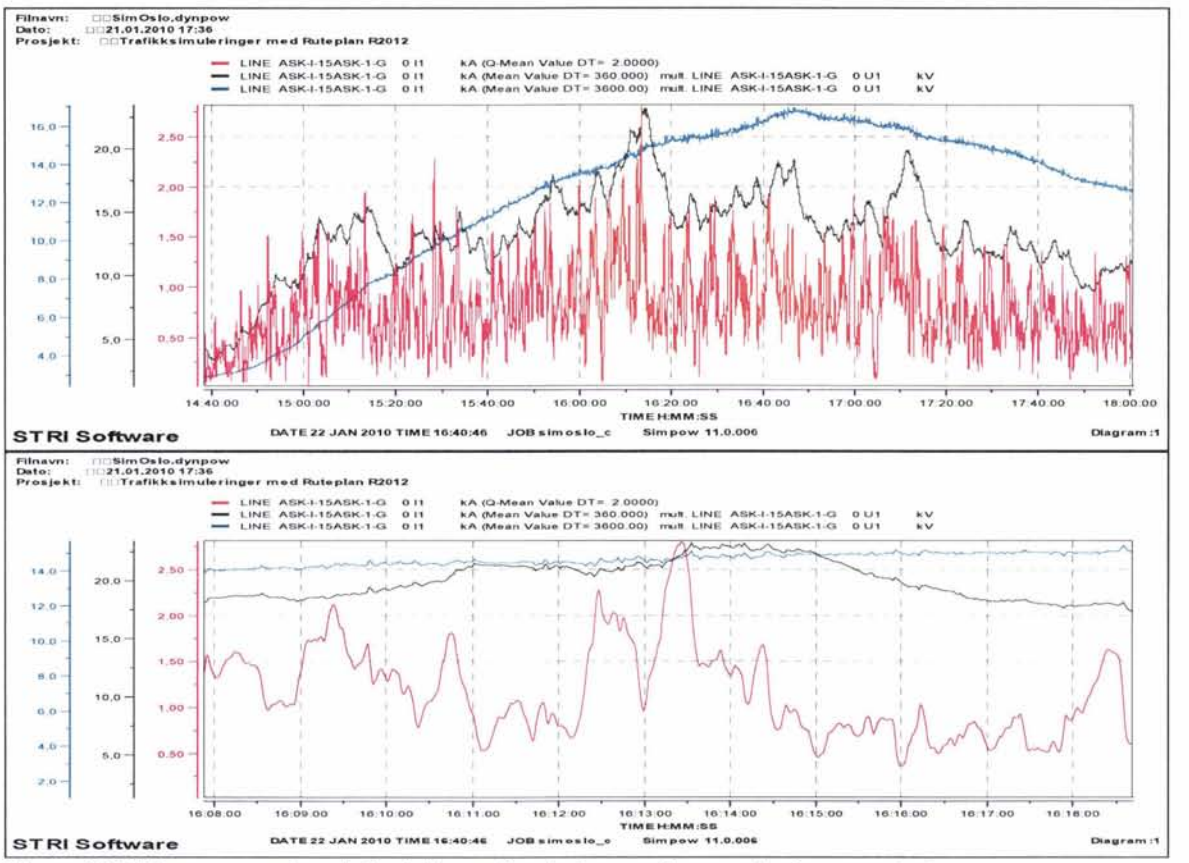
4.6 Simulering med 12 % statikk i perifere omformerstasjoner og økt ytelse i Hakavik til 15 MW

Hakavik kraftverk skal renoveres og større aggregater vurderes å installeres. Dette vil kunne føre til redusert belastning av Asker omformerstasjon og større bidrag til Oslo-området i kritiske situasjoner. Det er gjort en trafikksimulering der den nye generatoren i Hakavik yter 15 MW og 5 MVAr. I simuleringen mottar den rundt 4,0 MVAr og ved bedre undersøkelse og optimering av lastflyten ville det sikkert vært bedre om den produsert reaktiv effekt, noe som ville vært til større hjelp i et kraftsystem der generatorene (i omformerstasjonene) må produserer mye reaktiv effekt. Toppbelastningen er vist i Tabell 4-11 og en ser at Asker blir noe mindre belastet, 7 % -poeng eller en reduksjon på 8 %, sammenlignet med simulering uten Hakavik, se avsnitt 4.2. De øvrige omformerstasjonene i Oslo-området blir også noe mindre belastet. Figur 4-22 viser at formlikheten mellom kurvene for belastning som funksjon av tiden er veldig lik med og uten Hakavik, sammenlign med figuren i avsnitt 4.2.

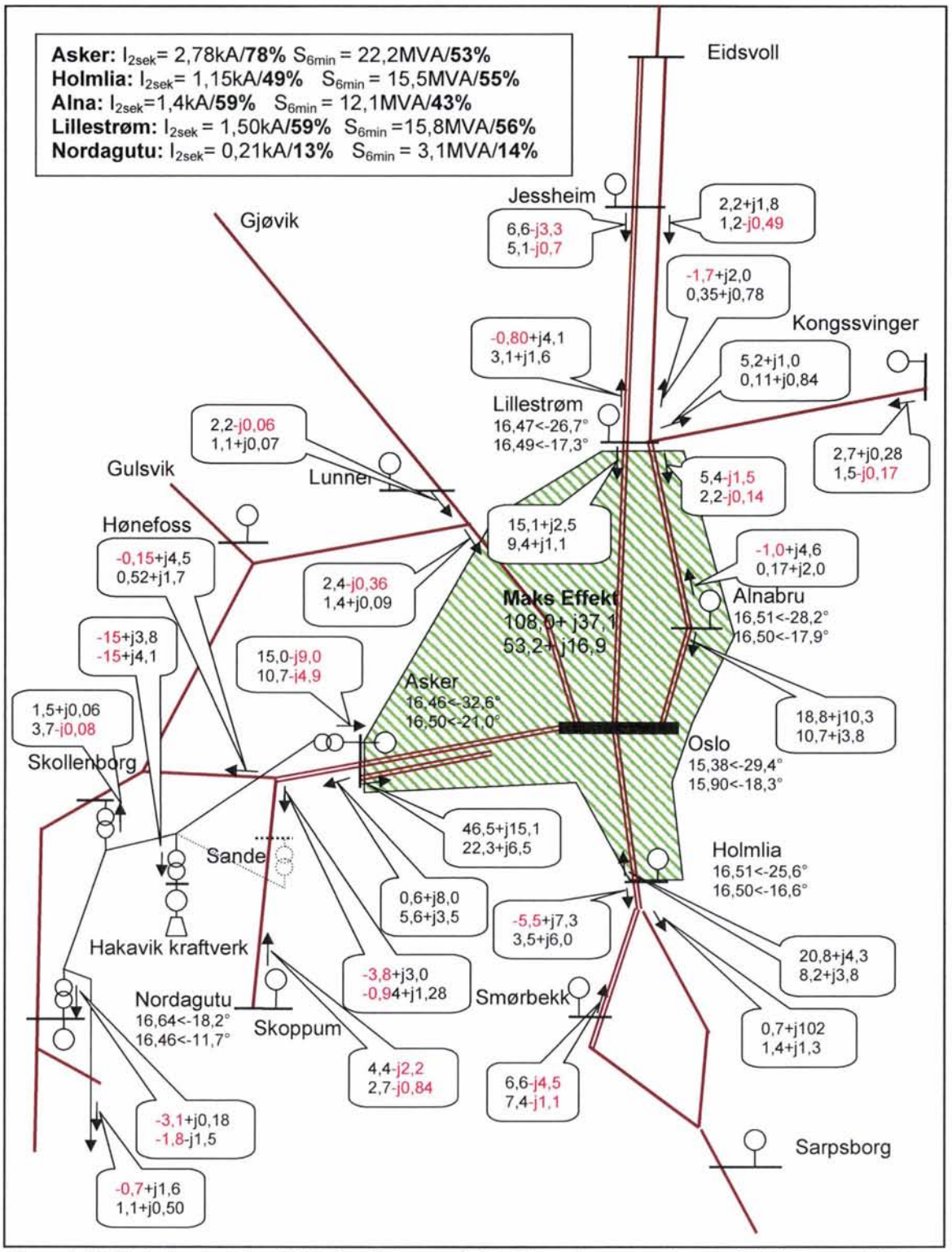
Når det gjelder effektflyten når belastningen i Oslo-området er på sitt største, se Figur 4-23, ser en at det fra Asker og inn mot Oslo nå går en del mer effekt, ca 3,8 MW, enn i tilfellet uten Hakavik. Effekten fra Hakavik fører altså til at Asker omformerstasjon produserer noe mindre effekt og at det samtidig leveres mer effekt inn mot Oslo. Denne effekten avlaster de andre stasjonene noe og en ser at noe mindre effekt flyter inn mot Oslo fra Lillestrøm og Holmlia. En ser at også de mer perifere omformerstasjonene som Smørbekk og Jessheim blir litt avlastet. Effekten fra Hakavik jevner seg altså ut over hele Oslo-området. En ser også en tendens til at Skollenborg, Nordagutu og Neslandsvatn transformatorstasjoner mater effekt inn i fjernledningen. Hva dette skyldes er ikke undersøkt, sannsynligvis er dette kun kortvarig.

Tabell 4-11 Belastning av omformerstasjonene. Prosentvis belastning av innsatt ytelse for de kritiske tidsperiodene. Trafikksimulering med dagens forhold, men med 12 % fallende statikk for spenningen for de perifere omformerstasjonene og Hakavik i drift med 15 MW.

Belastning av omformerstasjonene								
		Strøm			Effekt			
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek	2-sek		6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	3 x 10	2,798	79	46,178	23,267	55	16,962	57
Holmlia	2 x 10	1,790	76	29,551	16,255	58	14,402	72
Alnabru	2 x 10	1,402	59	23,182	13,416	48	10,923	55
Lillestrøm	3 x 12	2,660	**105**	43,851	20,027	48	16,108	45
Jessheim	2 x 12	1,598	**94**	26,322	14,764	53	12,061	50
Tangen	2 x 5,8	0,819	**66**	12,420	4,974	31	3,376	29
Rudshøgda	3,1	0,335	75	4,509	2,143	45	1,148	37
Fåberg	2 x 5,8	0,574	46	9,042	3,074	19	1,923	17
Smørbekk	2 x 12	1,198	**71**	19,246	10,354	37	8,570	36
Sarpsborg	1 x 12	0,482	57	7,837	4,719	34	3,845	32
Kongsvinger	1 x 5,8	0,492	31	7,297	3,571	45	2,204	38
Lunner	1 x 5,8	0,497	80	7,092	5,728	72	3,404	59
Hønefoss	1 x 5,8	0,262	21	4,175	2,634	33	1,950	34
Nordagutu	2 x 7	0,477	29	7,514	4,676	21	3,114	22
Skoppum	2 x 5,8	0,892	**71**	13,668	7,174	45	4,181	72
Larvik	2 x 5,8	0,733	**59**	11,313	4,777	30	3,021	52



Figur 4-22 Kurve som viser belastningen for Asker omformerstasjon over hele simuleringsperioden (øverst) og for perioden med størst belastning (nederst). Rød kurve viser RMS verdi for strømmen og svart og blå kurve er henholdsvis MEAN verdi av 6-minutters og 1-timesverdi av effekten.



Figur 4-23 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området. Høyeste momentanverdi i Oslo-området oppstår klokken 16:13:23 og for 6-minutters effekt opptrer maksimalverdien mellom klokken 16:13:39. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

5 STATISK LASTFLYT OG TILTAK TIL FORBEDRET EFFEKTUTVEKSLING

Når en her skal se på lastfordelingen mellom omformerstasjonene for høyeste forekommende 6-minuttersverdi for Oslo-området vil systemet være nokså høyt belastet, mellom 50 og 60 % for de sentrale omformerstasjonene. En vil i normal drift ikke se belastingsverdier som kan føre til overbelastning, og selv med utfall av ett aller to aggregater vil en kanskje ikke få for høye belastninger. Først når en belaster systemet med de høyeste kortvarige effekten får en fare for overbelastinger. Så lenge en gjør studiene på systemet når det er moderat høyt belastet, som med 6-minuttersverdier, får en se på undersøkelsene her som mer kvalitative. Trafikksimuleringer med de tiltakene en har kommet frem til som de beste vil vise om utfall av aggregater vil kunne føre til utfall av hele kraftsystemet.

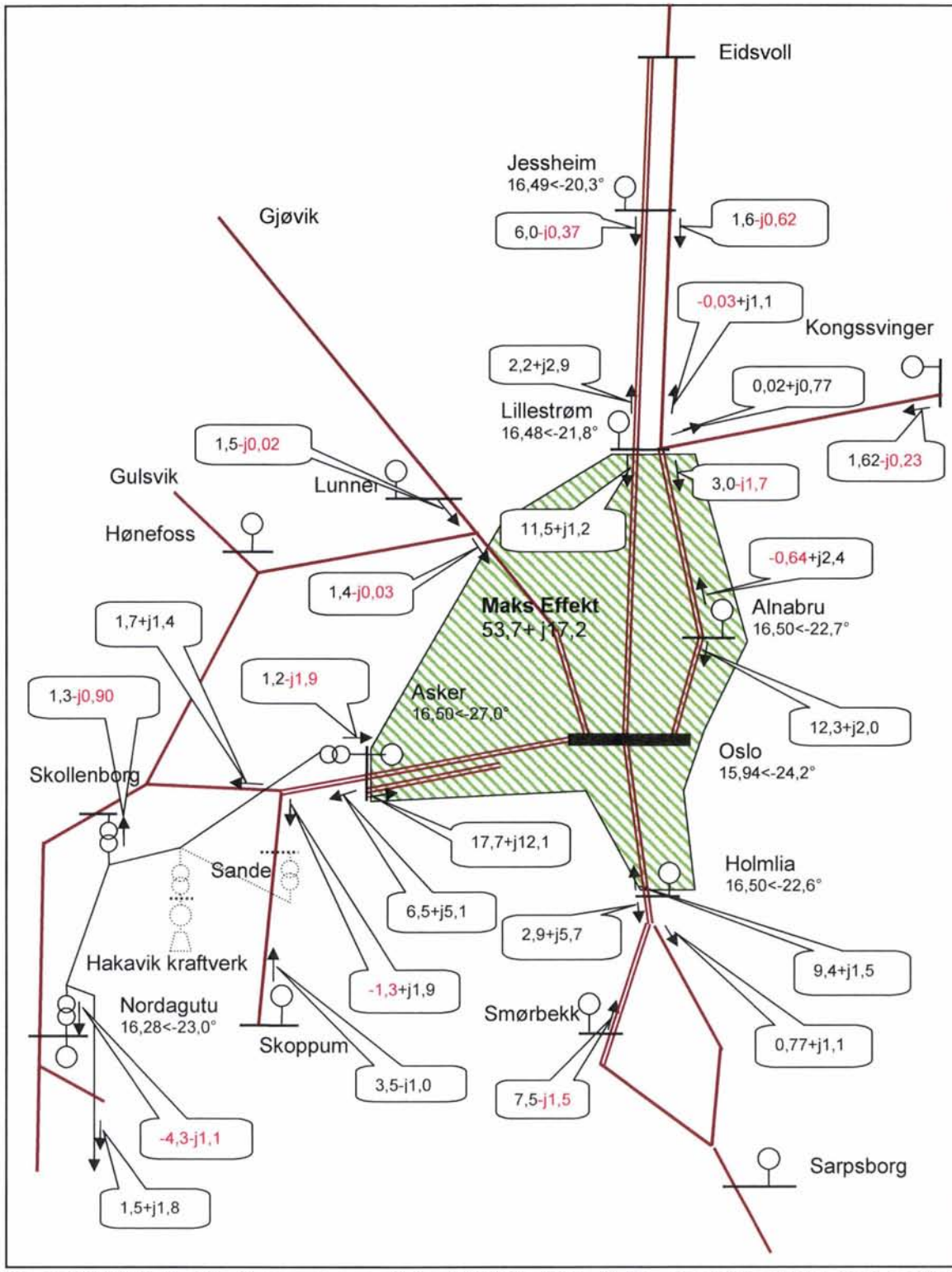
Det en først og fremst må ta sikte på å oppnå her, er justeringer av parametere for å oppnå en jevnest mulig belastning av aggregatene. Det vil si at stasjoner med tre aggregater belastes 50 % mer enn stasjoner med to aggregater. Muligens vil en tillate at Lillestrøm og Jessheim belastes noe mer siden disse har statiske omformere som ikke kan overbelastes. Samtidig bør den reaktive effektflyten reduseres så mye som mulig. En tar først og fremst sikte på at de parametrene en kommer frem til kan være felles for alle omformerstasjoner.

5.1 Utgangspunkt for undersøkelsene

I avsnitt 1.5.2 ble det forklart hvordan en vil undersøke kraftsystemet med en modell som erstatter togene med laster på hver matestrekning. Nedenfor viser Tabell 5-1 hvordan omformerstasjonene belastes med den statiske modellen. Det er øyeblikket der selve Oslo-området belastes på sitt høyeste som er undersøkt. For sammenligningens skyld er det vist den høyeste belastningen for 6-minuttersverdien for Oslo-området fra trafikksimuleringen i avsnitt 4.2 der høyeste 6-minuttersverdi oppstår klokken 16:13:37. En kan da se at forskjellen mellom simuleringen og den statiske lastflyten ikke er stor. Asker blir belastet en del mer i den statiske modellen og Nelaug blir belastet en del mindre. I Figur 5-1 er det laget et enlinjeskjema som viser belastningen. Av dette får en si at metodikken med en Π-ekvivalent førte frem. Avhengigheten mellom spenning og effektopptak er satt til MP = MQ = 1, se formel i avsnitt 1.5.2. Videre er cos φ satt til 0,96. Dette gir best samsvar mellom statisk lastflyt og trafikksimuleringer. Det er disse verdiene som blir benyttet i de videre prinsipielle undersøkelsene.

Tabell 5-1 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og sammenligning med trafikksimuleringen. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformerstasjon	Innsatt ytelse	Trafikksimulering		Statisk lastflyt			
		6-minutter		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	27,075	64	29,891	71	23,002	19,086
Holmlia	**2 x 10**	15,897	57	14,251	51	12,293	7,210
Alnabru	**2 x 10**	13,228	47	12,474	45	11,669	4,402
Lillestrøm	**3 x 12**	16,801	40	17,212	41	16,641	4,411
Jessheim	**2 x 12**	10,510	38	10,651	38	10,503	1,739
Tangen	**2 x 5,8**	3,093	19	3,1481	20	3,160	0,082
Rudshøgda	**3,1**	0,975	20	0,979	20	0,926	0,320
Fåberg	**2 x 5,8**	1,905	12	1,871	12	1,847	-0,277
Smørbekk	**2 x 12**	9,948	36	9,57	34	9,562	-0,325
Sarpsborg	**1 x 12**	3,861	28	4,068	29	4,067	0,012
Kongsvinger	**1 x 5,8**	1,612	20	1,644	21	1,627	-0,232
Lunner	**1 x 5,8**	2,519	31	2,356	29	2,343	0,254
Hønefoss	**1 x 5,8**	2,108	26	2,165	27	2,166	-0,112
Nordagutu	**2 x 7**	4,740	22	5,133	23	4,844	1,691
Nelaug	**2 x 5,8**	5,652	35	3,386	21	3,385	-0,054
Skoppum	**2 x 5,8**	3,762	24	3,864	24	3,868	-0,094
Larvik	**2 x 5,8**	3,264	20	2,998	19	2,872	-0,864



Figur 5-1 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

5.2 Innstilling av spenningsregulatorer for sentrale omformerstasjoner

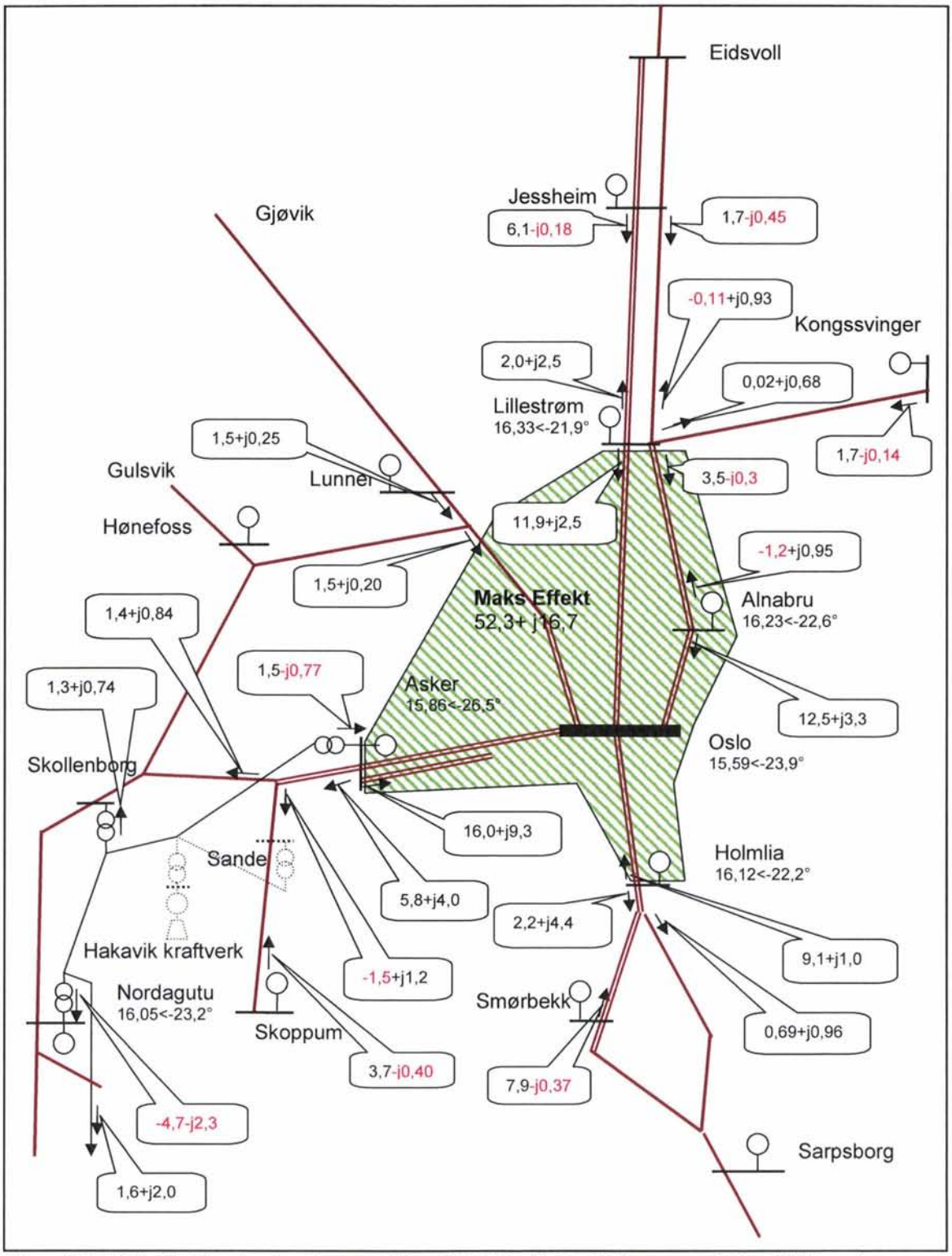
For å finne passende innstilling av statikken for spenningsregulatorene for omformerstasjonene i Oslo-området forsøker en seg frem med 8, 12 og 16 % statikk. De perifere omformerne har 12 % statikk (og 24 % ved drift av bare ett av to aggregater) og en velger i første omgang lik innstilling for alle stasjonene i Oslo.

5.2.1 Fallende statikk på 8 % for de sentrale omformerstasjonene og 12 % for de perifere

Nedenfor viser Tabell 5-2 belastningen for alle omformerstasjoner når stasjonene i Oslo-området har 8 % fallende statikk og Figur 5-2 viser effektflyten mellom stasjonene. Som en kan se reduseres belastningen for Asker, Holmlia og Alnabru, mens Lillestrøm og Jessheim før noe økt belastning. For de øvrige omformerstasjonene er endringene små, men en legger spesielt merke til at Nordagutu nå leverer 2 % -poeng mer effekt. Noe mer effekt kan en altså få utvekslet mellom Nordagutu og Asker om de begge har fallende statikk.

Tabell 5-2 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og sammenligning med simuleringen med 0 % statikk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformerstasjon	Innsatt ytelse	0 % statikk for sentrale stasjoner		Statisk lastflyt med 8 % statikk for sentrale stasjoner og 12 % for perifere stasjoner			
		6-minutter		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	3 x 10	29,891	71	24,746	59	20,329	14,110
Holmlia	2 x 10	14,251	51	12,485	45	11,266	5,368
Alnabru	2 x 10	12,474	45	12,088	43	11,317	4,248
Lillestrøm	3 x 12	17,212	41	18,354	44	17,175	6,443
Jessheim	2 x 12	10,651	38	10,881	39	10,652	2,214
Tangen	2 x 5,8	3,148	20	3,203	20	3,198	0,163
Rudshøgda	3,1	0,979	20	0,986	21	0,932	0,323
Fåberg	2 x 5,8	1,871	12	1,879	12	1,858	-0,278
Smørbekk	2 x 12	9,57	34	10,054	36	10,019	0,826
Sarpsborg	1 x 12	4,068	29	4,120	29	4,119	0,119
Kongsvinger	1 x 5,8	1,644	21	1,663	21	1,656	-0,147
Lunner	1 x 5,8	2,356	29	2,461	31	2,405	0,521
Hønefoss	1 x 5,8	2,165	27	2,243	28	2,237	0,152
Nordagutu	2 x 7	5,133	23	5,866	27	5,100	2,898
Nelaug	2 x 5,8	3,386	21	3,380	21	3,377	-0,100
Skoppum	2 x 5,8	3,864	24	4,042	25	4,013	0,474
Larvik	2 x 5,8	2,998	19	3,036	19	2,948	-0,726



Figur 5-2 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

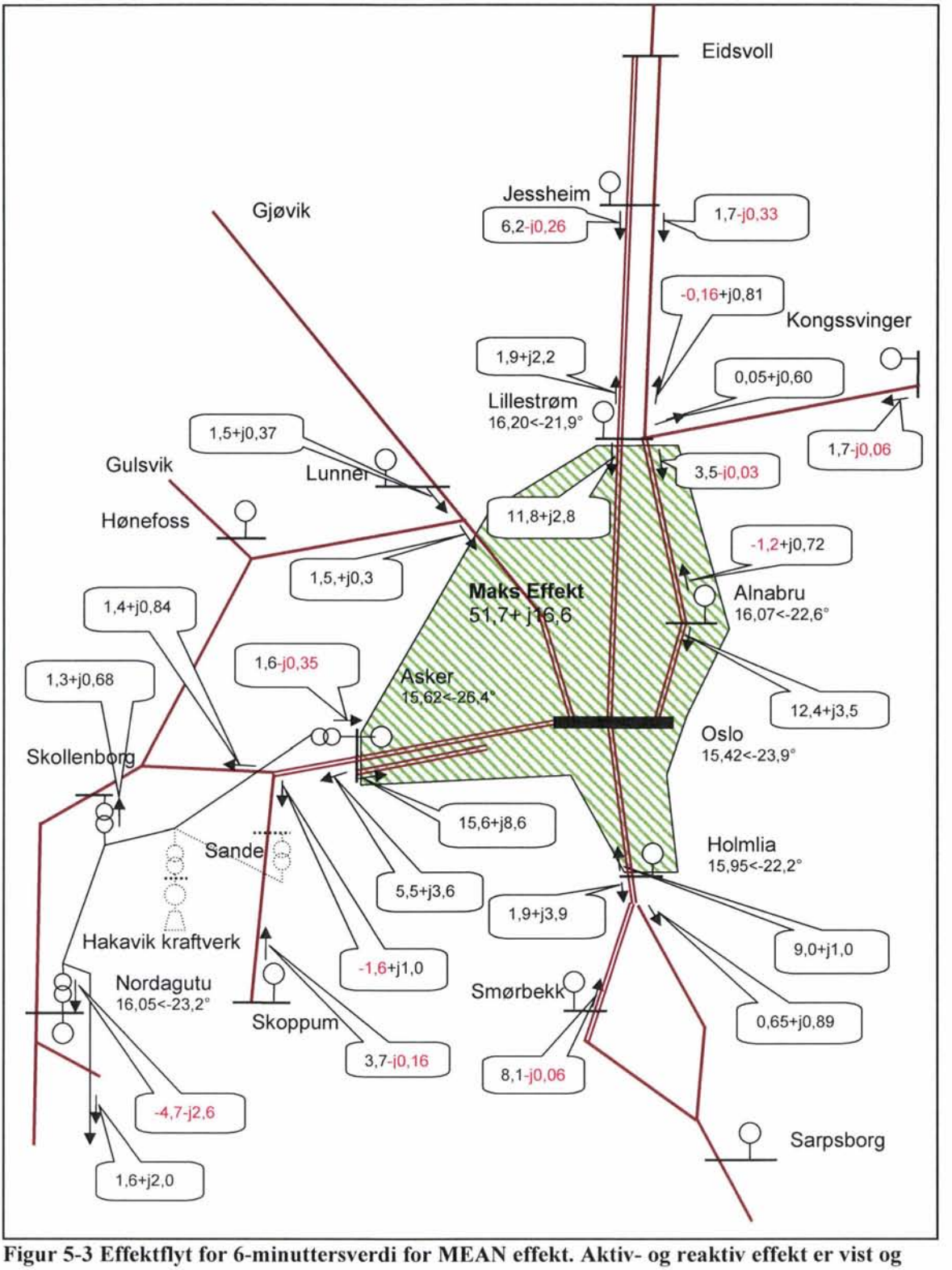
5.2.2 Fallende statikk på 12 % for alle omformerstasjonene

Med 12 % fallende statikk for alle omformerstasjonene ser en at det oppstår nokså jevn belastning av dem, se Tabell 5-3. Asker belastes noe mer og det er helt i tråd med det en ønsker sett i forhold til dennes større installasjon, men det er påfallende å se at Lillestrøm og Jessheim ikke vil bidra mer. En ser også at en oppnår at de perifere omformerstasjonene bidrar noe mer. Det ser ut til at 12 % gir jevnere belastning av stasjonene og gir gunstigere forhold enn det en oppnår med 8 % statikk.

Figur 5-3 viser effektflyten mellom omformerstasjonene og en kan se hvordan effekten fordeler seg ut over linjene uten de helt store endringene fra situasjonen i utgangspunktet i grunnsimuleringen, se avsnitt 5.1 En legger merke til at samlet effektopptak i Oslo-området, - det skraverte området, er noe redusert fra utgangspunktet. Det kan altså se ut til at lastene tar opp mindre effekt nå og at dette skyldes den reduserte spenningen. Redusert effektopptak ved en såpass liten spenningsreduksjon er ikke særlig realistisk fordi togene ikke vil redusere sitt effektopptak for en så liten endring. Dermed kan det se ut som om den valgte effektreduksjonen for lastene ved redusert spenning er ugunstig, i alle fall for Oslo-området. Imidlertid er forskjellen ikke særlig stor, og den kan også være en årsak av at tapene er blitt mindre når mindre reaktiv effekt flyter mellom omformerstasjonene.

Tabell 5-3 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og sammenligning med simuleringen med 8 % statikk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformerstasjon	Innsatt ytelse	8 % statikk for sentrale stasjoner		Statisk lastflyt med 12 % statikk for alle stasjoner			
		6-minutter		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	3 x 10	24,746	59	23,156	55	19,461	12,549
Holmlia	2 x 10	12,485	45	12,029	43	10,970	4,922
Alnabru	2 x 10	12,088	43	11,963	43	11,180	4,257
Lillestrøm	3 x 12	18,354	44	18,136	43	16,949	6,426
Jessheim	2 x 12	10,881	39	10,952	39	10,670	2,457
Tangen	2 x 5,8	3,203	20	3,246	20	3,235	0,260
Rudshøgda	3,1	0,986	21	0,994	21	0,938	0,328
Fåberg	2 x 5,8	1,879	12	1,889	12	1,868	-0,278
Smørbekk	2 x 12	10,054	36	10,223	37	10,152	1,188
Sarpsborg	1 x 12	4,120	29	4,157	30	4,153	0,182
Kongsvinger	1 x 5,8	1,663	21	1,684	21	1,682	-0,068
Lunner	1 x 5,8	2,461	31	2,523	32	2,441	0,636
Hønefoss	1 x 5,8	2,243	28	2,274	28	2,259	0,256
Nordagutu	2 x 7	5,866	27	6,152	28	5,200	3,288
Nelaug	2 x 5,8	3,380	21	3,414	21	3,412	-0,057
Skoppum	2 x 5,8	4,042	25	4,136	26	4,077	0,681
Larvik	2 x 5,8	3,036	19	3,060	19	2,981	-0,684



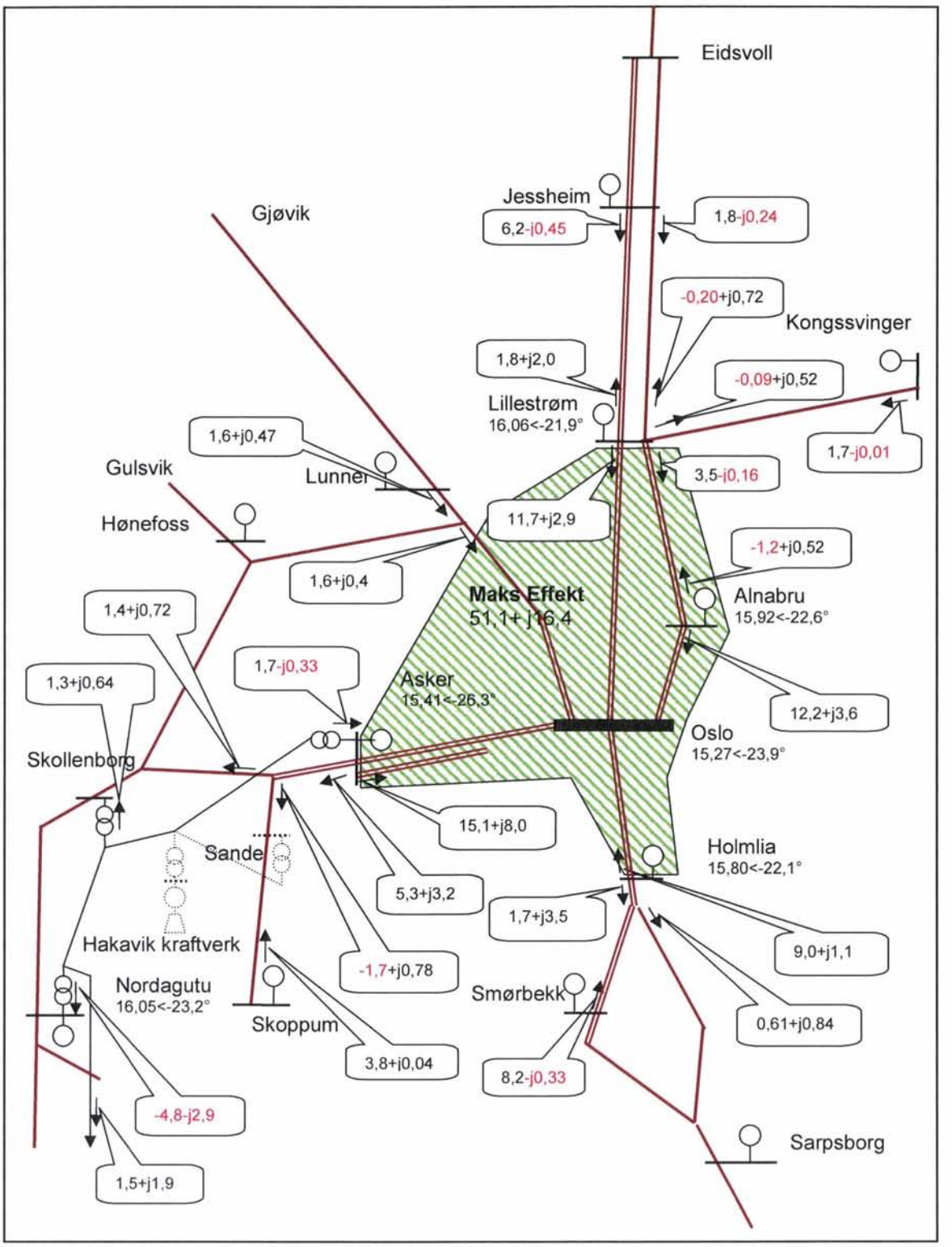
Figur 5-3 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

5.2.3 Fallende statikk på 16 % for de sentrale omformerstasjoner

I Tabell 5-4 og Figur 5-4 ser en resultatet av belastningen for omformerstasjonene når en velger så mye som 16 % statikk for de sentrale omformerstasjonene, mens de perifere har 12 %. Endringene fra tilfellet med 12 % statikk er ikke stor, det en altså ønsker er avlasting av de sentrale omformerstasjonene og større bidrag fra de perifere. Når denne tendensen er så svak kan det være like fornuftig å normalisere innstillingen av alle spenningsregulatorer for en verdi. Dermed benytter en 12 % statikk for alle omformerstasjoner i de videre undersøkelsene.

Tabell 5-4 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og sammenligning med simuleringen med 12 % statikk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

		12 % statikk for sentrale stasjoner		Statisk lastflyt med 16 % statikk for sentrale stasjoner og 12 % for perifere stasjoner			
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	6-minutter		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	3 x 10	23,156	55	21,886	52	18,744	11,299
Holmlia	2 x 10	12,029	43	11,649	42	10,715	4,557
Alnabru	2 x 10	11,963	43	11,789	42	11,022	4,181
Lillestrøm	3 x 12	18,136	43	17,896	43	16,710	6,378
Jessheim	2 x 12	10,952	39	10,956	39	10,638	2,609
Tangen	2 x 5,8	3,246	20	3,295	21	3,274	0,370
Rudshøgda	3,1	0,994	21	1,002	21	0,945	0,334
Fåberg	2 x 5,8	1,889	12	1,900	12	1,879	-0,277
Smørbekk	2 x 12	10,223	37	10,394	37	10,281	1,518
Sarpsborg	1 x 12	4,157	30	4,193	30	4,186	0,238
Kongsvinger	1 x 5,8	1,684	21	1,709	21	1,708	0,011
Lunner	1 x 5,8	2,523	32	2,583	32	2,474	0,743
Hønefoss	1 x 5,8	2,274	28	2,314	29	2,287	0,346
Nordagutu	2 x 7	6,152	28	6,415	29	5,292	3,627
Nelaug	2 x 5,8	3,414	21	3,445	22	3,444	-0,022
Skoppum	2 x 5,8	4,136	26	4,228	26	4,137	0,861
Larvik	2 x 5,8	3,060	19	3,083	19	3,012	-0,649



Figur 5-4 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

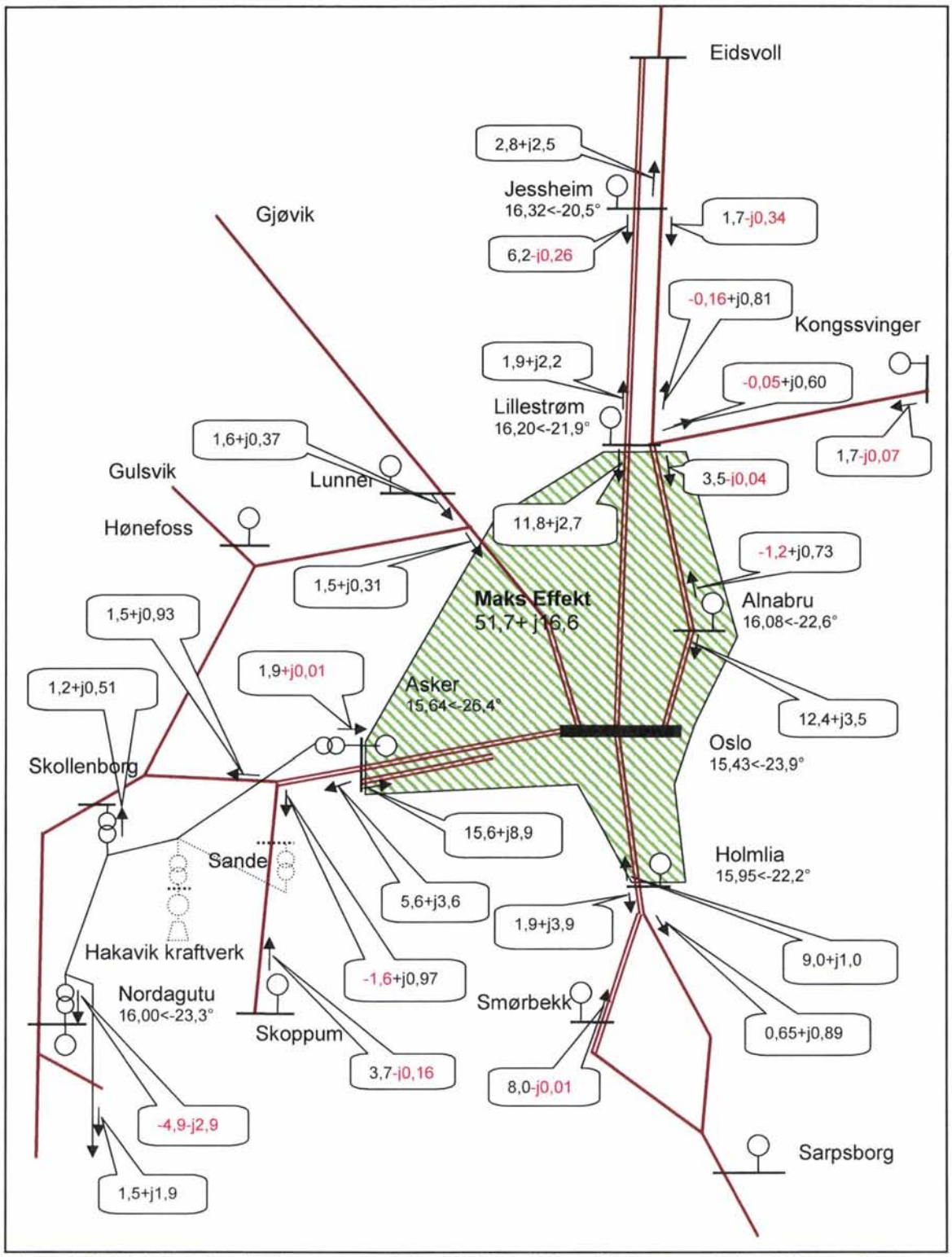
5.3 Endring av omsetningen på transformatorer til fjernledningen for å forbedre overføringsevnen mellom Asker og Nordagutu

I avsnitt 4.2 regnet en ut impedansen for fjernledningen og fant at den elektriske avstanden mellom Asker og Nordagutu omformerstasjoner er kun 19 km. Det er derfor paradoksalt at en ikke får større bidrag fra Nordagutu, spesielt fordi denne er nokså lavt belastet i den situasjonene en analyserer. En vil forsøke å endre på transformatoromsetningen slik at mer effekt går mot Asker. Fra før er omsetningen i Nordagutu 57 / 16,5 kV og særlig høyere enn dette vil en ikke sette spenningen på fjernledningen. En forsøker da å redusere spenningen på primærsiden i Asker, og i Tabell 5-5 ser en resultatet av en reduksjon på henholdsvis 0,5 og 1,0 kV. Det ser altså ut til at 0,5 kV er det mest optimale for å oppnå mest mulig effekt fra Nordagutu og samtidig avlaste Asker mest mulig. Imidlertid viser det seg at forbedringen er ganske liten. I Figur 5-5 er den nye effektflyten vist og sammenligner en dette med effektflyten i avsnitt 5.2.2, der alle forhold er de samme utenom innstillingen av transformatoren, ser en at neste alle forhold er uforandret.

Grunnen til at det er så lite bidrag fra Nordagutu til Asker er nok at det er så stor forskjell mellom bestykningen i de to stasjonene. Med 3 x 10 MVA aggregater blir fasevinkelen i Asker, selv med nokså stor belastning, ikke særlig stor i forhold til fasevinklene i Nordagutu. Når da heller ikke spenningen er særlig lavere kommer det ikke mye effekt fra Nordagutu, se Figur 5-5 der spenning og fasevinkler er vist.

Tabell 5-5 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og sammenligning med simuleringen med 12 % statikk og opprinnelig omsetning i transformatoren i Asker. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk for alle stasjoner				Statisk lastflyt med omsetning 54,5/16,5 kV i Asker				Statisk lastflyt med omsetning 54,0/16,5 kV i Asker			
		Tilsynelatende effekt		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	Tilsynelatende effekt		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	Tilsynelatende effekt		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	3 x 10	23,156	55	19,461	12,549	21,886	52	18,744	11,299	22,950	55	19,399	12,263
Holmlia	2 x 10	12,029	43	10,970	4,922	11,649	42	10,715	4,557	12,008	43	10,958	4,896
Alnabru	2 x 10	11,963	43	11,180	4,257	11,789	42	11,022	4,181	11,940	43	11,167	4,227
Lillestrøm	3 x 12	18,136	43	16,949	6,426	17,896	43	16,710	6,378	18,109	43	16,930	6,399
Jessheim	2 x 12	10,952	39	10,670	2,457	10,956	39	10,638	2,609	10,943	39	10,663	2,452
Nordagutu	2 x 7	6,152	28	5,200	3,288	6,415	29	5,292	3,627	6,428	29	5,304	3,633
Nelaug	2 x 5,8	3,414	21	3,412	-0,057	3,445	22	3,444	-0,022	3,450	22	3,449	-0,024



Figur 5-5 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall. Omsetning er 54/16,5kV for transformator i Asker.

5.4 Endring av reaktansen X_q i Lillestrøm og Jessheim

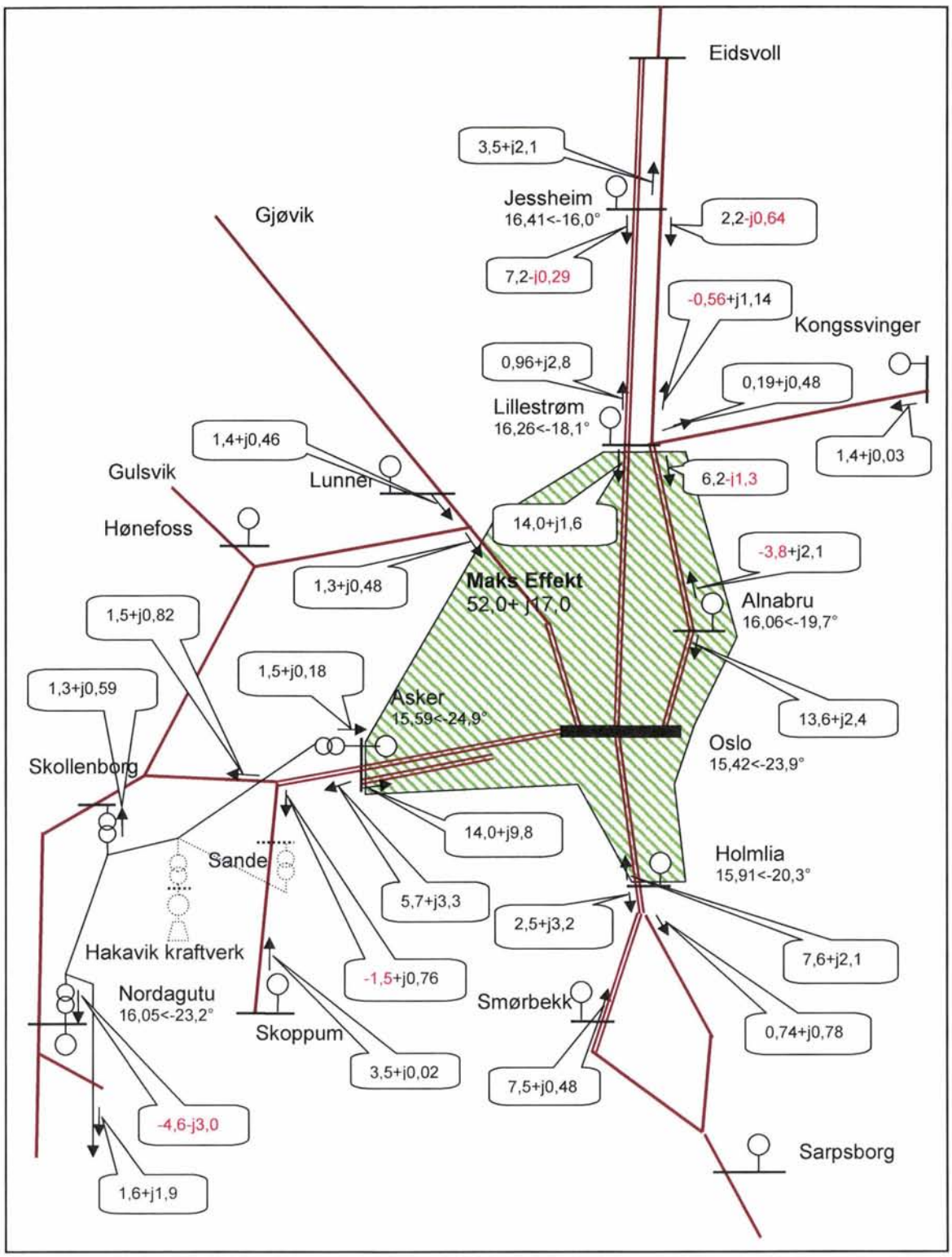
5.4.1 Forsøk med 50 % redusert X_q i Lillestrøm og Jessheim

Ved å redusere X_q for Lillestrøm og Jessheim omformerstasjoner er det mulig å få større bidrag fra disse, dette er tidligere undersøkt i [10]. I tidligere arbeid kom en frem til at en reduksjon på 40 % ville være passende, men som en ser Tabell 5-6 vil en videre reduksjon helt ned til 50 % gi enda større effekt fra Lillestrøm og Jessheim. Ytterligere reduksjon av X_q vil føre til reaktiv effektutveksling mellom Alnabru og Jessheim, noe som ikke kan sies å være gunstig.

Figur 5-6 nedenfor viser effektflyten for Oslo-området etter endringen med 50 % reduksjon. Sammenlignes dette med tilfellet med 12 % statikk for alle omformerstasjoner og omsetning på 54,5/16,5 kV i Asker, se avsnitt 5.3, ser en at den ekstra effekten fra Lillestrøm og Jessheim fordeler seg jevnt utover i kraftsystemet. Endringene er ikke veldig store, men i en situasjon med enda større effektbehov i Oslo vil nok endringene bli mer betydelige. En legger merke til at Asker leverer noe mer reaktiv effekt og dette er årsaken til at Asker får øket belastning fra 52 til 54 %. Til tross for dette vil en foretrekke denne nye innstillingen der Lillestrøm og Jessheim bidrar mer.

Tabell 5-6 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og sammenligning med simuleringen med opprinnelig reaktans for de statiske omformerstasjonene. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 40 % lavere Xq i Lillestrøm og Jessheim				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm og Jessheim			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	21,886	52	18,744	11,299	22,603	54	18,565	12,893	22,471	54	18,288	13,058
Holmlia	**2 x 10**	11,649	42	10,715	4,557	11,532	41	10,269	5,234	11,386	41	10,046	5,346
Alnabru	**2 x 10**	11,789	42	11,022	4,181	11,041	39	10,106	4,446	10,758	38	9,763	4,520
Lillestrøm	**3 x 12**	17,896	43	16,710	6,378	20,548	49	19,857	5,254	21,414	51	20,843	4,882
Jessheim	**2 x 12**	10,956	39	10,638	2,609	12,378	44	12,289	1,466	12,855	46	12,800	1,158
Nordagutu	**2 x 7**	6,415	29	5,292	3,627	6,224	28	5,093	3,578	6,206	28	5,042	3,618



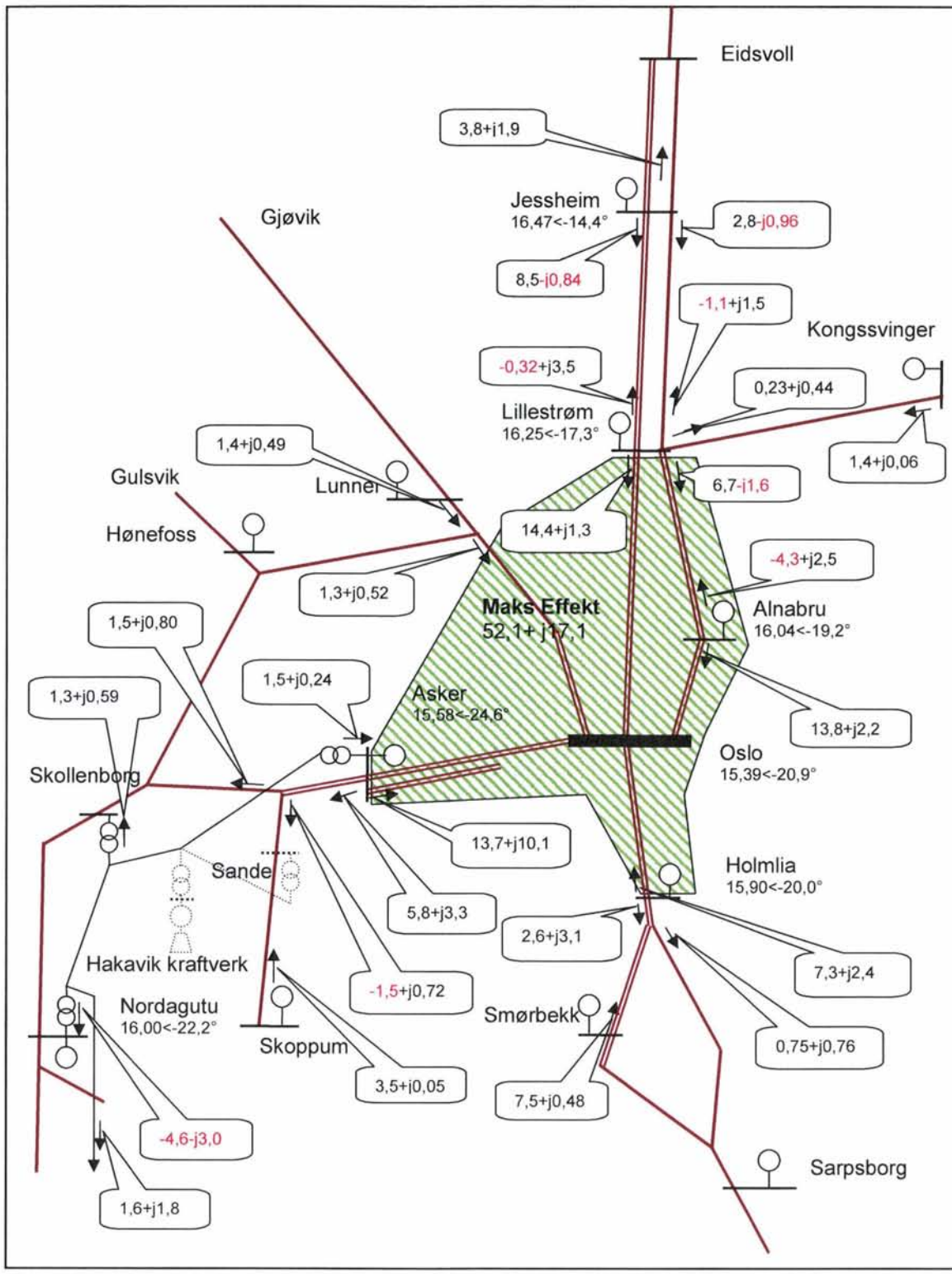
Figur 5-6 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

5.4.2 Forsøk med 50 % redusert X_q i Lillestrøm og 60 % i Jessheim

I forrige avsnitt fant en ut at 50 % redusert X_q i Lillestrøm og Jessheim var optimalt, og en vil her forsøke å redusere reaktansen kun for Jessheim omformerstasjon. Nedenfor viser Tabell 5-7 hvorledes effektfordelingen blir med en reduksjon på både 60 og 70 %, sammenlignet med resultatet med 50 % reduksjon for begge. En kan altså øke bidraget enda mer fra Jessheim, men da reduseres også bidraget fra Lillestrøm. Figur 5-7 viser effektflyten med 60 % reduksjon i Jessheim, og som en ser vil Jessheim omformerstasjon komme til å mate effekt forbi Lillestrøm og ned til Oslo. Sannsynligvis vil dette bety større tap. En ser også at det utveksles noe mer reaktiv effekt mellom omformerstasjonene, noe som heller ikke er gunstig. Det skal ikke utelukkes at 60 % reduksjon i Jessheim er gunstig, men en egen trafikksimulering der dette undersøkes spesielt bør da gjøres. Sannsynligvis vil 50 % reduksjon i både Lillestrøm og Jessheim omformerstasjon være det beste og dette benyttes videre.

Tabell 5-7 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og sammenligning med simuleringen med forskjellig grad av redusert reaktans for alle statiske omformerstasjonene. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

		Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm og Jessheim				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm og 60 % i Jessheim				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm og 70 % i Jessheim			
Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	22,471	54	18,288	13,058	22,442	53	18,197	13,134	22,410	53	18,090	13,226
Holmlia	**2 x 10**	11,386	41	10,046	5,346	11,350	41	9,972	5,404	11,308	40	9,885	5,476
Alnabru	**2 x 10**	10,758	38	9,763	4,520	10,687	38	9,649	4,593	10,605	38	9,515	4,684
Lillestrøm	**3 x 12**	21,414	51	20,843	4,882	21,018	50	20,403	5,014	20,552	49	19,880	5,180
Jessheim	**2 x 12**	12,855	46	12,800	1,158	13,865	50	13,845	0,719	15,105	54	15,102	0,197
Nordagutu	**2 x 7**	6,206	28	5,042	3,618	6,202	28	5,026	3,634	6,198	28	5,007	3,653



Figur 5-7 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

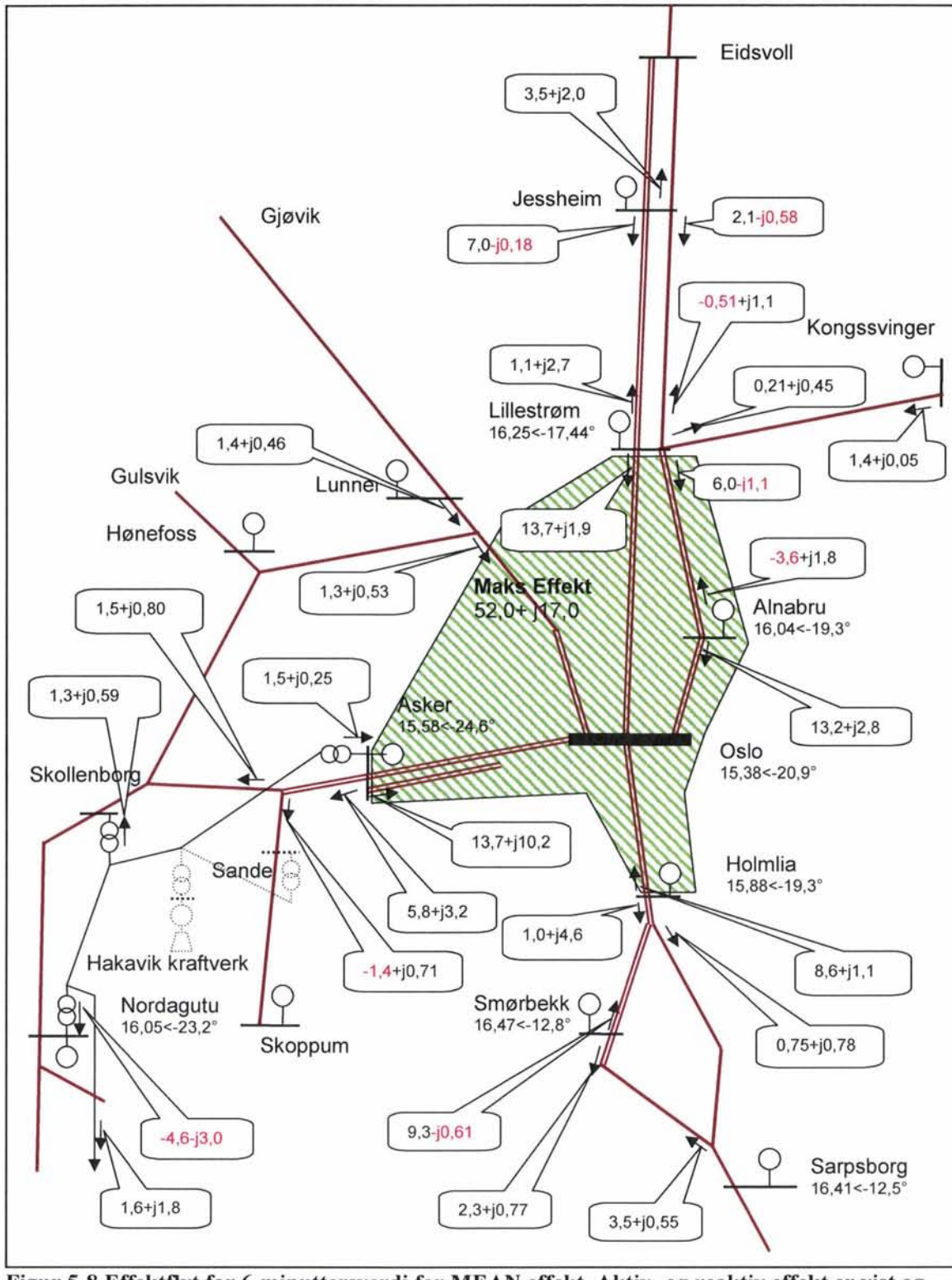
5.5 Endring av reaktansen X_q i Smørbekk

5.5.1 Forsøk med 50 % redusert X_q i Smørbekk

Med endret X_q i Smørbekk omformerstasjon er det mulig å få denne også til å bidra mer til Holmlia og resten av Oslo-området. I Tabell 5-8 ser en hvordan en 50 % reduksjon får Smørbekk til å øke sin belastning fra 35 til 43 %. Dette er ingen liten økning og av Figur 5-8 ser en at det heller ikke oppstår noen ugunstig reaktiv effektflyt.

Tabell 5-8 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og sammenligning med simuleringen med forskjellig grad av redusert reaktans for omformerstasjonen i Smørbekk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm og Jessheim				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, omsetning 54,5/16,5 kV i Asker, 50 % lavere Xq i Lillestrøm og Jessheim og 50 % reduksjon i Smørbekk			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	3 x 10	22,471	54	18,288	13,058	22,407	53	18,063	13,260
Holmlia	2 x 10	11,386	41	10,046	5,346	11,089	40	9,544	5,631
Smørbekk	2 x 12	9,796	35	9,658	1,627	11,921	43	11,916	0,300
Alnabru	2 x 10	10,758	38	9,763	4,520	10,676	38	9,586	4,699
Lillestrøm	3 x 12	21,414	51	20,843	4,882	21,141	50	20,489	5,179
Jessheim	2 x 12	12,855	46	12,800	1,158	12,718	45	12,649	1,304
Nordagutu	2 x 7	6,206	28	5,042	3,618	6,197	28	5,002	3,659



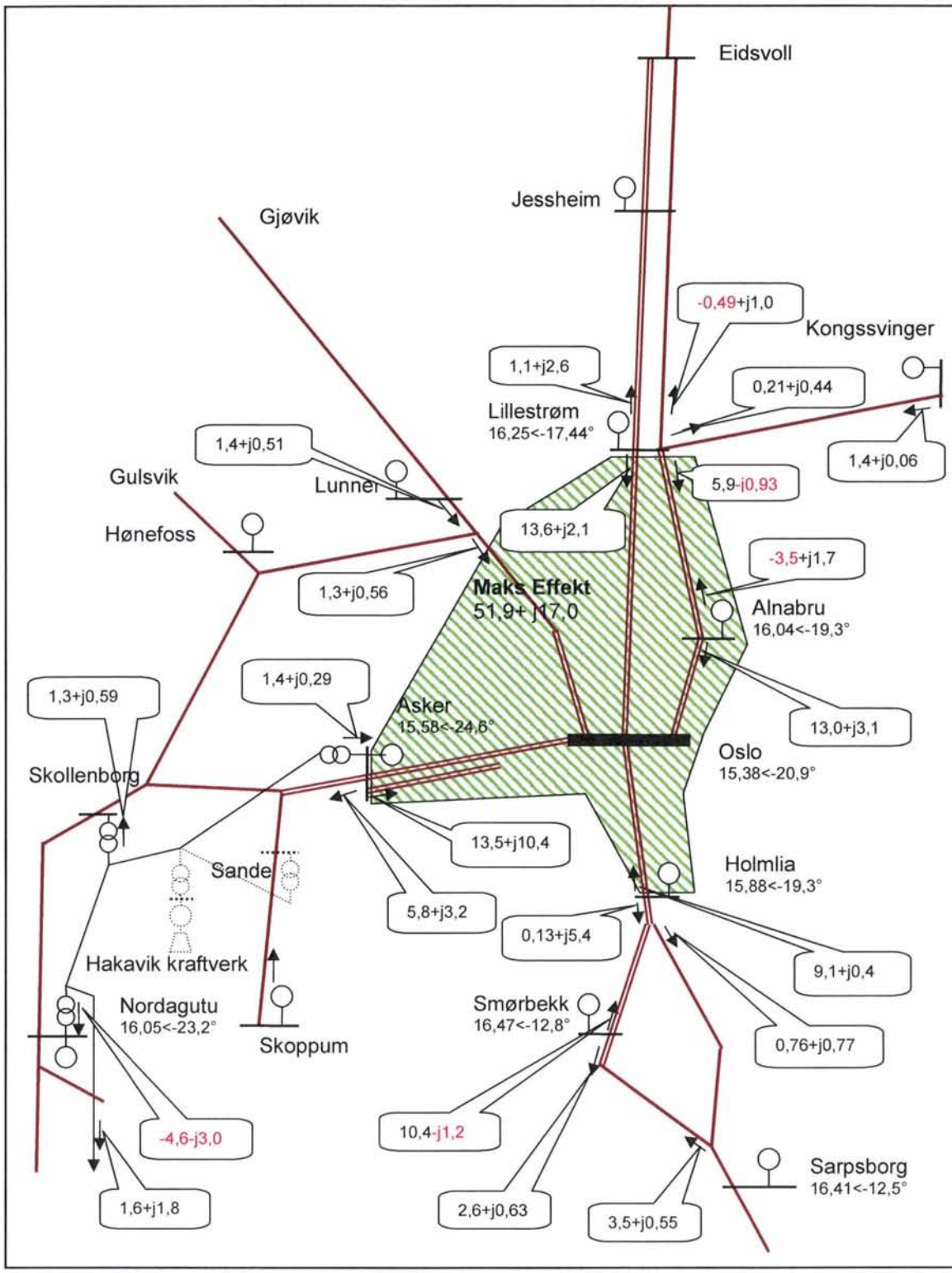
Figur 5-8 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

5.5.2 Forsøk med 70 % redusert X_q i Smørbekk

Med ytterligere reduksjon av reaktansen i Smørbekk omformerstasjon oppnår en større belastning av denne, men som en ser av resultatene i Tabell 5-9 fører dette til at Smørbekk begynner å motta reaktiv effekt. Figur 5-9 viser hvordan effektflyten nå blir, og en må kunne si at endringene ikke er store. Holmlia omformerstasjon leverer nå mindre aktiv effekt sørover, men noe mer reaktiv effekt. Av dette får en slutte at 50 % reduksjon er passende også for Smørbekk.

Tabell 5-9 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og sammenligning med simuleringen med 50 % redusert reaktans for omformerstasjonen i Smørbekk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, omsetning 54,5/16,5 kV i Asker, 50 % lavere Xq i Lillestrøm og Jessheim og 50 % reduksjon i Smørbekk				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, omsetning 54,5/16,5 kV i Asker, 50 % lavere Xq i Lillestrøm og 50 % i Jessheim og 70 % reduksjon i Smørbekk			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	22,407	53	18,063	13,260	22,380	53	17,941	13,379
Holmlia	**2 x 10**	11,089	40	9,544	5,631	10,950	39	9,265	5,822
Smørbekk	**2 x 12**	11,921	43	11,916	0,300	13,252	47	13,244	-0,423
Alnabru	**2 x 10**	10,676	38	9,586	4,699	10,638	38	9,489	4,808
Lillestrøm	**3 x 12**	21,141	50	20,489	5,179	20,997	50	20,295	5,354
Jessheim	**2 x 12**	12,718	45	12,649	1,304	12,645	45	12,567	1,388
Nordagutu	**2 x 7**	6,197	28	5,002	3,659	6,194	28	4,980	3,683



Figur 5-9 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

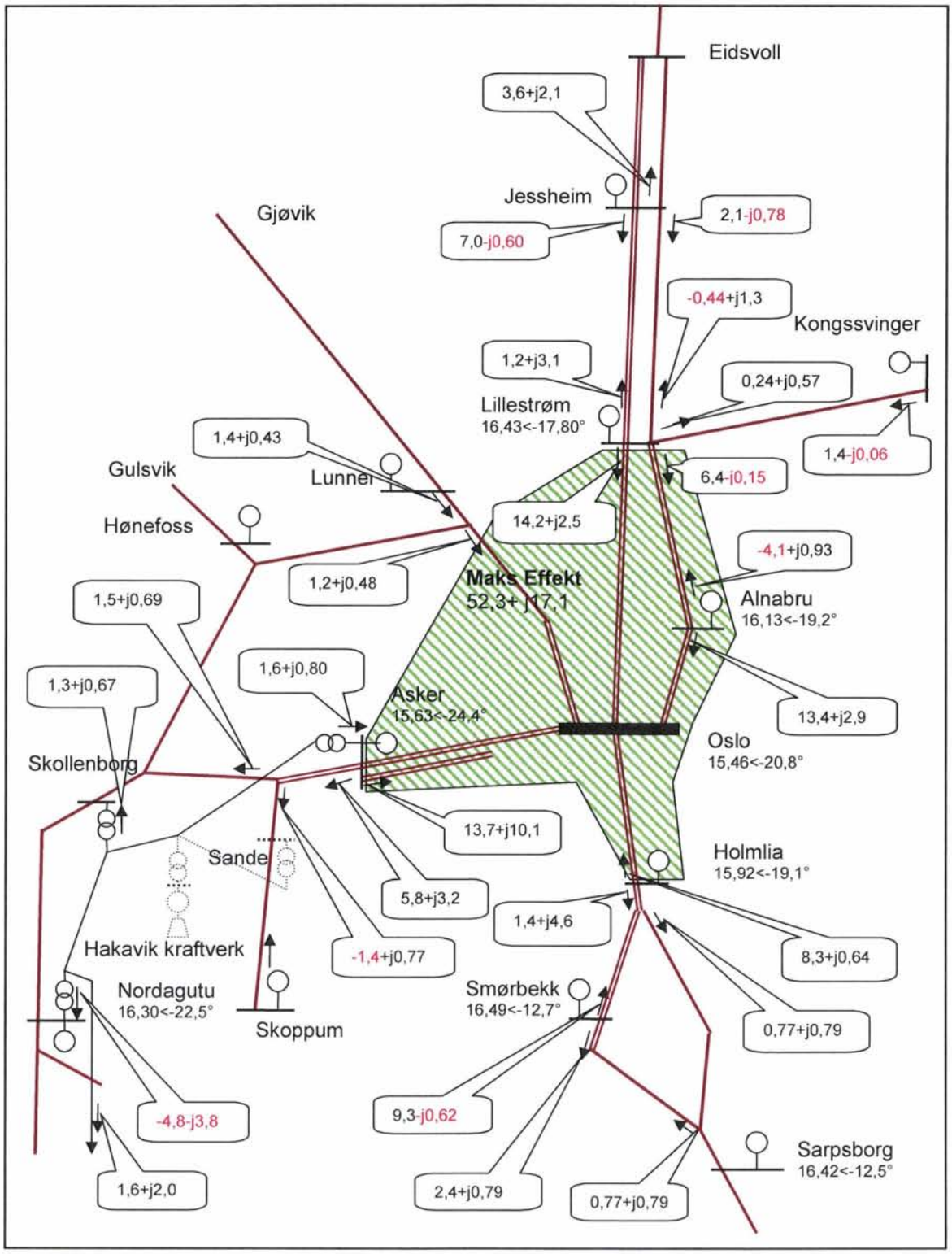
5.5.3 Redusert X_q i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk, mindre statikk for Jessheim Lillestrøm Smørbekk og Nordagutu, men fortsatt 12 % på alle andre omformerstasjoner

Det kan tenkes at en mer gunstig lastflyt vil oppstå om de største omformerstasjonene får en mindre statikk en de andre. Disse vil de kunne bidra mer slik at de omformerstasjonene som kan overbelastes blir noe lettere belastet. De statiske stasjonene får en statikk på 4 % og en redusert X_q på 50 % som en har funnet mest gunstig i foregående avsnitt. Også Nordagutu får denne statikken i håp om at den skal bidra mer til Asker. Nedenfor viser Tabell 5-10 belastningen av omformerstasjonene etter at disse tiltakene er forsøkt. Som en kan se avlastes Asker, Holmlia og Alnabru noe, mens Lillestrøm med 4 % statikk bidrar mer. Endringen for de andre stasjonene er mindre. I Figur 5-10 kan en se hvordan effektflyten endres.

Dette kan være et gunstig tiltak for å få et større bidrag fra de statiske omformerstasjonene som en gjerne ønsker skal bidra så mye som mulig til å avlaste de roterende omformerne. Imidlertid kan det være ugunstig om tapene kommer til å øke, dette er undersøkt i en egen trafikksimulering i avsnitt 6.1.3.

Tabell 5-10 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt med 4 % statikk og 50 % redusert reaktans for de statiske omformerstasjonene Lillestrøm, Jessheim og smørbekk, samt for Nordagutu. Sammenligning med simuleringen med 12 % statikk for alle omformerstasjoner. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm og 50 % i Jessheim, og 50 % reduksjon i Smørbekk				Statisk lastflyt med 4 % statikk i JES, LIL, SMO og NOR, 12 % statikk i alle andre omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker, samt 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	22,407	53	18,063	13,260	21,801	52	17,845	12,523
Holmlia	**2 x 10**	11,089	40	9,544	5,631	10,769	38	9,393	5,257
Smørbekk	**2 x 12**	11,921	43	11,916	0,300	11,892	42	11,887	0,310
Alnabru	**2 x 10**	10,676	38	9,586	4,699	10,136	36	9,390	3,816
Lillestrøm	**3 x 12**	21,141	50	20,489	5,179	22,920	55	21,640	7,511
Jessheim	**2 x 12**	12,718	45	12,649	1,304	12,649	45	12,621	0,822
Nordagutu	**2 x 7**	6,197	28	5,002	3,659	7,252	33	5,425	4,808



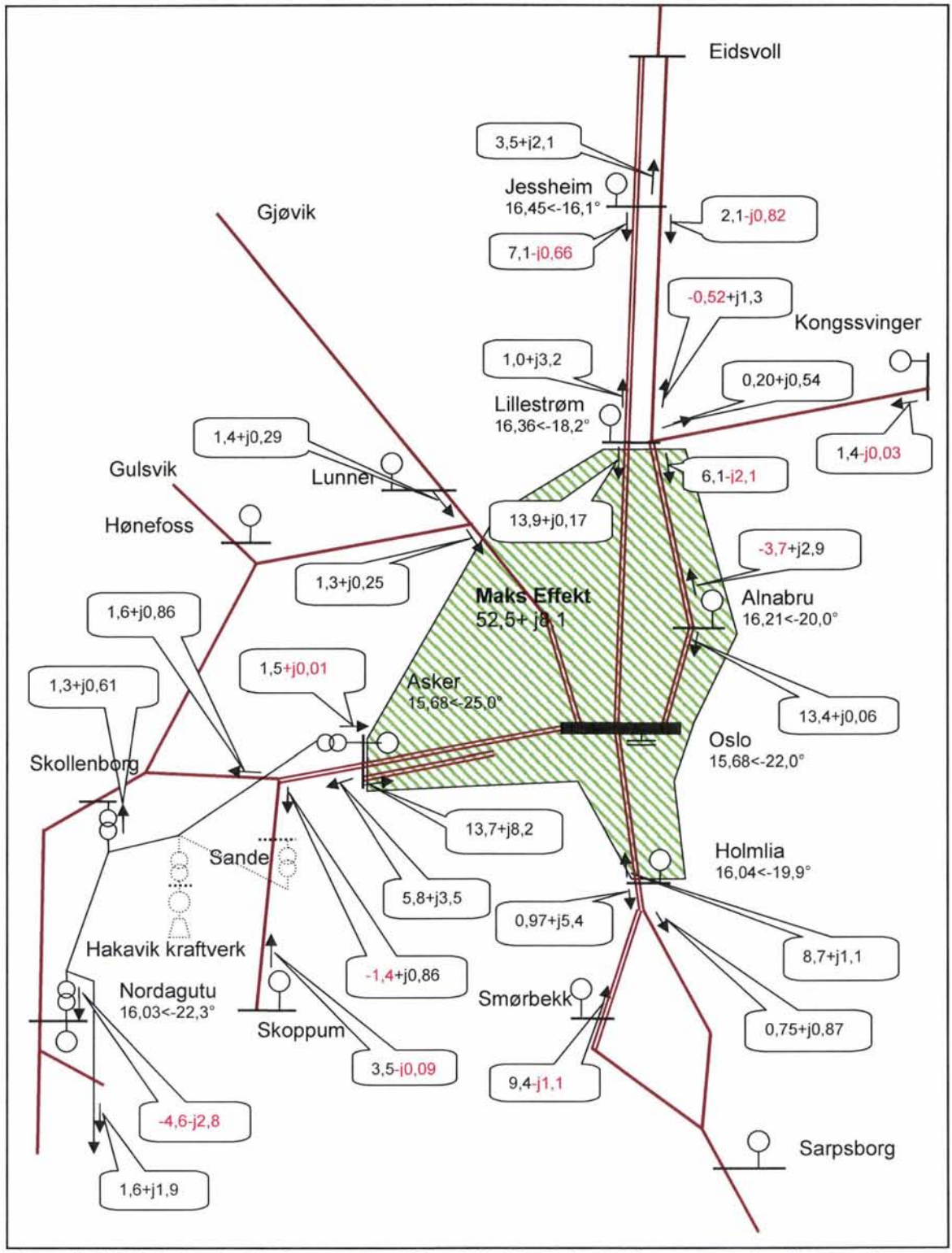
Figur 5-10 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

5.6 Kondensatorbatteri i Oslo

Det er forsøkt med en lastflytsimulering der det settes inn et 10 MVAr kondensatorbatteri på Oslo S og resultatene av belastningen for omformerstasjonene er vist i Figur 5-11. Som en ser går belastningen av stasjonene ned med ett til to prosentpoeng, og Figur 5-11 viser hvordan effektflyten forandrer seg fra tilfellet uten kondensatorbatteri, se tilsvarende figur i avsnitt 5.5.1. Virkningen av kondensatorbatteriet er altså liten, men så burde det kanskje vært større for å avlaste omformerne mer. I normal drift er imidlertid behovet for et kondensatorbatteri neppe stort, det er ikke så stor reaktiv effekt som utveksles at det betyr mye. Det er heller i en situasjon med utfall at ekstra reaktiv effekt vil kunne komme godt med. Da vil en nok foretrekke et batteri med mange trinn eller et SVC-anlegg (Statisk VAr Kompensering). En annen og enda bedre løsning er å la togene kompensere reaktivt ved lave spenninger. Mest effektiv kan en undersøke dette med en trafikksimulering der togene kompenserer reaktivt.

Tabell 5-11 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og kondensatorbatteri i Oslo, sammenligning med opprinnelig belastning. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm Jessheim og Smørbekk				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim, og Smørbekk. 10 MVAr kondensator i Oslo			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	22,407	53	18,063	13,260	21,639	52	18,171	11,750
Holmlia	**2 x 10**	11,089	40	9,544	5,631	10,516	38	9,658	4,148
Alnabru	**2 x 10**	10,676	38	9,586	4,699	10,112	36	9,664	2,977
Lillestrøm	**3 x 12**	21,141	50	20,489	5,179	21,030	50	20,773	3,245
Jessheim	**2 x 12**	12,718	45	12,649	1,304	12,779	46	12,759	0,678
Nordagutu	**2 x 7**	6,197	28	5,002	3,659	6,090	28	5,014	3,458



Figur 5-11 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

5.7 Hakavik kraftstasjon utvidet til 15 MW og forsøk med reaktiv effektproduksjon

Hakavik skal i disse dager renoveres og nye aggregater skal settes inn. En ytelse på hele 15 MW er foreslått som det høyeste og her vil en undersøke hvordan denne effekten blir absorbert i nettet. I tillegg vil en undersøke litt på om stor reaktiv effekt fra Hakavik vil ha noen nytte.

5.7.1 15 MW og 3,6 MVAr eller cos φ = 0,97 (kapasitivt) i Hakavik

Først forsøkes det med en relativt liten reaktiv effektproduksjon i Hakavik. Egentlig ville en her forsøke med cos φ = -0,95, men å få ønsket spenning, aktiv og reaktiveffekt samtidig er ikke enkelt og krever mange forsøk. Her ble reaktiv effekt 3,6 MVAr og en godtar dette. Spenningen ble forsøkt holdt til 57 kV ved Hakavik, men kom opp i 60,8 kV. Dette kan bety at impedansen i fjernledingen er for stor for denne effektoverføringen. Et annet moment er at transformatoren i Nordagutu har omsetning på 57/16,5 kV, og at denne muligens skulle vært trinnet ned. Det er allikevel neppe mulig å redusere spenningen ved Hakavik noe særlig bare ved å trinne ned i Nordagutu.

Nedenfor viser Tabell 5-12 hvorledes effekten fra Hakavik får nesten alle de sentrale omformerstasjonene til å gå ned i produksjon. Som forventet er det Asker og Nordagutu som mottar mest av effekten. Det er også disse som reduserer sin produksjon av reaktiv effekt mest. Det kan se ut til at Asker reduserer produksjonen sin så mye at selv med utfall av to aggregater her kan det gjenværende fortsatt holdes i gang uten å overbelastes.

Tabell 5-12 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og øket effektproduksjon i Hakavik kraftverk, sammenligning med opprinnelig belastning. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Hakavik 15 MW og 3,6 MVAR			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	22,407	53	18,063	13,260	17,178	41	13,934	10,047
Holmlia	**2 x 10**	11,089	40	9,544	5,631	10,312	37	8,662	5,585
Alnabru	**2 x 10**	10,676	38	9,586	4,699	9,872	35	8,702	4,662
Lillestrøm	**3 x 12**	21,141	50	20,489	5,179	19,574	47	18,751	5,591
Jessheim	**2 x 12**	12,718	45	12,649	1,304	12,034	43	11,908	1,727
Nordagutu	**2 x 7**	6,197	28	5,002	3,659	3,050	14	2,751	1,316
Nelaug	**2 x 5,8**	3,342	21	3,340	0,056	2,618	16	2,565	0,524

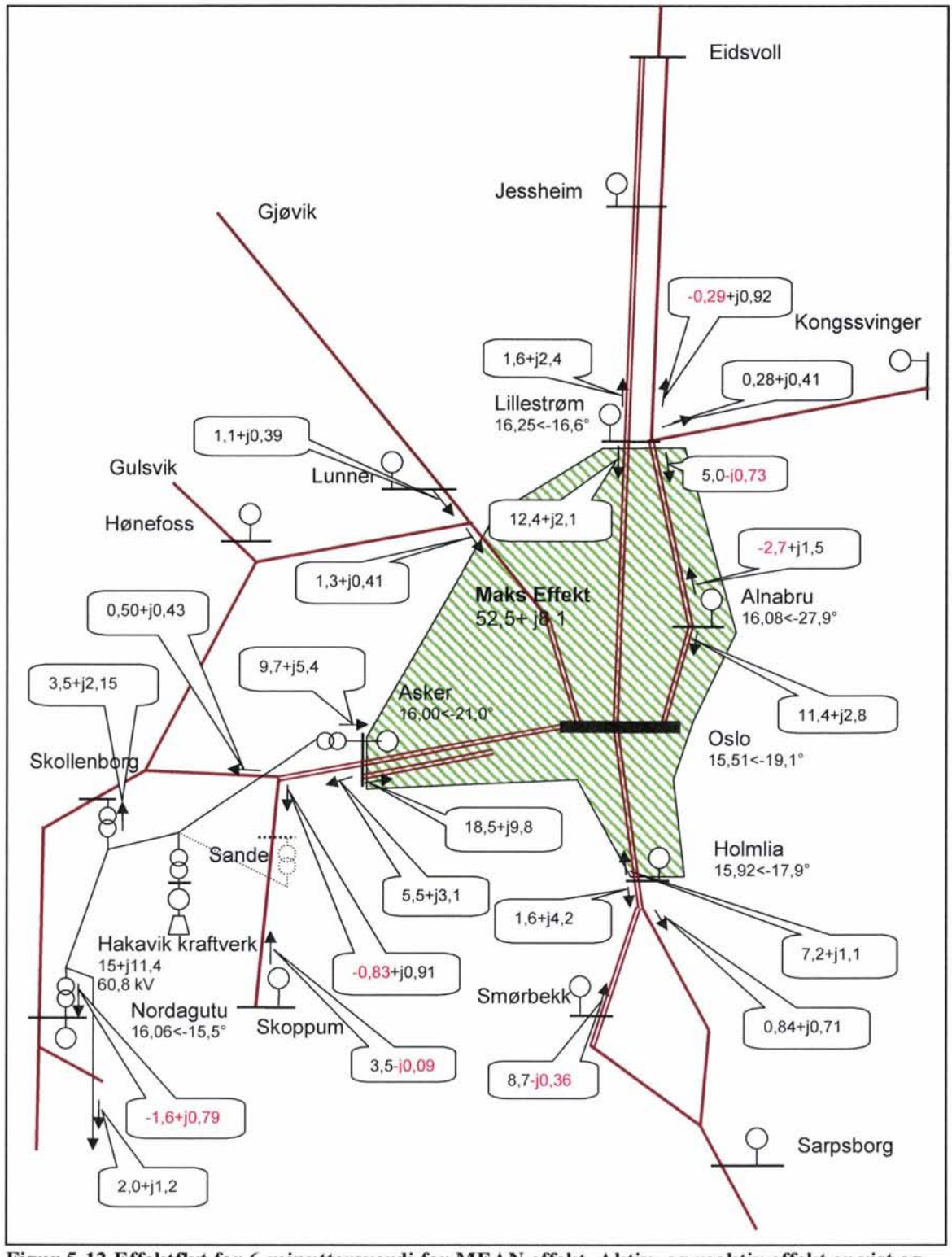
5.7.2 10 MVAr eller cos φ = 0,83 (kapasitivt) i Hakavik

En forsøker videre med en nokså høy reaktiv effektproduksjon i Hakavik og selv om en altså ønsker 10 MVAr får en godta 11,4 MVAr. Da ble spenningen så mye som 63,7 kV ved Hakavik og det vil neppe være mulig å ha så høy spenning på fjernledningen som nominelt

har 55 kV. I Tabell 5-13 har en sammenlignet effektproduksjonen fra de aktuelle omformerstasjonene når Hakavik produserer henholdsvis 3,6 og 11,4 MVAr. Som en ser ble det nå bare små endringer for belastningen og kun Asker og Nordagutu får sin reaktive produksjon betydelig redusert. Det ser ikke ut til å være gunstig med en så stor reaktiv effektproduksjon i Hakavik. En generator med så stor kapasitet for reaktiv effekt er heller ikke særlig gunstig da det oppstår tap og lavere virkningsgrad. Figur 5-12 viser effektflyten når Hakavik har denne store reaktive effektproduksjonen. Sammenlignes dette med effektflyten i 5.5.1, som ligner mest på forholdene her, ser en at den reaktive effekten mot Oslo-området går med til å avlaste Asker. Ellers ser en at den reaktive effekten får Nordagutu til å gå undermagnetisert.

Tabell 5-13 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og forsøk med forskjellig reaktiv effektproduksjon i Hakavik kraftverk, sammenligning med reaktiv effekt i forrige simulering. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Hakavik 15 MW og 3,6 MVAR				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Hakavik 15 MW og 11,4 MVAr			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	17,178	41	13,934	10,047	16,184	39	14,324	7,534
Holmlia	**2 x 10**	10,312	37	8,662	5,585	10,231	37	8,752	5,288
Alnabru	**2 x 10**	9,872	35	8,702	4,662	9,789	35	8,786	4,316
Lillestrøm	**3 x 12**	19,574	47	18,751	5,591	19,635	47	18,937	5,167
Jessheim	**2 x 12**	12,034	43	11,908	1,727	12,086	43	11,982	1,569
Nordagutu	**2 x 7**	3,050	14	2,751	1,316	2,880	13	2,706	-0,983
Nelaug	**2 x 5,8**	2,618	16	2,565	0,524	2,653	17	2,628	0,363



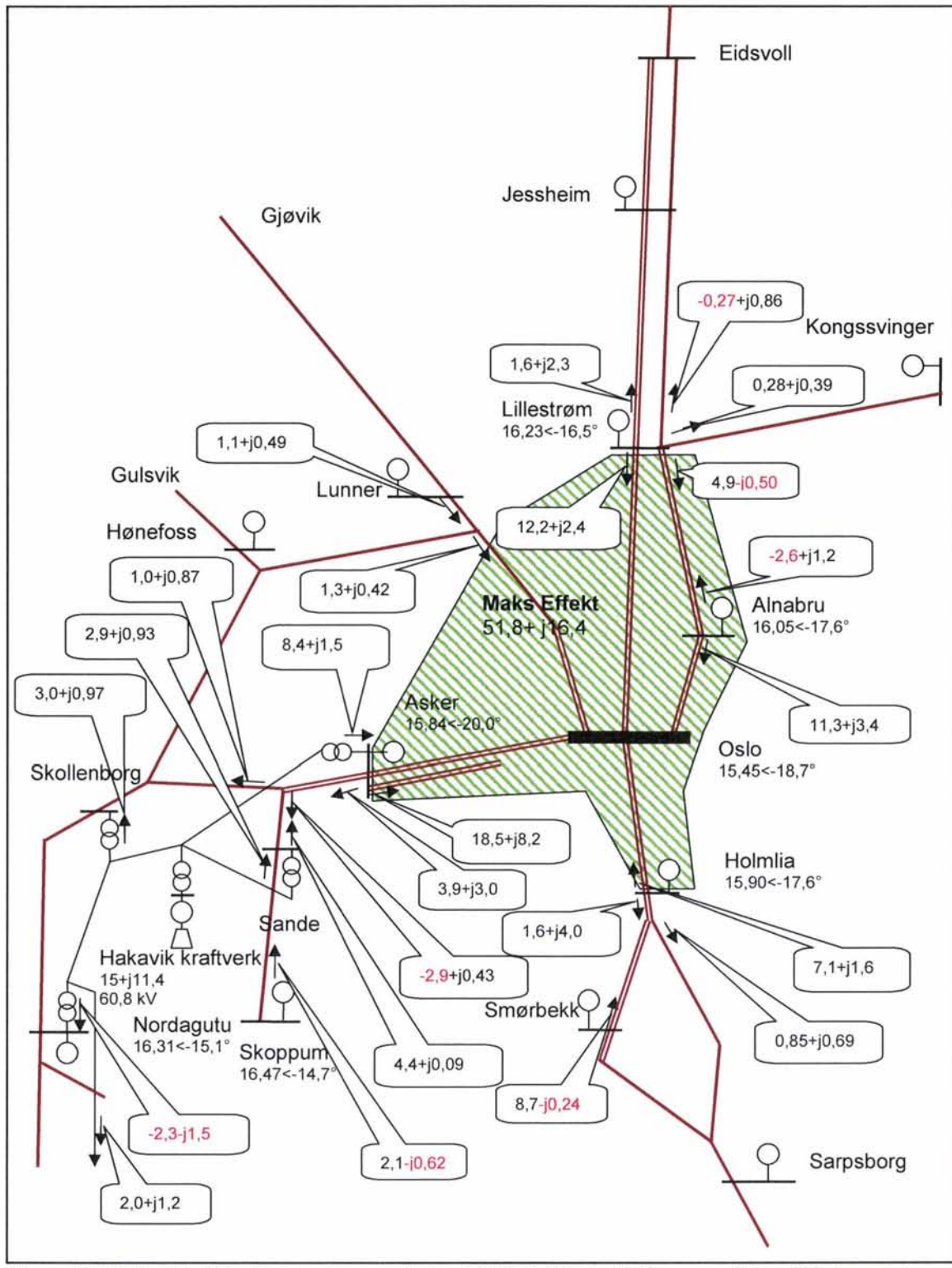
Figur 5-12 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

5.8 Hakavik utvidet til 15 MW med cos φ = 0,97 (kapasitivt) og Sande transformatorstasjon i fortsatt drift

I trafikksimuleringene i kapittel 4 så en at Skoppum ble noe hardt belastet for sin 2-sekundersverdi og det kan være interessant å se om en denne avlastes om fjerneledningen med innmating i Sande opprettholdes. Nedenfor viser Tabell 5-14 hvordan Skoppum blir avlastet 4 % -poeng, mens andre omformerstasjoner blir bare helt ubetydelig påvirket av at Sande transformatorstasjon kobles inn. Imidlertid er Skoppum i dette øyeblikket veldig lavt belastet og det må gjøres egen simulering i en situasjon hvor den er mye belastet for å se om den virkelig vil bli lavere belastet når behovet er stort. Egne trafikksimuleringer blir gjort på dette i avsnitt 6.1.4, 6.1.5 og 6.2.4. Av lastflyten i Figur 5-13 ser en små endringer fra tilsvarende figur i avsnitt 5.7.1. En legger merke til en noe større effektflyt fra Vestfoldbanen og inn på Drammensbanen når Sande mater inn effekt.

Tabell 5-14 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og forsøk med Sande transformatorstasjon i fortsatt drift. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Hakavik 15 MW og 3,6 MVAR				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Hakavik 15 MW og 3,6 MVAR. Sande innkoblet			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	17,178	41	13,934	10,047	17,114	41	13,981	9,871
Holmlia	**2 x 10**	10,312	37	8,662	5,585	10,308	37	8,671	5,562
Alnabru	**2 x 10**	9,872	35	8,702	4,662	9,868	35	8,711	4,635
Lillestrøm	**3 x 12**	19,574	47	18,751	5,591	19,583	47	18,771	5,557
Jessheim	**2 x 12**	12,034	43	11,908	1,727	12,040	43	11,916	1,714
Nordagutu	**2 x 7**	3,050	14	2,751	1,316	3,340	15	2,959	1,549
Skoppum	**2 x 5,8**	3,329	21	3,196	0,926	2,760	17	2,757	0,115
Larvik	**2 x 5,8**	2,261	14	2,253	-0,182	2,149	13	2,133	-0,259
Nelaug	**2 x 5,8**	2,618	16	2,565	0,524	2,698	17	2,654	0,484



Figur 5-13 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

5.9 Undersøkelser med AT-system i Oslo-området

5.9.1 AT-system inn mot Eidsvoll via Dovrebanen, Lillestrøm via Kongsvingerbanen, Grefsen mot Gjøvik og Hønefoss, Neslandsvatn og videre langs Sørlandsbanen og Smørbekk videre met Sverige

Når det i fremtiden sannsynligvis blir bygget AT-system inn mot Oslo-området blir det nok mulig at en får et større bidrag fra de omkringliggende omformerstasjoner. Det er sannsynlig at det på lang sikt vil bli bygget flere dobbeltspor for stor hastighet inn mot Oslo, og at dette gjør at trafikken kan komme til å øke mye. Her er det ikke tatt hensyn til slike ting, en har kun satt inn den lavere impedansen som gjelder, og forutsatt de samme linjer og belastninger som i dag. Det er benyttet impedansen som gjelder for AT-system med seksjonert kl-anlegg med 381 mm^2 ledertverrsnitt for negativ- og positivleder, denne er Z = 0,03895+j0,04850 Ohm/km referert til 15 kV spenningsnivå. Nedenfor viser Tabell 5-15 hvordan belastingen på de sentrale omformerstasjonene blir med AT-system, og en ser at endringene er minimale. Men med enda større belasting er det sannsynlig at en ville fått et noe større bidrag fra de omkringliggende omformerstasjoner. AT-system gjennom hele Oslo-området ville muligens hatt en større effekt. Undersøkelsene gjøres for øvrig uten at Hakavik kraftverk er i drift.

Tabell 5-15 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og forsøk med AT-system på hovedstrekningene inn mot Oslo. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. AT-system inn mot Oslo			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	22,407	53	18,063	13,260	22,083	53	17,773	13,106
Holmlia	**2 x 10**	11,089	40	9,544	5,631	10,798	39	9,361	5,368
Alnabru	**2 x 10**	10,676	38	9,586	4,699	10,353	37	9,370	4,403
Lillestrøm	**3 x 12**	21,141	50	20,489	5,179	20,471	49	19,896	4,784
Jessheim	**2 x 12**	12,718	45	12,649	1,304	12,131	43	12,085	1,034
Nordagutu	**2 x 7**	6,197	28	5,002	3,659	5,949	27	4,802	3,511

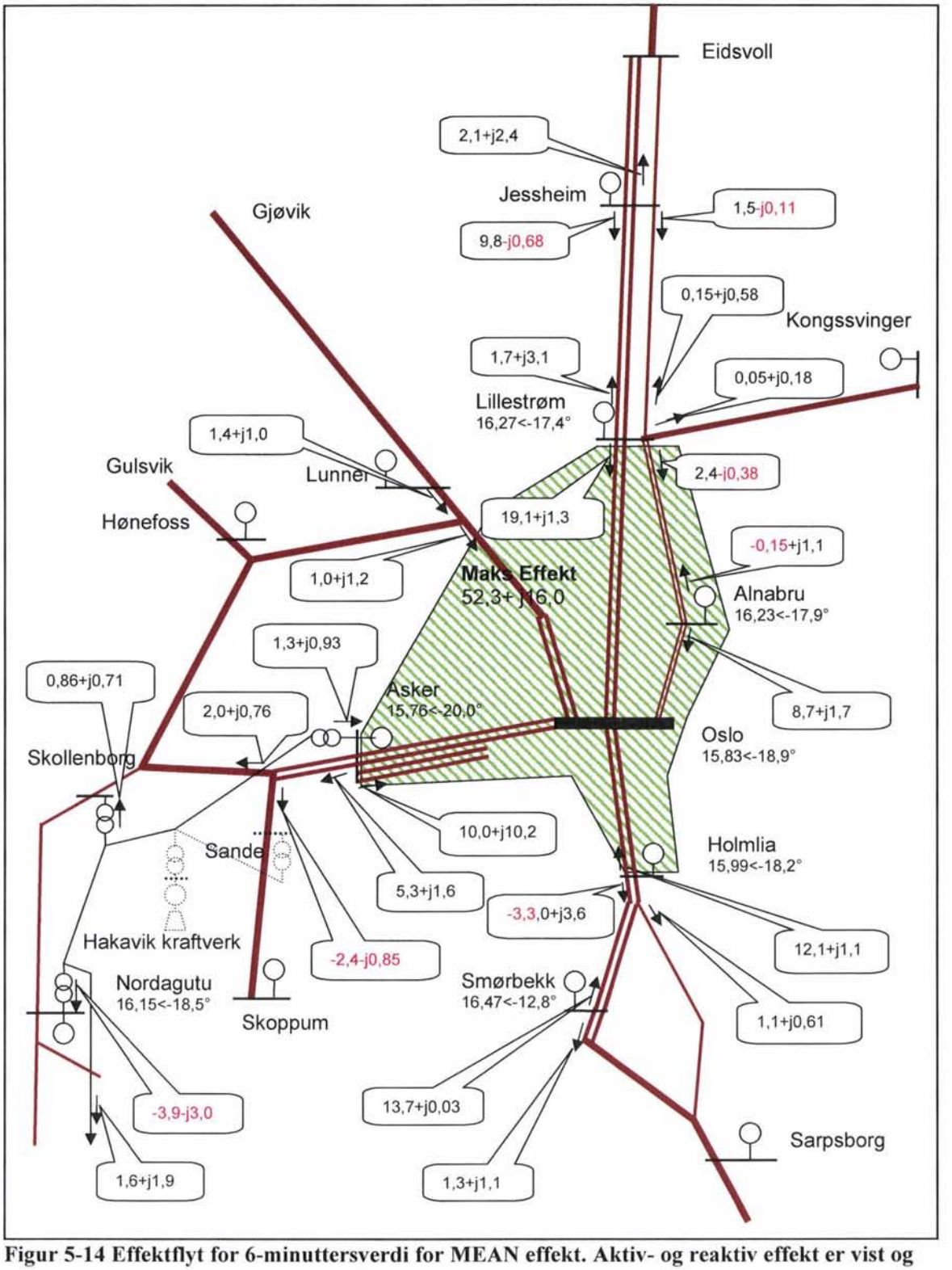
5.9.2 AT-system gjennom hele Oslo-området

Med AT-system gjennom hele Oslo-området forventes å føre til at omformerstasjonene i Oslo belastes mindre både fordi nabostasjonene lenger ut deltar mer og fordi det blir bedre effektfordeling mellom stasjonene i Oslo. En ser for seg en situasjon der det bygges AT-system på alle banestrekninger og bare baner med liten trafikk beholder sitt konvensjonelle kl-anlegg. Her blir det således ikke bygget AT-system på Hovedbanen og heller ikke på de deler av Sørlandsbanen som har fjernledning. I denne undersøkelsen var omformerne i Oslo ganske jevnt belastet, slik at andre tilfeller med mer ujevn belastning av stasjonene vil kunne vise en bedre fordeling med AT-system. Nedenfor viser Tabell 5-16 hvordan alle omformerstasjonene blir lettere belastet, unntaket er Lillestrøm som blir uforandret og Jessheim som produserer mer effekt. Årsaken er at Jessheim og Lillestrøm leverer mer effekt inn til Oslo-områdene, se Figur 5-14 og sammenlign med tilsvarende lastflytskjema i avsnitt 5.5.1 der forholdene er de samme utenom AT-systemet. En legger merke til den nokså store økningen av effekten som

flyter på Gardermobanen fra Lillestrøm og ned til Oslo, økningen fra 13,7 MW til 19,1 MW er på nesten 40 %. En legger også merke til at selv om Holmlia avlastes kommer det nå mer effekt fra Østfoldbanen via Smørbekk. Fra Asker omformerstasjon kommer det nå en del mindre effekt inn mot Oslo, men det er mulig at om en kobler ut ett aggregat i Asker vil Nordagutu kunne bidra mer. Egne trafikksimuleringer gjøres i avsnitt 6.1 for å se hvordan systemet blir belastet om det bygges ut AT-system. Om det imidlertid viser seg at enklere tiltak kan gjøres blir ikke slike trafikksimuleringer utført.

Tabell 5-16 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og forsøk med AT-system gjennom Oslo, sammenligning med forrige simulering med AT-system bare på hovedstrekningene inn mot Oslo-området. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. AT-system inn mot Oslo				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. AT-system gjennom Oslo			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	22,083	53	17,773	13,106	17,874	43	14,055	11,043
Holmlia	**2 x 10**	10,798	39	9,361	5,368	10,041	36	8,867	4,698
Alnabru	**2 x 10**	10,353	37	9,370	4,403	9,031	32	8,586	2,800
Lillestrøm	**3 x 12**	20,471	49	19,896	4,784	20,562	49	19,955	4,928
Jessheim	**2 x 12**	12,131	43	12,085	1,034	13,425	48	13,316	1,692
Nordagutu	**2 x 7**	5,949	27	4,802	3,511	4,758	22	3,928	2,686



Figur 5-14 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

5.10 Undersøkelse med utfall av to aggregater samtidig

I avsnitt 5.2 fant en at 12 % fallende statikk for alle omformerstasjoner ville være gunstig. I dette avsnittet skal en undersøke hvilken statikk som er gunstig ved utfall av ett aggregat. Tidligere [12] har en funnet at det er gunstig med dobbelt så stor statikk ved utfall av ett av to aggregater i en omformerstasjon. Her vil en undersøke om en kan velge samme innstiling av spenningsregulatorene i Oslo-området eller om det kan være bedre med enda lavere statikk. Fordi avstandene mellom stasjonene er liten og nettet er stivt, kan det hende at lavere spenning ved utfall ikke gjør at togene får for lav spenning. En benytter resultatene fra de forrige avsnittene som grunnforutsetning, altså 12 % fallende statikk, 50 % redusert reaktans i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk omformerstasjoner, samt omsetning på 54,5/16,5 i transformatoren for fjernledningen i Asker. Hakavik er, om ikke noe annet er spesifisert, utkoblet.

5.10.1 Fallende statikk slik at spenningen blir 24 % lavere ved utfall i Asker og Holmlia og normal Xq i Smørbekk

Det har i tidligere simuleringer, se [7] vært påvist at det kan komme til å flyte stor reaktiv effekt mellom Holmlia og Smørbekk omformerstasjon om en har utfall av ett aggregat i Holmlia og lav reaktans X_q i Smørbekk. Det er derfor undersøkt om dette kan bli et problem ved at en undersøker effektflyten ved de tiltak en nå har funnet, men lar reaktansen X_q i Smørbekk være henholdsvis uforandret og redusert med 50 % som en fant mest optimalt. Resultatet av dette er vist i Tabell 5-17 nedenfor og som en ser er belastningen av Holmlia lite påvirket. Det er først og fremst bidraget fra Smørbekk som endres. Sannsynligvis er det den sterkt fallende statikken ved utfall som fører til at en unngår en uheldig effektflyt mellom Holmlia og Smørbekk. Trafikksimuleringer i kapittel 6 vil ytterligere påvise om dette vil kunne være et problem.

Tabell 5-17 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og utfall av to aggregater samtidig, sammenligning med forskjellig reaktans X_q i Smørbekk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger og utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia med 24 % statikk				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner ellers grunnforutsetninger, men normal Xq i Smørbekk og utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia med 24 % statikk			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	2 x 10	18,917	68	14,180	12,522	18,908	68	14,361	12,299
Holmlia	1 x 10	7,385	53	5,687	4,702	7,539	54	6,013	4,537
Smørbekk	2 x 12	13,203	47	13,181	0,729	10,991	39	10,789	2,085
Alnabru	2 x 10	12,038	43	10,606	5,693	12,128	43	10,822	5,476
Lillestrøm	3 x 12	23,162	55	22,419	5,781	23,492	56	22,846	5,427
Jessheim	2 x 12	13,530	48	13,478	1,164	13,697	49	13,659	0,990
Nordagutu	2 x 7	7,102	32	5,642	4,314	6,999	32	5,665	4,110

5.10.2 Fallende statikk slik at spenningen blir henholdsvis 16 % lavere ved utfall i Asker og 24 % Holmlia

Nedenfor viser Tabell 5-18 belastningen som oppstår når ett aggregat i både Holmlia og Asker faller ut når statikken ved utfall blir 24 % i Holmlia og 16 % i Asker med tre innsatte aggregater. For sammenligningen sin skyld er resultatene med belastningen av aggregatene med normal drift og grunnforutsetningene satt inn. I trafikksimuleringene med grunnleggende forutsetninger, se avsnitt 4.3, ble både Asker og Holmlia omformerstasjoner belastet så høyt ved utfall av ett aggregat i hver av dem at de resterende bli overbelastet og falt ut. Stabiliseringen var da satt til 5 % og statikken for stasjonen var flat. Spenningen vil da falle med 2,7 % for Asker og 5 % for Holmlia.

Det er her naturlig å sammenligne med belastningen i det øyeblikket da belastningen er størst for selve Oslo-området, se Figur 4-13. Asker er da belastet 25,2 MVA (eller 90 %) for sin 6-minuttersverdi og Holmlia er belastet 11,9 MVA (eller 85 %). Her ser en at med en betydelig større fallende statikk oppnår en at belastningen av disse omformerstasjonene blir betydelig lavere. Men en må også ta i betraktning at den statiske lastflyten ikke viste helt riktig belastning i forhold til trafikksimuleringen, se avsnitt 5.1. Spesielt var Asker belastet hardere i den statiske lastflyten. Dermed kan det hende at en har grunn til å være enda mer optimistisk med tanke på mulighetene for å redusere belastningen av Asker slik som resultatene her antyder. Det en har oppnådd med de nye grunnsimuleringene ser en tydelig her, det er større belastning av Lillestrøm og Jessheim, samt at både Nordagutu og Smørbekk bidrar mer. En annen ting er at spenningen blir lavere, dermed skal det produseres mindre reaktiv effekt i omformerne. Den lavere spenningen får imidlertid lastene i den statiske modellen til å oppta mindre effekt, mens dette nok ikke vil skje for togene da spenningen må synke enda mer. Egen trafikksimulering må gjøres for å se hva som egentlig blir resultatet av de nye innstillingene. En skal i neste avsnitt se på hva enda lavere spenning ved utfall vil føre til.

Tabell 5-18 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og utfall av to aggregater samtidig, sammenligning med forskjellig statikk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

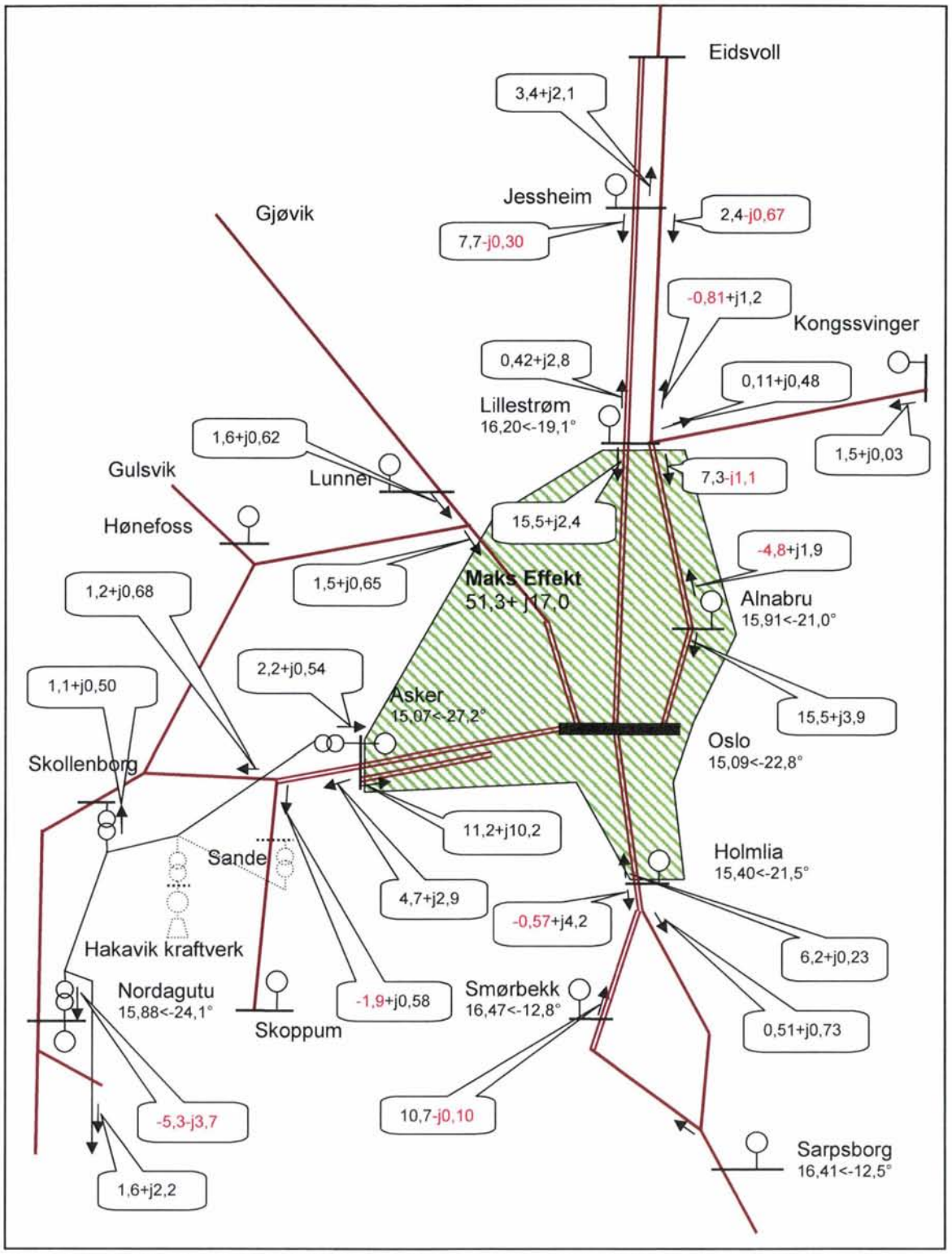
Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og ellers grunnforutsetninger				Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger og utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia med 24 % statikk			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	22,407	53	18,063	13,260	**2 x 10**	18,917	68	14,180	12,522
Holmlia	**2 x 10**	11,089	40	9,544	5,631	**1 x 10**	7,385	53	5,687	4,702
Smørbekk	**2 x 12**	11,921	43	11,916	0,300	**2 x 12**	13,203	47	13,181	0,729
Alnabru	**2 x 10**	10,676	38	9,586	4,699	**2 x 10**	12,038	43	10,606	5,693
Lillestrøm	**3 x 12**	21,141	50	20,489	5,179	**3 x 12**	23,162	55	22,419	5,781
Jessheim	**2 x 12**	12,718	45	12,649	1,304	**2 x 12**	13,530	48	13,478	1,164
Nordagutu	**2 x 7**	6,197	28	5,002	3,659	**2 x 7**	7,102	32	5,642	4,314

5.10.3 Fallende statikk slik at spenningen blir 28 % lavere ved utfall i Asker og Holmlia

Når statikken ved utfall økes fra 24 til 28 % og det simuleres med lastflyt med utfall av Asker og Holmlia ser en at en kan oppnå enda mer lastavslag, se Tabell 5-19. Endringene er imidlertid små, og det er bare meget liten endring av bidraget fra de andre omformerstasjonene når Asker og Holmlia gir fra seg last. Figur 5-15 viser effektflyten som oppstår i Oslo-området og områdene utenfor. Dette er interessant å sammenligne med lastflyten fra trafikksimuleringen for samme driftstilfelle i avsnitt 4.3 og Figur 4-13. Om en her sammenligner kun 6-minuttersverdier ser en noen ganske store endringer. Fra Asker ble det tidligere levert 16,2 MW inn mot Oslo, noe som nå er endret til 11,2 MW. Det er i hovedsak Nordagutu, Lillestrøm, Jessheim og Holmlia som bidrar med mer effekt til Oslo-området, slik at Asker og Holmlia avlastes.

Tabell 5-19 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og utfall av to aggregater samtidig, sammenligning med forskjellig statikk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger og utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia med 24 % statikk				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger og utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia med 28 % statikk			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**2 x 10**	18,917	68	14,180	12,522	18,282	65	13,885	11,892
Holmlia	**1 x 10**	7,385	53	5,687	4,702	7,122	51	5,578	4,418
Smørbekk	**2 x 12**	13,203	47	13,181	0,729	13,227	47	13,198	0,845
Alnabru	**2 x 10**	12,038	43	10,606	5,693	12,158	43	10,636	5,891
Lillestrøm	**3 x 12**	23,162	55	22,419	5,781	23,248	55	22,457	5,973
Jessheim	**2 x 12**	13,530	48	13,478	1,164	13,552	48	13,495	1,216
Nordagutu	**2 x 7**	7,102	32	5,642	4,314	7,197	33	5,666	4,437



Figur 5-15 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

5.10.4 Fallende statikk slik at spenningen blir 24 % lavere ved utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru

Med utfall av ett aggregat i Holmlia og ett i Alnabru oppstår en situasjon som nok ikke er så kritisk som utfall av ett aggregat samtidig i Asker og Holmlia. Det kan imidlertid være interessant å se på lastflyten og forskjellen på om en har 24 eller 28 % fallende statikk ved utfall. Nedenfor viser belastningen av noen sentrale omformerstasjoner før og etter utfallet av aggregatene. Som en ser fordeler belastningen seg ut over de øvrige stasjonene når Holmlia og Alnabru mister noe av sin kapasitet. Alnabru og Holmlia reduserer sin effektproduksjon slik at de gjenværende aggregatene bare blir moderat belastet.

Tabell 5-20 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og utfall av to aggregater samtidig, sammenligning med forskjellig statikk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og ellers grunnforutsetninger				Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger og utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru med 24 % statikk			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	22,407	53	18,063	13,260	**3 x 10**	23,790	85	19,364	13,821
Holmlia	**2 x 10**	11,089	40	9,544	5,631	**1 x 10**	7,380	53	5,693	4,687
Smørbekk	**2 x 12**	11,921	43	11,916	0,300	**2 x 12**	13,211	47	13,190	0,716
Alnabru	**2 x 10**	10,676	38	9,586	4,699	**1 x 10**	6,778	48	5,585	3,841
Lillestrøm	**3 x 12**	21,141	50	20,489	5,179	**3 x 12**	23,861	57	22,935	6,550
Jessheim	**2 x 12**	12,718	45	12,649	1,304	**2 x 12**	13,766	49	13,701	1,312
Nordagutu	**2 x 7**	6,197	28	5,002	3,659	**2 x 7**	6,395	29	5,249	3,653

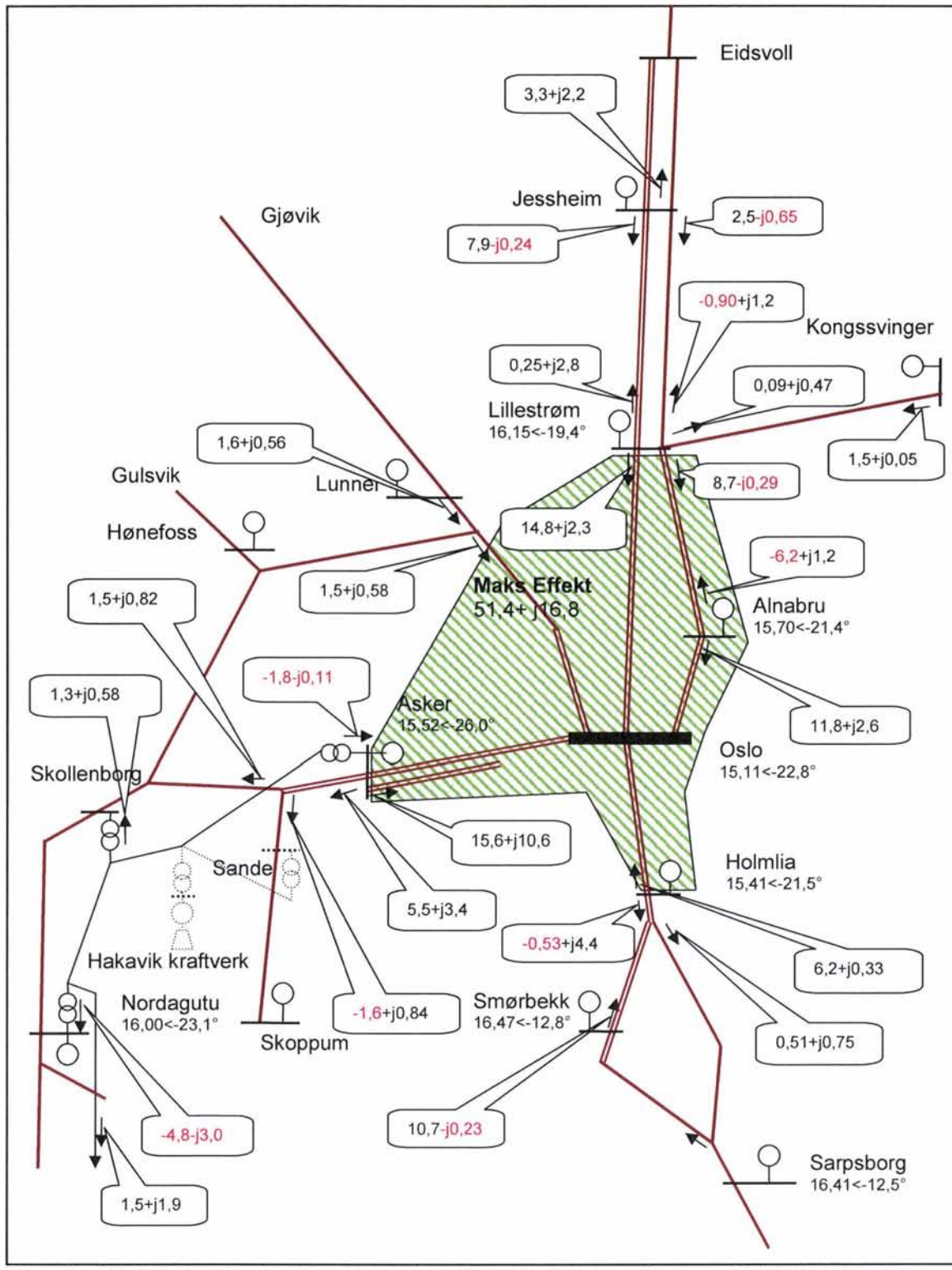
5.10.5 Fallende statikk slik at spenningen blir 28 % lavere ved utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru

Med 28 % fallende statikk istedenfor 24 ser en at det oppstår bare en liten reduksjon av effektproduksjonen i Holmlia og Alnabru, mens økningen for de andre blir jevnet ut så mye at endringene er meget små, se Tabell 5-21. Når det gjelder lastflyten for hele området viser Figur 5-16 hvordan det nå flyter mer effekt fra Asker og Lillestrøm, enn i tilfellet med utfall av Asker og Holmlia. Holmlia avlastes like mye av Smørbekk uavhengig av om det er Alnabru eller Asker som i tillegg mister ett aggregat.

En vil her konkludere med at endringen fra 24 til 28 % fallende statikk ved utfall av ett aggregat i en stasjon har liten betydning. For å få samme innstillinger i alle stasjoner kan en like godt standardisere på 12 % ved normal drift og 24 ved utfall av ett av to aggregater. En kan da ta vekk kompenseringen mellom aggregatene.

Tabell 5-21 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og utfall av to aggregater samtidig, sammenligning med forskjellig statikk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger og utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru med 24 % statikk				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger og utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru med 28 % statikk			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	23,790	57	19,364	13,821	23,896	57	19,400	13,952
Holmlia	**1 x 10**	7,380	53	5,693	4,687	7,099	51	5,583	4,376
Smørbekk	**2 x 12**	13,211	47	13,190	0,716	13,230	47	13,203	0,814
Alnabru	**1 x 10**	6,778	48	5,585	3,841	6,566	47	5,502	3,584
Lillestrøm	**3 x 12**	23,861	57	22,935	6,550	23,948	57	22,965	6,754
Jessheim	**2 x 12**	13,766	49	13,701	1,312	13,785	49	13,715	1,368
Nordagutu	**2 x 7**	6,395	29	5,249	3,653	6,404	29	5,254	3,661



Figur 5-16 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

5.10.6 Mindre statikk for Jessheim, Lillestrøm, Smørbekk og Nordagutu, men fortsatt 12 % på alle andre omformerstasjoner og utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia

Det ble i avsnitt 5.5.3 undersøkt hvordan lastflyten endres om omformerstasjonene Jassheim, Lillestrøm, Smørbekk og Nordagutu får mindre fallende statikk. En statikk på 4 % ble valgt for disse og 12 % for de øvrige. En fikk da se at disse omformerstasjonene bidro med mer effekt, altså etter intensjonen. Stor betydning fikk det allikevel ikke. En skal her undersøke hvordan 4 % statikk (i normal drift) for disse stasjonene påvirker en situasjon med utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia. Det bemerkes at Asker ved utfall av ett aggregat nå får 6 % statikk og Holmlia 8 %. Nedenfor viser Tabell 5-22 at Asker får redusert sitt bidrag med fem prosentpoeng og Holmlia med fire. De andre omformerne bidrar mer og Nordagutu så mye som seks prosentpoeng.

Dette kan være et mulig alternativ for å avhjelpe de roterende omformerstasjonene i Oslo-området ved utfall. Imidlertid vil en også måtte undersøke om en får ugunstigere forhold i normal drift ved at tapene øker. En kan få den bieffekt med denne endringen av statikken at det utveksles mer reaktiv effekt. I avsnitt 6.1.3 blir det gjort en egen undersøkelse på dette.

Tabell 5-22 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og utfall av to aggregater samtidig, sammenligning med forskjellig statikk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger og utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia med 24 % statikk				Statisk lastflyt med 4 % statikk i Jessheim, Lillestrøm, Smørbekk og Nordagutu og 12 % statikk i alle andre omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger. Forsøk med utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia med 24 % statikk			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	2 x 10	18,917	68	14,180	12,522	17,641	63	13,651	11,173
Holmlia	1 x 10	7,385	53	5,687	4,702	6,858	49	5,468	4,132
Smørbekk	2 x 12	13,203	47	13,181	0,729	13,209	47	13,180	0,856
Alnabru	2 x 10	12,038	43	10,606	5,693	11,431	41	10,366	4,818
Lillestrøm	3 x 12	23,162	55	22,419	5,781	25,363	60	23,824	8,646
Jessheim	2 x 12	13,530	48	13,478	1,164	13,377	48	13,365	0,534
Nordagutu	2 x 7	7,102	32	5,642	4,314	8,345	38	6,210	5,569

5.11 Undersøkelse med forskjellig effekt i Hakavik kraftverk og utfall av to aggregater samtidig i Holmlia og Alnabru

En vil her undersøke litt rundt effekten som kommer fra Hakavik og dens betydning ved utfall. Det er ved utfall av omformeraggregater at bidraget fra denne kraftstasjonen kan være av stor betydning. Under diskusjoner angående størrelsen på den eller de nye turbinnene i Hakavik har det vært diskutert en samlet ytelse på 5, 10 eller 15 MW. Det kan nok slås fast at en ytelse på 5 MW vil ha liten betydning ved utfall av to aggregater i Oslo-området, det har en sett at 5 MW fordelt ut mellom de sentrale stasjonene knapt utgjør mer enn ett prosentpoeng. Dermed er denne ytelsen ikke så interessant å undersøke. En vil her se på noen tilfeller med 10 og 15 MW og se om det er noen forskjell.

5.11.1 Ytelse på 10 MW i Hakavik og utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru

Ved utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru omformerstasjoner antas det å være situasjonen der effektbidrag fra Hakavik får mest betydning. Med 10 MW i bidrag fra Hakavik blir reduksjonen av belastningen av de andre stasjonene som vist i Tabell 5-23. For sammenligningens skyld er belastningen uten Hakavik også vist, og en ser at spesielt Asker og Nordagutu blir lettere belastet. Ellers fordeler effekten seg ut og avlaster alle omformerstasjonene.

Tabell 5-23 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og utfall av to aggregater samtidig, sammenligning med situasjonen med og uten effektproduksjon i Hakavik. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

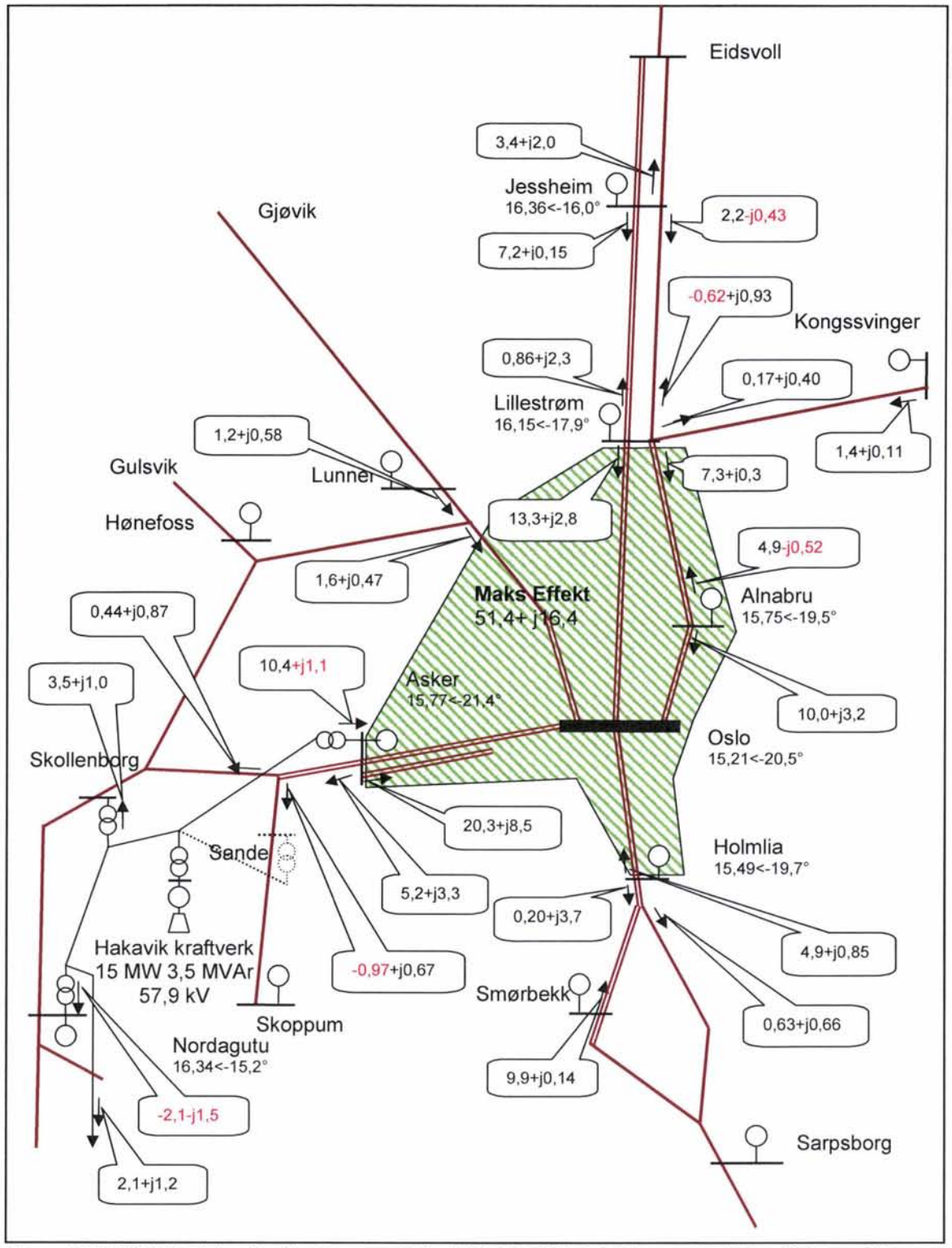
Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger og utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru med 24 % statikk				Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger og utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru med 24 % statikk. Hakavik med 10 MW produksjon			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	23,790	57	19,364	13,821	**3 x 10**	19,788	47	16,539	10,864
Holmlia	**2 x 10**	7,380	53	5,693	4,687	**1 x 10**	7,020	50	5,339	4,550
Smørbekk	**2 x 12**	13,211	47	13,190	0,716	**2 x 12**	12,728	45	12,696	0,886
Alnabru	**2 x 10**	6,778	48	5,585	3,841	**1 x 10**	6,423	46	5,241	3,712
Lillestrøm	**3 x 12**	23,861	57	22,935	6,550	**3 x 12**	22,659	54	21,659	6,630
Jessheim	**2 x 12**	13,766	49	13,701	1,312	**2 x 12**	13,255	47	13,163	1,546
Nordagutu	**2 x 7**	6,395	29	5,249	3,653	**2 x 7**	3,866	18	3,617	1,365

5.11.2 Ytelse på 15 MW i Hakavik og utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru

I Tabell 5-24 er det vist belastningen av omformerstasjonene ved utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru, samt et bidrag på 15 MW fra Hakavik. For sammenligningens skyld er det satt inn tall for belastningen med bare 10 MW fra kraftstasjonen. Igjen ser en at belastningen fordeler seg jevnt ut over alle omformerstasjonene. En legger merke til at en ganske stor del av effekten avlaster Nordagutu omformerstasjon. Av trafikksimuleringene i avsnitt 4.2 kan en få inntrykk av at den kortvarige belastningen er ca dobbelt så stor som 6-minuttersverdiene. Om en her tenker seg at belastningen øker til det dobbelte vil en utvilsomt nærme seg grensene for overlast, men en kan få inntrykk av at det kan gå bra. Marginene mot overbelastning vil selvsagt ikke være store og sannsynligvis vil økt ytelse i en slik situasjon med utfall av to aggregater hjelpe til å redusere marginene. Det er nok vanskelig å si at en effekt på mellom 5, 10 eller 15 MW fra Hakavik redder situasjonen, selv med trafikksimuleringer kan en neppe si at en har en klar grense. I Figur 5-17 kan en se hvordan effekten fra Hakavik fordeler seg mellom stasjonene, se også avsnitt 5.10.4 og Figur 5-16.

Tabell 5-24 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og utfall av to aggregater samtidig, sammenligning med situasjonen med 10 og 15 MW effektproduksjon i Hakavik. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger og utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru med 24 % statikk. Hakavik med 10 MW produksjon				Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger og utfall av ett aggregat i Holmlia og Alnabru med 24 % statikk. Hakavik med 15 MW produksjon			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	19,788	47	16,539	10,864	18,510	44	15,085	10,727
Holmlia	**1 x 10**	7,020	50	5,339	4,550	6,899	49	5,150	4,583
Smørbekk	**2 x 12**	12,728	45	12,696	0,886	12,479	45	12,433	1,049
Alnabru	**1 x 10**	6,423	46	5,241	3,712	6,305	45	5,059	3,763
Lillestrøm	**3 x 12**	22,659	54	21,659	6,630	22,100	53	20,977	6,931
Jessheim	**2 x 12**	13,255	47	13,163	1,546	12,996	46	12,876	1,749
Nordagutu	**2 x 7**	3,866	18	3,617	1,365	3,242	15	2,951	1,340



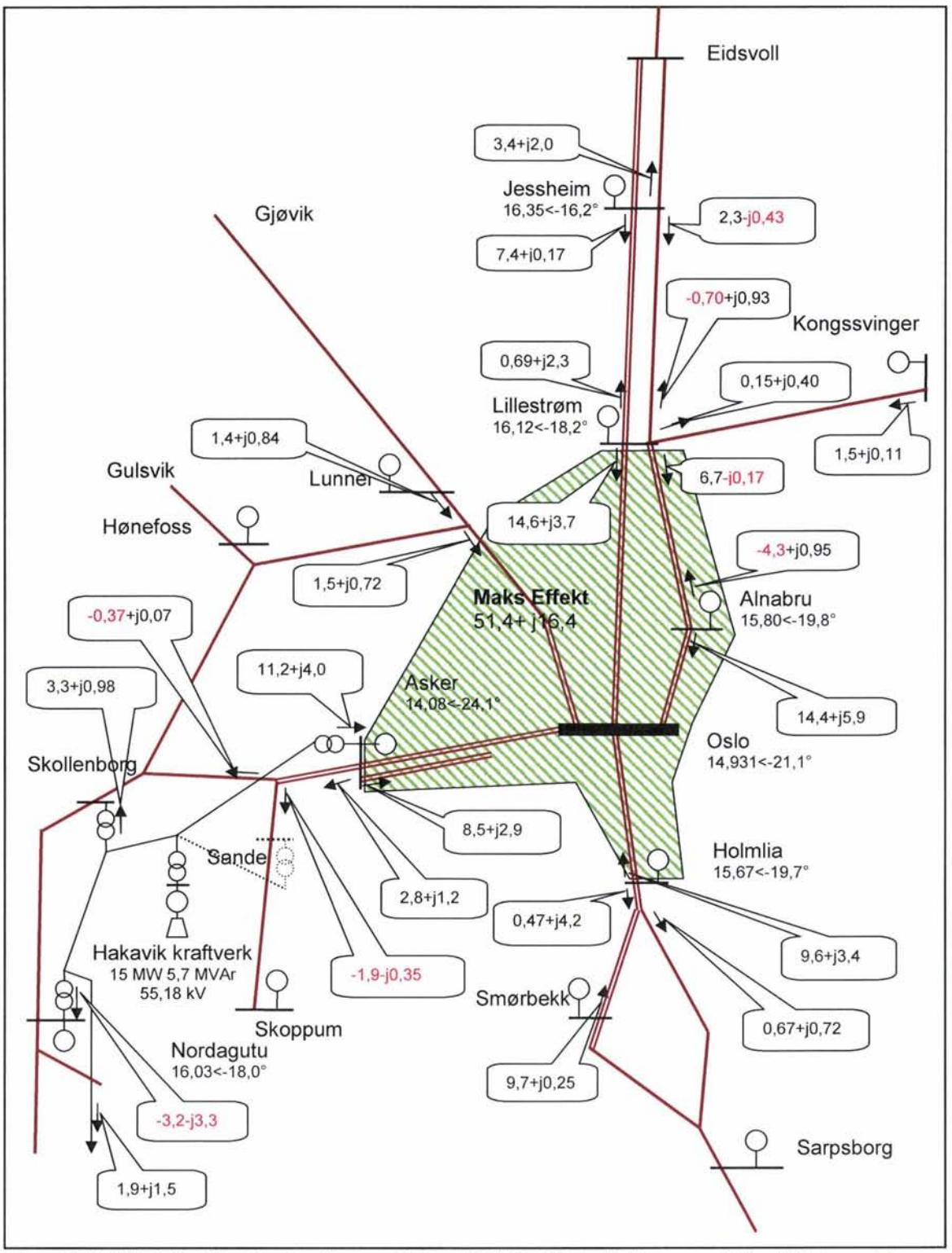
Figur 5-17 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

5.11.3 Ytelse på 15 MW og utfall av hele Asker omformerstasjon

Ved utfall av hele Asker omformerstasjon vil en utvilsomt få en dramatisk situasjon der utfall av hele Oslo-området vil synes uunngåelig. Om det imidlertid kan komme et bidrag på 15 MW fra Hakavik og med de nye tiltakene for innstilling av omformeraggregatene er det imidlertid mulig at også dette kan gå bra. I Tabell 5-25 er det vist belastningen av omformerstasjonene med denne situasjonen. Som en ser fordeler belastningen seg ganske jevnt ut over alle stasjonene og selv om en ser for seg en fordobling av den kortvarige belastningen ser en at det godt kan tenkes at en fremdels kan opprettholde driften. Egne trafikksimuleringer må i så fall vise dette. Når det gjelder effektflyten i Oslo-området viser Figur 5-19 denne, og som en ser reduseres bidraget fra Asker og inn til Oslo samtidig med at de andre omformerstasjonene leverer mer.

Tabell 5-25 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og utfall av hele Asker omformerstasjon med effektproduksjon i Hakavik. Sammenligning med situasjonene før utfall av Asker. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger. Hakavik med 15 MW				Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner, ellers grunnforutsetninger. Hakavik med 15 MW og utfall av hele Asker omformerstasjon.			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	17,178	41	13,934	10,047	**0 x 10**	0,000	-	-	-
Holmlia	**2 x 10**	10,312	37	8,662	5,585	**2 x 10**	12,616	45	10,073	7,587
Alnabru	**2 x 10**	9,872	35	8,702	4,662	**2 x 10**	12,296	44	10,154	6,934
Lillestrøm	**3 x 12**	19,574	47	18,751	5,591	**3 x 12**	22,713	54	21,473	7,376
Jessheim	**2 x 12**	12,034	43	11,908	1,727	**2 x 12**	13,216	47	13,091	1,800
Nordagutu	**2 x 7**	3,050	14	2,751	1,316	**2 x 7**	5,236	24	3,912	3,480



Figur 5-18 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

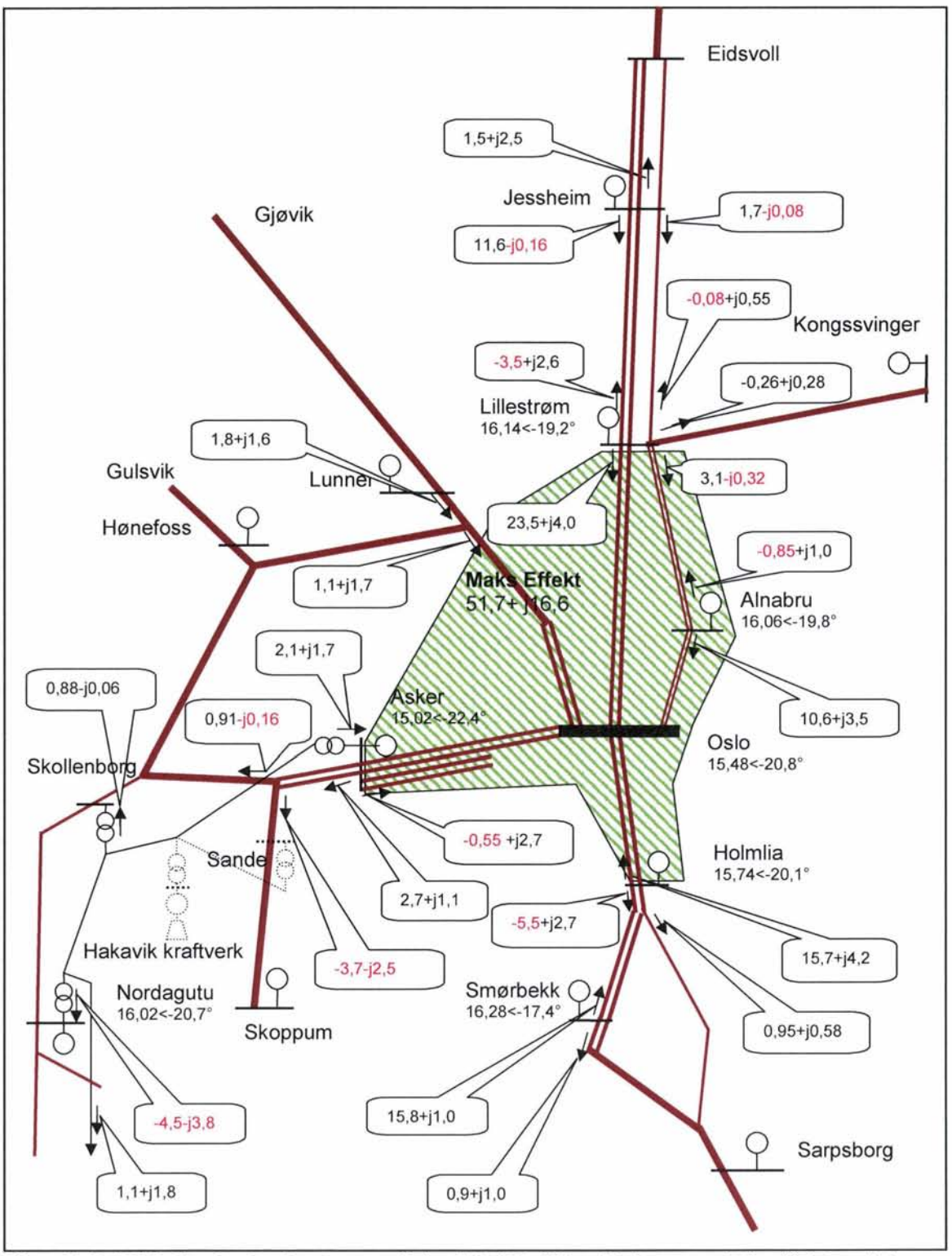
5.12 Undersøkelse med utfall og AT-system i Oslo-området

5.12.1 AT-system over hele Oslo-området og utfall av Asker omformerstasjon

Med AT-system over hele Oslo-området slik som undersøkt i avsnitt 5.9 vil effekten kunne fordeles mye bedre mellom omformerstasjonene, slik at selv utfall av en hel omformerstasjon vil kunne gå bra uten utfall av nabostasjonene. Dette vil en undersøke her og undersøkelsen er gjort med utfall av hele Asker omformerstasjon uten at Hakavik kraftverk er i drift. Nedenfor viser Tabell 5-27 hvordan omformerstasjonene blir belastet, og for sammenligningens skyld er belastningen i normal drift også tatt med. Som en ser øker belastningen på de nærliggende stasjonene i Oslo-området en del, men en ser også at de fjernere stasjonene som Smørbekk og Jessheim får økt belastning. Mest overraskende er det at fjerntliggende stasjoner som Lunner og Hønefoss får økt sin produksjon med nesten 10 % -poeng begge to. I Figur 5-20 ser en effektflyten som oppstår i denne situasjonen, og det er påfallende hvor mye mer effekt som hentes fra de mer perifere omformerstasjonene, sammenlign for eksempel med lignende tilfelle med utfall med konvensjonelt system, se figurene i 5.10.

Tabell 5-26 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og utfall av Asker når det er bygget AT-system gjennom Oslo-området. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

		Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. AT-system gjennom Oslo					Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. AT-system inn mot Oslo og utfall av Asker omformerstasjon			
Omformer-stasjon	**Innsatt ytelse**	**6-minutter**		**Aktiv effekt**	**Reaktiv effekt**	**Innsatt ytelse**	**6-minutter**		**Aktiv effekt**	**Reaktiv effekt**
	[MVA]	**[MVA]**	**%**	**[MW]**	**[MVAr]**	**[MVA]**	**[MVA]**	**%**	**[MW]**	**[MVAr]**
Asker	**3 x 10**	17,874	43	14,055	11,043	**3 x 10**	0,000	0	0,000	0,000
Holmlia	**2 x 10**	10,041	36	8,867	4,698	**2 x 10**	12,320	44	10,191	6,913
Smørbekk	**2 x 12**	15,285	55	15,232	1,246	**2 x 12**	17,159	61	17,012	2,225
Sarpsborg	**1 x 12**	4,265	30	4,250	0,357	**1 x 12**	4,724	34	4,702	0,450
Alnabru	**2 x 10**	9,031	32	8,586	2,800	**2 x 10**	10,793	39	9,803	4,514
Lunner	**1 x 5,8**	2,634	33	2,309	1,266	**1 x 5,8**	3,292	41	2,687	1,903
Hønefoss	**1 x 5,8**	2,475	31	2,176	1,180	**1 x 5,8**	3,247	41	2,656	1,868
Lillestrøm	**3 x 12**	20,562	49	19,955	4,928	**3 x 12**	23,806	57	22,720	7,088
Kongsvinger	**1 x 5,8**	1,666	21	1,639	0,297	**1 x 5,8**	1,906	24	1,852	0,452
Jessheim	**2 x 12**	13,425	48	13,316	1,692	**2 x 12**	15,023	54	14,836	2,349
Nordagutu	**2 x 7**	4,758	22	3,928	2,686	**2 x 7**	5,832	27	4,621	3,558



Figur 5-19 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

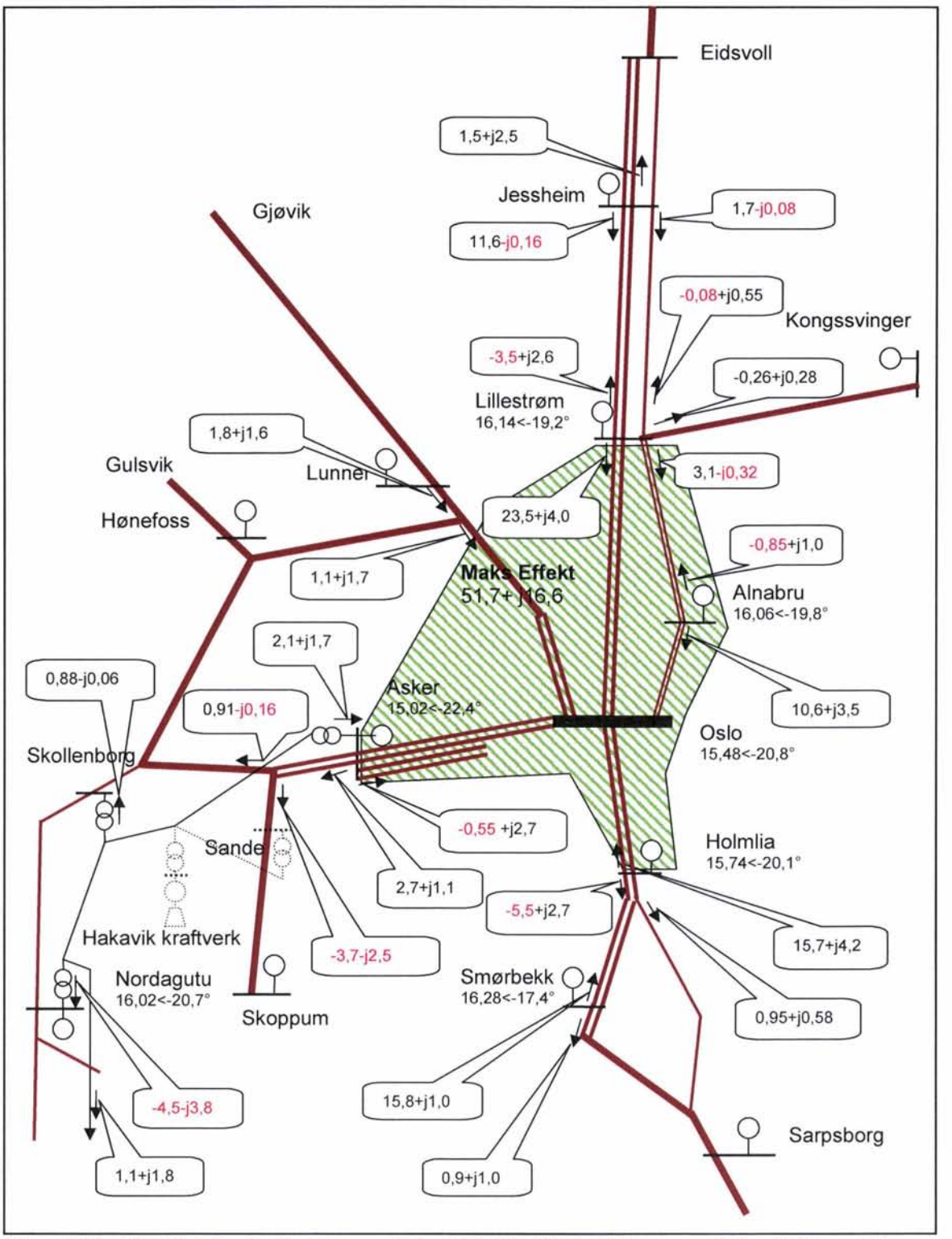
5.13 Undersøkelse med utfall og AT-system i Oslo-området

5.13.1 AT-system over hele Oslo-området og utfall av Asker omformerstasjon

Med AT-system over hele Oslo-området slik som undersøkt i avsnitt 5.9 vil effekten kunne fordeles mye bedre mellom omformerstasjonene, slik at selv utfall av en hel omformerstasjon vil kunne gå bra uten utfall av nabostasjonene. Dette vil en undersøke her er gjort med utfall av hele Asker omformerstasjon uten at Hakavik kraftverk er i drift. Nedenfor viser Tabell 5-27 hvordan omformerstasjonene blir belastet og for sammenligningens skyld er belastningen i normal drift også tatt med. I Figur 5-20 ser en effektflyten som oppstår i denne situasjonen, ser en effektflyten som oppstår i denne situasjonen, og det er påfallende hvor mye mer effekt som hentes fra de mer perifere omformerstasjonene, sammenlign for eksempel med lignende tilfelle med utfall med konvensjonelt system, se figurene i 5.10.

Tabell 5-27 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og utfall av Asker når det er bygget AT-system gjennom Oslo-området. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

		Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. AT-system gjennom Oslo					Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. AT-system inn mot Oslo og utfall av Asker omformerstasjon			
Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt	Innsatt ytelse	6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	17,874	43	14,055	11,043	**3 x 10**	0,000	0	0,000	0,000
Holmlia	**2 x 10**	10,041	36	8,867	4,698	**2 x 10**	12,320	44	10,191	6,913
Smørbekk	**2 x 12**	15,285	55	15,232	1,246	**2 x 12**	17,159	61	17,012	2,225
Sarpsborg	**1 x 12**	4,265	30	4,250	0,357	**1 x 12**	4,724	34	4,702	0,450
Alnabru	**2 x 10**	9,031	32	8,586	2,800	**2 x 10**	10,793	39	9,803	4,514
Lunner	**1 x 5,8**	2,634	33	2,309	1,266	**1 x 5,8**	3,292	41	2,687	1,903
Hønefoss	**1 x 5,8**	2,475	31	2,176	1,180	**1 x 5,8**	3,247	41	2,656	1,868
Lillestrøm	**3 x 12**	20,562	49	19,955	4,928	**3 x 12**	23,806	57	22,720	7,088
Kongsvinger	**1 x 5,8**	1,666	21	1,639	0,297	**1 x 5,8**	1,906	24	1,852	0,452
Jessheim	**2 x 12**	13,425	48	13,316	1,692	**2 x 12**	15,023	54	14,836	2,349
Nordagutu	**2 x 7**	4,758	22	3,928	2,686	**2 x 7**	5,832	27	4,621	3,558



Figur 5-20 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

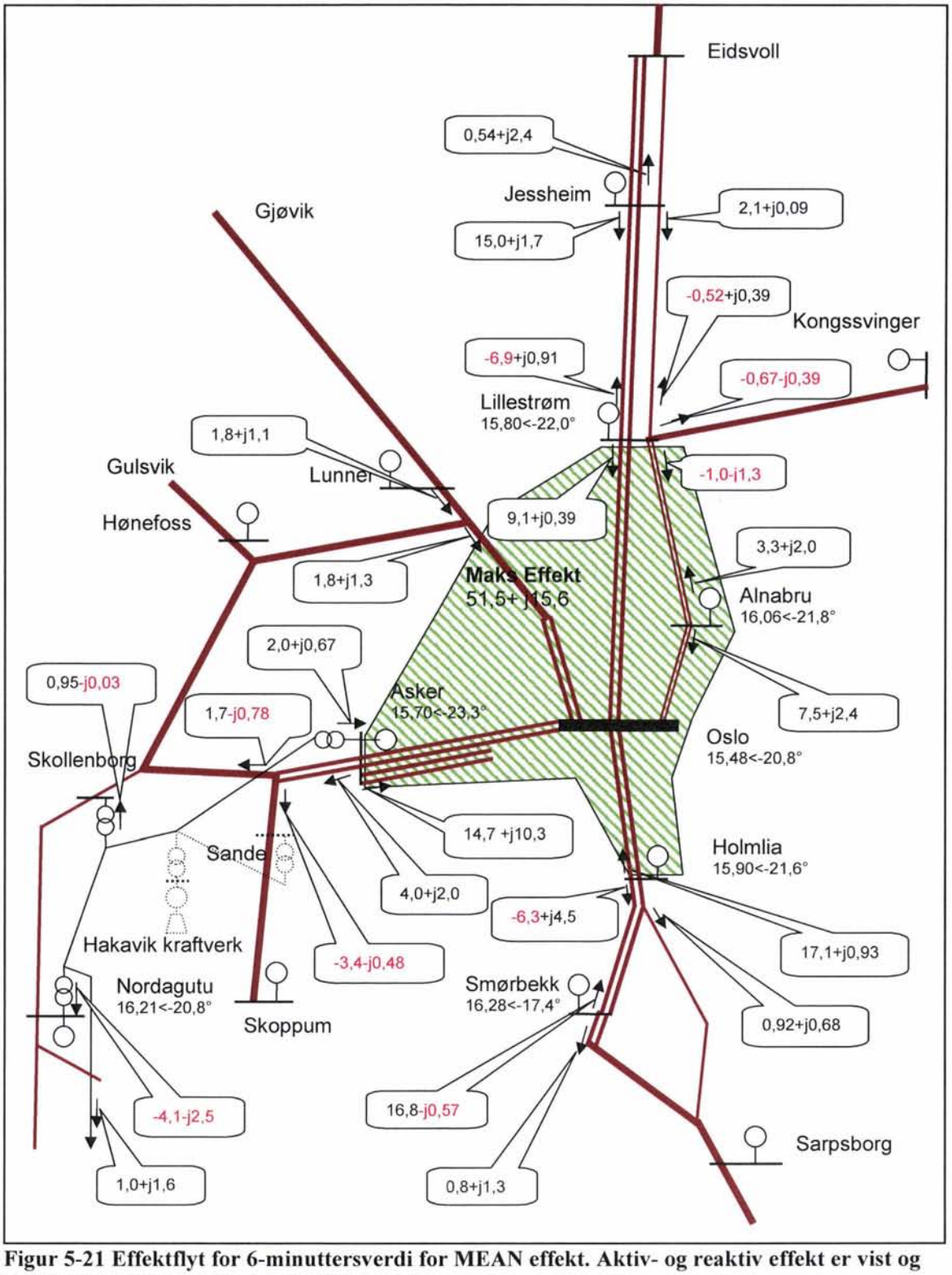
5.13.2 AT-system over hele Oslo-området og utfall av Lillestrøm omformerstasjon

Utfall av hele Lillestrøm omformerstasjon må utvilsomt sies å være det verste som kan skje banestrømforsyningen i Oslo-området. Dette er den største omformerstasjonen og den er en viktig forsyning både for Oslo-området og Gardermobanen, Hovedbanen og Kongsvingerbanen. I Tabell 5-28 er belastningen av de viktigste omformerstasjonene vist, og som en ser er det også i dette tilfelle slik at effekten blir fordelt ut over mange stasjoner. Ikke uventet er det Jessheim som får sin belastning økt mest. Mer overraskende er det at Smørbekk bidrar så mye og dette har nok årsak i at X_q for de statiske omformerne ble redusert såpass mye som 50 %. En annen ting som er vel så viktig er at på matestrekningen mellom Smørbekk og Holmlia er stor belastning og at Holmlia leverer mindre effekt mot sør i denne situasjonen, se Figur 5-21 og sammenlign med tilsvarende lastfordeling undersøkt i avsnitt 5.9.2. I praksis vil en starte opp det andre aggregatet i Kongsvinger for derved å overføre mer effekt fra kortere hold.

Om utfallet av Lillestrøm eller Asker skjer i rushtrafikken kan en av dette få inntrykk av at overføringsevnen for AT-system er så stor at dette ikke fører til noen kritisk situasjon, altså verken veldig lav spenning eller overbelastning. Naturlig nok er det bare egne simuleringer som vil kunne vise dette, og om nødvendig blir dette analysert i dette arbeidet eller så gjøres det i en egen rapport for belastningen i Oslo-området på lengre sikt, se avsnitt 7.2.17.

Tabell 5-28 Belastning av omformerstasjonene med statisk lastflyt og utfall av Lillestrøm når det er bygget AT-system gjennom Oslo-området. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Omformer-stasjon	Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. AT-system gjennom Oslo				Innsatt ytelse	Statisk lastflyt med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. AT-system inn mot Oslo og utfall av Lillestrøm omformerstasjon			
		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt		6-minutter		Aktiv effekt	Reaktiv effekt
	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]	[MVA]	[MVA]	%	[MW]	[MVAr]
Asker	**3 x 10**	17,874	43	14,055	11,043	**3 x 10**	20,430	49	16,755	11,690
Holmlia	**2 x 10**	10,041	36	8,867	4,698	**2 x 10**	12,045	43	10,742	5,429
Smørbekk	**2 x 12**	15,285	55	15,232	1,246	**2 x 12**	17,894	64	17,869	0,897
Sarpsborg	**1 x 12**	4,265	30	4,250	0,357	**1 x 12**	4,886	35	4,884	0,093
Alnabru	**2 x 10**	9,031	32	8,586	2,800	**2 x 10**	11,662	42	10,812	4,373
Lunner	**1 x 5,8**	2,634	33	2,309	1,266	**1 x 5,8**	3,043	38	2,725	1,355
Hønefoss	**1 x 5,8**	2,475	31	2,176	1,180	**1 x 5,8**	2,829	35	2,564	1,196
Lillestrøm	**3 x 12**	20,562	49	19,955	4,928	**0 x 12**	0,000	0	0,000	0,000
Kongsvinger	**1 x 5,8**	1,666	21	1,639	0,297	**1 x 5,8**	2,416	30	2,248	0,884
Jessheim	**2 x 12**	13,425	48	13,316	1,692	**2 x 12**	18,104	65	17,594	4,238
Nordagutu	**2 x 7**	4,758	22	3,928	2,686	**2 x 7**	4,950	22	4,405	2,258



Figur 5-21 Effektflyt for 6-minuttersverdi for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt er vist og negativt fortegn er markert med røde tall.

5.14 Oppsummering etter undersøkelser med normal- og unormal driftsituasjoner med forbedring av lastflyten i Oslo-området

Her følger en kort oppsummering av det en har funnet i dette kapittelet. Simuleringene med statisk lastflyt og normal drift viste at:

- Innføring av statikk for omformerstasjonene reduserer belastningen på gjenværende aggregater ved utfall
  - Fra før har en funnet at 12 % statikk for omformerstasjonene ved normal drift er gunstig for å redusere reaktiv effektutveksling mellom omformerstasjonene, se [12]. For Oslo-området er denne gevinsten enda større ved at den reaktive effektutvekslingen går betydelig ned.
  - Om de store statiske omformerne får en mindre fallende statikk vil disse kunne bidra med større effekt, - slik kan disse avlaste de roterende aggregatene og redusere faren for at de overbelastes.
  - En har også funnet at ved utfall av ett av to aggregater i en stasjon er det fornuftig å la spenningen falle til det dobbelte, altså 24 % statikk.
  - Imidlertid er ikke forskjellene veldig store om statikken endres med 4 % opp eller ned. Det som er foreslått her gir samme innstillinger som det som anbefales for resten av landet, noe som i seg selv er en fordel.
- Reduksjon av tverraksereaktansen, X_q i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk har vist at disse omformerne kan levere betydelig mer effekt inn til Oslo-området.
  - En reduksjon på 50 % ser ut til å være det optimale for Lillestrøm omformerstasjon.
  - For Jessheim og Smørbekk har en forsøkt med både 50 og 70 % reduksjon uten å finne at noen av disse verdiene klart kan anbefales. Med 70 % reduksjon vil Jessheim og Smørbekk bidra til å avlaste henholdsvis Lillestrøm og Holmlia, og en kan da anta at det oppstår større tap når denne effekten skal overføres over lengre avstand inn mot Oslo.
- Endringen av transformatoromsetningen for transformatoren for fjernledningen i Asker har vist at en kan oppnå en noe større overføring fra Nordagutu
  - Det er forsøkt å endre omsetningen fra dagens 55/16,5 til 54,5/16,5 kV og sett at en får en liten forbedring.
  - Om det er vanskelig å velge dette trinnet i praksis kan en velge en annen og noe lavere omsetning, imidlertid er dette det minst viktige tiltaket.
- Oppgradering av Hakavik kraftstasjon og økning av effekten gir et godt bidrag til banestrømforsyningen.
  - Det er sett på tilfelle med en produksjon på 15 MW i normal drift og stor og liten reaktiv effektproduksjon. Det ser ikke ut til at det får særlig stor betydning om Hakavik kan levere 3,6 eller 11,4 MVAr.
  - Det er forsøkt med en produksjon på både 10 og 15 MW uten at en kan se at forskjellene er veldig store ved utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia. Den ekstra effekten fører imidlertid til en avlastning av alle omformerstasjoner i Oslo-området, noe som er svært positivt.
- Undersøkelse av om fortsatt drift av Sande vil være gunstig for avlastning av Skoppum
  - Skoppum omformerstasjon ble noe hardt belastet i trafikksimuleringene og en avlastning av denne kan få betydning for redundansen her.
- Undersøkelse med et 10 MVAr stort kondensatorbatteri viste at alle omformerstasjonene ble avlastet noe.

- En måtte sannsynligvis testet ut med større ytelse. Den reaktive effektflyten i normal drift er uansett ikke stor.
- Kondensatorbatteriet vil nok ha større betydning ved utfall av omformerenheter, og kan muligens da være det som skal til for å heve spenningen og avlaste omformerne. Det er mulig at en under slike forutsetninger kan avpasse et kondensatorbatteri til akkurat riktig størrelse slik at en kommer innenfor kravene som settes, om det blir nødvendig.
- Samlet sett vil kondensatorbatteri være vanskelig å dimensjonere riktig i forhold til behovet. Det er også vanlig å bruke SVC-anlegg som automatisk regulerer den reaktive effekten etter gitte kriterier. Et SVC-anlegg vil utvilsomt være komplisert og det anbefales derfor ikke å gå videre med denne løsningen.

- Trafikksimuleringer må gjøres for å undersøke mer realistisk hvilke tiltak som har betydning. Det som kan undersøkes med egne trafikksimuleringer er:
  - Undersøkelser vedrørende statikk, simulering med 12 % i normal drift og 24 % ved utfall. Det som er aktuelt å undersøke er:
    - Undersøk reduksjon av belastningen på omformere.
    - Om spenningen for togene blir akseptable og vurdering av praktiske konsekvenser.
    - Endring av energiforbruket.
  - Undersøke om Jessheim og Smørbekk bør få tverraskereaktansen redusert med 50 eller 70 %.
    - Se hvordan belastningen av omformerne endrer seg.
    - Mulig at forskjell i energiforbruk blir det avgjørende kriteriet for valg.
    - Det som viser seg best av disse to alternativene benyttes videre i analysene.
  - Simulere med Sande transformatorstasjon i drift for å se om Skoppum avlastes tilstrekkelig og om energiforbruket går ned.
  - Hakavik kraftstasjon legges inn med økt ytelse for å se på betydningen i normal og unormal drift.
    - Se på potensialet for forbedring av totalt energiforbruk ved normal drift og 15 MW produksjon.
    - Se på forbedringen av belastningen for omformerne ved utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia med 15 MW produksjon.
  - Kondensatorbatteri kan undersøkes i en trafikksimulering, men det er mulig at tog med reaktiv kompensering ved lave spenninger kan være vel så nyttig.

6 TRAFIKKSIMULERING MED TILTAK FOR Å FORBEDRE SAMKJØRINGEN I OSLO-OMRÅDET

I forrige avsnitt ble det nevnt en del tiltak som er interessante å undersøke i forbindelse med trafikksimuleringer. I tillegg til det som ble nevnt er det en del andre interessante ting som vil bli undersøkt her, dette er først og fremst virkningen av en begrensningsfunksjon i spenningsregulatorene slik som forklart i [14].

6.1 Simulering med normal drift

6.1.1 Simulering med normal driftsituasjon med innføring av tiltakene som en fant i kapittel 5

Med de tiltakene som er funnet i forrige kapittel og oppsummert i avsnitt 5.14 er det gjort en simulering med samme forutsetninger som den i avsnitt 4.2. Det vil si normale driftsforhold der alle omformeraggregater i Oslo-området ligger inne og en har gitt alle spenningsregulatorer 12 % fallende statikk, det er en omsetning på 54,5/16,5 kV på transformatoren i Asker og X_q i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk er redusert med 50 %. Nedenfor viser Tabell 6-1 høyeste registrerte belastning på alle omformerstasjonene. Som en ser er fremdeles Lillestrøm og Jessheim høyt belastet kortvarig, men for Asker, Holmlia og Alnabru er reduksjonen betydelig. En ser altså at Asker er belastet 18 prosentpoeng lavere for sin 2-sekundersverdi enn tidligere, for Holmlia og Alnabru er forskjellen henholdsvis 14 og 12 prosentpoeng. Også for 6-minutters og 1-timesverdiene er reduksjonene store. Imidlertid ser en igjen at Skoppum og Larvik er belastet hardt og neppe vil kunne ligge inne om ett aggregat i disse faller ut.

Figur 6-1 viser effektflyten når belastningen i Oslo-området er på sitt høyeste. Sammenlignes dette med resultatene i avsnitt 4.2, ser en flere endringer, for det første at maksimalt effektopptak i Oslo-området er noe redusert. Dette var 108,7 og 53,6 MW for henholdsvis 2-sekunders og 6-minuttersverdi, og det er nå blitt 103,0 og 53,8 MW. Om reduksjonen av den kortvarige verdien skyldes lavere tap, eller om togene har fått lavere spenning og dermed reduserer pådraget er ikke undersøkt spesielt. En annen forklaring kan være at togene kjører noe annerledes, slik at sammenlagringen av effekt slår ut med litt lavere toppverdi. Sannsynligvis kan det være alle tre faktorene samtidig. Det ble i avsnitt 4.2 sagt at den totale ytelsen i Oslo-området er 178 MVA og at den gjenværende effekten i topplastøyeblikket er 36 %. Når det nå brukes 103,0 MW og 34 MVAr blir dette 108,5 MVA og gjenværende effektreserve er 39 %. Det er altså en viss forbedring, men en forventer heller ikke at dette skal kunne endres mye heller. Dette som er spesielt interessant å konstantere er at belastningen av stasjonene er blitt mye mer jevnt fordelt for toppbelastningsøyeblikket. En kan se at Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk bidrar mer, mens det kommer mindre effekt fra Asker og Alnabru. Andre ting som en kan se er at spenningen som forventet nå blir en del lavere, spesielt ser en at spenningen kortvarig blir ca 15,5 kV i Oslo.

Belastningen av nabostasjonene når hver av omformerstasjonene i Oslo-området har sin maksimale belastning vil kunne være interessant av to grunner. En får se hvilke omformerstasjoner som hjelper til og hvor mye, og for det andre hvor mye effekt utenfor Oslo-området en kunne ha gjort seg nytte av og eventuelt hvordan dette kan forbedres. I Tabell 6-2 til Tabell 6-6, for henholdsvis Asker, Holmlia, Alnabru, Lillestrøm og Jessheim ser en belastningen for 2-sekunders og 6-minuttersverdiene. For alle stasjonene er belastningen nokså moderat når en av dem har sin maksimale belastning. Det store unntaket er Lillestrøm

og Jessheim som bidrar mye når de andre er høyt belastet. Innenfor Oslo-området ser det ut til at de roterende omformerstasjonene Asker, Holmlia og Alnabru greier å avlaste hverandre ganske godt. Derimot ser det ut til at stasjoner utenfor Oslo-området som Nordagutu, Hønefoss, Tangen og Kongsvinger deltar heller lite. Når en skal bedømme dette må en også tenke på at en stasjon kan være høyt belastet på grunn av et eller flere tog rett utenfor, derfor bør en nok ta like mye hensyn til 6-minuttersbelastningen. Om togtrafikken kommer til å trekke enda mer effekt vil en nok kunne se større bidrag fra nabostasjonene utenfor Oslo-området. Allikevel er det grenser for hvor mye effekt som kan overføres på dette lave spenningsnivået og med den store impedansen som kontaktledningen har.

Det er interessant å se at energibehovet er blitt mindre nå, se Tabell 6-7 som viser at det totalt er 285,8 MWh som er brukt i disse tre timene. I forhold til resultatet fra simuleringen i avsnitt 4.2 der totalt forbruk ble 302,2 MWh er dette en ganske betydelig forbedring. Reduksjonen utgjør 16,4 MWh eller 5,4 %. Antar en at det er seks timer i døgnet med rush og et redusert forbruk pr time på 5 MWh, seks med moderat trafikk og tolv med liten trafikk, kan en anta et redusert døgnforbruk. Her antas det at forbruket reduseres til 2 MWh pr time med moderat trafikk og til bare 0,5 MWh med liten trafikk. Besparelsen på et døgn blir da 48 MWh. I løpet av ett år blir dette ca 17,5 GWh, og med en energipris på 25 øre/kWt blir dette en redusert kostnad på 4,4 millioner kr.

Tabell 6-1 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperiden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Normal driftsituasjon								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	3 x 10	2,421	68	36,324	22,960	55	18,505	62
Holmlia	2 x 10	1,191	50	18,136	12,311	44	10,612	53
Alnabru	2 x 10	1,147	49	17,838	12,201	44	10,717	54
Lillestrøm	3 x 12	2,447	**96**	38,063	23,844	57	20,282	56
Jessheim	2 x 12	1,577	**93**	24,789	15,900	57	14,225	59
Tangen	2 x 5,8	0,821	**66**	12,404	4,877	30	3,188	27
Rudshøgda	3,1	0,334	74	4,476	2,112	44	1,107	36
Fåberg	2 x 5,8	0,574	46	9,049	2,991	19	1,833	16
Smørbekk	2 x 12	1,456	**86**	23,473	13,321	48	11,249	47
Sarpsborg	1 x 12	0,461	54	7,456	4,441	32	3,336	28
Kongsvinger	1 x 5,8	0,486	78	7,202	3,577	45	2,142	37
Lunner	1 x 5,8	0,507	81	7,237	5,990	75	3,595	62
Hønefoss	1 x 5,8	0,317	25	4,947	2,956	37	2,313	40
Nordagutu	2 x 7	0,689	42	10,754	6,778	31	4,937	35
Nelaug	2 x 5,8	0,572	46	8,847	6,454	40	3,124	27
Skoppum	2 x 5,8	0,928	**74**	14,194	7,963	50	4,785	41
Larvik	2 x 5,8	0,737	**59**	11,465	5,114	32	3,551	61

Tabell 6-2 Belastningen for nabostasjonene i samme øyeblikk som Asker omformerstasjon har sin høyeste 2-sekunders og 6-minuttersverdi av belastningen.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Høyest belastning i Asker					
		Strøm		Effekt	
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		6-minutter	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	%
Asker	3 x 10	2,421	68	22,960	55
Holmlia	2 x 10	0,996	42	11,790	42
Alnabru	2 x 10	1,142	48	11,870	42
Lillestrøm	3 x 12	1,934	76	21,041	50
Jessheim	2 x 12	0,949	56	12,452	44
Hønefoss	1 x 5,8	0,159	13	2,169	27
Nordagutu	2 x 7	0,406	25	5,547	25

Tabell 6-3 Belastningen for nabostasjonene i samme øyeblikk som Holmlia omformerstasjon har sin høyeste 2-sekunders og 6-minuttersverdi av belastningen.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Høyest belastning i Holmlia					
		Strøm		Effekt	
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		6-minutter	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	%
Holmlia	2 x 10	1,191	50	12,311	44
Asker	3 x 10	1,374	39	22,826	54
Alnabru	2 x 10	1,034	44	11,957	43
Lillestrøm	3 x 12	2,180	86	20,790	49
Jessheim	2 x 12	1,079	64	11,852	42
Smørbekk	2 x 12	0,903	53	12,804	46
Sarpsborg	1 x 12	0,276	33	3,675	26
Nordagutu	2 x 7	0,371	22	5,434	25

Tabell 6-4 Belastningen for nabostasjonene i samme øyeblikk som Alnabru omformerstasjon har sin høyeste 2-sekunders og 6-minuttersverdi av belastningen.

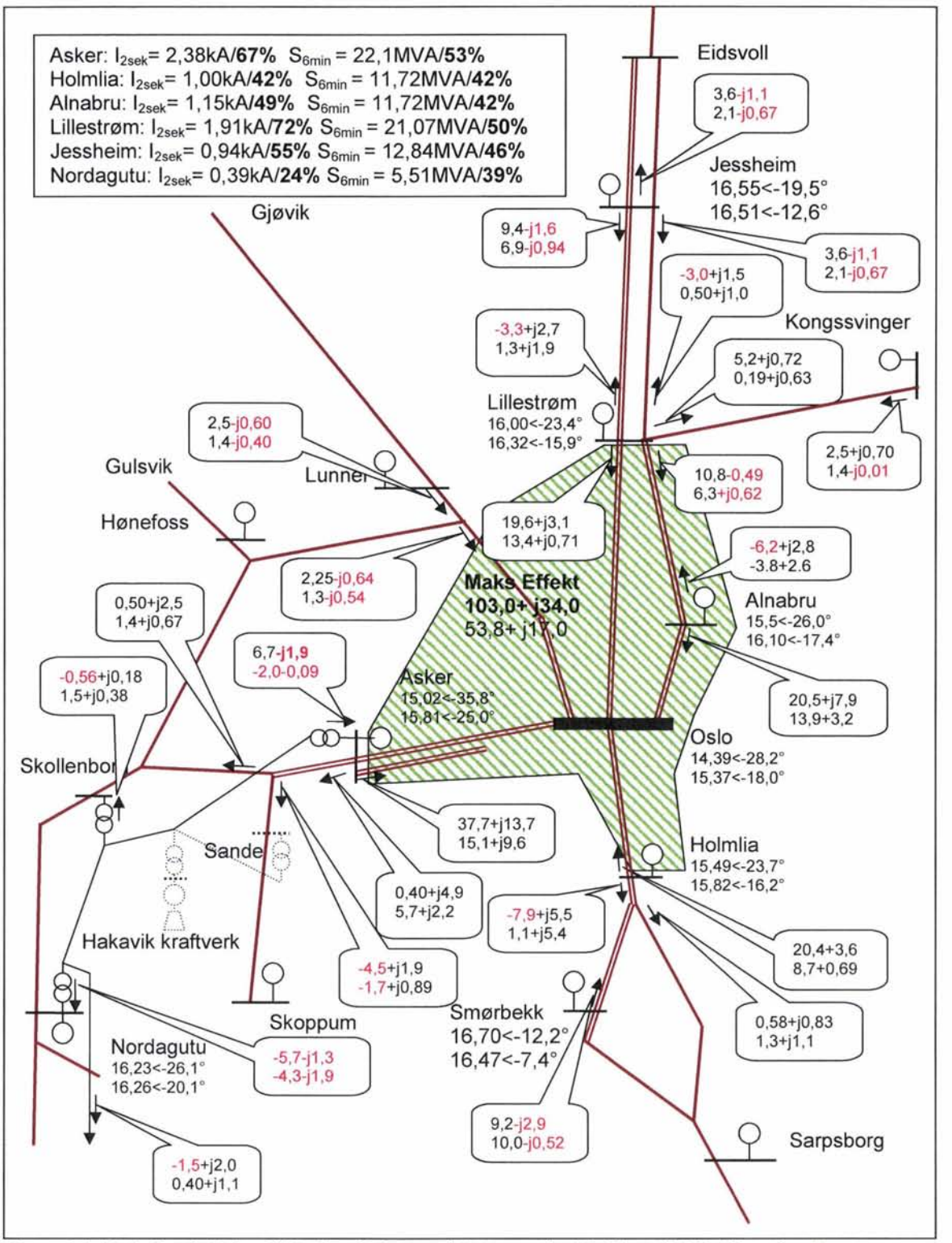
Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Høyest belastning i Alnabru					
		Strøm		Effekt	
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		6-minutter	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	%
Alnabru	2 x 10	1,147	49	12,201	44
Holmlia	2 x 10	0,999	42	11,516	41
Asker	3 x 10	2,375	67	19,046	45
Lillestrøm	3 x 12	1,906	75	23,844	57
Jessheim	2 x 12	0,927	55	15,082	54
Smørbekk	2 x 12	0,686	40	12,083	43
Nordagutu	2 x 7	0,390	24	4,410	20

Tabell 6-5 Belastningen for nabostasjonene i samme øyeblikk som Lillestrøm omformerstasjon har sin høyeste 2-sekunders og 6-minuttersverdi av belastningen.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Høyest belastning i Lillestrøm					
		Strøm		Effekt	
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		6-minutter	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	%
Lillestrøm	3 x 12	2,447	96	23,844	57
Alnabru	2 x 10	0,844	36	12,201	44
Holmlia	2 x 10	0,615	26	11,516	41
Asker	3 x 10	0,930	26	19,046	45
Smørbekk	2 x 12	0,693	41	12,083	43
Nordagutu	2 x 7	0,297	18	4,410	20
Jessheim	2 x 12	0,994	59	15,082	54
Kongsvinger	1 x 5,8	0,205	33	1,970	25

Tabell 6-6 Belastningen for nabostasjonene i samme øyeblikk som Jessheim omformerstasjon har sin høyeste 2-sekunders og 6-minuttersverdi av belastningen.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere X i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Høyest belastning i Jessheim					
		Strøm		Effekt	
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		6-minutter	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	%
Jessheim	2 x 12	1,577	93	15,900	57
Lillestrøm	3 x 12	1,633	64	23,045	55
Alnabru	2 x 10	0,637	27	11,503	41
Holmlia	2 x 10	0,604	26	10,879	39
Asker	3 x 10	0,972	27	17,307	41
Tangen	2 x 5,8	0,268	21	3,151	20
Kongsvinger	1 x 5,8	0,364	58	2,019	25



Figur 6-1 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området oppstår klokken 16:13:39 og for 6-minuttersverdi opptrer maksimalverdien klokken 16:13:22. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

Tabell 6-7 Sum energiforbruk til omformerstasjonene (målt på trefasesidene) for hver av timene som er simulert.

Periode	Energi til omformerstasjoner [MWh]		
	Inn	Ut	Sum
Kl 15-16	87,06	-0,04	87,02
Kl 16-17	103,80	-0,03	103,77
Kl 17-18	95,06	-0,08	94,97
Sum	***285,91***	***-0,15***	***285,76***

6.1.2 Simulering med normal driftsituasjon og 70 % reduksjon av X_q for Jessheim og Smørbekk

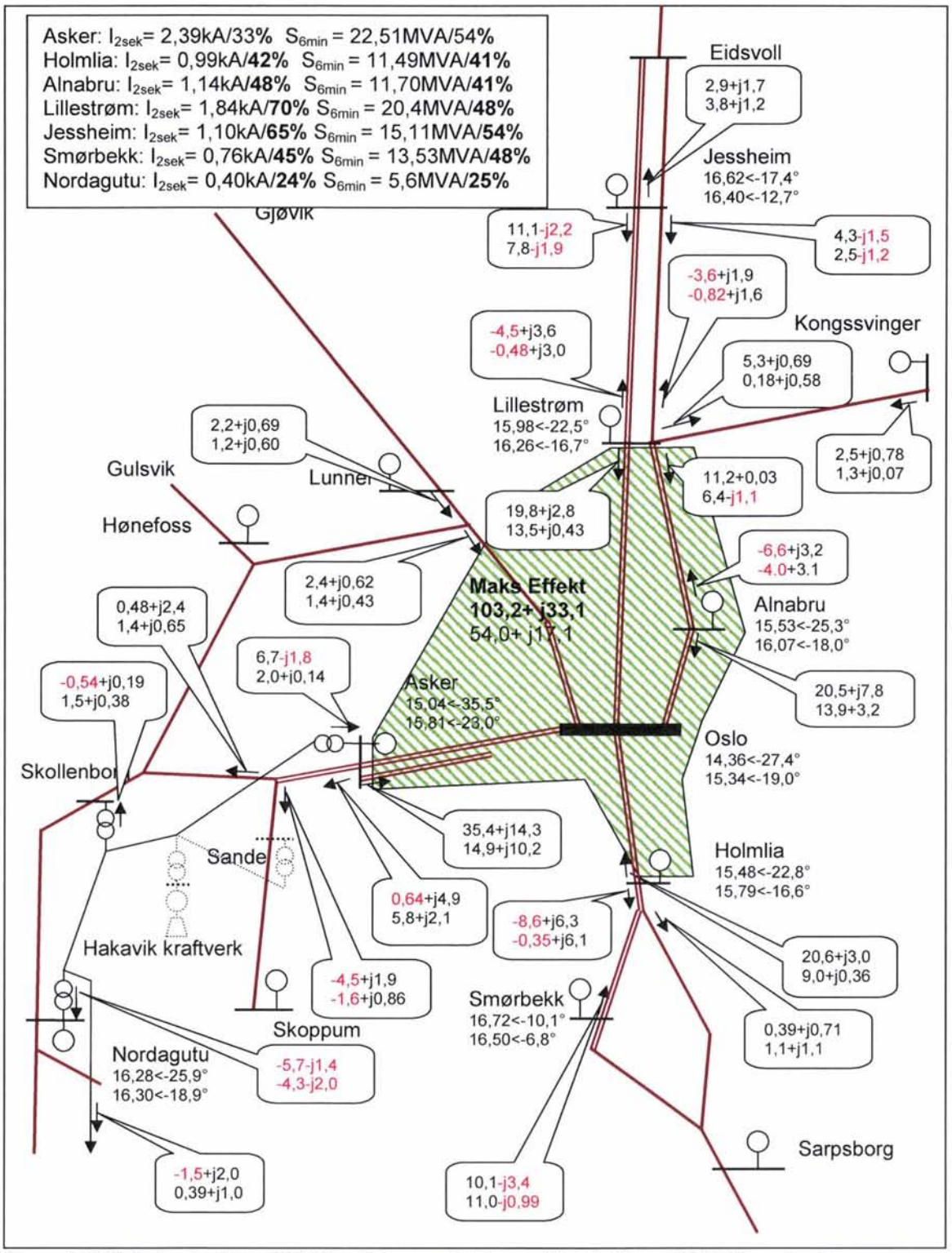
I avsnitt 5.4 og 5.5 undersøktes reduksjon av x_q for Jessheim og Smørbekk på både 50 og 70 %, uten at en kunne finne ut hvilken reduksjon som var best. For å finne ut hva som er mest gunstig er det utført en egen simulering med 70 % reduksjon i begge omformerstasjonene samtidig. Nedenfor viser Tabell 6-8 den maksimale belastningen som oppstår for alle omformerstasjonene og som en ser er det nå oppstått høyere belastning for Asker, Holmlia og Alnabru, samt Tangen[6].

I Figur 6-2 ser en effektflyten når Oslo-området er høyest belastet og en ser at Jessheim og Smørbekk mottar mer reaktiv effekt enn i simuleringen i avsnitt 6.1.1. Dermed stiger også spenningen mer på samleskinnen til disse stasjonene. Energiforbruket er for timene 15:00 til 18:00, er økt noe, se Tabell 6-9 Det ser altså ikke ut til å være noe med energiforbruket som blir gunstigere med reduksjonen på 70 % for de aktuelle omformerstasjonene. På grunn av den ugunstige høye belastningen av enkelte omformerstasjoner og økt reaktiv effektflyt vil en ikke kunne tillate annen reduksjon av x_q enn 50 % for Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. De neste simuleringene blir utført med denne forutsetningen.

[6] Ved simuleringen her oppdaget en at Lillestrøm omformerstasjon gikk i strømgrense for sine likerettere og dermed reduseres spenningen for en lengre tid (flere titalls sekunder). Dette er ikke slik omformerne skal oppføre seg i virkeligheten, - det er vekselretteren som skal gå i strømgrense først. Problemet er undersøkt og forklart første gang i [10]. En har ikke greid å finne ut hva som er feil med tallene som er oppgitt for omformerstasjonen og modellen for omformeraggregatene. Løsningen her ble å sette strømgrensen for strømretten veldig høyt, slik at vekselretterens strømgrense altid trer i funksjon først. Det er observert at stasjonen går med høy cos fi når strømgrensen aktiveres. Feilen dette medfører er sannsynligvis liten.

Tabell 6-8 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperiden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført og det er 70 % lavere X_q i de statiske omformerstasjonene på Jessheim og Smørbekk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm og 70 % Jessheim og Smørbekk.								
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	Strøm		Effekt				
		2-sek		2-sek	6-minuitter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	3 x 10	2,434	69	36,475	23,110	55	18,719	62
Holmlia	2 x 10	1,265	54	19,191	12,198	44	10,539	53
Alnabru	2 x 10	**1,358**	**58**	20,859	13,293	47	10,935	55
Lillestrøm	3 x 12	**2,627**	**103**	40,398	26,872	64	20,383	57
Jessheim	2 x 12	**1,514**	**89**	24,043	17,453	62	16,025	67
Tangen	2 x 5,8	**0,934**	**75**	13,854	4,950	31	3,371	29
Rudshøgda	3,1	0,331	74	4,433	2,107	44	1,085	35
Fåberg	2 x 5,8	0,574	46	9,055	2,949	18	1,775	15
Smørbekk	2 x 12	1,598	**94**	26,041	14,598	52	12,411	52
Sarpsborg	1 x 12	0,441	52	7,110	4,185	30	3,209	27
Kongsvinger	1 x 5,8	0,483	77	7,149	3,606	45	2,150	37
Lunner	1 x 5,8	0,507	81	7,309	5,995	75	3,657	63
Hønefoss	1 x 5,8	0,316	25	4,932	2,946	37	2,293	40
Nordagutu	2 x 7	0,694	42	10,835	6,859	31	5,010	36
Nelaug	2 x 5,8	0,571	46	8,846	6,460	40	3,113	27
Skoppum	2 x 5,8	**0,927**	**74**	14,169	7,978	50	4,759	41
Larvik	2 x 5,8	**0,746**	**60**	11,566	5,081	32	3,507	60



Figur 6-2 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området oppstår klokken 16:13:23 og for 6-minuttersverdi opptrer maksimalverdien klokken 16:13:28. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

Tabell 6-9 Sum energiforbruk til omformerstasjonene (målt på trefasesidene) for hver av timene som er simulert.

Periode	Energi til Matestasjoner [MWh]		
	Inn	Ut	Sum
Kl 15-16	87,31	-0,04	87,26
Kl 16-17	104,35	-0,04	104,32
Kl 17-18	95,41	-0,09	95,31
Sum	***287,06***	***-0,17***	***286,89***

6.1.3 Simulering med normal driftsituasjon og 4 % fallende statikk i Lillestrøm, Jessheim, Smørbekk og Nordagutu

Det ble i avsnitt 5.5.3 gjort et forsøk med å la statikken for de sentrale statiske omformerstasjonene Lillestrøm, Jessheim, Smørbekk og Nordagutu være på 4 % istedenfor 12 %. De øvrige stasjonene har fortsatt 12 % statikk. Dette for å få disse stasjonene til å bidra mer til å avlaste Asker, Holmlia og Alnabru som kan fryktes å overbelastes lettere. Nedenfor viser Tabell 6-10 hvordan maksimalbelastningen for hver av omformerstasjonene blir når en har innført denne endringen. Resultatene må sammenlignes med simuleringene i avsnitt 6.1.1. En ser da at Asker, Holmlia og Alnabru er belastet noe mindre, - opptil seks prosentpoeng. Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk er for sine forskjellige belastningsverdier både belastet mer, mindre og like mye som før. Dette kan derfor være et tiltak med positiv effekt, men energiforbruket er det viktig når det gjelder statikk i normal drift.

I Tabell 6-11 er energiforbruket for hver time som er simulert vist og en ser at endringen er helt marginal. En kunne ha forventet at dette tiltaket kunne ha påvirket energiforbruket i negativ retning, men det ser ikke ut til å skje, sammenlignet med avsnitt 6.1.1. Det er ingen klare indikasjoner på at endret statikk for noen av stasjonene vil ha spesielt negative konsekvenser for energiforbruket i normal drift. Dette vil gi gunstigere effektfordeling i en avvikssituasjon med utfall av to roterende aggregater, ved at de statiske omformerne bidrar mer. Tiltaket med 4 % statikk for disse omformerstasjonene kan derfor anbefales.

Tabell 6-10 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperiden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men det er undersøkt hva 4 % statikk i omformerstasjonen på Lillestrøm, Jessheim, Smørbekk og Nordagutu betyr. De øvrige har fremdeles 12 % statikk. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Trafikksimulering med 4 % statikk i Lillestrøm, Jessheim, Smørbekk og Nordagutu. 12 % statikk i alle andre omformerstasjoner, omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk.								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	**3 x 10**	2,385	67	35,807	22,455	53	17,988	60
Holmlia	**2 x 10**	1,155	49	17,652	12,023	43	10,361	52
Alnabru	**2 x 10**	1,063	45	16,680	11,347	41	10,018	50
Lillestrøm	**3 x 12**	**2,643**	**104**	42,777	25,740	61	21,726	60
Jessheim	**2 x 12**	**1,550**	**91**	25,262	16,063	57	14,006	58
Tangen	**2 x 5,8**	0,811	65	12,241	4,799	30	3,134	27
Rudshøgda	**3,1**	0,333	74	4,457	2,106	44	1,102	36
Fåberg	**2 x 5,8**	0,574	46	9,050	2,989	19	1,829	16
Smørbekk	**2 x 12**	**1,481**	**87**	24,210	13,387	48	11,397	47
Sarpsborg	**1 x 12**	0,456	54	7,361	4,416	32	3,420	28
Kongsvinger	**1 x 5,8**	0,483	77	7,159	3,470	43	2,088	36
Lunner	**1 x 5,8**	0,506	81	7,229	5,949	74	3,630	63
Hønefoss	**1 x 5,8**	0,314	25	4,915	2,921	37	2,286	39
Nordagutu	**2 x 7**	0,781	47	12,649	7,584	34	5,405	39
Nelaug	**2 x 5,8**	0,565	45	8,769	6,425	40	3,131	27
Skoppum	**2 x 5,8**	**0,926**	**74**	14,172	7,908	49	4,755	41
Larvik	**2 x 5,8**	**0,729**	**58**	11,350	5,051	32	3,524	61

Tabell 6-11 Sum energiforbruk til omformerstasjonene (målt på trefasesidene) for hver av timene som er simulert.

Periode	Energi til Matestasjoner [MWh]		
	Inn	Ut	Sum
Kl 15-16	87,02	-0,04	86,99
Kl 16-17	103,77	-0,03	103,74
Kl 17-18	95,02	-0,09	94,93
Sum	***285,81***	***-0,16***	***285,65***

6.1.4 Simulering med normal driftsituasjon og Hakavik kraftverk med en produksjon på 15 MW

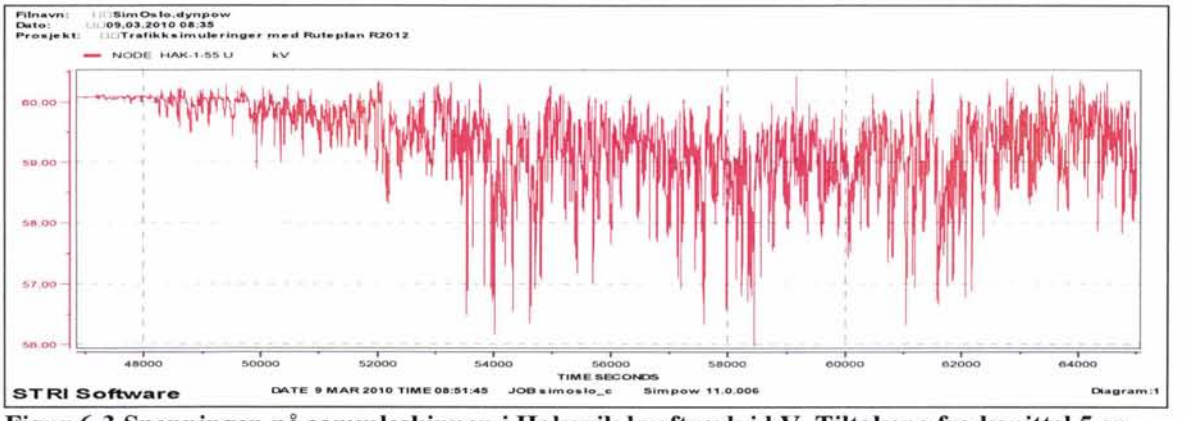
Med en produksjon på 15 MW i Hakavik avlastes spesielt Asker omformerstasjon mye, det samme gjør Nordagutu i enda større grad, se Tabell 6-12. Også de andre stasjonene i Oslo-området avlastes en del, men her er endringen liten. Figur 6-6 viser effektflyten og sammenlignes dette med tilsvarende figur i avsnitt 6.1.1 ser en at effekten fordeler seg meget jevnt ut over hele området. Når det gjelder det totale energiforbruket viser Tabell 6-13 at det knapt er noen som helst endring. Dette betyr nok at tapene reduseres minimalt av produksjonen fra Hakavik i rushtiden.

I Figur 6-3 er spenningen ved samleskinnen for 55 kV-nivå vist. Som en ser blir spenningen noe høy, jevnt over ligger den på rundt 60 kV og kortvarig noe høyere. Det kan se ut som om reaktiv effekt taes opp i Hakavik fordi spenningen reduseres når den reaktive effekten er høy, se Figur 6-4. Om en ønsker at Hakavik skal produsere reaktiv effekt, kan det se ut til at initialbetingelsene (forutsetningene i OPTPOW) ikke er valgt med omhu. Det kan se ut som om den reaktive effekten bør ha motsatt retning (produksjon) eller være null, og ikke som her ligge på rundt 2,5 Mvar. Trinning av transformatorene kan også spille inn.

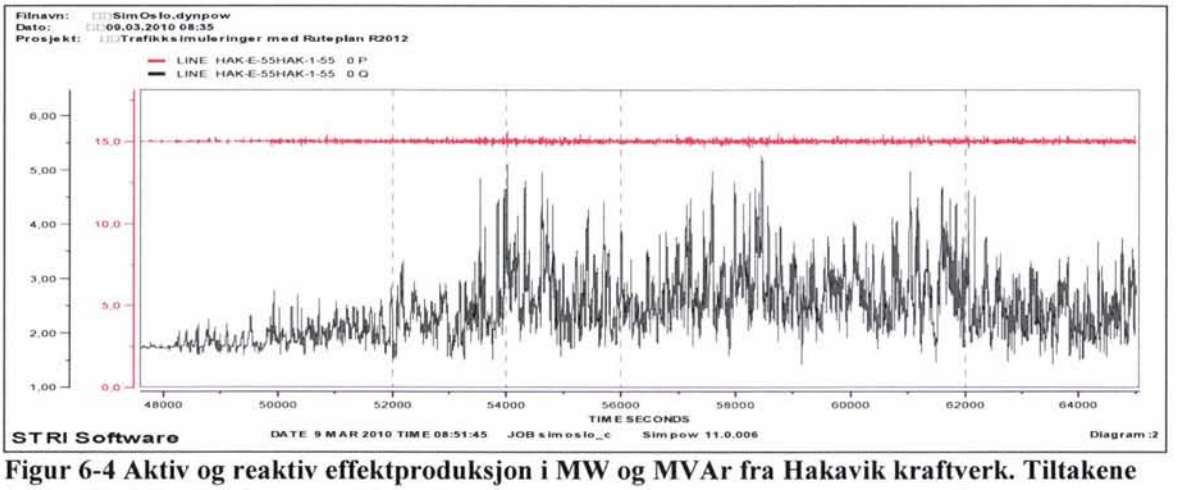
Produksjonene i Hakavik kan komme godt med og desto større effekt desto bedre, men når det i dag diskuteres om denne skal være på 5, 10 eller 15 MW er det vanskelig å si noe ut fra dette om det finnes en minste foretrukne ytelse. Det ser ut som at i normal drift vil Asker omformerstasjon avlastes og effekten fordele seg jevnt ut. Om effekten er på et av de tre trinnene vil omtrent det samme skje, bare i større eller mindre grad. Imidlertid vil det være en fordel med så stor innmatet effekt inn mot Asker som mulig fra Hakavik, spesielt ved færre operative aggregater i Asker enn normalt.

Tabell 6-12 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperiden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men Hakavik kraftverk er i drift med en produksjon på 15 MW. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

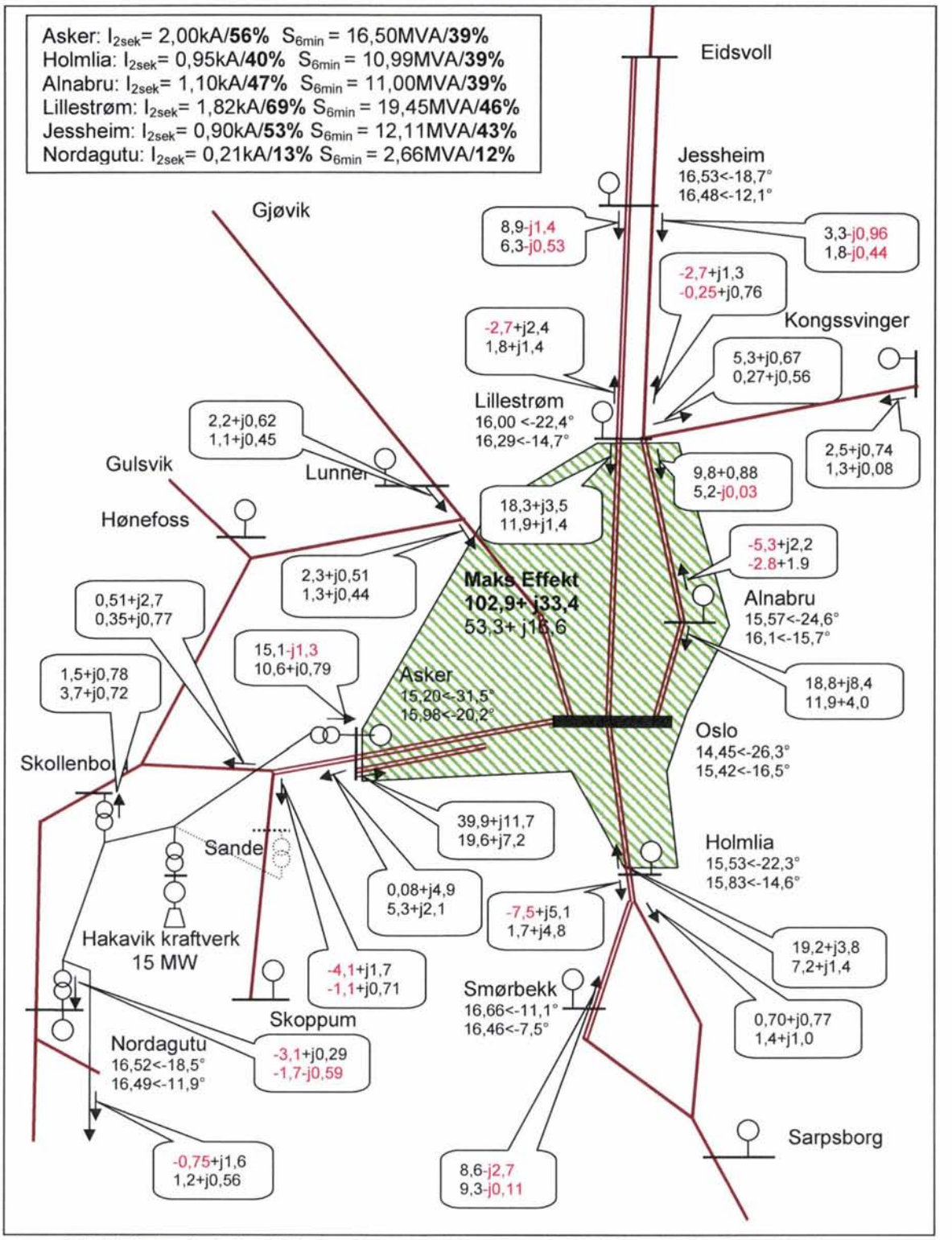
Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Hakavik i drift med 15 MW.								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	3 x 10	2,037	58	30,968	17,145	41	12,911	43
Holmlia	2 x 10	1,151	49	17,530	11,557	41	9,932	50
Alnabru	2 x 10	1,104	47	17,201	11,568	41	10,049	50
Lillestrøm	3 x 12	**2,363**	**93**	36,700	22,379	53	18,883	52
Jessheim	2 x 12	**1,573**	**93**	24,672	15,508	55	13,018	54
Tangen	2 x 5,8	**0,829**	**66**	12,469	4,836	30	3,103	27
Rudshøgda	3,1	0,333	74	4,461	2,101	44	1,093	35
Fåberg	2 x 5,8	0,573	46	9,050	2,947	18	1,793	15
Smørbekk	2 x 12	1,425	84	22,929	12,701	45	10,690	45
Sarpsborg	1 x 12	0,455	54	7,343	4,352	31	3,275	27
Kongsvinger	1 x 5,8	0,484	77	7,154	3,561	45	2,086	36
Lunner	1 x 5,8	0,506	81	7,284	5,917	74	3,509	61
Hønefoss	1 x 5,8	0,281	22	4,445	2,625	33	1,933	33
Nordagutu	2 x 7	0,419	25	6,666	3,506	16	2,182	16
Nelaug	2 x 5,8	0,563	45	8,655	6,105	38	2,460	21
Skoppum	2 x 5,8	**0,903**	**72**	13,789	7,327	46	4,200	36
Larvik	2 x 5,8	**0,731**	**58**	11,283	4,713	29	2,987	51



Figur 6-3 Spenningen på sammleskinnen i Hakavik kraftverk i kV. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men Hakavik kraftverk er i drift med en produksjon på 15 MW.



Figur 6-4 Aktiv og reaktiv effektproduksjon i MW og MVAr fra Hakavik kraftverk. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men Hakavik kraftverk er i drift med en produksjon på 15 MW.



Figur 6-5 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området oppstår klokken 16:13:23 og for 6-minuttersverdi opptrer maksimalverdien klokken 16:13:39. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

Tabell 6-13 Sum energiforbruk til omformerstasjonene (målt på trefasesidene) for hver av timene som er simulert.

Periode	Energi til Matestasjoner [MWh]		
	Inn	Ut	Sum
Kl 15-16	87,11	-0,10	87,01
Kl 16-17	103,58	-0,08	103,51
Kl 17-18	95,16	-0,18	94,98
Sum	***285,85***	***-0,36***	***285,50***

6.1.5 Simulering med normal driftsituasjon der Hakavik kraftverk har en produksjon på 15 MW og Sande transformatorstasjon er i drift

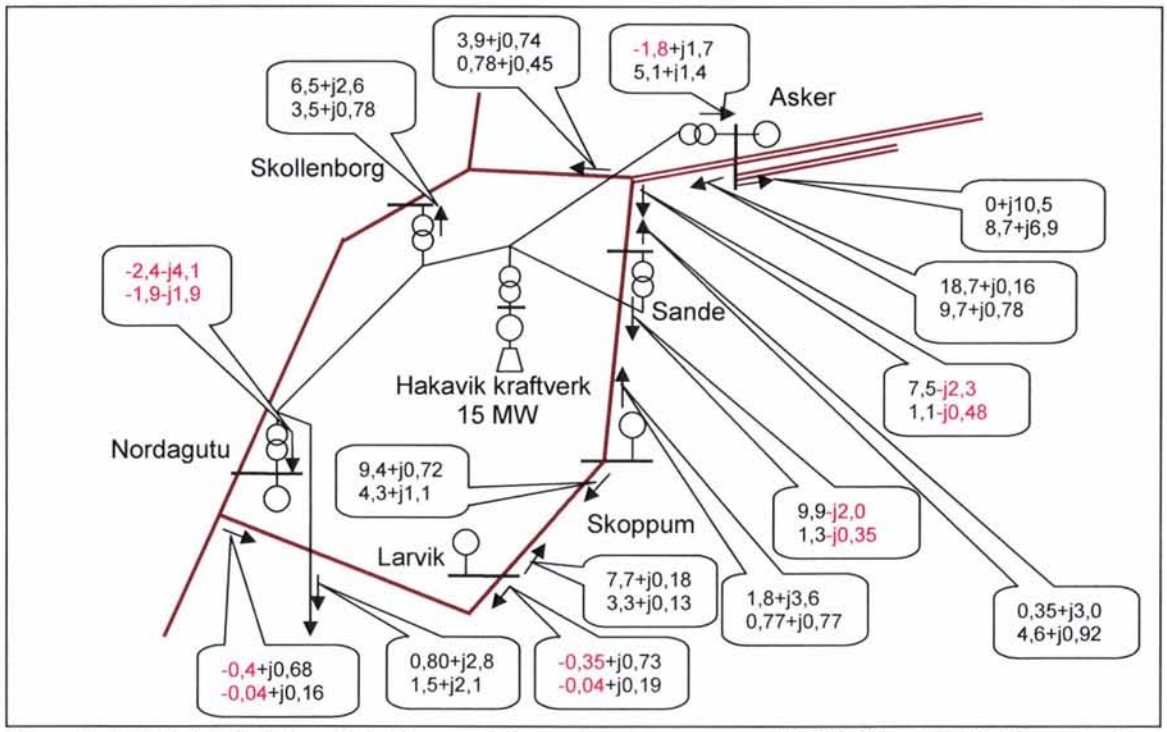
På grunn av den store belastningen som oppstod på Skoppum omformerstasjon undersøkes om det kunne vært fordelaktig dersom Sande transformatorstasjon fortsatt var i drift, selv om en tidligere har besluttet at denne skal legges ned. Tabell 6-14 viser maksimal belastning for alle omformerstasjoner med Sande i drift, og som en ser blir Skoppum avlastet noe. I avsnitt 6.1.1 fant en at Skoppum belastes 74 % for sin 2-sekundersverdi, mens en nå finner at belastningen blir 62 %. Altså en ikke ubetydelig reduksjon og en ser at Sande transformatorstasjon også belastes relativt høyt og jevnt. Også Larvik blir noe avlastet, spesielt for sin 1-timesverdi er endringen stor.

I Figur 6-6 og Figur 6-7 ser en effektflyten i området ved Skoppum når den belastes mest, henholdsvis med og uten Sande transformatorstasjon i drift. En ser at i tidspunktene med størst belastning på Skoppum er det mye effekt som overføres mot vest fra denne og at Sande da kan avlaste i øst med sitt bidrag. En legger også merke til at Asker, som belastes meget lite, mater effekt inn i fjernledningen når Sande ligger inne. For å være helt sikker på at Sande er nødvendig for Skoppum, skulle det vært utført en simulering med utfall av ett aggregat i Skoppum. Da vil en se om Sande kan avlaste Skoppum slik at det gjenværende aggregatet ikke overbelastes. Sannsynligvis er avstanden mellom disse stasjonene så kort at Sande kan forhindre overbelastning i en slik situasjon.

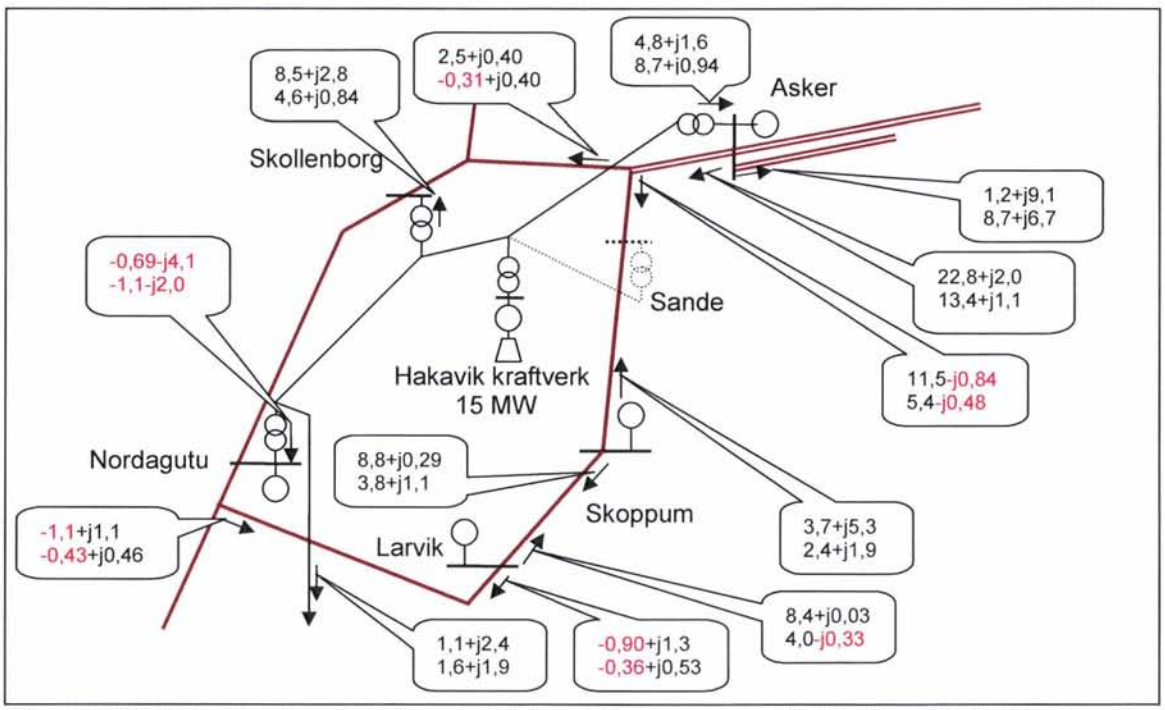
I Tabell 6-15 kan en se det totale energiforbruket med Sande i drift og endringen fra tilfellet med normal drift er lite. Det er derfor ikke noe vektig argument at energitapene går ned, men det er på den annen side greit å se at energioverføring på fjernledningen ikke fører til større tap i nettet. En bør ut fra dette vurdere å beholde Sande som transformatorstasjon, men se på kostnadene for å oppgradere denne stasjonen, sammenlignet med kostnad for tiltak i Skoppum.

Tabell 6-14 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperiden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men Hakavik kraftverk produserer 15 MW og Sande transformatorstasjon i drift. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Hakavik i drift med 15 MW og Sande transformatorstasjon ikke nedlagt.								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	**3 x 10**	2,032	57	30,863	17,028	41	12,785	43
Holmlia	**2 x 10**	1,153	49	17,550	11,559	41	9,911	50
Alnabru	**2 x 10**	**1,103**	**47**	17,184	11,557	41	10,034	50
Lillestrøm	**3 x 12**	**2,351**	**92**	36,729	22,374	53	18,753	52
Jessheim	**2 x 12**	**1,574**	**93**	24,674	15,306	55	13,154	55
Tangen	**2 x 5,8**	**0,825**	**66**	12,400	4,843	30	3,113	27
Rudshøgda	**3,1**	0,332	74	4,448	2,099	44	1,091	35
Fåberg	**2 x 5,8**	0,573	46	9,042	2,950	18	1,794	15
Smørbekk	**2 x 12**	1,424	**84**	22,906	12,698	45	11,584	48
Sarpsborg	**1 x 12**	0,450	53	7,259	4,265	30	3,135	26
Kongsvinger	**1 x 5,8**	0,484	77	7,162	3,561	45	2,082	36
Lunner	**1 x 5,8**	0,505	81	7,225	5,904	74	3,500	60
Hønefoss	**1 x 5,8**	0,276	22	4,365	2,594	32	1,913	33
Nordagutu	**2 x 7**	0,512	31	8,114	4,008	18	2,447	17
Nelaug	**2 x 5,8**	0,561	45	8,637	6,143	38	2,531	22
Skoppum	**2 x 5,8**	**0,776**	**62**	12,062	5,756	36	3,319	29
Sande	**2 x 2,5**	0,785	-	11,071	6,782	-	4,463	-
Larvik	**2 x 5,8**	**0,713**	**57**	11,050	4,564	29	2,822	49



Figur 6-6 Maksimal aktiv effekt for området ved Skoppum oppstår klokken 17:06:38 og for 6-minuttersverdi opptrer maksimalverdien klokken 17:10:59. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.



Figur 6-7 Maksimal aktiv effekt for området ved Skoppum oppstår klokken 17:06:38 og for 6-minuttersverdi opptrer maksimalverdien klokken 17:10:58 når Sande transformatorstasjon ikke er i drift. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

Tabell 6-15 Sum energiforbruk til omformerstasjonene (målt på trefasesidene) for hver av timene som er simulert.

Periode	Energi til Matestasjoner [MWh]		
	Inn	Ut	Sum
Kl 15-16	86,76	-0,10	86,66
Kl 16-17	103,09	-0,08	103,02
Kl 17-18	94,60	-0,17	94,42
Sum	***284,45***	***-0,35***	***284,10***

6.1.6 Simulering med normal driftsituasjon og redusert pådrag i togene

Det kan være tvil om togene i normal drift virkelig vil komme til å trekke så mye effekt som simuleringene så langt har vist. Flere grunner til dette kan nevnes, det er normalt ikke behov for så stor trekkraft som Type 74/75 har og alle tog behøver sannsynligvis ikke å holde skiltet hastighet. En ser her for seg et scenario med full trafikkproduksjon, med sommertid og få reisende. Endringene som er gjort i simuleringene her er som følger:

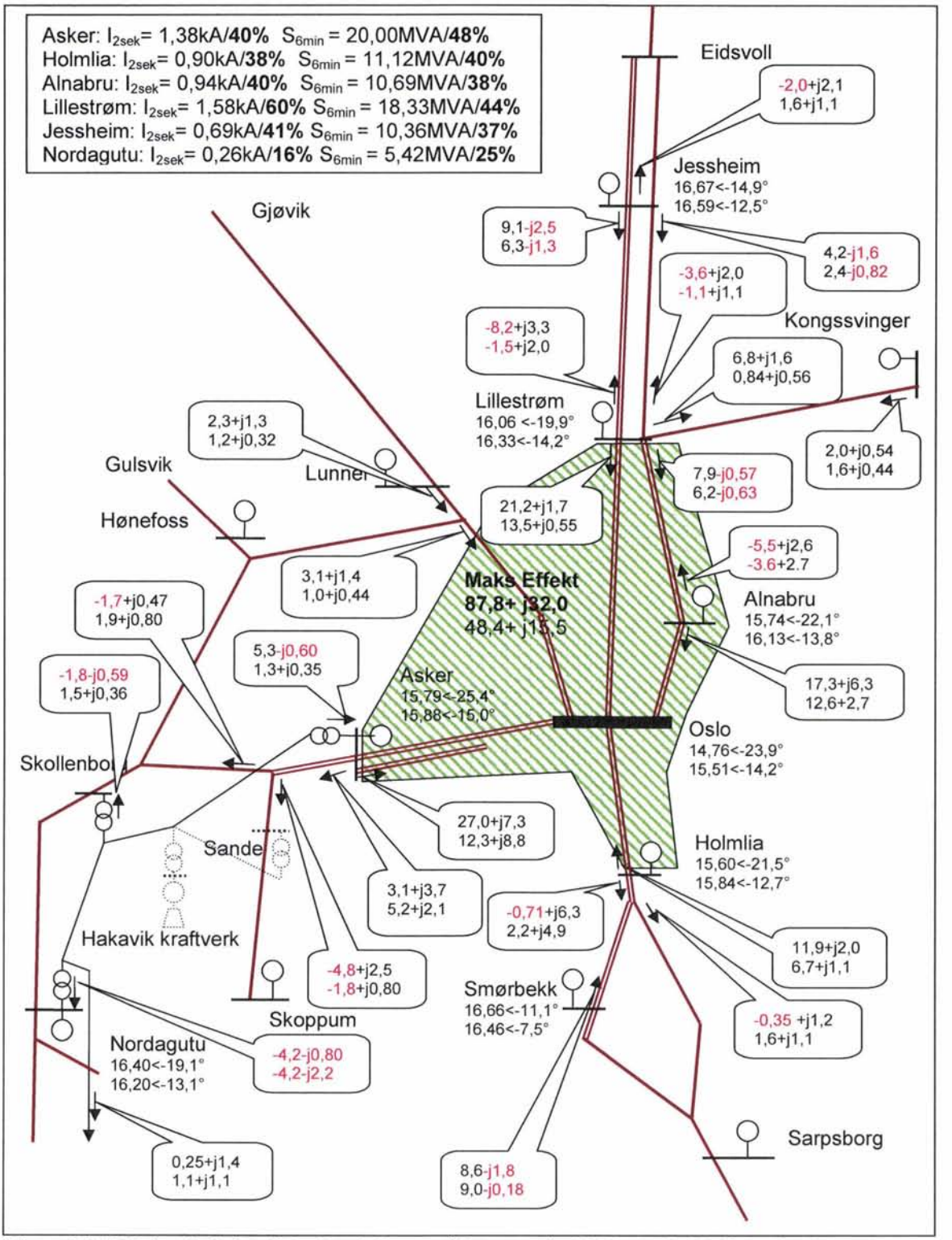
- Type 74/75 kan bare trekke 70 % av sin installerte ytelse.
- Alle togene har få passasjerer, modellene for tomme tog er derfor benyttet. Bare fjerntog og godstogene har normalt høyt antall passasjerer og lastvekt.
- Alle togene holder 160 km/t som maksimal hastighet. Dette får bare betydning i Romeriksporten der hastigheten ellers ville vært 200 km/t for flytoget og Type 74/75.
- Alle togene kjører 5 km/t saktere enn skiltet hastighet. Det er en slakk på 4 % i ruteplanen som gjør at det kan kjøres med noe lavere hastighet. Det betyr at med begrensningen av hastigheten som forklart i punktet ovenfor, vil togene i Romeriksporten holde 155 km/t.
- Type 74/75 får redusert sitt effektuttak for oppvarming til en mer gjennomsnittlig verdi (60 % reduksjon). De andre togene går med sine opprinelige verdier som er ment å være gjennomsnittlige. Effekt til hjelpesystemer er uansett ikke noe som har stor betydning, for eksempel trekker ett dobbeltsett Type 74/75 bare 390 kW til hjelpekraft når utetemperaturen er 15 °C.

Med alle disse tiltakene for togene reduseres maksimal effektbelastning for omformerstasjonene, se Tabell 6-16. Sammenlignes dette med resultatene i avsnitt 6.1.1 ser en at belastningen har gått ned ganske mye for noen stasjoner, størst er endringen for Asker, Alnabru, Lillestrøm og Jessheim der reduksjonen er rundt 10 % -poeng eller mer. Også for de perifere omformerstasjonene er endringene store, selv om det er variasjoner. I Figur 6-8 er effektflyten i Oslo-området vist og som en ser er det totale effektopptaket redusert fra 103,0 til 87,8 MW for 2-sekundersverdi og fra 53,8 til 48,4 MW for 6-minuttersverdien, se igjen avsnitt 6.1.1. En ser at det er spesielt effekten fra Asker og inn mot Oslo som er kraftig redusert, ellers ser endringene ut til å være nokså små og jevnt fordelt.

Tabell 6-17 viser at energiforbruket for alle omformerstasjonene er redusert fra 285,8 til 239,3 MWh, se igjen avsnitt 6.1.1 for sammenligning. Dette er en endring på 16 % og må sies å være mye. Sannsynligvis er det den lavere hastigheten i Romeriksporten som utgjør mye av dette utslaget. I praksis kan det godt tenkes at togene ikke vil holde 200 km/t i Romeriksporten, men reduserer hastigheten under normale driftsforhold for å spare energi. Ut fra dette kan det se ut som om at en kan forvente ca 10 % -poeng eller lavere belastning på de fleste omformerstasjoner i normal drift.

Tabell 6-16 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperiden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men togsettene av Type 74/75 er gitt en pådragsreduksjon på 30 %. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Alle tog med 5 km/t redusert hastighet, få passasjerer og bare 70 % uttak i Type 74 og 75.								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	**3 x 10**	1,815	51	28,033	20,119	48	15,632	52
Holmlia	**2 x 10**	1,132	48	17,307	11,138	40	9,320	47
Alnabru	**2 x 10**	0,987	42	15,609	10,701	38	9,102	46
Lillestrøm	**3 x 12**	**1,962**	**77**	31,545	19,291	46	16,298	45
Jessheim	**2 x 12**	**1,294**	**76**	20,546	12,018	43	10,344	43
Tangen	**2 x 5,8**	0,556	44	8,553	3,598	22	2,451	21
Rudshøgda	**3,1**	0,275	61	3,895	1,642	34	0,894	29
Fåberg	**2 x 5,8**	0,454	36	7,290	2,386	15	1,494	13
Smørbekk	**2 x 12**	**1,418**	**84**	22,924	12,448	44	10,411	43
Sarpsborg	**1 x 12**	0,500	59	8,022	3,930	28	3,246	27
Kongsvinger	**1 x 5,8**	0,498	80	7,255	3,405	43	1,903	33
Lunner	**1 x 5,8**	0,465	74	6,806	5,544	69	3,401	59
Hønefoss	**1 x 5,8**	0,276	22	4,286	2,829	35	2,084	36
Nordagutu	**2 x 7**	0,629	38	9,819	5,579	25	4,399	31
Nelaug	**2 x 5,8**	0,559	45	8,718	6,764	42	2,859	25
Skoppum	**2 x 5,8**	**0,754**	**60**	11,680	6,327	40	4,027	35
Larvik	**2 x 5,8**	0,628	50	9,764	4,329	27	3,063	53



Figur 6-8 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området oppstår klokken 16:03:22 og for 6-minuttersverdi opptrer maksimalverdien klokken 16:14:54. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

Tabell 6-17 Sum energiforbruk til omformerstasjonene (målt på trefasesidene) for hver av timene som er simulert.

Periode	Energi til Matestasjoner [MWh]		
	Inn	Ut	Sum
Kl 15-16	72,13	-0,05	72,08
Kl 16-17	86,97	-0,07	86,90
Kl 17-18	80,41	-0,11	80,31
Sum	***239,51***	***-0,23***	***239,29***

6.2 Simulering med unormale driftssituasjoner

Unormale driftsituasjoner vil blant annet være koblinger i nettet eller utfall av ett eller flere omformeraggregater. I Oslo-området skal det kunne tillates at hele to omformeraggregater faller ut uten at det får betydning for togtrafikken. I dag vil en kunne få utfall av to aggregater i to forskjellige stasjoner uten at det får konsekvenser, selv i rushtiden[7]. Imidlertid er det tvilsomt om utfall av to aggregater i samme stasjon kan inntreffe, uten at de øvrige stasjoner i Oslo-området overbelastes og faller ut. Her vil en gjøre en del undersøkelser rundt dette med de tiltakene som en fant optimale i forrige avsnitt.

6.2.1 Simulering med utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia

Feil! Fant ikke referansekilden. viser at med utfall av ett aggregat samtidig i Asker og Holmlia blir de gjenværende aggregatene i Asker, Holmlia og Alnabru hardt belastet. Selv om de ikke belastes over sine grenseverdier er marginene mot overbelastning så små at det sannsynligvis bare er tilfeldigheter som avgjør om dette vil kunne gå bra. I Figur 6-9 kan en se hvordan effektfordelingen i Oslo-området blir. Sammenlignet med samme simulering, men uten tiltak i avsnitt 4.3, viser at Asker og Holmlia omformerstasjon nå bidrar betydelig mindre. Omvendt bidrar Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk mer. Overraskende er det å se hvor lite Nordagutu bidrar, dette selv om spenningen blir lavere i Asker og Nordagutu holder høy spenning.

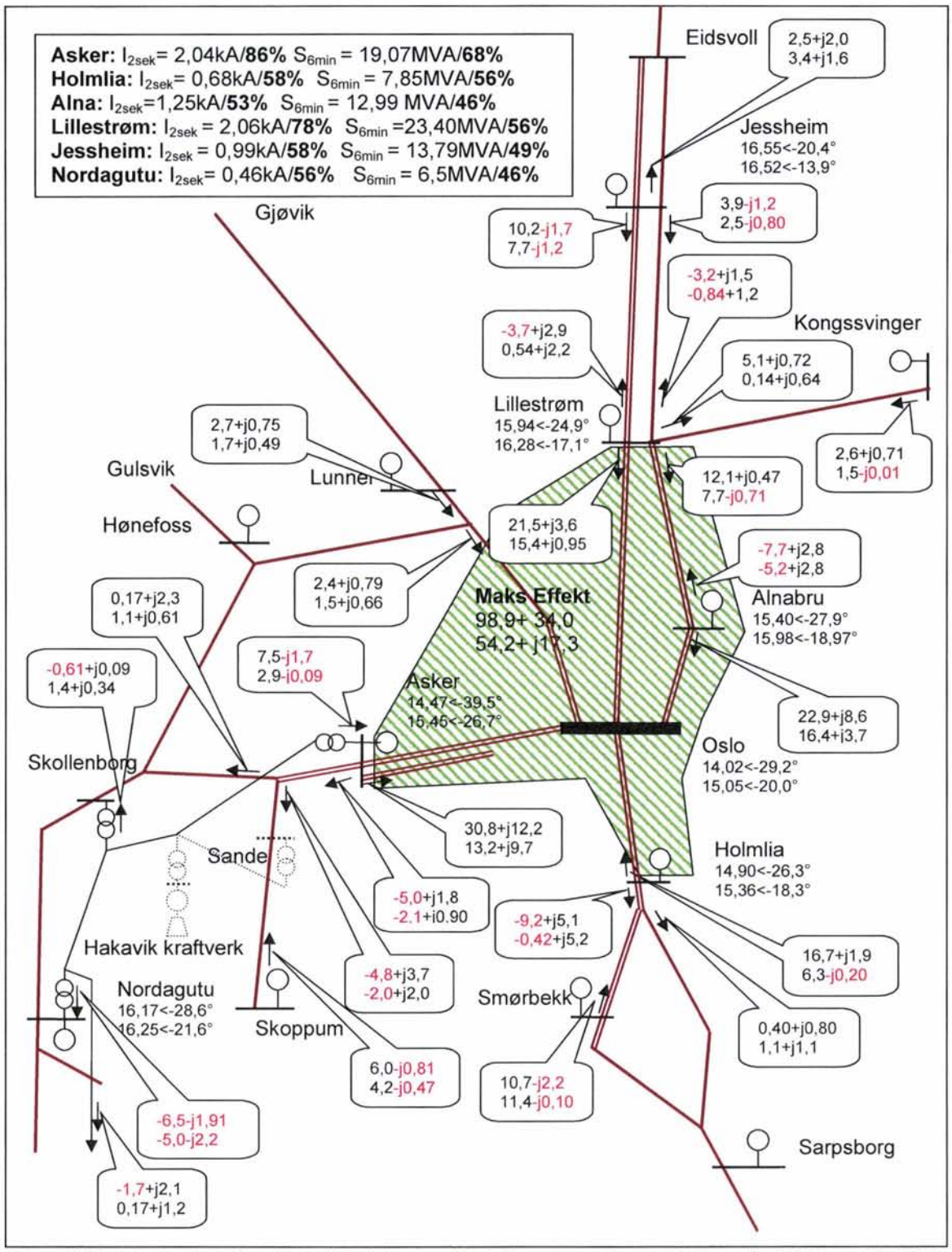
En annen ting som nå skjer med fallende statikk er at spenningen blir lavere og at togene reduserer effektopptaket sitt noe. Tidligere var effektopptaket ca 109 MW, mens det nå er ca 99 MW, altså en reduksjon på ca 10 MW.

I Tabell 6-18 ser en at ganske mange tog får lave spenninger, noen under 11,0 kV. Det kan tenkes at reaktiv kompensering kunne ha forbedret forholdene, ved at spenningen hadde blitt bedre, men samtidig ville nok også belastningen på omformerne blitt større. I avsnitt 6.3 er det undersøkt andre måter i tillegg for å begrense effekten fra omformerne i avvikssituasjoner og samtidig forbedre spenningen.

[7] Her har en ingen hendelseslogger, protokoller, simuleringer eller målinger til å støtte påstanden. Fra Bane Energi opplyses det om at et Q48-aggregat (10 MVA) fra Alnabru nå er i Hønefoss, og at en av Q48-aggregatene i Asker samtidig har vært ute av drift i lengre tid. Dette er tilstanden pr mai 2010.

Tabell 6-18 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperiden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men ett aggregat i Asker og Holmlia er falt ut. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	**2 x 10**	2,120	**90**	30,715	20,414	72	16,932	85
Holmlia	**1 x 10**	1,133	**96**	15,575	9,792	70	7,590	76
Alnabru	**2 x 10**	2,150	**91**	30,300	19,711	70	13,285	66
Lillestrøm	**3 x 12**	2,616	**103**	38,939	25,543	61	22,955	64
Jessheim	**2 x 12**	1,536	**91**	24,225	16,400	59	14,456	60
Tangen	**2 x 5,8**	0,968	**77**	14,327	5,010	31	3,535	30
Rudshøgda	**3,1**	0,333	74	4,474	2,129	44	1,124	36
Fåberg	**2 x 5,8**	0,574	46	9,057	3,029	19	1,877	16
Smørbekk	**2 x 12**	1,560	**92**	25,090	14,861	53	12,590	52
Sarpsborg	**1 x 12**	0,475	56	7,675	4,742	34	3,699	31
Kongsvinger	**1 x 5,8**	0,490	78	7,264	3,852	48	2,329	40
Lunner	**1 x 5,8**	0,513	82	7,381	6,131	77	3,838	66
Hønefoss	**1 x 5,8**	0,332	27	5,174	3,114	39	2,480	43
Nordagutu	**2 x 7**	0,750	45	11,651	7,744	35	5,737	41
Nelaug	**2 x 5,8**	0,579	46	8,988	6,580	41	3,334	29
Skoppum	**2 x 5,8**	0,949	**76**	14,513	8,444	**53**	5,128	44
Larvik	**2 x 5,8**	0,739	**59**	11,481	5,208	33	3,729	64



Figur 6-9 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området for momentanverdi oppstår klokken 16:13:23 og for 6-minutters effekt opptrer maksimalverdien klokken 16:13:29. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

Tabell 6-19 Tog som får lavere spenning enn 12,0 kV i simuleringen. Materielltype og antall enheter for hvert tog.

Tog	Minimum spenning under 12 kV RMS [kV]	
	1 sekund	2 minutter
3772 - Type 71_1	**11,49**	14,55
3566 - Type 71_1	**11,61**	13,14
3568 - Type 71_2	**11,15**	14,44
3570 - Type 71_2	**11,96**	14,26
3771 - Type 71_2	**11,08**	13,23
3567 - Type 71_1	**11,43**	13,00
3569 - Type 71_1	**11,79**	14,13
3571 - Type 71_1	**11,97**	14,31
3571 - Type 74_2	**11,15**	12,94
1633 - Type 74_2	**11,76**	14,19
1683 - Type 74_2	**11,03**	13,28
1684 - Type 74_1	**11,60**	13,11
1686 - Type 74_1	**11,15**	14,86
333 - Type 75_2	**11,66**	13,82
332 - Type 75_1	**11,94**	14,19
830 - Type 75_1	**11,38**	12,74
832 - Type 75_1	**11,86**	13,62
835 - Type 75_2	**11,17**	12,59
532 - Type 74_1	**10,77**	13,07
533 - Type 75_1	**11,46**	13,04
535 - Type 75_1	**11,51**	14,77
1081 - Type 74_1	**11,61**	12,71
1034 - Type 72_2	**11,74**	12,66
47 - Type 73_2	**10,87**	12,77

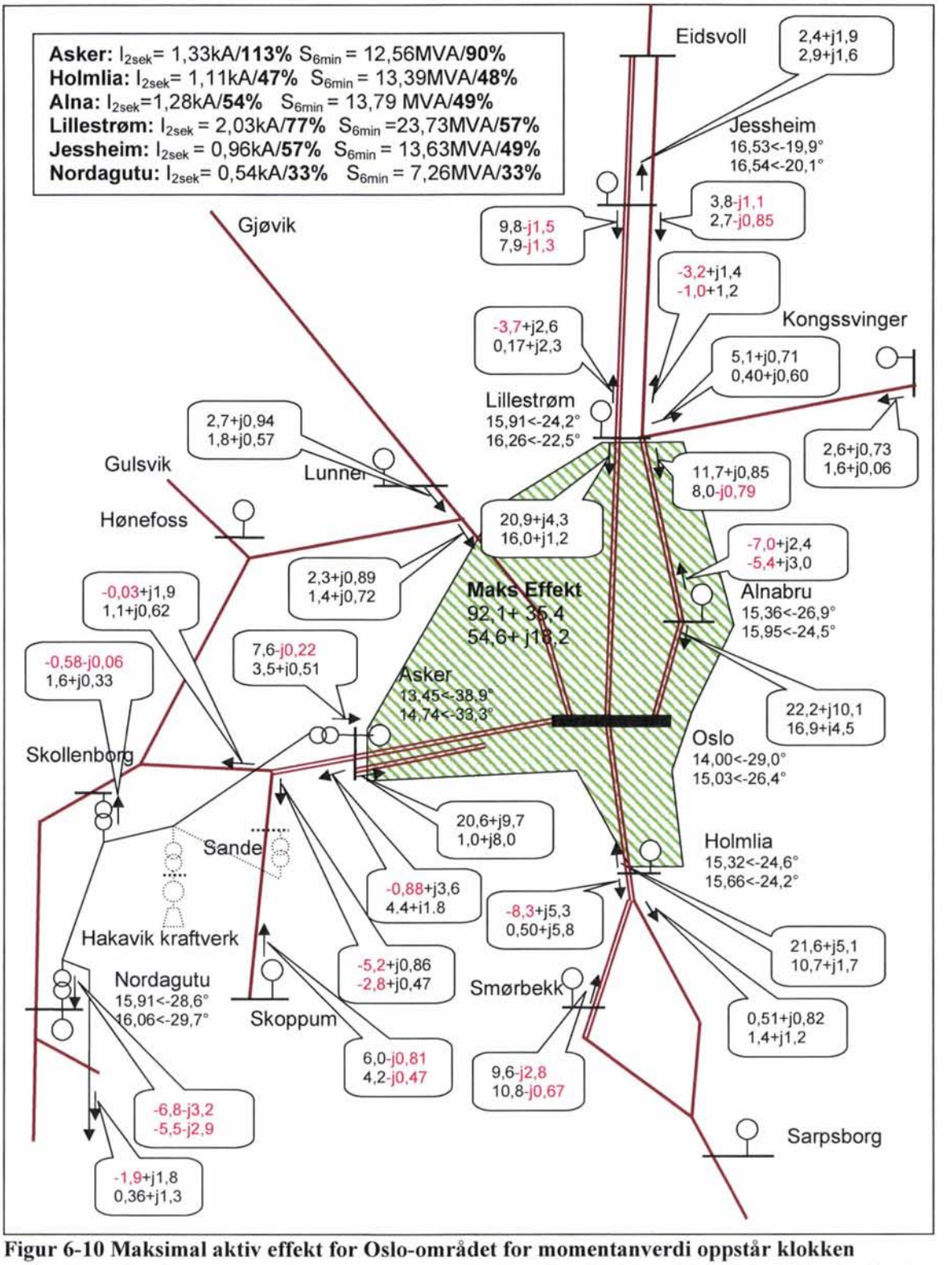
6.2.2 Simulering med utfall av to aggregater i Asker

Ved utfall av aggregater er det statistisk også mulig at dette skjer i samme stasjon. Simulering med utfall av to aggregater i Asker viser som forventet at det gjenværende blir veldig høyt belastet og vil kobles ut for overbelastning relativt raskt, se Tabell 6-20 nedenfor. Det som imidlertid er spesielt interessant å observere er hvor liten maksimalt opptredende belastning for de andre stasjonene er. Av dette kan det se ut som om utfall av det tredje og siste aggregatet i Asker ikke vil føre til at de øvrige aggregatene overbelastes. Grunnen til dette er nok flere, - viktigst er nok at tiltakene en har innført bidrar til bedre effektfordeling mellom stasjonene og at de statiske stasjonene bidrar mer. Samtidig vil den fallende statikken for spenningsregulatorene på 12 % sørge for at de roterende aggregater ikke har så lett for å overbelastes.

I Figur 6-10 kan en se hvordan effektflyten i Oslo-området blir og en ser at det totale effektopptaket nå er redusert yterligere fra tilfellet med utfall av ett aggregat i Asker og Holmlia. Det er fra Holmlia at det kommer mer effekt, mens det fra Lillestrøm og Alnabru ikke ser ut til å komme noe større bidrag. Enda en gang ser en at Nordagutu gir et lite bidrag, dette til tross for at den kun er moderat belastet. Togene som får lav spenning er vist i Tabell 6-21 og spenningen er ikke så lav som i tilfellet med utfall av aggregater både i Asker og Holmlia. Det er heller ikke så mange tog som får lav spenning.

Tabell 6-20 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperiden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men to aggregater i Asker er falt ut. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Utfall av to aggregater i Asker.								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	**1 x 10**	**1,415**	**120**	**18,848**	**13,878**	**99**	**11,345**	**113**
Holmlia	**2 x 10**	1,324	56	19,995	14,230	51	12,069	60
Alnabru	**2 x 10**	1,356	57	20,985	14,455	52	12,487	62
Lillestrøm	**3 x 12**	**2,625**	**103**	40,503	27,951	67	22,876	64
Jessheim	**2 x 12**	**1,503**	**89**	23,993	17,099	61	15,018	63
Tangen	**2 x 5,8**	0,829	66	12,495	4,933	31	3,366	29
Rudshøgda	**3,1**	0,333	74	4,472	2,123	44	1,122	36
Fåberg	**2 x 5,8**	0,574	46	9,056	3,020	19	1,864	16
Smørbekk	**2 x 12**	**1,495**	**88**	24,324	14,174	51	12,161	51
Sarpsborg	**1 x 12**	0,469	55	7,574	4,534	32	3,455	29
Kongsvinger	**1 x 5,8**	0,491	78	7,274	3,677	46	2,239	39
Lunner	**1 x 5,8**	0,514	82	7,353	6,163	77	3,866	67
Hønefoss	**1 x 5,8**	0,345	28	5,361	3,301	41	2,607	45
Nordagutu	**2 x 7**	0,826	50	12,850	8,725	40	6,411	46
Nelaug	**2 x 5,8**	0,583	47	9,057	6,659	42	3,413	29
Skoppum	**2 x 5,8**	**0,970**	**78**	14,813	8,934	56	5,454	47
Larvik	**2 x 5,8**	0,761	61	11,827	5,355	33	3,881	67



Figur 6-10 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området for momentanverdi oppstår klokken 16:13:23 og for 6-minutters effekt opptrer maksimalverdien klokken 16:14:24. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

Tabell 6-21 Tog som får lavere spenning enn 12,0 kV i simuleringen. Materielltype og antall enheter for hvert tog.

Tog	Minimum spenning under 12 kV RMS [kV]	
	1 sekund	2 minutter
1679 - Type 74_1	**11,91**	14,99
1683 - Type 74_2	**11,64**	13,98
1686 - Type 74_1	**11,86**	14,99
834 - Type 74_1	**11,75**	12,30
833 - Type 74_2	**11,81**	12,37
532 - Type 74_2	**11,70**	13,66
536 - Type 74_1	**11,61**	13,11
529 - Type 74_2	**11,70**	13,66
531 - Type 74_2	**11,61**	13,10
47 - Type 73_2	**11,71**	13,79
79 - Type 73_2	**11,95**	13,43

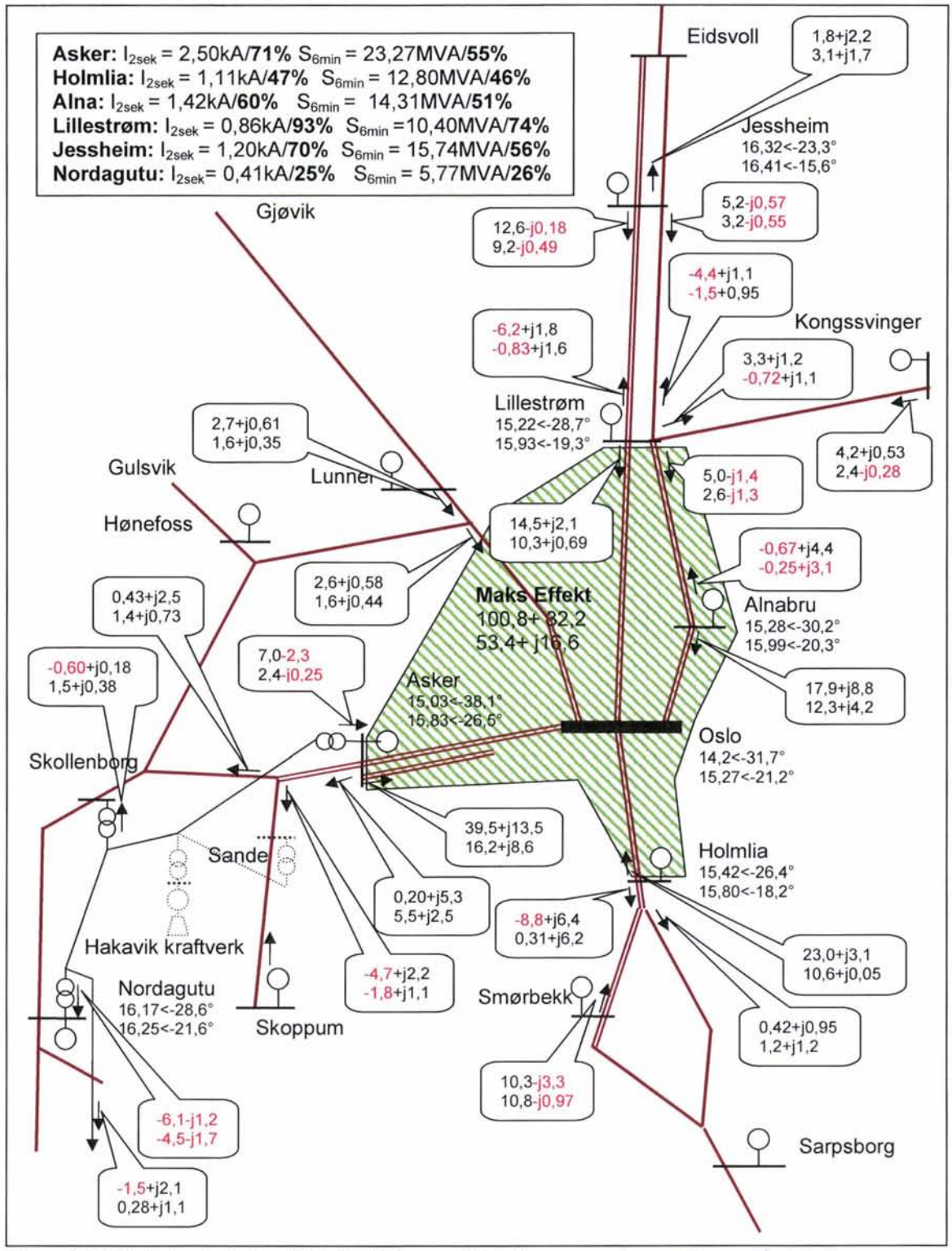
6.2.3 Simulering med utfall av to aggregater i Lillestrøm

Ved utfall av to av aggregatene i Lillestrøm omformer kan ikke det gjenværende overbelastes og det er da spørsmål om noen andre omformerstasjoner vil bli overbelastet. I Tabell 6-22 ser en at de øvrige omformerne bare blir noe mer belastet enn i tilfellet med normal drift, se Tabell 6-1. Alnabru blir mest belastet, men det kan tenkes at selv om det siste aggregatet i Lillestrøm skulle falle ut, vil ikke noen andre stasjoner falle ut for overbelastning.

I Figur 6-11 kan en se hvordan utfall av de to aggregatene i Lillestrøm fører til at mer effekt overføres fra Asker, Holmlia og Alnabru. Noe mer effekt kommer fra Kongsvinger, noe som ytterligere forbedres ved at to aggregater er i drift i dette senariet. Allikevel bidrar ikke dette til at Kongsvinger belastes mer enn moderat. Ingen tog får spenninger under 12,0 kV, noe som betyr at en kan godta at Lillestrøm belastes mye. Sannsynligvis vil en se det samme for Jessheim, - at selv om denne belastes høyt kortvarig blir ikke spenningen for togene lave ved utfall av ett aggregat her.

Tabell 6-22 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperiden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men to aggregater i Lillestrøm er falt ut. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Utfall av to aggregater i Lillestrøm.								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	**3 x 10**	2,555	72	38,348	24,305	58	19,810	66
Holmlia	**2 x 10**	1,365	58	20,739	13,411	48	11,669	58
Alnabru	**2 x 10**	1,467	62	22,586	15,434	55	13,304	67
Lillestrøm	**1 x 12**	0,876	**103**	13,583	12,013	86	10,176	85
Jessheim	**2 x 12**	1,759	**104**	27,298	19,395	69	16,025	67
Tangen	**2 x 5,8**	0,833	67	12,563	5,000	31	3,398	29
Rudshøgda	**3,1**	0,336	75	4,510	2,150	45	1,152	37
Fåberg	**2 x 5,8**	0,574	46	9,062	3,095	19	1,939	17
Smørbekk	**2 x 12**	1,518	90	24,733	14,031	50	11,928	50
Sarpsborg	**1 x 12**	0,467	55	7,544	4,556	33	3,674	31
Kongsvinger	**2 x 5,8**	0,632	51	9,906	4,778	30	3,146	27
Lunner	**1 x 5,8**	0,507	81	7,309	6,053	76	3,743	65
Hønefoss	**1 x 5,8**	0,321	26	5,023	2,992	37	2,382	41
Nordagutu	**2 x 7**	0,688	42	10,751	6,930	31	5,130	37
Nelaug	**2 x 5,8**	0,571	46	8,865	6,504	41	3,231	28
Skoppum	**2 x 5,8**	0,932	**75**	14,264	8,046	50	4,906	42
Larvik	**2 x 5,8**	0,736	59	11,417	5,138	32	3,632	63



Figur 6-11 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området for momentanverdi oppstår klokken 16:13:23 og for 6-minutters effekt opptrer maksimalverdien klokken 16:14:39. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

6.2.4 Simulering med utfall av hele Asker omformerstasjon og Hakavik i drift og produksjon på 15 MW

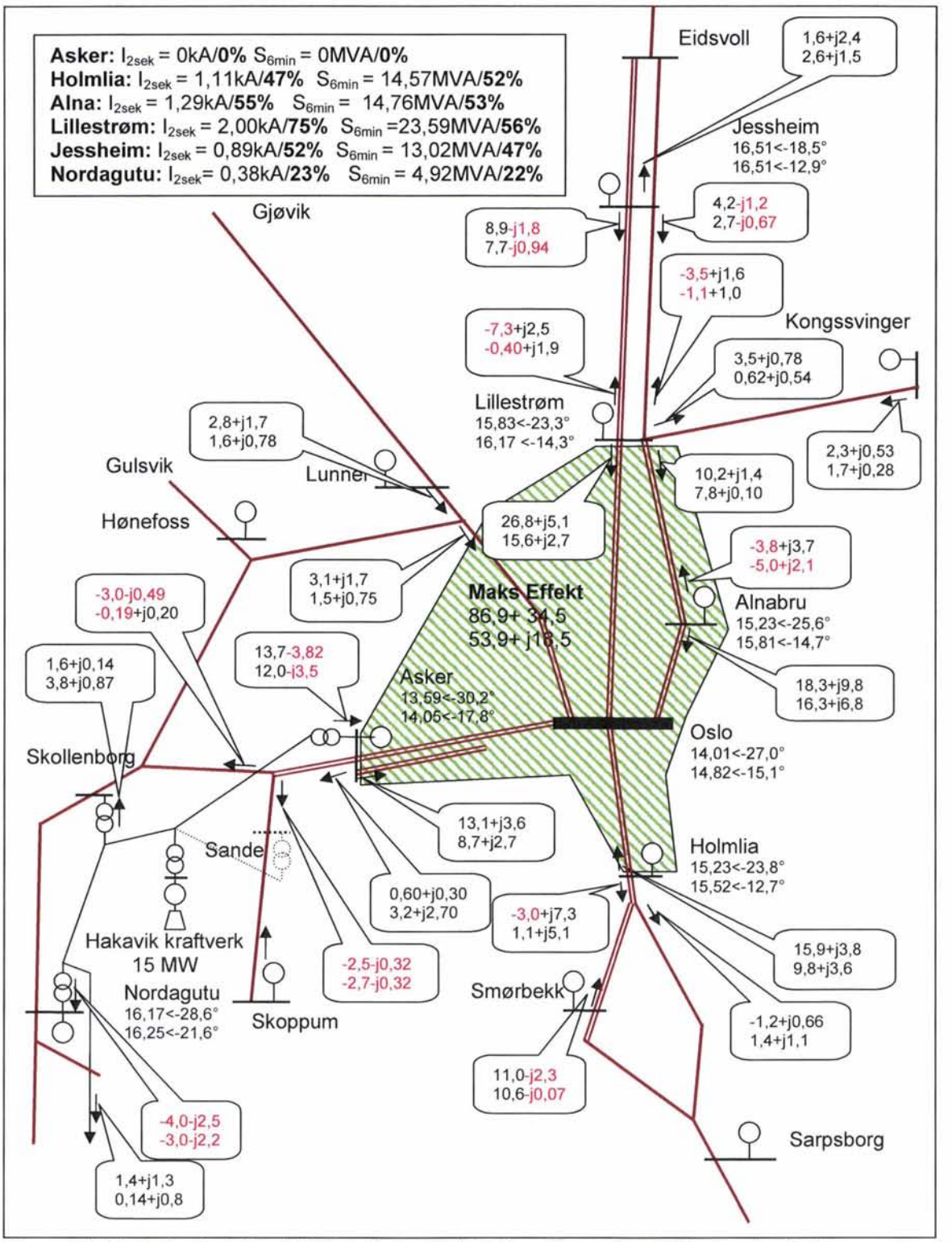
Simuleringen med utfall av hele Asker omformerstasjon og en produksjon på 15 MW i Hakavik kraftverk er gjort for å se hvor stor betydning Hakavik egentlig har. Det burde vært simulert med forskjellige ytelser i Hakavik, om for eksempel 5, 10 eller 15 MW er aktuelle ytelser for en ny installasjon. Imidlertid kan en ved å se på Tabell 6-23 få inntrykk av at Hakavik i seg selv ikke vil være kritisk i forhold til systemutfall i denne situasjonen, men heller vil ha betydning for spenningen for togene. De nærmeste omformerstasjonene Holmlia og Alnabru får ikke maksimale belastningstopper som er spesielt store og heller ikke veldig mye større enn ved normal drift, se 6.1.1. Det ser ut til at om hele Asker omformerstasjon falt ut av drift, vil de gjenværende omformerstasjonene kunne opprettholde driften uten å overbelastes. Dette altså selv om Hakavik ikke er i drift. Gjelder dette for Asker, vil det sannsynligvis også gjelde for en av de andre stasjonene også. Spenningen for togene vil imidlertid bli lav.

Figur 6-12 viser effektflyten i situasjonene med størst effektbehov inne i Oslo-området, og som en ser er uttaket til togene redusert fra 103,0 i normal drift, til 86,9 MW for spissbelastningen ved utfall av hele Asker. Reduksjonen er altså på 16 %. Meget enkelt kan en nok si at om Hakavik i denne situasjonene hadde vært ca 16 MW, så ville togene ha kunnet fått samme effekt som i normal drift. Ellers kan en se at det kommer mye ekstra effekt fra Lillestrøm i denne situasjonen, mens Holmlia og Alnabru faktisk leverer mindre effekt.

Tabell 6-24 viser at en del tog får spenning under 12,0 kV. Sannsynligvis er Hakavik kraftstasjon sitt viktigste bidrag å sørge for at togene får akseptable spenninger. Om den som sagt hadde vært omtrent dobbelt så stor hadde nok ingen tog fått lave spenninger. Nå er det imidlertid utfall av to aggregater Oslo-området skal dimensjoneres for, og da vil effektunderskuddet bli mindre og spenningen for togene bli bedre med Hakavik sitt bidrag. Hakavik med 15 MW kan bare nesten erstatte ett roterende aggregat på 10 MVA, slik at noen effektunderskudd vil det måtte bli. For å erstatte ett aggregat på 10 MVA burde Hakavik vært på mellom 18 og 20 MVA, forutsatt at det skal kunne dekke opp for 2-sekundersverdiene for ett slikt aggregat. Det kan altså se ut som om Hakavik burde vært på rundt 20 MW, men når dette er umulig er det bedre at det er på 15 enn 10 MW.

Tabell 6-23 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperioden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men Asker omformerstasjon er falt ut samtidig som Hakavik kraftverk produserer 15 MW. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Hakavik med en produksjon på 15 MW og utfall av alle aggregater i Asker.								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	**0 x 10**	0,000	-	0,000	0,000	-	0,000	-
Holmlia	**2 x 10**	1,347	57	20,253	14,791	53	12,068	60
Alnabru	**2 x 10**	1,348	57	20,577	14,913	53	12,637	63
Lillestrøm	**3 x 12**	**2,631**	**103**	40,386	25,638	61	21,855	61
Jessheim	**2 x 12**	**1,591**	**94**	24,946	16,306	58	14,538	61
Tangen	**2 x 5,8**	0,826	66	12,425	4,882	31	3,237	28
Rudshøgda	**3,1**	0,334	74	4,474	2,119	44	1,116	36
Fåberg	**2 x 5,8**	0,573	46	9,042	3,005	19	1,846	16
Smørbekk	**2 x 12**	**1,504**	**89**	24,423	13,902	50	12,744	53
Sarpsborg	**1 x 12**	0,467	55	7,535	4,521	32	3,410	28
Kongsvinger	**1 x 5,8**	0,489	78	7,260	3,699	46	2,223	38
Lunner	**1 x 5,8**	0,516	83	7,363	6,169	77	3,804	66
Hønefoss	**1 x 5,8**	0,338	27	5,193	3,077	38	2,336	40
Nordagutu	**2 x 7**	0,618	37	9,644	5,890	27	3,627	26
Nelaug	**2 x 5,8**	0,571	46	8,852	6,309	39	2,769	24
Skoppum	**2 x 5,8**	**0,971**	**78**	14,753	8,832	55	5,160	44
Larvik	**2 x 5,8**	**0,751**	**60**	11,628	4,964	31	3,360	58



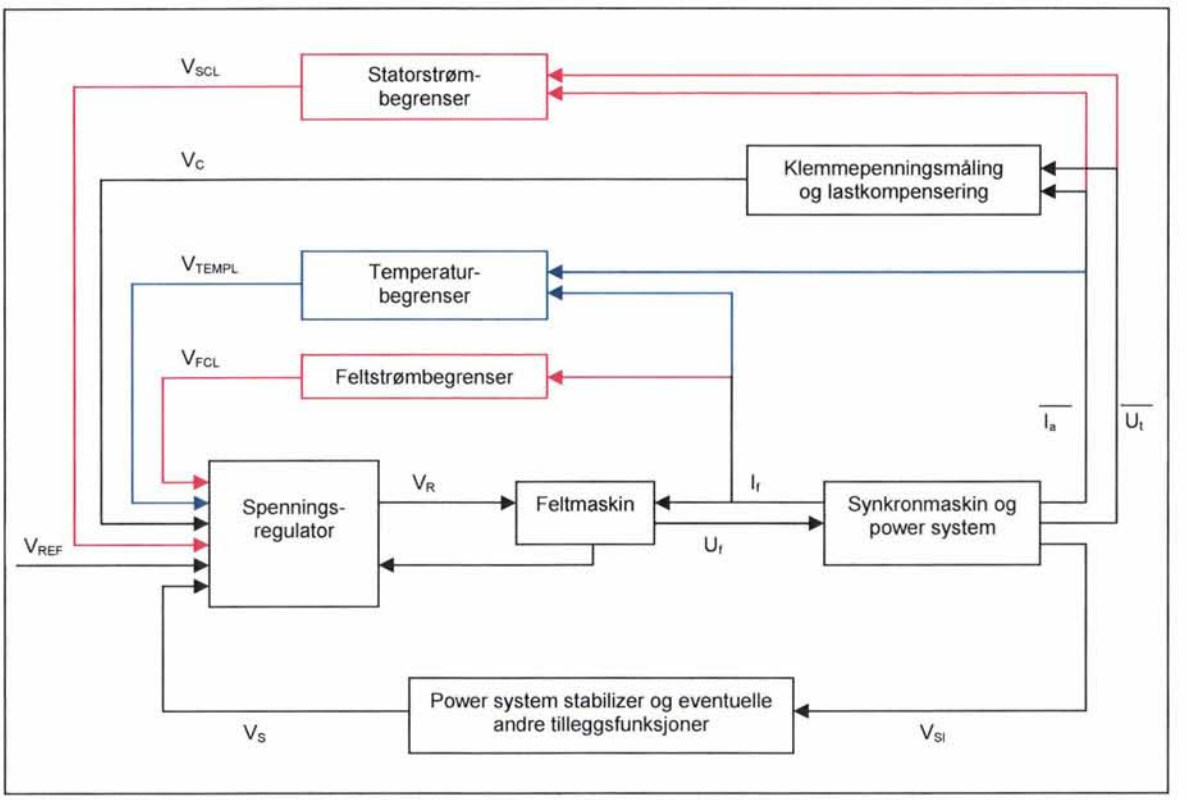
Figur 6-12 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området for momentanverdi oppstår klokken 16:03:31 og for 6-minutters effekt opptrer maksimalverdien klokken 16:14:43. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

Tabell 6-24 Tog som får lavere spenning enn 12,0 kV i simuleringen. Materielltype og antall enheter for hvert tog.

Tog	Minimum spenning under 12 kV RMS [kV]	
	1 sekund	2 minutter
1679 - Type 74_1	**11,96**	14,99
1683 - Type 74_2	**11,79**	13,41
834 - Type 74_1	**11,59**	12,06
833 - Type 74_2	**11,66**	12,16
933 - Type 70_2	**11,84**	12,45
532 - Type 74_2	**11,72**	14,02
529 - Type 74_2	**11,98**	13,80
531 - Type 74_2	**11,67**	12,72
581 - Type 70_1	**11,97**	12,79
47 - Type 73_2	**11,72**	14,14
79 - Type 73_2	**11,92**	13,53
5800 - EL16_800	**11,91**	12,69

6.3 Simulering med tiltak i form av strøm- og/eller temperaturbegrenser i roterende omformerstasjoner

Undersøkelse av temperatur- og strømbegrenser som omtalt i [14] og gjøres for det ene tilfellet med utfall av to omformere i Asker. Det vil da normalt være stor sannsynlighet for at det gjenværende aggregatet faller ut for overlast, men at begrenserfunksjonen vil forhindre dette. Temperaturbegrensermodulene stilles inn for at temperaturen i stator og rotor ikke skal overskride 90 °C og strømbegrenseren for at nominell strøm for felt- og statorviklingen ikke skal kunne overskrides. Modulene virker som tre ekstra bidrag til summasjonspunktet i spenningsregulatoren slik at spenningen justeres ned, se Figur 6-13. Hensikten er altså at om en omformerstasjon nærmer seg kritiske verdier for belastbarheten vil spenningen justeres ned og andre nærliggende stasjoner ta over effekten. En annen ting som også skjer er at togene reduserer sitt effektopptak ved lave spenninger. I tillegg til redusert spenning ved fare for overbelastning vil også spenningsstatikken være inkludert.



Figur 6-13 Blokkskjema som viser tilleggsfunksjoner til spenningsregulatoren for generatoren i en roterende omformer. Det er de røde og blå enhetene som er undersøkt spesielt her, mens "Power system stabilizer og eventuelle andre tilleggsfunksjoner" ikke er inkludert.

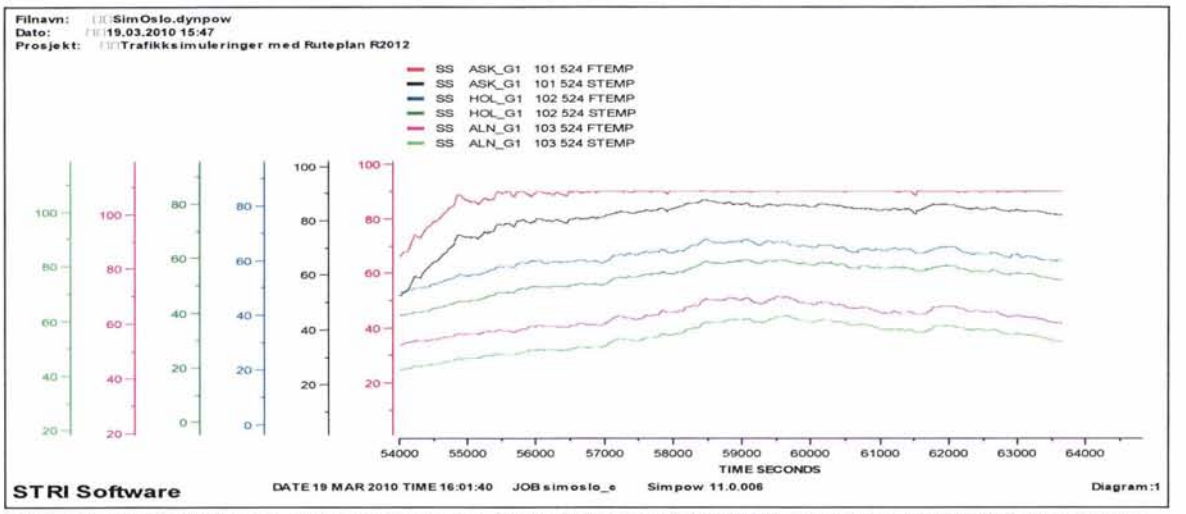
6.3.1 Utfall av to aggregater i Asker og temperaturbegrenser i alle de sentrale roterende omformerne

Ved utfall av to aggregater i Asker omformerstasjon ser en at med temperatur- og strømbegrenser blir høyeste belastning av Asker omformerstasjon henholdsvis 86 og 89 % for 2-sekunders og 6-minuttersverdiene. Dette er i stor kontrast til simuleringen i avsnitt 6.2.2 der det gjenværende aggregatet ble belastet over 100 % og helt sikkert ville falle for overlast. I Figur 6-14 ser en hvordan temperaturen i de tre omformerstasjonene Asker, Holmlia og Alnabru endrer seg, men at det kun er i Asker at en tydelig ser hvordan begrenseren trer i funksjon for å begrense temperaturen til 90 °C. Når det gjelder strømmen viser Figur 6-15 at feltstrømbegrenseren er i funksjon bare noen få ganger for det gjenværende aggregatet i Asker. For statorstrømbegrenseren er det ikke vist noen figur, men her kom begrenseren ikke i funksjon.

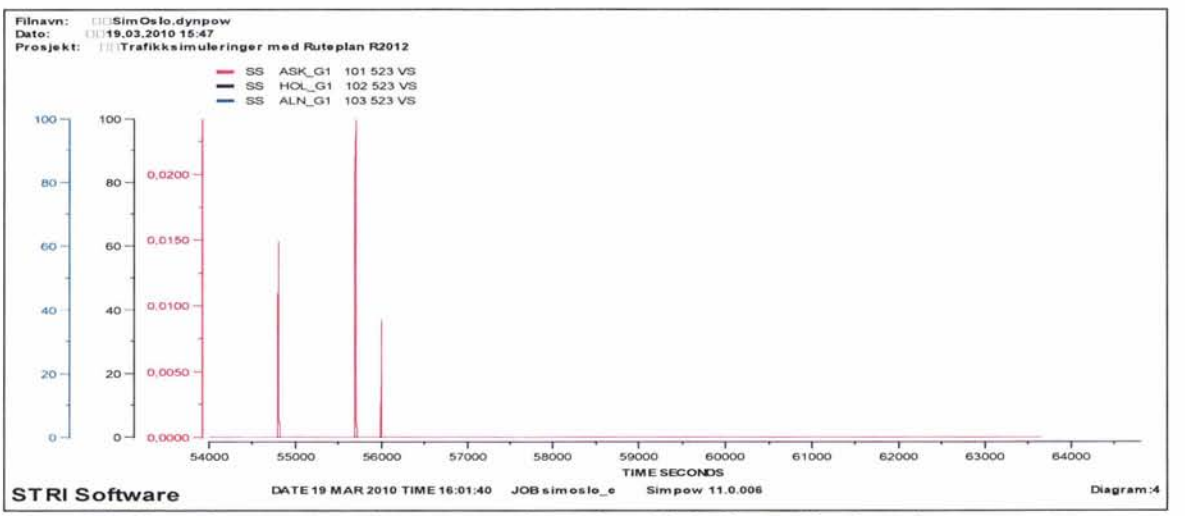
Når det gjelder effektflyten i hele området viser Figur 6-21 at Asker bidrar mindre til Oslo-området når behovet er størst mens Lillestrøm bidrar mer, dette igjen sammenlignet med tilfellet uten begrenserfunksjoner. En legger også merke til at det maksimale effektopptaket i Oslo-området nå er redusert en del. Som ventet er det også flere tog som får lav spenning nå og spenningen er også lavere, se Tabell 6-26. I neste avsnitt skal det undersøkes om tog med reaktiv kompensering kan øke spenningen for togene.

Tabell 6-25 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperiden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men to aggregater i Asker er falt ut og temperatur- og strømbegrensere er innført. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

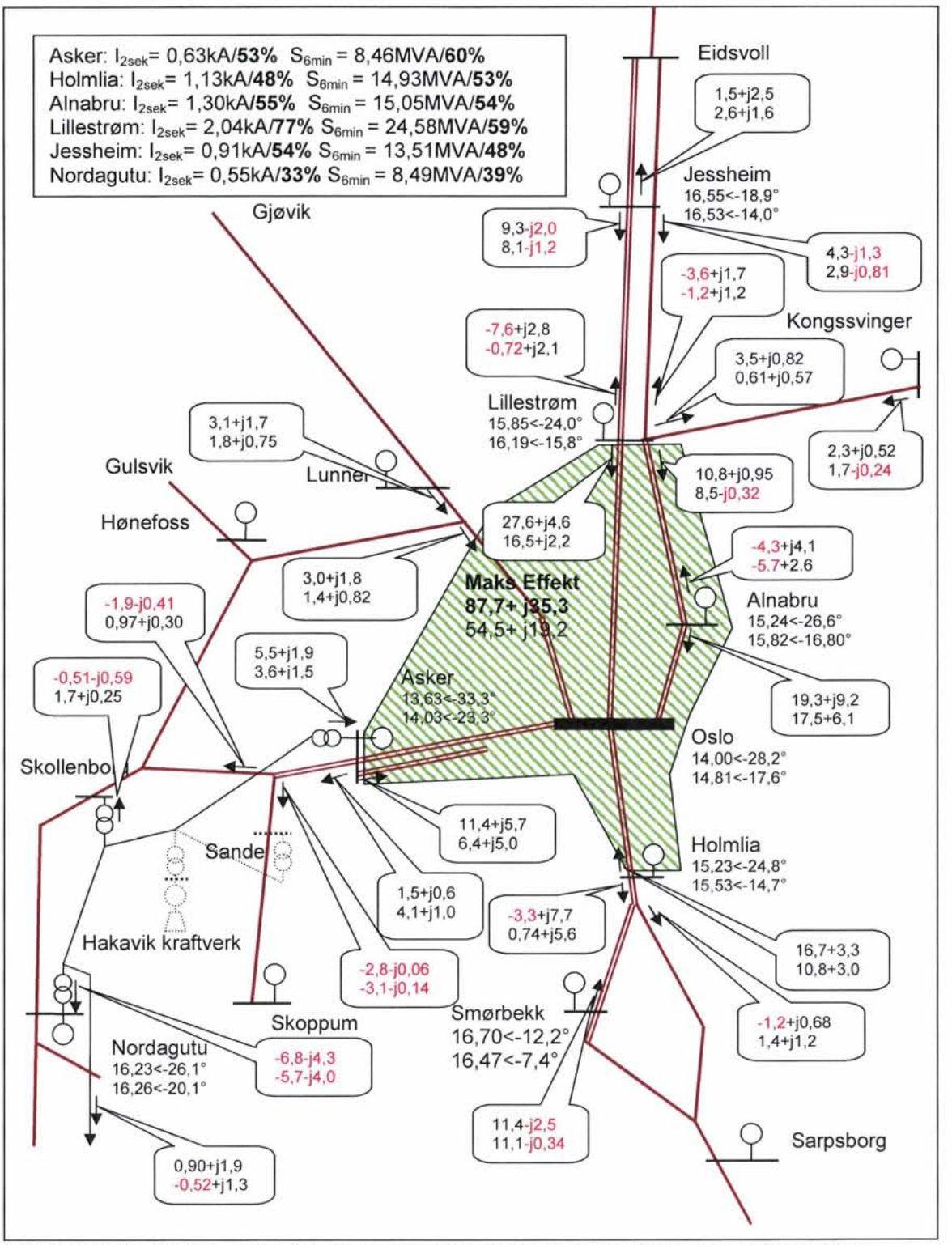
Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Utfall av to aggregater i Asker og temp/strøm begrensere i Asker, Holmlia og Alnabru.								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	**1 x 10**	**1,017**	**86**	14,017	9,671	69	**8,931**	**89**
Holmlia	**2 x 10**	1,381	59	20,801	15,179	54	12,497	62
Alnabru	**2 x 10**	1,396	59	21,478	15,264	55	13,078	65
Lillestrøm	**3 x 12**	**2,621**	**103**	40,442	28,329	67	23,392	65
Jessheim	**2 x 12**	**1,504**	**89**	23,984	16,993	61	14,546	61
Tangen	**2 x 5,8**	0,828	66	12,478	4,944	31	3,382	29
Rudshøgda	**3,1**	0,333	74	4,470	2,125	44	0,996	32
Fåberg	**2 x 5,8**	0,551	44	8,812	3,027	19	1,732	15
Smørbekk	**2 x 12**	**1,512**	**89**	24,569	14,269	51	12,722	53
Sarpsborg	**1 x 12**	0,471	56	7,612	4,620	33	3,519	29
Kongsvinger	**2 x 5,8**	0,492	39	7,300	3,693	23	2,252	19
Lunner	**1 x 5,8**	0,516	83	7,378	5,791	72	3,447	59
Hønefoss	**1 x 5,8**	0,367	29	5,599	3,470	43	2,655	46
Nordagutu	**2 x 7**	0,888	54	13,654	9,645	44	6,896	49
Nelaug	**2 x 5,8**	0,582	47	9,024	6,743	42	3,432	30
Skoppum	**2 x 5,8**	**0,981**	**78**	14,926	9,240	58	5,590	48
Larvik	**2 x 5,8**	0,690	55	10,588	5,216	33	3,623	62



Figur 6-14 Utviklingen av temperaturen i feltviklingen (FTEMP) og stator (STEMP) for Asker, Holmlia og Alnabru gjennom trafikksinuleringen. Tiden i sekunder der 54000 er klokken 15:00 og temperaturen i Celsiusgrader. Bare kurver for ett aggregat er vist, men de andre aggregatene i samme stasjon er av samme størrelse og belastes likt.



Figur 6-15 Inngripen av strømbegrenseren for Asker, Holmlia og Alnabru gjennom trafikksimuleringen. Tiden i sekunder der 54000 er klokken 15:00. Bare kurver for ett aggregat er vist, men de andre aggregatene i samme stasjon er av samme størrelse og belastes likt.



Tabell 6-26 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området for momentanverdi oppstår klokken 16:20:11 og for 6-minutters effekt opptrer maksimalverdien klokken 16:14:42. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

Tabell 6-27 Tog som får lavere spenning enn 12,0 kV i simuleringen. Materielltype og antall enheter for hvert tog.

Tog	Minimum spenning under 12 kV RMS [kV]	
	1 sekund	2 minutter
3762 - Type 71_1	11,99	13,14
3773 - Type 71_1	11,98	12,85
3779 - Type 71_1	**11,80**	13,63
1633 - Type 74_2	11,96	12,78
1683 - Type 74_2	**11,44**	13,40
1686 - Type 74_1	**11,69**	14,99
834 - Type 74_1	**11,40**	11,96
833 - Type 74_2	**11,50**	12,08
933 - Type 70_2	**11,65**	12,29
532 - Type 74_2	**11,67**	13,63
534 - Type 74_1	**11,72**	12,77
536 - Type 74_1	**11,45**	12,66
529 - Type 74_2	**11,48**	13,28
531 - Type 74_2	**11,45**	12,65
581 - Type 70_1	**11,66**	12,45
583 - Type 70_1	**11,72**	12,74
63 - Type 73_2	**11,69**	13,03
602 - El18_8B7	**11,80**	12,80
47 - Type 73_2	**11,70**	13,76
79 - Type 73_2	**11,46**	12,89
5800 - EL16_800	**11,70**	12,40

6.3.2 Utfall av to aggregater i Asker temperaturbegrenser i alle de sentrale roterende omformerne og Type 74 og 75 med reaktiv kompensering ved lave spenninger

Ved å la togene få reaktiv kompensering ved lave spenninger kan en oppnå at spenningen heves i systemet generelt, samtidig som at togene også kan ta ut noe mer aktiv effekt. I avsnitt 4.5 viser Figur 4-20 hvordan fasevinkelen til Type 74 og 75 skal endres når spenningen blir lav[8]. Dette må sees på som et forslag, og det er muligens andre forhold kan tale for å ikke endre såpass mye på fasevinklene allerede ved 16,5 kV. Dette gjør i alle fall at ingen tog får spenning under 12,0 kV. Tog 532 og 47 får en spenning på 12,0 kV for 2- sekunders RMS verdi av spenningen. Mens tog 581 og 5800 får en spenning på 12,1 kV. Alle andre tog får bedre spenninger enn dette, og med dette tiltaket kommer en akkurat innenfor kravet.

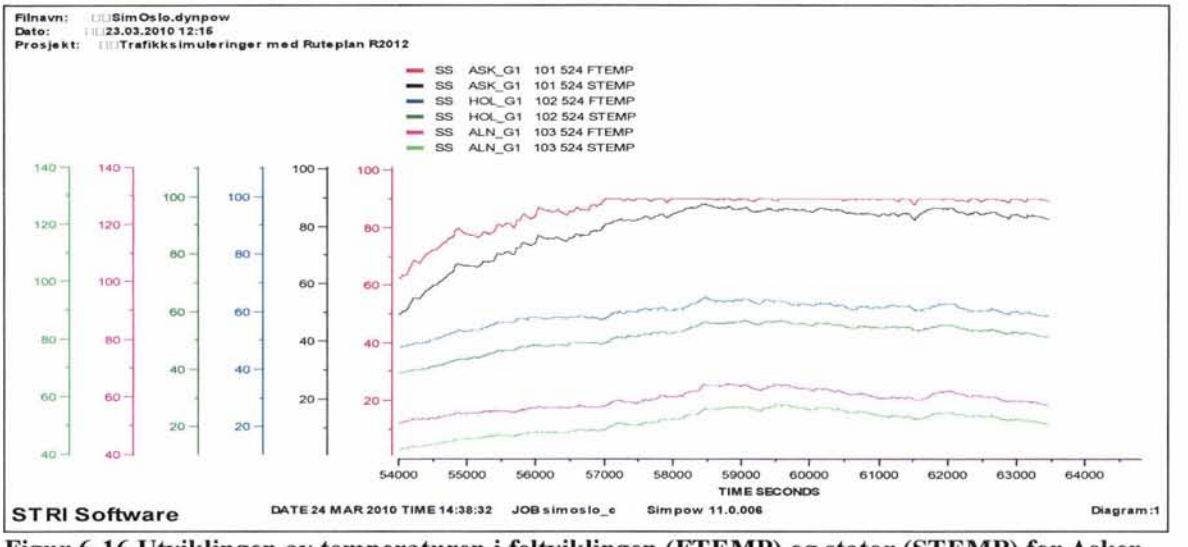
I Tabell 6-28 kan en se hvordan belastningen av omformeraggregatene blir og tendensen er altså en noe større belastning på Asker, mens de andre belastes noe mindre. Faktisk ser en at for 1-timesverdien for det gjenværende aggregatet i Asker blir over 100 %. Dette kan tyde på at den termiske modellen som er laget i SIMPOW ikke er god nok, eller at temperaturgrensen må stilles noe ned. I virkeligheten kan en bruke termistorene i statorviklingene og dermed fåes en direkte måling. Dermed er dette noe som en kan unngå i praksis. I Figur 6-16 og Figur 6-17 og ser en hvordan henholdsvis temperaturen og strømbegrenseren for feltviklingen trer i funksjon for de tre stasjonene i Asker, Holmlia og Alnabru. Det er bare så vidt at begrenseren for feltstrøm er i funksjon, mens begrenseren for statorstrøm ikke kommer i bruk. Figur 6-18,

[8] Her oppdages det at den opprinnelige kompenseringen for togene ved lave spenninger ikke er korrekt i modellen som er benyttet. Det er benyttet feil fortegn, men for å ha likt sammenlingingsgrunnlag beholdes de opprinnelige verdiene. Figuren i avsnitt 7.2.10 viser de opprinnelige verdiene som er benyttet. Imidlertid er dette en feil av mindre betydning og simuleringene med utfall blir noe mer konservative.

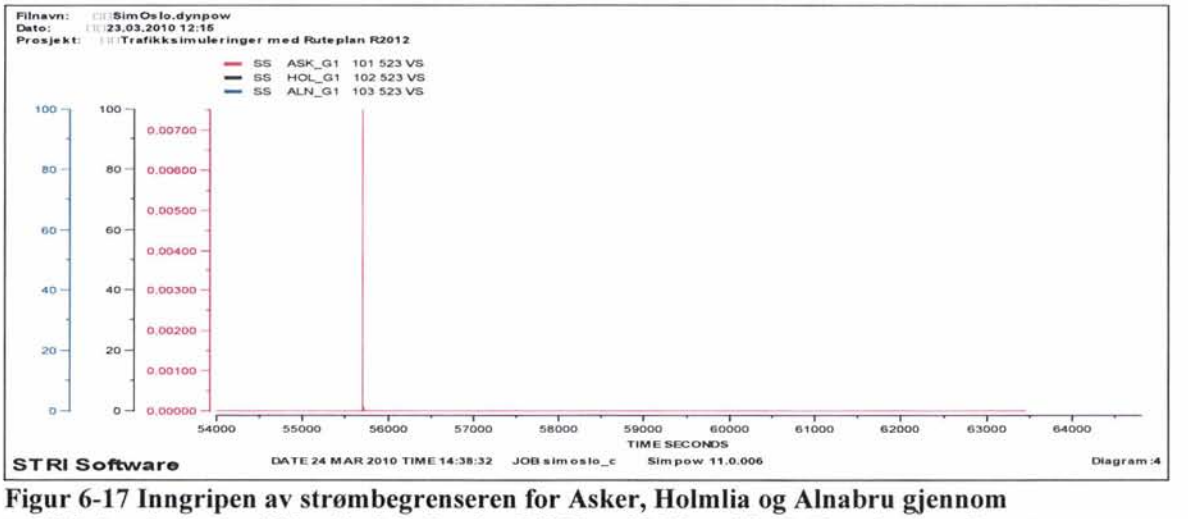
Figur 6-19 og Figur 6-20 viser henholdsvis 2-sekundersverdi av RMS strøm, 6-minuttersverdien og 1-timesverdien av MEAN effekt for det gjenværende aggregatet i Asker. Illustrasjonene viser kurvene for temperaturen i tidsrommet ved belastningstoppen. Det er vist kurve for tilfellet uten begrenser, med begrensere og med begrensere og tog med reaktiv kompensering. En ser tydelig at tiltaket med begrenser forårsaker at en unngår overbelastning, men forskjellen mellom tilfellet med kompensering i togene og uten er liten. I Figur 6-21 ser en effektflyten i Oslo-området for øyeblikket med maksimalt effektbehov og sammenlignet med resultatet i forrige avsnitt, se 6.3.1, ser en at med reaktiv kompensering i togene øker det aktive effektuttaket. Samtidig reduseres den reaktive effektflyten og ingen tog får altså spenning under 12,0 kV, det ser med andre ord ut som om selve hensikten med reaktiv kompensering i togene er oppfylt.

Tabell 6-28 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperiden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men to aggregater i Asker er falt ut, temperatur- og strømbegrensere er innført og reaktiv kompensering i Type 74 og 75 er innført. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

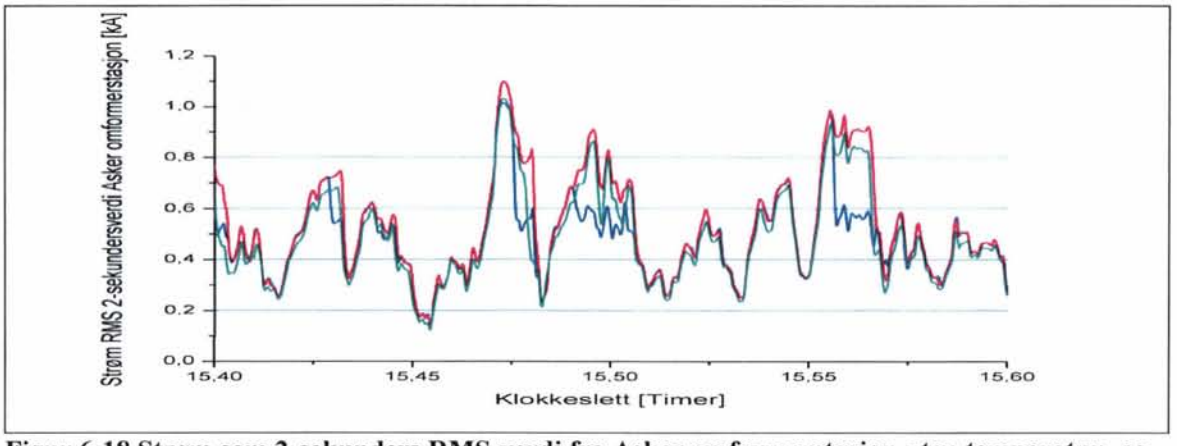
Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Utfall av to aggregater i Asker og tem/strøm begrensere i Asker, Holmlia og Alnabru. Tog Type 74 og 75 med reaktiv kompensering ved lav spenning								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minutter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	1 x 10	1,031	**87**	14,633	9,685	**69**	8,921	**89**
Holmlia	2 x 10	1,354	57	20,601	14,445	52	12,014	60
Alnabru	2 x 10	1,323	56	20,719	14,252	51	12,196	61
Lillestrøm	3 x 12	2,612	**103**	40,694	27,761	66	22,823	63
Jessheim	2 x 12	1,448	85	23,508	16,752	60	14,448	60
Tangen	2 x 5,8	0,812	**65**	12,502	4,669	29	3,226	28
Rudshøgda	3,1	0,343	76	4,863	1,926	40	0,913	29
Fåberg	2 x 5,8	0,582	47	9,530	3,089	19	1,769	15
Smørbekk	2 x 12	1,517	**89**	24,720	14,271	51	12,032	50
Sarpsborg	1 x 12	0,468	55	7,554	4,617	33	3,524	29
Kongsvinger	1 x 5,8	0,489	78	7,256	3,611	45	2,200	38
Lunner	1 x 5,8	0,446	71	6,612	5,706	71	3,360	58
Hønefoss	1 x 5,8	0,353	28	5,488	3,299	41	2,575	44
Nordagutu	2 x 7	0,819	50	12,751	8,715	40	6,372	46
Nelaug	2 x 5,8	0,583	47	9,028	6,711	42	3,450	30
Skoppum	2 x 5,8	0,997	**80**	15,444	8,807	**55**	5,370	46
Larvik	2 x 5,8	0,674	**54**	10,889	5,165	32	3,600	62



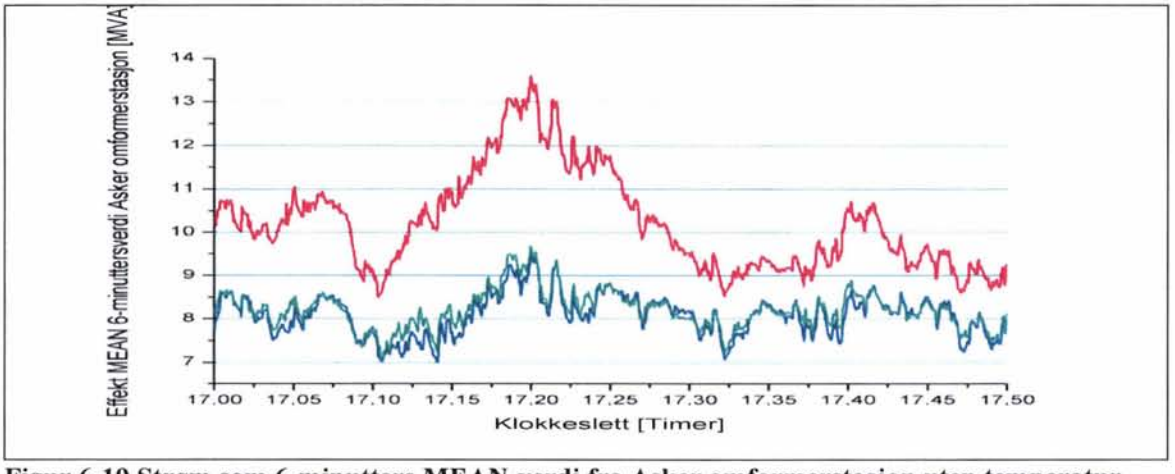
Figur 6-16 Utviklingen av temperaturen i feltviklingen (FTEMP) og stator (STEMP) for Asker, Holmlia og Alnabru gjennom trafikksinuleringen. Tiden i sekunder der 54000 er klokken 15:00 og temperaturen i Celsiusgrader. Bare kurver for ett aggregat er vist, men de andre aggregatene i samme stasjon er av samme størrelse og belastes likt.



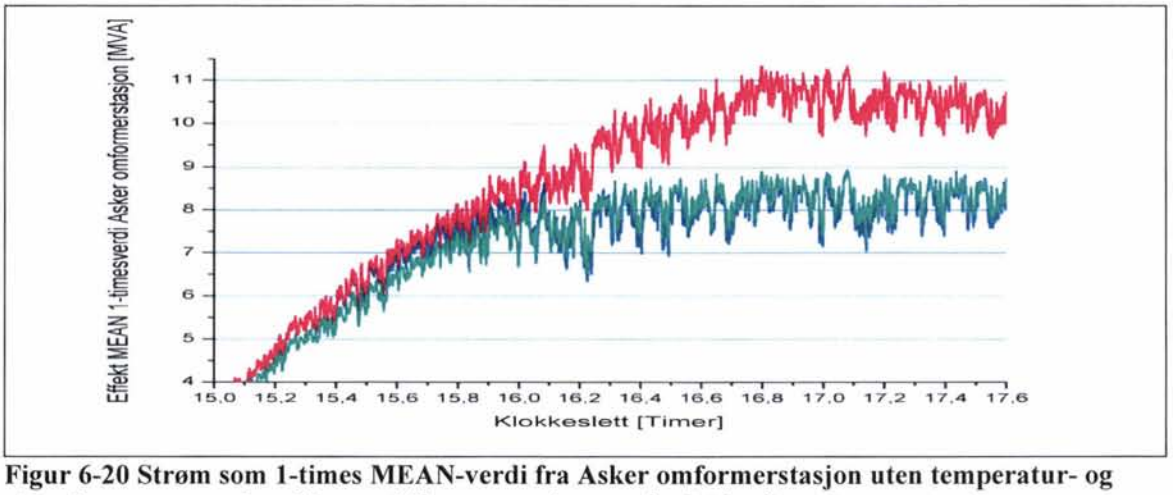
Figur 6-17 Inngripen av strømbegrenseren for Asker, Holmlia og Alnabru gjennom trafikksimuleringen. Tiden i sekunder der 54000 er klokken 15:00. Bare kurver for ett aggregat er vist, men de andre aggregatene i samme stasjon er av samme størrelse og belastes likt.



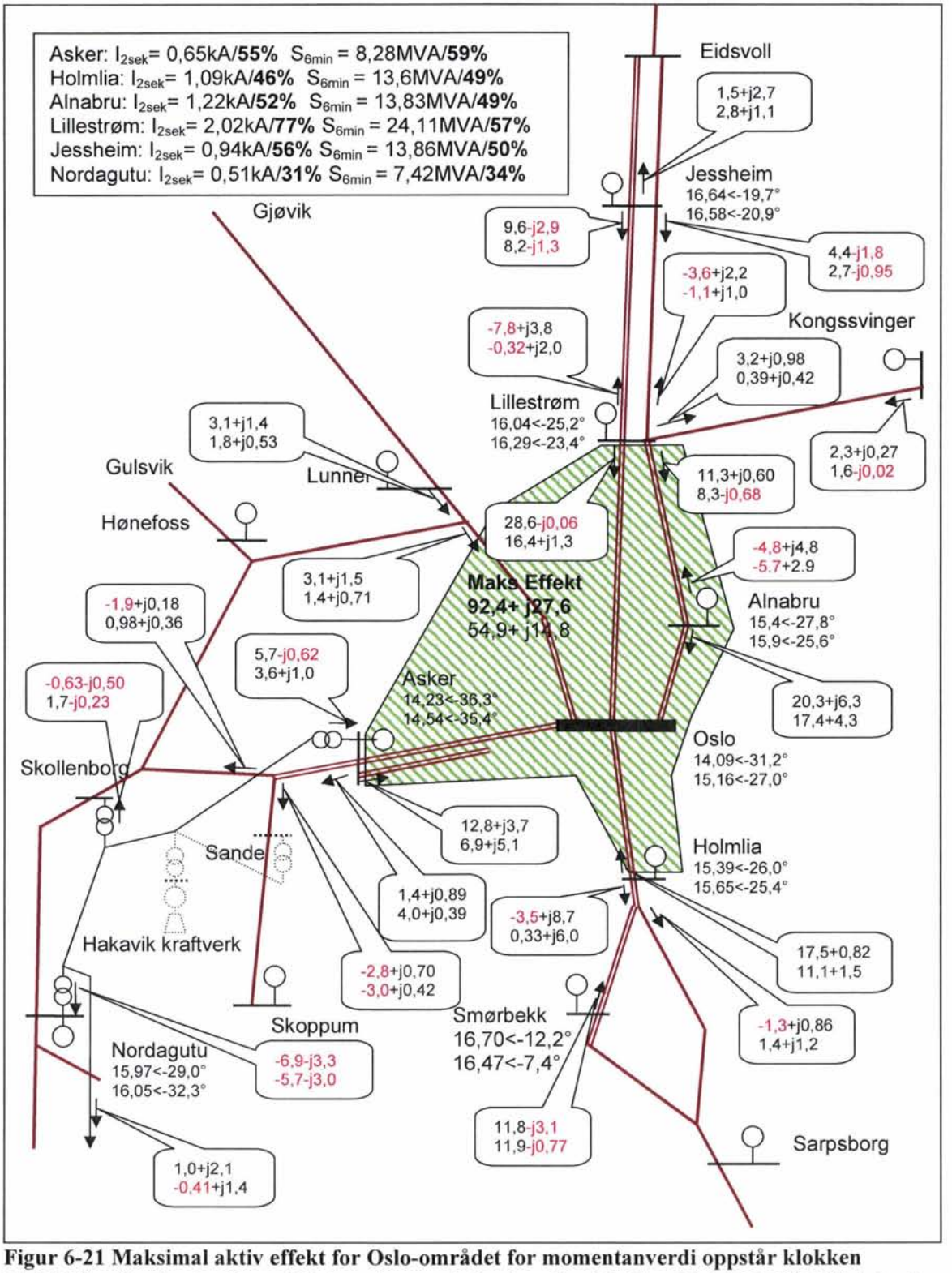
Figur 6-18 Strøm som 2-sekunders RMS-verdi fra Asker omformerstasjon uten temperatur- og strømbegrenser med rød kurve, blå og grønn kurve når det innføres temperatur- og strømbegrenser, der blå er når togene har reaktiv kompensering og grønn uten.



Figur 6-19 Strøm som 6-minutters MEAN-verdi fra Asker omformerstasjon uten temperatur- og strømbegrenser med rød kurve, blå og grønn kurve når det innføres temperatur- og strømbegrenser, der blå er når togene har reaktiv kompensering og grønn uten.



Figur 6-20 Strøm som 1-times MEAN-verdi fra Asker omformerstasjon uten temperatur- og strømbegrenser med rød kurve, blå og grønn kurve når det innføres temperatur- og strømbegrenser, der blå er når togene har reaktiv kompensering og grønn uten.



Figur 6-21 Maksimal aktiv effekt for Oslo-området for momentanverdi oppstår klokken 16:03:30 og for 6-minutters effekt opptrer maksimalverdien klokken 16:14:24. Effektflyt for 2-sekunders (øverste tall) og 6-minuttersverdi (nederste tall) for MEAN effekt. Aktiv- og reaktiv effekt der negativt fortegn er markert med røde tall.

7 OPPSUMMERING OG VURDERINGER

7.1 Oppsummering av resultater fra undersøkelsene

Trafikksimuleringer for å finne ut av grunnleggende forhold med ruteplan R2012 og nye tog er gjort som en første del av studien. Simulering med dagens forhold i Oslo-området uten noen tiltak, men under forutsetning av at Hakavik kraftverk ikke er i drift. Sande transformatorstasjon er heller ikke i drift. Oslo-området er definert som matestrekningene innenfor Asker, Holmlia, Alnabru og Lillestrøm. Spenningsregulatorene holder konstant spenning på 16,5 kV, men 12 % fallende statikk for perifere omformere. Trafikksimuleringen omfatter bare rushtiden fra klokken 15:00 til 18:00. Det en fant var følgende:

- Forutsatt normal drift og med alle omformeraggregater i Oslo-området i drift, vil belastningen bli høy, men uten at noen omformerstasjoner overbelastes.
    - Belastningen i selve Oslo-området er på sitt høyeste klokken 16:13:22 og belastningen blir da 108,7 MW og 37,8 MVAr (som gir 115,1 MVA). Det er da igjen 36 % av den totale omformerytelsen på 178 MVA (når en regner med 16,5 kV spenning for alle omformerne og ser på 2-sekundersverdien) for de fire stasjonene i Oslo-området.
    - Kraftsystemet vil ikke være redundant. Marginene mot overbelastning ved utfall av aggregater er langt overskredet, slik at utfall av to aggregater i rushtiden vil være kritisk på den måten at alle de roterende aggregatene i Oslo-området står i fare for å falle ut. Togfremføringen vil da kunne stanse og vil ikke kunne starte igjen før aggregatene er i drift igjen.
    - Belastningen for de roterende omformerstasjonene i Oslo-området er nokså jevn når en ser på prosentverdiene.
    - Nordagutu omformerstasjon bidrar lite til tross for fjernledningen.
    - Energiforbruket i de tre timene med rushtrafikk er 302,19 MWh.
- Trafikksimulering med utfall av ett aggregat i Asker og ett i Holmlia viser at belastningen for 2-sekundersverdiene av effekten blir så stor for de gjenværende aggregatene at de vil falle ut. Det er stor risiko for at de gjenværende stasjonene også vil overbelastes.
- Simulering med pådragsreduksjon til 70 % av installert ytelse i togsett av Type 74/75 fikk liten betydning. Totalt sett ble spissbelastningen i Oslo-området redusert med 13 MW, men reduksjonen av omformernes maksimalbelastning var liten.
- Simulering med reaktiv kompensering i togsett av Type 74/75 fikk også liten betydning i normal driftsituasjon. Dette er sannsynligvis et tiltak som betyr lite i normal drift når spenningene uansett er gode.
- Med Hakavik kraftverk utvidet til å kunne produsere 15 MW, vil Asker omformerstasjon avlastes en del, mens de øvrige stasjonene avlastes mindre. Effekten ser ut til å fordele seg jevnt ut over hele området. Størst mulig ytelse i Hakavik bidrar til å øke spenningen ved utfall av omformeraggregater. Dermed unngåes problemer for togtrafikken ved unormale driftssituasjoner.
- Også de perifere omformerstasjonene Tangen, Skoppum og Larvik blir høyt belastet, med forutsetning om at de har en innsatt ytelse på 2 x 5,8 MVA.

Etter dette ble det gjort en rekke undersøkelser med statisk lastflyt for å forbedre effektflyten og redusere spissbelastningen til omformerstasjonene. Den statiske lastflyten ble utført med en Π-ekvivalent som representerer belastningen av togene på matestrekningene. Belastningssituasjonen klokken 16:13:37 fra trafikksimuleringene der 6-minuttersverdien

hadde sitt maksimum er blitt undersøkt og representert med statiske laster i modellen. En har funnet følgende.

- Fallende statikk på 12 % i alle omformerstasjoner er gunstig ved at den reaktive effektutvekslingen går betydelig ned.
    - Ved utfall av ett av to aggregater er det gunstig å la spenningen synke med hele 24 %. Eller med utfall av to av tre aggregater med 18 %.
    - Med dette vil en få de samme innstillinger for alle omformerstasjoner i landet.
- Reduksjon av tverraksereaktansen i statiske omformere, - reduksjon av X_q i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk har vist at disse omformerne kan levere betydelig mer effekt inn til Oslo-området. En reduksjon på 50 % er gunstig for å få disse stasjonene til å bidra mer effekt til Oslo-området.
- Med en endret omsetningen i transformatoren i Asker i forbindelse med fjernledningen fra dagens 55/16,5 til 54,5/16,5 kV har en sett at en får en liten forbedring i effektoverføringen fra Nordagutu.
- Økes effekten fra Hakavik kraftverk til 15 MVA, vil produksjonen fordeles jevnt mellom stasjonene i området den mater ut til over fjernledningen.
    - For Oslo-området sin del er det Asker omformerstasjon som avlastes mest.
    - Stor eller liten reaktiv effektproduksjon i Hakavik ser ikke ut til å ha stor betydning, annet enn at spenningen på fjernledningen kan bli høy ved Hakavik, altså opp mot 60 kV. Spenningen på fjernlednignen bør ikke komme noe særlig over 55 kV som er nominelt nivå. Det kan derfor være unødvendig med annen effektfaktor enn $\cos \varphi = 1,0$.
    - Redusert ytelse får betydning for spenningen for togene.
- Fortsatt drift av Sande transformatorstasjon og 15 MW produksjon i Hakavik bidrar til at Skoppum omformerstasjon avlastes. Skoppum var med 2 x 5,8 MVA aggregater for mye belastet kortvarig i trafikksimuleringene.
- Kondensatorbatteri sentralt plassert ved Oslo koblingshus vil kunne forbedre effektflyten, spesielt ved utfall av omformere. Dette er ikke undersøkt videre, da en forventer at en i praksis trenger et SVC-anlegg og at dette er et komplisert og kostbart tiltak.

For å undersøke at disse tiltakene har den ønskede effekten ble det gjort nye trafikksimuleringer der endringene ble innført. For noen av parametrene ble forskjellige parametere forsøkt for å komme frem til optimale verdier. Det en fant ut er som følger:

- En spenningsstatikk på 12 % i alle omformerstasjoner, 50 % reduksjon av X_q i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk og en omsetning på 54,5/16,5 kV for transformatoren i Asker gir forbedrede forhold i normal drift.
    - Betydelig redusert maksimalbelastning for Asker, Holmlia og Alnabru omformerstasjoner.
    - I normal drift forbedres tapene og det totale energiforbruket går ned, - reduksjonen er på 16,4 MWh eller 5,4 %. For et helt døgn vil energiforbruket sannsynligvis reduseres enda mer.
    - Den eneste ulempen med fallende spenningsstatikk er lavere spenning, men for Oslo-området vil dette ha liten praktisk betydning.
- For de statiske omformerstasjonene Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk, samt for Nordagutu har en likeledes funnet at fallende statikk på 4 % gjør at disse belastes en del mer, noe som er positivt for alle de øvrige stasjonene.
- Hakavik kraftverk i drift med en produksjon på 15 MW reduserer maksimal effekt fra Asker og Nordagutu omformerstasjoner. Om Sande transformatorstasjon er i drift vil også Skoppum omformerstasjon avlastes.

- Simulering med redusert effektbehov i togene er ment som et scenario for en dag med normal trafikkproduksjon, men få passasjerer som kan oppstå om sommeren. Det er innført redusert pådrag til 70 % av totalytelsen i togsettene av Type 74/75, redusert hastighet i Romeriksporten fra 200 til 160 km/t, 5 km/t lavere hastighet enn skiltet hastighet og liten lastvekt ved få passasjerer. Den maksimale effekten belastningen for omformerstasjonene går under disse betingelsene ned med ca 10 % -poeng.

Trafikksimuleringene med unormal driftsituasjon viste at:

- Ved ellers samme forhold som ovenfor og utfall av ett aggregat samtidig i Asker og Holmlia vil belastningen for de gjenværende omformerne bli stor, men rett under grensen for utfall. Det er knapt noe margin mot overbelastning og tiltak i tillegg til de som er undersøkt så langt må innføres. Mange tog får i tillegg for lave spenninger, det vil si under 12,0 kV.
- Ved utfall av to aggregater i Asker vil det gjenværende aggregatet overbelastes, men selv om dette faller ut vil sannsynligvis de gjenværende omformerstasjonene ikke overbelastes. Det samme er undersøkt for Lillestrøm. Tiltakene som er undersøkt så langt viser altså at en sannsynligvis unngår utfall av alle stasjoner om to aggregater faller ut i samme stasjon. Dette betyr videre at utfall av hele Holmlia eller Alnabru heller ikke betyr overbelastning av de øvrige stasjonene.
- Betydningen av Hakavik kraftverk hadde vært større om den fult ut kunne erstattet ett roterende aggregat som faller ut. Da skulle Hakavik vært på rundt 20 MW om en ser på 2-sekundersverdien for ett Q48 aggregat (nominelt 10 MVA).
- Simulering med utfall av to aggregater i Asker omformerstasjon, samtidig som det innføres temperatur- og strømbegrenserer for omformerne, viser at det gjenværende aggregatet ikke blir overbelastet. Spenningen vil reduseres mye for omformerstasjonen og dermed vil de øvrige stasjonene bidra mer med effekt. Med dette tiltaket fåes roterende aggregater som ikke kan overbelastes, imidlertid kan spenningen for togene bli for lave.
- For å unngå at spenningen blir for lav med innføring av temperatur- og strømbegrenser gis alle togsettene av Type 74/75 reaktiv kompensering ved lav spenning. Dette gjør at ingen tog får for lave spenninger. Med disse tiltakene har en altså funnet at en kan oppnå å ikke overbelaste omformeraggregater i unormale driftsituasjoner uten at spenningen for togene blir for lav.

7.2 Vurderinger av forhold rundt simuleringene

7.2.1 Vurderinger av behovet for marginer i dette arbeidet og i tidligere arbeid

I en studie fra mai 1997 er det lagt til grunn følgende usikkerhetsmarginer: 10 % for dårlig lastfordeling mellom aggregater i samme omformerstasjon og usikkerheter i inndata. For variasjoner i ruteplanen legges det til 10-20 %. For å kompensere for lav tomgangseffekt legges det til en margin på 5 %. Dette gir en samlet margin på 25 % som brukes for alle stasjoner, utenom Jessheim der marginen settes til 35 %.

I dette arbeidet og i henhold til nye vurderinger i JD 546 er disse marginene mindre, se avsnitt 2.2.2. Her har en funnet at en vil legge til en margin på minst 15 % for en omformerstasjon ved utfall av aggregater. En har også sett at en vil komme til å overskride dette og at temperatur- og strømbegrenser er eneste mulighet for å beskytte omformerne. Ved at det innføres slike begrensere behøver en ikke ha så store marginer som en tidligere fant nødvendig. Bare om det skulle vise seg at simuleringene har en feilmargin på flere titalls

prosent vil en få problemer, da i form av for lave spenninger når omformerstasjonenes begrensere trer i funksjon. At noe slikt skulle kunne skje ansees for lite sannsynlig.

7.2.2 Kombinasjonene av alle tiltakene gjør at situasjonen i normal og unormal drift forbedres

De forbedringer som er funnet og anbefalt er oppsummert:

- Fallende spenningsstatikk for hvert enkelt roterende aggregat i alle omformerstasjonene på 12 %. Ved utfall av ett av to aggregater fåes 24 % fallende statikk, ved at kompensering som i dagens regulatorer utgår. Utfall av to av tre aggregater gir spenningsstatikk på 18 %.
- For statiske omformerstasjonene, samt for Nordagutu, har man likeledes funnet at fallende statikk på 4 % gjør at disse belastes mer, noe som er positivt for alle øvrige omformerstasjonene.
- Redusert X_q i de statiske omformerstasjonene Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk med 50 % får disse til å bidra mer.
- Endret omsetning i transformatoren i Asker i forbindelse med fjernledningen fra dagens 55/16,5 til 54,5/16,5 kV gir noe mer effekt fra Nordagutu som vanligvis er lettere belastet.
- Hakavik kraftverk i drift med 15 MW avlaster stasjonene i Asker og Nordagutu. Om også Sande transformatorstasjon er i drift avlastes Skoppum. Er det forskjell på energiprisen for Hakavik og fra de øvrige energiselskapene som leverer til omformerstasjonene vil dette slå gunstig ut.

Disse tiltakene gir en akseptabel margin for belastningen av omformerstasjonens aggregater, forutsatt at alle er i drift når trafikken er stor i Oslo-området. Fallende statikk fører til at en reduserer energiforbruket med 16,4 MWh eller 5,4 % mellom klokken 15:00 og 18:00. For et helt døgn er besparelsen enda større og det er antydet en årlig besparelse på 4,4 millioner kr. Fordelen med fallende statikk i tomgang er omtalt i avsnitt 7.2.4. Ved utfall av ett eller to aggregater kommer følgende tiltak til hjelp:

- Temperatur- og strømbegrenser sørger for at et roterende aggregat ikke kan overbelastes. Spenningen vil synke for stasjonen og nabostasjonene vil avhjelpe situasjonen.
- Reaktiv kompensering for togene av Type 74/75 hjelper til å holde spenningen oppe ved utfall av to aggregater samtidig.
- Redusert effektopptak ved lave spenninger er ikke undersøkt, men om alle togene følger normen EN 50388 vil neppe lave spenninger opptre.

Det er det første punktet ovenfor som sørger for at overbelasting av aggregater skal bli umulig. Lave spenninger vil kunne oppstå og de siste to punktene skal sørge for at spenningen skal bli god nok. Det er ikke forsøkt å gjøre en trafikksimulering der Type 74/75 følger normen EN 50388, se avsnitt 3.6.3, men dette vil utvilsomt ha en gunstig effekt. Samtidig bør toget kompensere med reaktiv effekt, selv om det kan tenkes at bare en av disse funksjonene alene er nok til å forbedre spenningen. Mer om dette i avsnitt 7.2.6.

Det planlegges å plassere to mobile omformerstasjoner i Oslo-området for økt beredskap ved alvorlige havarier og når omformeraggregater må tas ut for forebyggende vedlikehold. Dette er ikke en situasjon som simuleringene her har tatt hensyn til, fordi alle scenarioer her er gjort for utfall av aggregater der reparasjonstiden er relativt kort (timer). I tilfelle havari med lang reparasjonstid eller revisjoner av aggregater, kan selvsagt kortvarige utfall av de andre

aggregatene skje samtidig. En har da en ikke usannsynlig situasjon hvor tre aggregater er ute samtidig. Mobile reserveaggregater kan da på relativt kort sikt være eneste mulighet for å opprettholde driften og sikre god nok spenning for togene.

7.2.3 Ny situasjon der en er mer avhengig av alle aggregatene i drift

Innføring av ruteplan R2012 og nye togsett gir en mer anstrengt situasjon enn en er vant med i dag ved at alle aggregater i Oslo-området må være i drift samtidig. Selv omformerstasjonene Lillestrøm og Jessheim som i dag er høyst moderat utnyttet, vil belastes hardt. Utkobling av aggregater for reparasjon og vedlikehold kommer til å bli vanskeligere. Når en i dag kan koble ut ett aggregat for vedlikehold så lenge en ønsker og kan få utkobling av enda ett uten konsekvenser, blir situasjonen helt forskjellig i 2013. Da vil en måtte innføre alle tiltakene som er listet opp over, og selv da vil en få redusert spenning for togene om to aggregater faller ut. Spenningen kan nok forventes å komme ned mot 12,0 kV. Med spenninger i området 12 - 13 kV er det en viss sannsynlighet for forsinkelser, se [16], men varigheten har mye å si. Er spenningene sjeldent under 13,0 kV er det neppe stor fare for at togene kommer etter kjøretiden, - og det er nettopp hva en her vil oppnå.

Imidlertid har denne hendelsen med to aggregater ute av drift ikke stor sannsynlighet for å inntreffe. Planlegges utkoblingen av ett aggregat er det nok sjeldent at en blir nødt til å la det være ute også i rushtiden. Enda sjeldnere vil det være at ett annet aggregat av en eller annen grunn samtidig skulle komme til å falle ut. Problemet blir størst om ett aggregat skulle komme til å skades alvorlig å stå uten i lange tider, - det har tidligere skjedd at Lillestrøm har hatt ett aggregat ute i månedsvis. Noe slikt kan ikke tillates nå, i alle fall om trafikken blir like krevende som ruteplanen som er simulert. Det er mulig at belastningen i normal drift kommer til å bli lavere enn simulert og da blir ikke dette like kritisk, se avsnitt 7.2.8.

Om en skulle være så uheldig å få havari og langvarig driftstans av ett aggregat i en av omformerstasjonene må det vurderes ett reserveaggregat. Det samme gjelder om det uansett er ønskelig med spenning som er nesten like god som normalt ved utfall av to aggregater. Det ser da ut som om det er minst 10 til 20 MW som må erstattes, se simuleringene i avsnitt 6.2. En slik effekt kan skaffes fra ett eller to aggregater sentralt plassert i Oslo, disse bør være på av typen Q48 eller NEBB 7,0 MVA. Ved langvarig utfall av ett aggregat kan en heller plassere reserveaggregatet utenfor den aktuelle omformerstasjonen.

Her vil en vurdere bare den siste situasjonen som så alvorlig at det er nødvendig å få tak i ett eller to reserveaggregater. Selv med utfall av to aggregater og derpå følgende lave spenninger vil nok togtrafikken kunne avvikles uten store problemer. I avsnitt 6.2.2 og 6.2.3 er det simulert med en situasjon der to aggregater faller ut og spenningene for togene blir kortvarige helt under 12,0 kV. Imidlertid er spenningens RMS-verdier midlet over 2-minutter rundt 13 kV og bedre for togene. Dette vil vanligvis ikke påvirke kjøretiden noe særlig og videre i avsnitt 6.3.2 og den ekstra simuleringen i appendiks 4 der fasekompenserting ved lav spenning ble innført så en at ingen tog fikk spenninger under 12,0 kV. Togene vil da kunne trekke mer aktiv effekt ut av systemet og kjøretiden påvirkes mindre. Hakavik kraftverk vil også kunne hjelpe til en del i en slik situasjon, mer om dette i avsnitt 7.2.12.

7.2.4 Fallende statikk gir gunstigst effektflyt i tomgang

Ved justering av spenningsregulatoren på generatoren til de roterende aggregatene er det i praksis ikke enkelt å få den til å gi eksakt den spenningen en ønsker. Et annet problem er variasjoner som har å gjøre med temperatursvingninger. Om det viser seg at nøyaktigheten

blir +/- 100 V eller enda større variasjon, kan dette bety at effektmengder på flere hundre kW utveksles mellom omformerstasjonene i Oslo-området. Dette betyr uønskede tap, og fallende statikk er med på å begrense denne effektutvekslingen.

7.2.5 Stabilitet og fallende statikk for spenningsregulatorene

Med fallende statikk i omformerstasjonene kan det tenkes at en får en ugunstig samvirkning mellom tog og omformere. Lavfrekvente effektpendlinger har sitt opphav i en svak banestrømforsyning og dårlige dempeegenskaper i omformeraggregatene. Samvirke mellom regulatorene for likeretterne i togmateriellet og omformerne gir ugunstige oscillasjoner. Det kan være en fare for at fallende spenningsstatikk får banestrømforsyningen til å se enda svakere ut fra toget. Egne undersøkelser om dette må gjøres før endringer av regulatorinnstillingene gjøres. Sannsynligvis vil en bare se at dette går på bekostning av stabilitetsmarginer, men at en kan gjøre vurderinger rundt nytte og ulempe. Om dette viser seg å bli et problem kan løsningen bli en mindre fallende statikk, - dette vil gå ut over samkjøringen av omformerne i normal drift. Men om det innføres temperatur- og strømbegrensere vil disse uansett ha noe av den samme virkningen som fallende statikk i et feiltilfelle.

Både ut fra stabilitetshensyn og andre vurderinger rundt tillatte laveste spenninger kan det være aktuelt å ikke tillate så lav statikk som 12 % for de perifere omformerstasjonene. I så fall kan en velge en mindre verdi, eventuelt flat statikk, for de perifere stasjonene. For Asker, Holmlia og Alnabru velges uansett en statikk på 12 %, mens Lillestrøm, Jessheim, Smørbekk og Nordagutu anbefales en statikk på 4 % slik som en har kommet frem til i dette arbeidet.

7.2.6 Lave spenninger vil opptre i Oslo-området og lokomotivførernes kjørestil bør da endres

Redusert effektopptak etter EN 50388 skal være med på å avhjelpe situasjonen når kraftsystemet har redusert kapasitet. Dessuten vil en, om alle togene har denne innstillingen, få en mer rettferdig fordeling av effekten mellom de togene som er i trafikk. Det kan nemlig tenkes at lokomotivførere som reduserer pådraget ved lav spenning får økt fremføringstid, mens andre som kjører mer hardt kan ignorere lave spenninger og ta ut mer effekt og holde ruten. I så fall er det de togene som kjører uten begrensning kan komme til å dra spenningen enda mer ned og samtidig overbelaste omformerne slik at de enten faller ut eller reduserer spenningen ytterligere. Den riktige oppførselen, er altså å begrense pådraget til toget når spenningen blir lav.

I dag er lokomotivførere som kjører i Oslo-området vant til høy og stabil spenning, men med innføring av disse tiltakene vil spenningen kunne bli lav ved unormale driftsituasjoner. I alle fall om det skulle skje at det samtidig er behov for stort pådrag. Den lave spenningen vil kunne være en indikasjon for lokomotivførerne om at noe er galt med banestrømforsyningen. Forholdet mellom banestrømforsyningene og aktørene er altså et psykososialt system og med riktig oppførsel kan forbedringer i kritiske situasjoner gjøres. Lokomotivførerne kan redusere effektopptaket og avhjelpe situasjonen. En automatisk funksjon som overvåker dette i hvert tog og som kan passe på denne begrensningen nøyaktig er en stor fordel, men som det ble påpekt i avsnitt 3.6.3 det bare noen lokomotiver og togsett som følger kurven gitt av EN 50388. Flytoget med Type 71 har planlagt å endre forholdet slik at det bli i henhold til EN 50388 og Type 74/75 som enda er under produksjon kan få dette endret. For de andre togene bør lokomotivførerne venne seg til at ved lave spenninger må det kjøres forsiktig.

Sannsynligvis vil det imidlertid kun sjeldent oppstå tilfeller der det både er utfall av to aggregater og behov for stor effekt og kjøring etter skiltet hastighet.

Fra simuleringene kan det se ut som noe særlig lavere spenning enn 14 - 15 kV ikke vil opptre i normal drift, mens ved utfall av to omformere samtidig kan spenningen komme ned mot 12 - 13 kV. Dette er verdier hentet fra enlinjeskjemaene som viser effektflyten for tilfelene med størst effektbehov i Oslo-området for alle simuleringene. Det skulle dermed være enkelt å skille disse to situasjonene fra hverandre. I tillegg til dette vil toglederne kunne formidle en unormal driftssituasjon til togene og be om forsiktig kjøring.

7.2.7 Mulig oppjustering av 2-sekundersverdien for roterende aggregater vil ha stor betydning

Det har vært nevnt muntlig i banestrømforsyningsmiljøet at 2-sekundersverdiene er for lave. Disse verdiene som betraktes som nominelle verdier for kortvarig belastning av aggregatene, er egentlig innstillingsverdien i et overstrømsvern for generatorene som skal beskytte mot termisk overbelastning. Viser det seg at det i dag brukes for lave verdier og at en betydelig økning av kortvarig belastning kan gjøres vil dette kunne få stor betydning for tillatt trafikk. Er dette tilfelle har Oslo-området med den bestykningen som er benyttet i simuleringene her større kapasitet enn det som fremkommer her.

7.2.8 Lavere effektbehov i normal drift med trafikk etter ruteplanen

De nye togsettene til NSB har en veldig stor installert ytelse og det vil under normale forhold ikke være behov for å bruke så stor trekkraft. Simuleringene i avsnitt 4.4 viste at med uttak av bare 70 % av ytelsen ble kjøretiden lite påvirket. Ytterligere begrensning for ytelse for de nye togene og hastighet for alle togene i avsnitt 6.1.6 viste at effektbehovet kan gå ned med 10 % -poeng eller mer for de fleste omformerstasjonene. Det er ved ruteplanlegging lagt inn en margin på 4 %. På en strekning skiltet til 100 km/t kan en da kjøre 4 km/t saktere. Denne slakken vil lokomotivførerne venne seg til å utnytte og kjøre togene deretter, blant annet for å spare energi.

Fra NSB opplyses det om at den store ytelsen mest vil være til bruk for å kjøre inn forsinkelser, i normale situasjoner vil en kunne greie seg med ca 2/3 av effekten (to av tre motorer). Det virker til å være en del usikkerhet rundt behovet for de gode akselerasjonsegenskapene til disse togene, og det blir også påpekt at mellom Lysaker og Oslo S har en stort behov for å holde stor fart. For ruteplanleggingen sin del kan det virke som om det fortsatt er usikkerheter rundt dette.

Fra simuleringene for fjernstrekningene har en sett at simuleringene er konservative og gir større effektuttak fra omformerstasjonene enn virkeligheten. Avvik mellom målt og simulerte verdier kom på ca 30 % for undersøkelser for Lunner omformerstasjon, se [17]. Nå anses det som mer sannsynlig at forskjellene mellom målte og simulerte verdier vil bli mindre når det er mange tog i trafikk som i Oslo-området. Dette fordi sammenlagring av effekten mellom noen få tog kan gi større utslag enn om det er mange tog tilstede. Med mange tog er det stor sannsynlighet for at et stort antall tog trekker moderat effekt og mindre sannsynlighet for at mange tog trekker maksimal effekt samtidig.

Ut fra dette kan en forvente at effektbehovet kommer til å bli noe lavere i Oslo-området med innføring av nye tog og ruteplan R2012, men sannsynligvis ikke slike store forskjeller som en

har sett i andre simuleringer for fjernstrekningene. Ved avvik der det er behov for stor effekt til togene for å kjøre inn ruten, kan det komme til å bli større effektbehov enn i simuleringene. Dette fordi et større antall tog kan være på en bestemt strekning enn det som er normalt, mer om dette i avsnitt 7.2.9.

7.2.9 Trafikkavvik er ikke simulert - allikevel vil tiltakene sørge for at en unngår overbelastning av omformerne

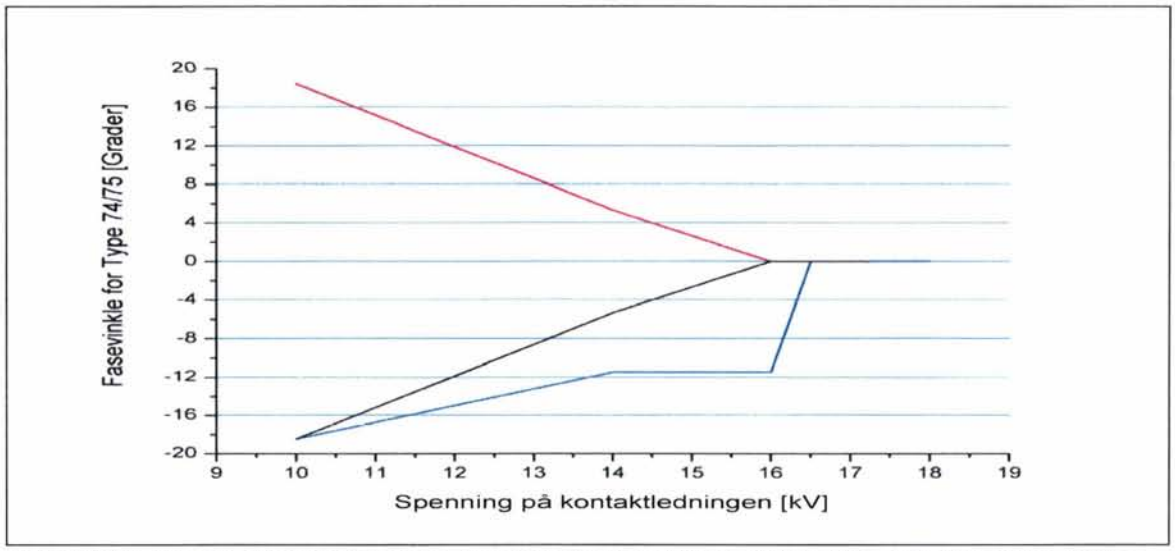
Spesielle scenarier der det er oppstått forsinkelser kan simuleres bare det lages ruteplaner for dette. I dette arbeidet er dette ikke gjort. Det en forventer og frykter er store spissbelastninger for en eller flere omformerstasjoner der togtrafikken blir spesielt stor. Roterende omformerstasjoner kan normalt overbelastes og falle ut, men om de utstyres med temperatur- og strømbegrenser er dette problemet ment å falle bort, eller i alle fall at sannsynligheten for utfall reduseres mye. Riktignok kan en da tenke seg at spenningene blir lave, men neppe noe lavere enn det som fint kan aksepteres i Oslo-området. I alle fall om alle aggregater er i drift.

7.2.10 Feil fasevinkel som funksjon av spenningen for Type 74 og 75

Ved utarbeidelse av en alternativ karakteristikk for fasekompensering ved lave spenninger i avsnitt 6.3.2 ble det oppdaget at en gjennomgående hadde benyttet feil kurve for simuleringene. Det er feil fortegn i tabellen i togmodellen som beskriver forholdet mellom fasevinkel og spenning for togsettene Type 74/75. Feilen er illustrert i Figur 7-1 med den røde strekene som er den uriktige kurven og den røde som er den riktige. I simuleringene oppstår i normal drift en laveste spenning på ca 15 kV og da skal utstyringen av fasevinkelen være ca 2°. Dette gir en cos φ = 0,999, altså svært nært 1,0 uavhengig av fortegnet. Når spenningen kommer ned på 12 kV blir vinkelen ca 12° og cos φ = 0,978. Med ett effektuttak på det maksimale for Type 74/75 på ca 12,8 MW og reaktiv effektuttak på +/- 2,7 MVAr.

Det er selvsagt ikke likegyldig om det trekkes 2,7 MVAr som enten er kapasitivt eller induktivt. Imidlertid er det bare av og til at togene trekker full effekt og da er feilen størst. Simuleringene med utfall av omformeraggregater og lav spenning har altså blitt noe mer konservative. Hvor mye er umulig å si uten å gjøre simuleringer, og i appendiks 3 er det beskrevet resultatet av en ekstra simulering der den originale kompenseringen (sort kurve) er benyttet. Resultatet ble en forbedring fra tilfellet med feil fortegn, - alle tog fikk spenning på 12,0 kV eller bedre.

Den kurven som det er simulert med, - den blå i figuren, gir kompensering av reaktiv effekt selv når spenningen er normal. Hensikten var å se om belastningen av omformerstasjonene ville kunne reduseres om togene virker som kompensatorer mer eller mindre konstant. Imidlertid viste dette seg å ha liten effekt, se avsnitt 4.5 der maksimalbelastningen for omformerstasjonene ble omentrent den samme som med opprinnelig fasekompensering (den røde kurven). Problemet med den blå kurven kan være at overgangene (knekkpunktene) er for krappe og at det kan bli problemer med å oppnå stabile arbeidspunkter. I diskusjon med STADLER om kompenseringsgraden er det nok derfor ikke nødvendig å ha den store endringen av fasevinkelen ved 16,5 kV. Enten kan en velge den originale kurven eller en noe større fasevinkel ved lave spenninger. En kan la kurven trappe av mer forsiktig i området ved 15,0 kV, men ved lave spenninger (under 13 - 14 kV) kan den omentrent følge den blå kurven. I tillegg kommer effektreduksjon ved lav spenning i henhold til EN 50388 til å forbedre forholdene mer enn simuleringene viser.



Figur 7-1 Fasevinkel benyttet i simuleringene for togsett Type 74/75. Den svarte kurven er den opprinnelige kurven som STADLER har oppgitt, og den røde er kurven med feil fortegn benyttet i nesten alle simuleringene. Den blå kurven er den som er benyttet der en har undersøkt betydningen av øket reaktiv kompensering i togene.

7.2.11 Regenerativ bremsing

For regenerativ bremsning er det i Norge satt en begrensning på 5 MW pr tog. Denne grensen er satt på grunn av impedansreelenes mulighet til å detektere en kortslutning samtidig som et tog bremser regenerativt. Også for Oslo-området gelder denne grensen, men det kan hende at det innføres en annen grense når dette senere skal undersøkes. En større studie på dette skal gjennomføres. Det er sannsynlig at denne grensen kan settes høyere. Togsettene Type 74/75 har muligheten til å bremse med samme effekt på hjulene som i traksjon og med dobbelt sett kan de mate tilbake 6,3 MW. Det ble besluttet at det var greit å simulere med denne effekten, men det er altså sannsynlig at en senere vil komme til å endre dette. Blir det nødvendig å begrense regenerativ effekt til 5 MW anses det som et tiltak som vil få liten innvirkning på det totale effektbehovet i Oslo-området.

7.2.12 Betydningen av Hakavik kraftverk

Hakavik kraftverk anbefales å dimensjoneres med en ytelse på 15 MW. Som det ble påpekt i avsnitt 6.2.4 skulle Hakavik kraftverk vært på ca 20 MW om det skal kunne erstatte ett roterende aggregat på nominelt 10 MVA (Q48). En enkel betraktning kan gjøres: Hakavik kunne ha oppretthold normale forhold om ett av aggregatene i Asker faller ut, om Hakavik var på 20 MW. Dette fordi roterende aggregater er bygget med stor overbelastningsevne. Hadde det vært på 40 MW kunne en mistet to aggregater i Asker. Sannsynligvis kunne en også ha mistet aggregater andre steder i Oslo-området (Holmlia, Alnabru og Lillestrøm, neppe Jessheim) og fått helt normale spenninger. Når Hakavik ikke kan bygges ut til å være så stort, kan det ikke være en fullgod erstatning i tilfelle utfall av ett eller to aggregater i Oslo-området. Imidlertid vil det være til hjelp med å opprettholde spenningen i en unormal situasjon om det er på 10 eller 15 MW. Allikevel bør en nok absolutt kjøre Hakavik for fullt om ett omformeraggregat tas ut for planlagt arbeid i rushtiden. Situasjoner med utkobling for arbeid i rushtiden bør unngås, men kan neppe utelukkes. På grunn av det den store trafikkøkningen og tog med store ytelsen kan spenningen for togene bli lavere enn lokomotivførerne i dag er vant til i unormale driftsituasjoner. I slike tilfeller vil Hakavik være

viktig for å forbedre spenningen til togene. De aggregatene som er ment for beredskap og som planlegges vil selvsagt også være viktig for å forbedre forholdene.

Reaktiv effektproduksjon i Hakavik kan muligens komme gunstig med for å bidra med produksjon av reaktiv effekt og holde spenningen oppe for togene. Undersøkelsene i avsnitt 6.1.4 var tydeligvis gjort med initialbetingelser (fra OPTPOW) slik at Hakavik forbrukte reaktiv effekt. Det skulle vært omvendt, men med produksjon av reaktiv effekt kan spenningen på fjernledningen bli høy. Fjernledningen er gammel og spenningen bør ikke kommer noe særlig over nominelt nivå på 55 kV. Dermed kan det være at reaktiv effektproduksjon i Hakavik må være liten og eventuelt at cos $\varphi = 1{,}0$ er best. Om det senere skjer en fornyelse av linjen til for eksempel 132 kV-nivå vil slike problemer forsvinne. Muligens vil en også få problemer med styring av den reaktive effekten og å holde spenningen innenfor ønskede grenser. Disse forholdene er ikke undersøkt her.

Når Hakavik blir såpass mindre enn en ønsket ut fra redundanshensyn, vil det uansett kunne bidra med billigere energi enn den som kjøpes inn til omformerstasjonene, og at energien brukes i høylastsituasjoner, slik at nytten er høy.

7.2.13 Behovet for Sande transformatorstasjon

En har sett at i alle simuleringene blir Skoppum omformerstasjon så hard belastet for sin 2-sekundersverdi, at ved utfall av ett av to 5,8 MVA aggregat her, vil det andre også falle ut. Om Hakavik har mulighet til å produsere 15 MW og Sande transformatorstasjon fortsatt er i drift, vil Skoppum avlastes, se avsnitt 6.1.5. Simuleringen viser at Skoppum fortsatt er noe høyt belastet kortvarig. Men det kan hende at ved utfall av ett aggregat kan Sande levere den effekten som skal til for å unngå utfall av det gjenværende. Når det senere bygges dobbeltspor på hele Vestfoldbanen og effektbehovet her øker, kan Sande bidra positivt. Overordnede økonomiske studier der en tar hensyn til plassering av omformerstasjoner, bestykning av disse og effektbehov må vise hva som er optimalt. Det anbefales derfor at utredning om banestrømforsyning for Vestfoldbanen fra 2007 oppdateres.

7.2.14 Fare for overbelastning av perifere omformere

Simuleringen i avsnitt 6.1.1 med normal drift, alle de anbefalte tiltakene og tog uten noen begrensninger eller tiltak viser at enkelte omformerstasjoner blir belastet over grensene sine. Dette gjelder Tangen, Skoppum og Larvik med aggregater på 2 x 5,8 MVA som kortvarig blir belastet over 50 %. I simuleringen i avsnitt 6.1.6 der togene gis pådragsbegrensning og blir belastningen redusert og da er det bare Skoppum som belastes for mye. Om Sande transformatorstasjon da er i drift kan det godt hende at belastningen går ned.

De nye lokaltrafikksettene skulle en ikke tro har like stort behov for å holde høy fart og akselerere like mye på disse strekningene, som i Oslo-området. Sannsynligheten for at effektforbruket blir så stort som i simuleringene vurderes dermed som mindre. Om en kjører mer forsiktig på fjernstrekningene kan det ikke ha særlig praktisk betydning for å holde rutene. Om det imidlertid ikke slår til og det er behov for stort pådrag, er det i avsnitt 7.2.15 foreslått at temperatur- og strømbegrenser i aggregatene kan være gunstig.

7.2.15 Temperatur- og strømbegrenser kan være gunstig også for fjernstrekningene

For fjernstrekningene er det for tiden et stadig økende press for å øke trafikken og stor belastning av omformerstasjonene og lave spenninger er et problem. Når en har et redundanskriterium som sier at omformerstasjoner med to aggregater ikke skal belastes mer enn 50 % for å være sikret redundans, har en normalt en stor uutnyttet reserve. Om faren for utfall av det gjenværende aggregatet kan elimineres kan større trafikk tillates. Temperatur- og strømbegrenser kan bøte på dette. Om en til enhver tid mer eller mindre er sikret at roterende aggregater ikke kan overbelastes kan en tøye strikken lengre enn i dag. Ulempen blir lave spenninger om en tillater mye trafikk og ett aggregat faller ut. Grunnen er at omformerstasjonene på fjernstrekningene har mye mindre mulighet til å utveksle effekt. Kontaktledningsimpedansen er så høy at en ikke får overført særlig mye effekt fra naboene. Både for å avhjelpe problemet med stort effektbehov med de nye lokaltogene og for å tillate større godstrafikk bør en undersøke denne muligheten. Fremtidig utbygging av AT-system vil føre til at bedret mulighet for deling av effekten mellom omformerstasjonene.

7.2.16 Innføring av ruteplan R2012 og praktiske tiltak i banestrømforsyningen

Her er noen forslag til innføring av tiltakene og hvordan en skal takle den store trafikken:

- Gjøre mest mulig av tiltakene tidligst mulig, slik at en er tidlig ute i tilfelle problemer. Det å innføre fallende statikk kan like gjerne innføres snarlig, istedenfor å vente til den nye ruteplanen og de nye lokaltogene innføres. Også redusert X_q i de statiske omformerstasjonene Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk kan gjøres tidlig.
- Foreta målinger for å se endringer. Det kan være interessant å foreta målinger fortløpende før og etter at tiltakene innføres. Innføres det ett og ett tiltak får en undersøkt den relative endringen av for eksempel maksimalt effektbehov for hver omformerstasjon.
- Innføres de nye togene ett og ett i trafikken kan en ved å foreta kontinuerlige målinger følge utviklingen. Om det skulle vise seg at effektbehovet blir større enn simuleringene antyder, får en i alle fall sett dette før en blir overrasket av for stor belastning og utfall.
- Det vil være gunstig om en får utvidet Hakavik og satt den i drift før den nye ruteplanen innføres.

7.2.17 Forslag til tiltak når enda flere togsett Type 74/75 skal settes i drift

Av undersøkelsene i avsnitt 6.1.1 har en sett at den totale ytelsen i Oslo-området er 178 MVA og når det nå brukes 108,5 MVA (103,0 MW og 34 MVAr) blir dette og gjenværende effektreserve er 39 %. Regnestykket er selvsagt forenklet, fordi det kommer effekt fra stasjoner utenfor Oslo-området også, der Jessheim sitt bidrag sannsynligvis alltid er det viktigste. Om det blir ønskelig for NSB å skifte ut alle sine lokaltog Type 69 med de nye togene, vil den resterende effektreserven komme til å bli enda mindre eller forsvinne. Det blir da nødvendig med større ytelse i Oslo-området, men en annen løsning kan være å få omformerstasjonene til å samarbeide ytterligere. I avsnitt 6.1.1 så en at utvekslingen av effekt i Oslo-området og spesielt utenfor kunne ha vært bedre. Med AT-system også i Oslo-området kan effektutvekslingen mellom omformerstasjonene forbedres. Ved en utbygging med AT-system videre på Dovrebanen, Kongsvingerbanen, Østfoldbanen (eller den nye Follobanen), Vestfoldbanen og Gjøvikbanen, kan en hente effekt fra nabostasjoner som Tangen,

Kongsvinger, Sarpsborg, Skoppum og Lunner. Egne simuleringer og undersøkelser i neste fase av prosjektet må belyse slike spørsmål.

8 KONKLUSJON OG ANBEFALTE TILTAK

Omfattende simuleringer for ruteplanen R2012, som skal innføres i årsskiftet 2012/13, er utført i dette arbeidet. Nye tog for persontrafikken skal innføres og disse togsettene skal være overtagere etter Type 69. De nye togene har en meget stor installert ytelse. Dagens Type 69 har når de kjører i doble sett en ytelse på 3,84 MVA, mens de nye maksimalt kan trekke nesten 13 MVA når de kjører i doble sett. Det er utført trafikksimuleringer der de nye togene er med, samt at alle andre nye forhold i ruteplanen er med i modellen. Simuleringene er gjort for rushtrafikken på ettermiddagen mellom klokken 15:00 og 18:00. Resultatet av disse simuleringene viser at i normal drift vil ikke omformerkapasiteten i Oslo-området overskrides. Forutsettes det at alle omformeraggregater er i drift, vil det enda være marginer mot overbelastning. Imidlertid kan en ikke forutsette at alle aggregater til en hver tid er operative. Kortvarige utfall kan skje, endog havarier som kan sette et aggregat ut av drift i lange tider.

Problemet er imidlertid at alle aggregater må være i drift i rushtiden og kravet i Teknisk regelverk (JD 546) om at to aggregater kan være ute av drift blir vanskeligere å oppfylle enn i dag. Selv ved å innføre tiltak som bedrer samkjøringen mellom omformerstasjonene, vil det bli lave spenninger for togene i en slik unormal driftssituasjon. Imidlertid er det ut fra det som er undersøkt her mulig å få spenninger innenfor kravene, men allikevel lavere spenning enn det som er vanlig i dag. Dette gjelder om Hakavik kraftverk ikke er i drift. Ved å kjøre Hakavik kun i rushtid vil en, selv med større installert ytelse, kunne benytte kraftverket igjennom hele året selv i tørrår.

Ved utfall av aggregater får en problemer med at andre aggregater også kan falle ut, samt at spenningen for togene blir lav og at dette igjen fører til redusert pådrag og forsinkelser. Det er fire tiltak som anbefales innført for å kunne unngå problemer med utfall av omformeraggregater:

- Fallende spenningsstatikk for hvert enkelt aggregat i alle statiske- og roterende omformerstasjoner på 12 %. Ved utfall av ett av to aggregater skal det bli 24 % fallende statikk. For stasjoner med tre aggregater vil utfall av ett gi 18 % statikk og utfall av to av tre gir 36 %.
- For statiske omformerstasjonene Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk, samt for Nordagutu, har man likeledes funnet at fallende statikk på 4 % gjør at disse belastes mer, noe som er positivt for alle øvrige omformerstasjonene.
- Redusere X_q i de statiske omformerstasjonene Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. En reduksjon på 50 % ser ut til å være det riktige.
- Temperatur- og strømbegrenser sørger for at et roterende aggregat vanskelig kan overbelastes. Spenningen vil synke for stasjonen, og nabostasjonene vil avhjelpe situasjonen.
- Endret omsetning i transformatoren i Asker i forbindelse med fjernledningen fra dagens 55/16,5 til 54,5/16,5 kV gir noe mer effekt fra Nordagutu som vanligvis er lettere belastet. (Dette er det tiltaket som har minst betydning.)
- Hakavik kraftverk i drift med 10 eller 15 MW avlaster stasjonene i Asker og Nordagutu, og indirekte også Oslo-området. Om også Sande transformatorstasjon er i drift avlastes Skoppum. Ved utfall av ett eller to aggregater i Oslo-området vil produksjonen i Hakavik forbedre spenningen for togene.
- Det planlegges å plassere to mobile omformerstasjoner i Oslo-området. Ut fra simuleringene her er dette ikke nødvendig, men alle scenariene her er gjort for utfall

av aggregater der reparasjonstiden er relativt kort. I tilfelle havari eller revisjoner av aggregater, kan selvsagt kortvarige utfall av de andre aggregatene skje. Mobile reserveaggregater kan da være eneste mulighet for å opprettholde driften.

I tillegg er det nødvendig at følgende tiltak innføres i togene:

- Reaktiv kompensering for togene av Type 74/75 hjelper til å holde spenningen oppe ved utfall av to aggregater samtidig. Se avsnitt 7.2.10 der kompenseringsgrad er diskutert.
- Redusert effektopptak ved lave spenninger er ikke undersøkt, men om alle togene følger normen EN 50388 vil neppe lave spenninger opptre. Dette vil være vanskelig å få til i eldre tog. For Flytoget (Type 71) er dette bestemt skal gjøres i disse dager (vår 2010) og for Type 74/75 er det mulig nå som togene er under planlegging og produksjon.

Det er summen av alle disse bidragene som bidrar til at en kan miste noe omformerkapasitet og allikevel opprettholde trafikken uten store systemutfall. Riktignok vil spenningene kunne bli lavere enn i dag ved utfall av to aggregater samtidig, men så lenge spenningen er rundt 13,0 kV og over, vil det påvirke kjøretiden til togene lite.

I tillegg til disse konkrete tekniske løsningene, er det nok på sin plass å utføre kontinuerlige målinger av effektforbruket for omformerstasjonene. Situasjonen kan overvåkes etter hvert som stadig nye lokaltog av Type 74/75 settes i drift. Også målinger før og etter tiltakene med spenningsregulatorene vil kunne være interessante. Innføring av tiltakene og målinger bør innføres snares mulig, slik at om noe ikke er som forutsatt, kan en gjøre tiltak tidligst mulig og før 2012/13. En bør også informere lokomotivførerne om den nye situasjonen der banestrømforsyningen blir mer presset og at situasjoner der spenningen kommer ned mot 12-13 kV kan oppstå. Dette vil nok være en ny situasjon for lokomotivføreren og riktig handling vil kunne være vesentlig. Manuell pådragsbegrensning hos togførere vil riktignok ikke være lett på påvirke eller å følge opp, og er et usikkert tiltak.

I fase 2 av dette arbeidet skal en se på utnyttelsesgraden for banestrømforsyningen med enda flere togsett av Type 74/75. Det er også mulig at andre utbygginger og endringer kommer til å skje de nærmeste årene. Aktuelle tiltak vil både kunne være større omformerkapasitet, - sannsynligvis en ny stor omformerstasjon i Oslo-området. Det planlegges også AT-system i forbindelse med fornyelser og nyutbygging gjennom Oslo-området. Planlegging eller diskusjoner om hvordan dette praktisk kan gjennomføres bør gjøres snarest. En grunnleggende utfordring for kraftsystemet, er at en også etter innføring av de anbefalte relativt enkle tiltak, ligger helt på grensen av de kapasitetsmessige behov. For økt robusthet for kraftsystemet bør det vurderes hvordan man kan skaffe høyere kapasitet for Oslo-området på mellomlang sikt.

9 APPENDIKS 1 - MÅLT LASTFLYT UTEN TRAFIKK I OSLO-OMRÅDET

På julaften 2008 ble det foretatt målinger av effektflyten mellom sentrale omformerstasjoner i Oslo-området med noen spesielle koblingsbilder. Målingene ble foretatt etter at all trafikk var over sent på ettermiddagen og kvelden, slik at det kun er effektutveksling mellom omformerne og hjelpekraft som trekkes fra kontaktledningen som måles. Det ble undersøkt tre forskjellige koblingsbilder for å forenkle en senere analyse, fordi effektflyten er komplisert og koblinger med bare noen få involverte stasjoner gjør dette enklere. De tre koblingsbildene er som følger:

1 Koblingsbilde; - undersøkelse av effektflyt for Oslo-område

- Utgående linje fra Asker omformerstasjon mot Drammen legges ut.
- Transformatoren for fjernlinjen i Asker legges ut. Også transformatoren for fjernledningen.
- Utgående linje fra Ski omformerstasjon mot Moss og Mysen legges ut
- Utgående linje fra Jessheim omformerstasjon mot Eidsvoll legges ut
- Utgående linje fra Oslo mot Gjøvikbanen legges ut
- Utgående linje fra Lillestrøm mot Kongsvingerbanen legges ut

På denne måten vil kun omformerstasjonene Asker, Alnabru, Holmlia, Lillestrøm og Jessheim være sammenkoblet, slik at Oslo-området blir en elektrisk øy.

2 Koblingsbilde; - undersøkelse av effektflyt for indre Oslo-område

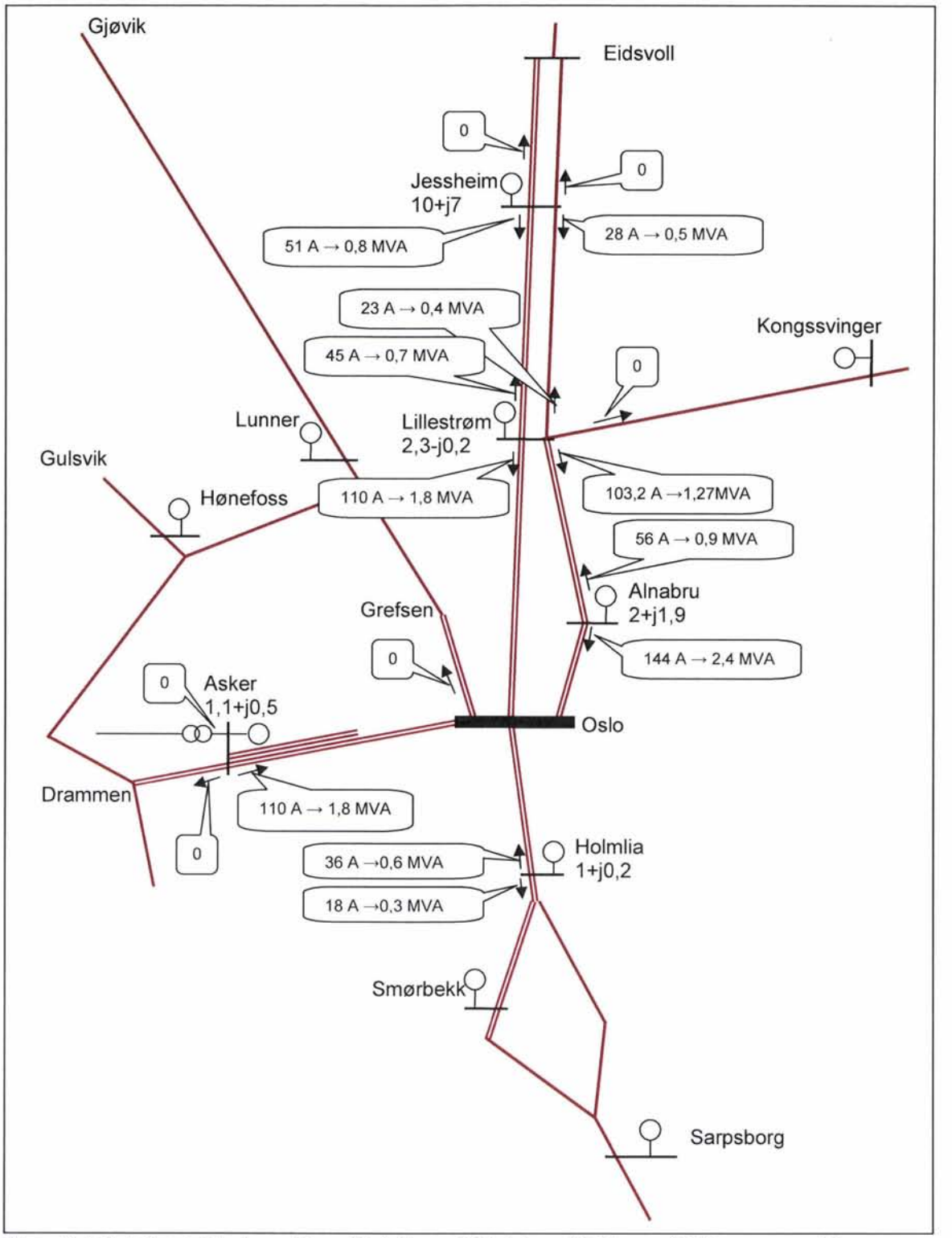
- Utgående linje fra Asker omformer mot Drammen legges ut.
- Transformatoren for fjernlinjen i Asker legges ut. Også transformatoren for fjernledningen.
- Utgående linje fra Ski omformerstasjon mot Moss og Mysen legges ut
- Utgående linje fra Jessheim omformerstasjon mot Eidsvoll legges inn
- Utgående linje fra Lillestrøm omformerstasjon mot Jessheim legges ut
- Utgående linje mot Gjøvikbanen legges ut
- Utgående linje fra Lillestrøm mot Kongsvingerbanen legges ut

På denne måten vil en oppnå det samme som i 1, men Jessheim er ikke inkludert.

3 Normalt koblingsbilde; - alle avgangene legges inn igjen og normal driftsituasjon gjenopprettes

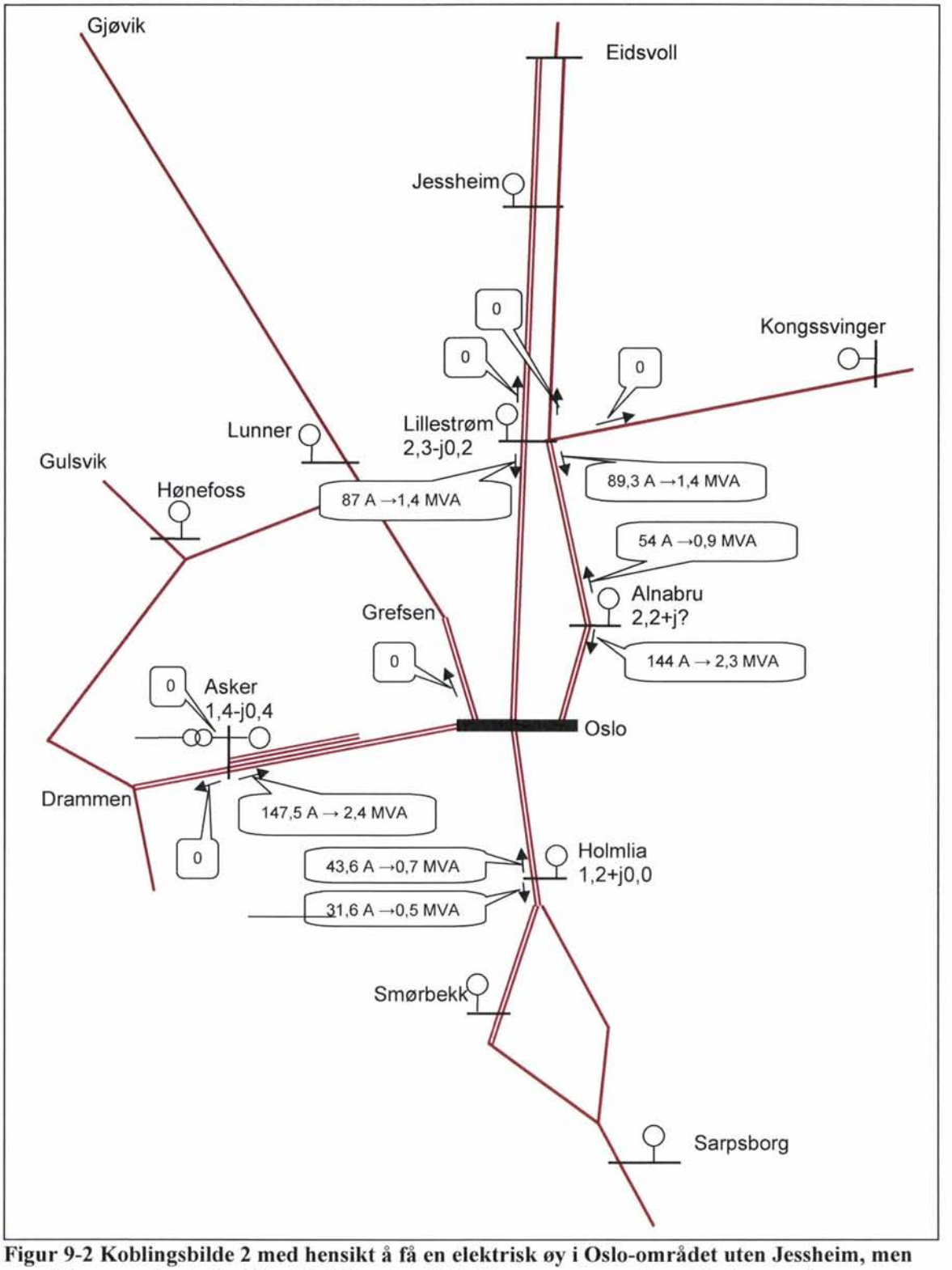
Dessverre ble punktet om at utgående linje fra Ski omformerstasjon mot Moss og Mysen legges ut feilformulert, det skulle stått Holmlia omformerstasjon. Dermed ble dette ikke etterfulgt og koblingen i elektrisk øy ble ikke oppfylt.

I Figur 9-1 viser effektflyten for koblingsbilde 1 og som en ser er det mye effekt som utveksles mellom omformerne. Det er imidlertid trist å konstantere at så mange av måleverdiene ser ut til å være gale, - summen av effekt inn til omformerne og ut til kontaktledningen ser ikke ut til å være riktige. Heller ikke er det mulig å finne ut av effektretningen, all den tid bare strømmens absoluttverdier er målt. Spenningen er heller ikke målt nøyaktig ved omformerstasjonene og da kan en ikke sikkert si om utveksling av effekt skyldes fasevinkelforskjeller eller forskjellige spenninger. I Oslo-området er det minimalt med sporvekselvarme som forsynes fra kl-anlegget og en kan forvente at det bare er hensatte tog som forsynes fra banestrømforsyningen og at dette utgjør noen hundre kW.



Figur 9-1 Koblingsbilde 1 med hensikt å få en elektrisk øy i Oslo-området, men som ikke er realisert fordi forbindelsen fra Holmlia og sørover er inne. Ved beregning av tilsynelatende effekt på avgangene er det antatt en samleskinnespenning på 16,2 kV.

Nedenfor viser Figur 9-2 koblingsbilde 2 der avgangen fra Lillestrøm mot Jessheim er koblet ut. Virkningen av å koble ut forbindelsen til Jessheim ser tydeligvis ut til å være at effektutvekslingen mellom Asker og Holmlia reduseres noe. For Alnabru derimot ser det ut til at forholdene endres lite. Dette kan tyde på at Jessheim og Lillestrøm har en faseforskyvning som virker i samme retning og at disse igjen har en forskyvning i forhold til Asker og Holmlia.

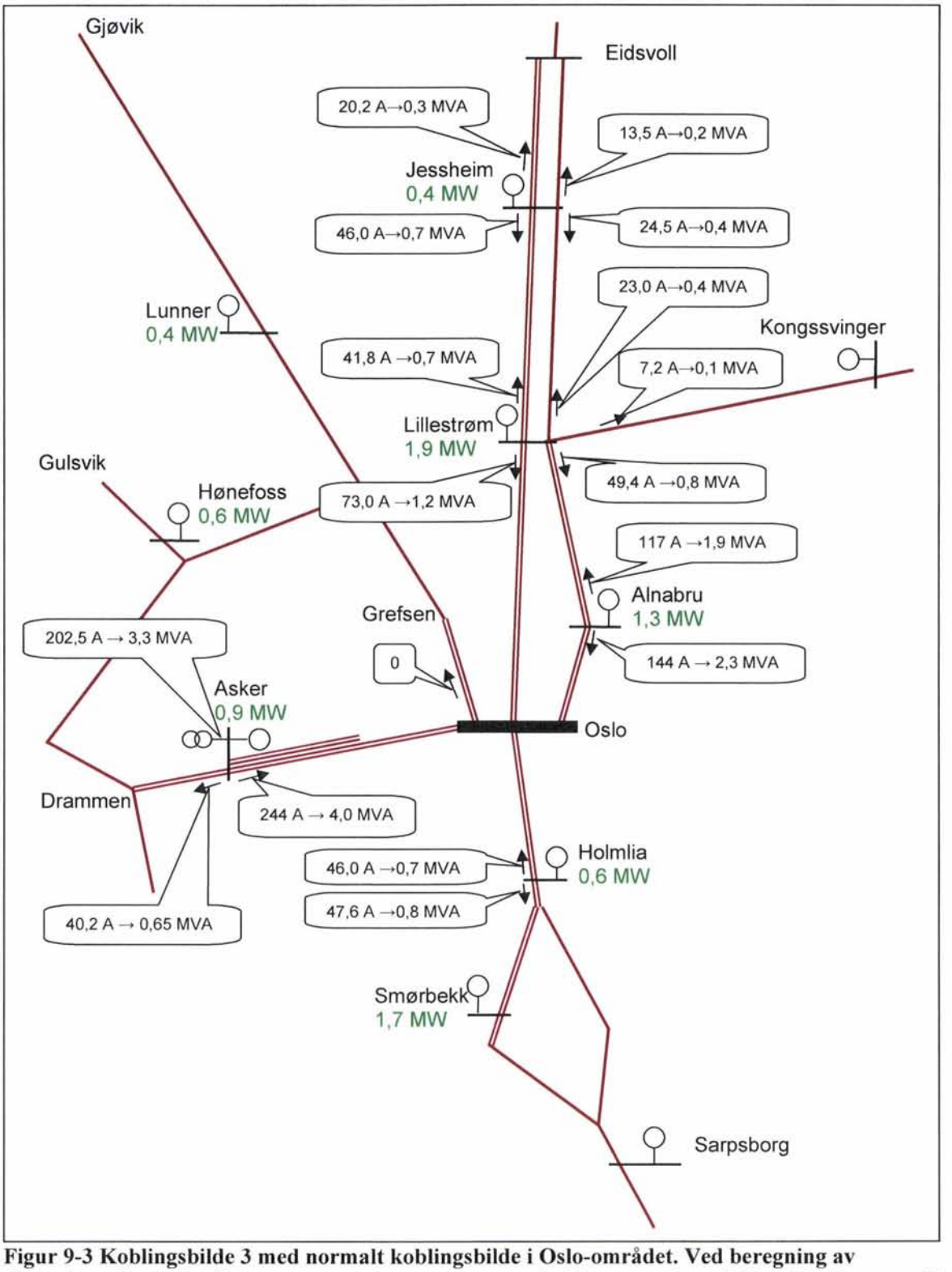


Figur 9-2 Koblingsbilde 2 med hensikt å få en elektrisk øy i Oslo-området uten Jessheim, men som ikke er realisert fordi forbindelsen fra Holmlia og sørover er inne. Ved beregning av tilsynelatende effekt på avgangene er det antatt en samleskinnespenning på 16,2 kV.

Nedenfor viser Figur 9-3 effektflyten med koblingsbilde 3 der normale forbindelser er opprettet. Istedenfor å benytte effektopptak til omformerstasjonene fra målingene fra Bane Energi sin driftsentral er det istedenfor benyttet målinger av energiopptaket. Energien måles hver hele time og i dette tilfellet er det benyttet data for målt energi den 25.12.2008 klokken 04:00. I dette tidspunktet er det ikke togtrafikk.

En ser at det er en del effekt som utveksles mellom omformerne, men så er også transformatoren for fjernledningen ved Asker koplet inn og denne injiserer 3,3 MVA fra Hakavik kraftverk. Sannsynligvis er mye av denne injiserte effekten aktiv effekt og det virker dermed naturlig at noen av omformerstasjonene leverer denne effekten inn i trefasenettet. Imidlertid er målingene for energi fra Bane Energi bare med positive fortegn, dermed vil en være i tvil om effektflyten er reel. En skulle ha forventet at Asker i størst grad, men også Lillestrøm, Alnabru og Holmlia tar imot denne effekten og at de da skulle ha hatt motsatte fortegn i forhold til figuren.

Legg spesielt merke til den store forskjellen i effektopptak mellom Smørbekk og Holmlia. Med hypotesen ovenfor skulle en ha forventet negativt fortegn for Holmlia og nærmere null for Smørbekk. Istedenfor er det nokså mye effekt som går inn til Smørbekk omformer og da kan en jo lure på om dette kan ha sin årsak i forskjellige fasevinkler i overliggende nett.



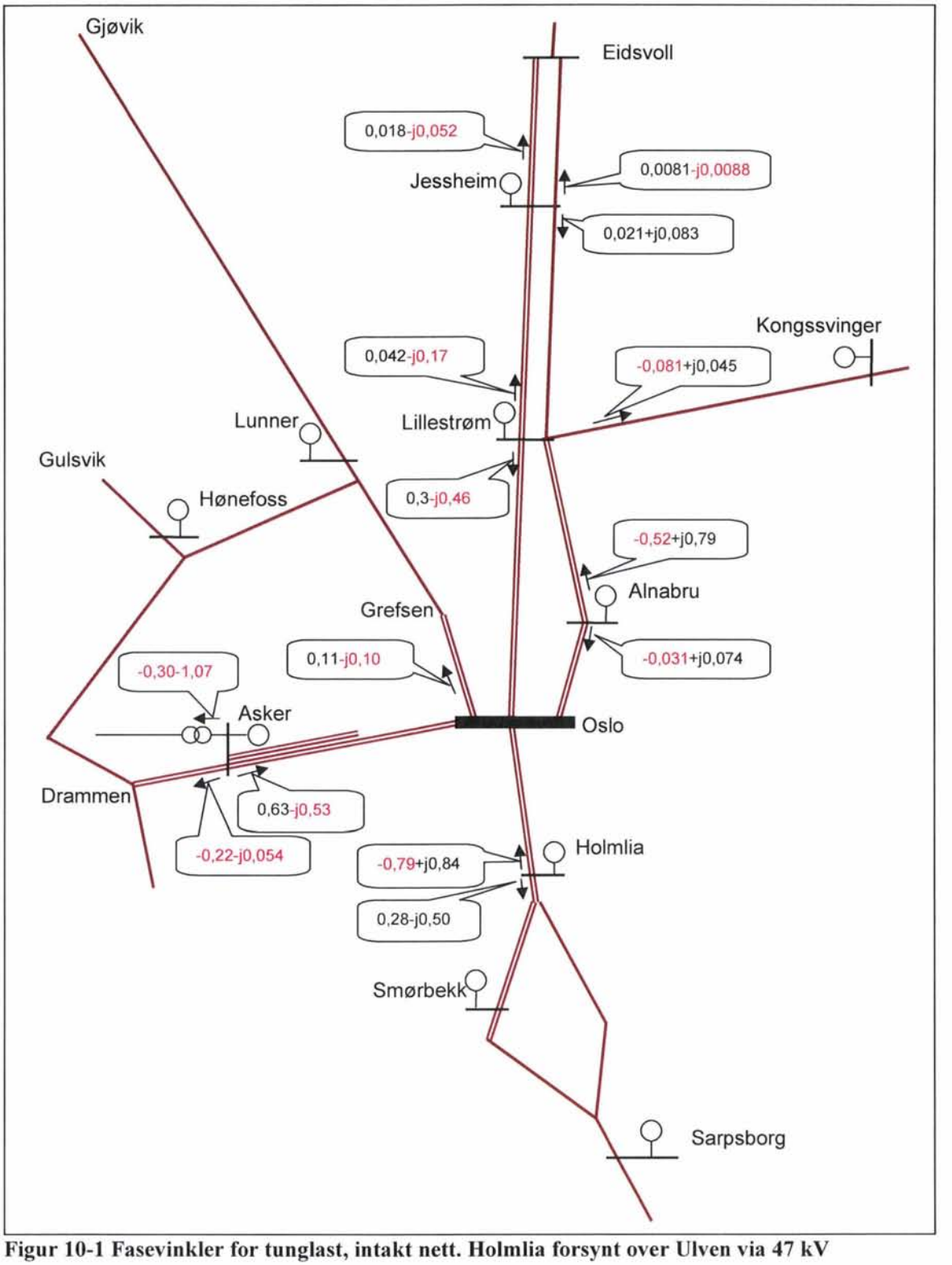
Figur 9-3 Koblingsbilde 3 med normalt koblingsbilde i Oslo-området. Ved beregning av tilsynelatende effekt på avgangene er det antatt en samleskinnespenning på 16,2 kV. Grønne tall indikerer avlesning av målt energi i en time uten trafikk slik at målt MWh blir omentrent likt med MW.

10 APPENDIKS 2 - FASEVINKLER I OVERLIGGENDE NETT

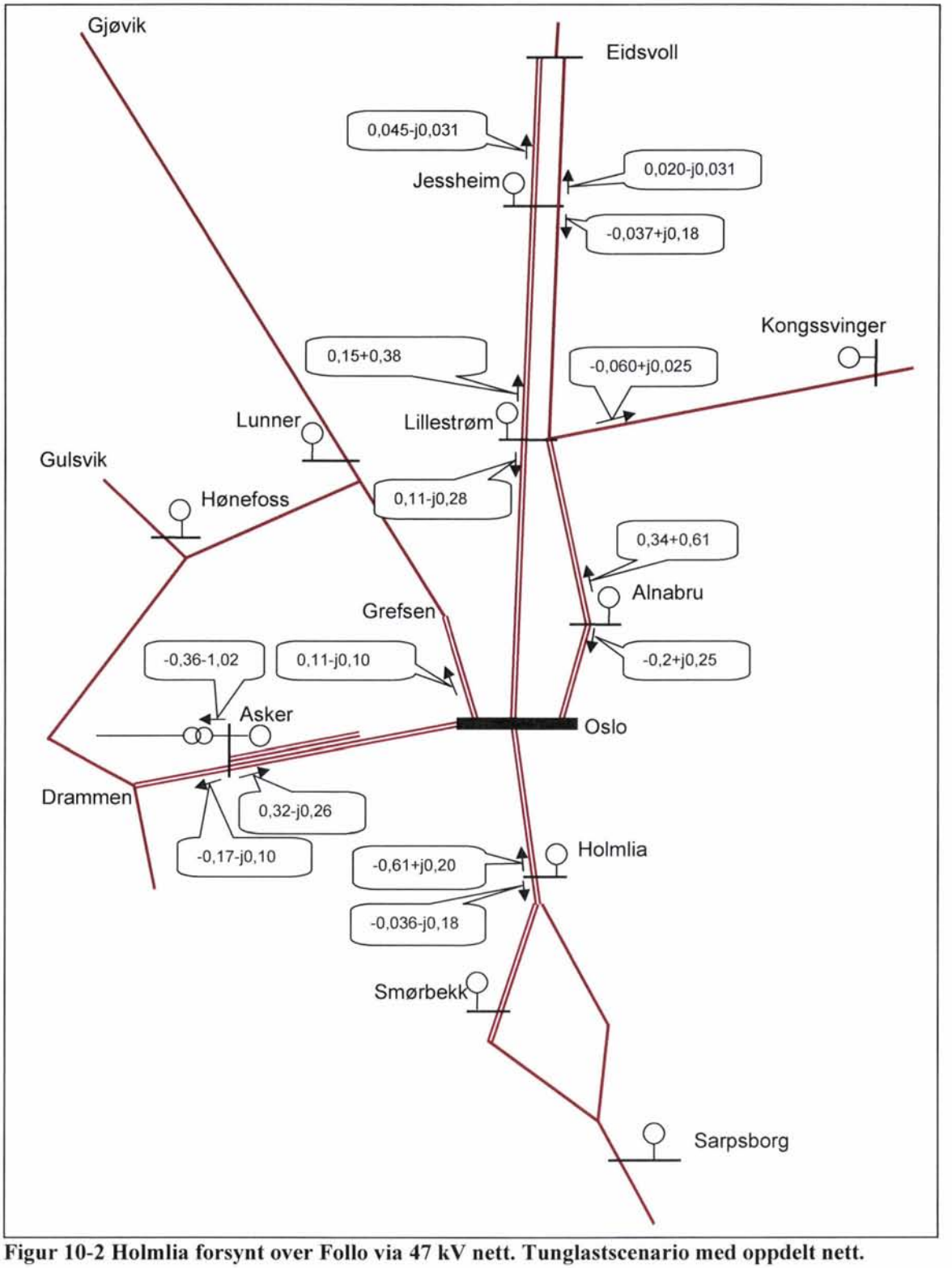
For å se hvilken effektflyt en kan regne med å få med de fasevinkler som Statnett har beregnet, se [13], er det gjort en undersøkelse for å finne effektflyten i tomgang. Alle spenningsregulatorer holder spenningen konstant på 16,5 kV. Det er forutsatt at alle aggregater er i drift, selv om det er urealistisk i tomgang. I virkeligheten er det omtrent bare i julen og i påsken hvert år at det er noen timer uten noen togdrift og da vil en sørge for å ha færrest mulig aggregater i drift. I Figur 10-1 viser effektflyten mellom omformerstasjonene med normal driftskobling i overliggende regionalnett og Holmlia forsynt fra Ulven transformatorstasjon. Dette er den situasjonen som gir størst fasevinkel mellom Asker og Holmlia, - omentrent 19° der Holmlia ligger etter. Forskjellen mellom Asker-Alnabru-Lillestrøm-Jessheim er ikke så stor, - under 10° der Asker ligger fremst. Dermed vil effektflyten gå mot Holmlia, og som en ser mottar den 790 kW og mater ut 840 kVAr. Størst effektflyt går det mellom Asker og Holmlia.

Figur 10-2 viser lastflyten med tung belastning i sentralnettet og oppdelt nett, Holmlia er forsynt over Follo. Forskjellen mellom Holmlia og Asker er rundt 5°, der Asker ligger fremst og forskjellen mellom Asker og Alnabru er rundt 5°. Nå ser en at det går mindre effekt til Holmlia, men mer fra Asker til Alnabru. Det er mindre effekt som overføres nå enn i situasjonen i Figur 10-1.

Fasevinklene i overliggende nett har altså litte å si for utveksling av effekt i tomgang. Det ser heller ut til at fasevinklene har så litte å si at de like godt kunne vært satt til null. Når det i appendiks 1 ble referert til målinger med nokså stor effektutveksling i tomgang tyder det på at det er andre årsaker til dette. Det holdes for sannsynlig at forskjellig innstilling av tomgangspenningen i omformerstasjonene gjør at det utveksles effekt.



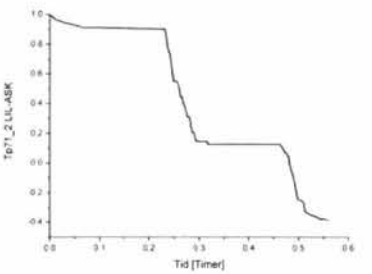
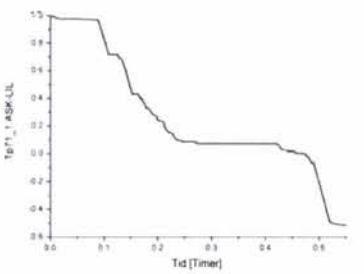
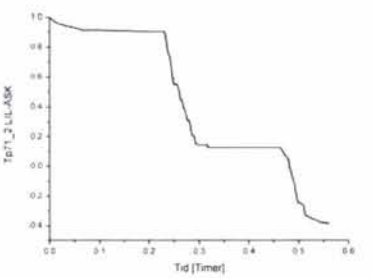
Figur 10-1 Fasevinkler for tunglast, intakt nett. Holmlia forsynt over Ulven via 47 kV

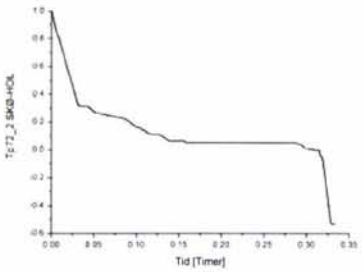
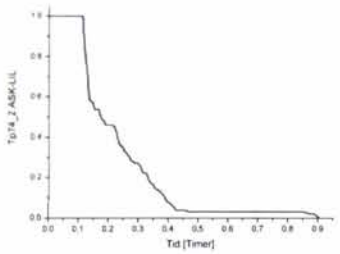
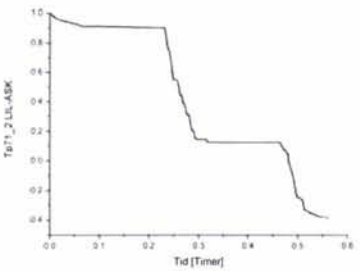
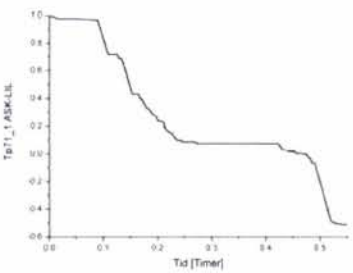


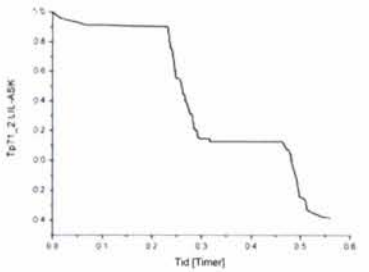
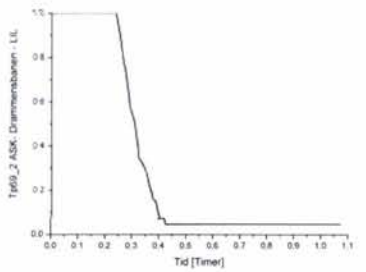
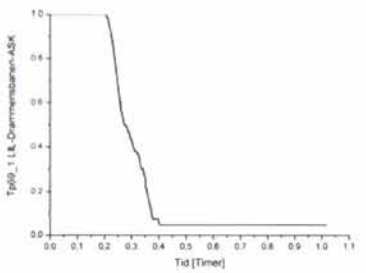
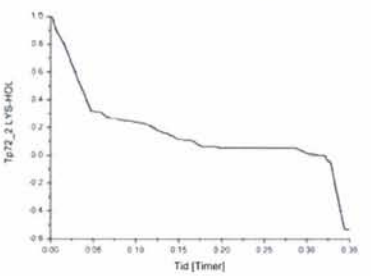
Figur 10-2 Holmlia forsynt over Follo via 47 kV nett. Tunglastscenario med oppdelt nett.

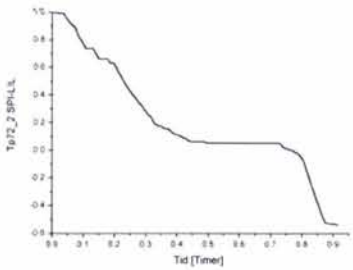
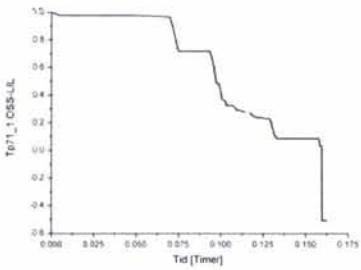
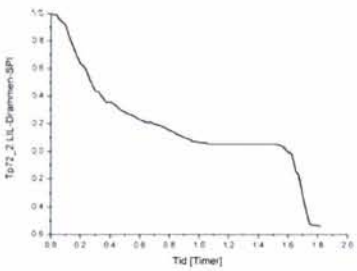
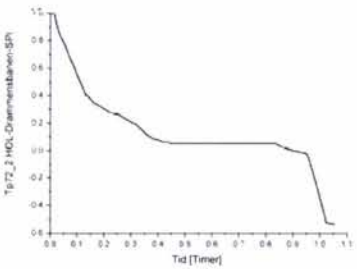
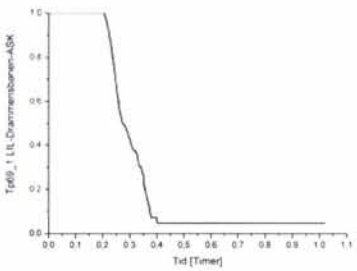
11 APPENDIKS 3 - SANNSYNLIGHETSREGNING FOR Å FINNE SANNSYNLIGHET FOR STØRRELSE AV MAKSIMAL EFFEKTBELASTNING I OSLO-OMRÅDET

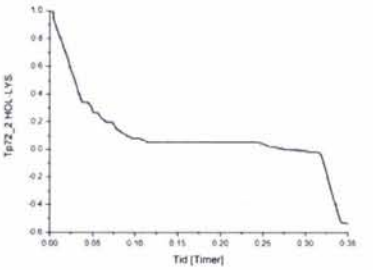
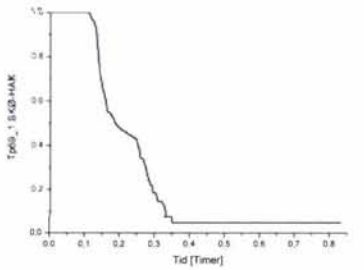
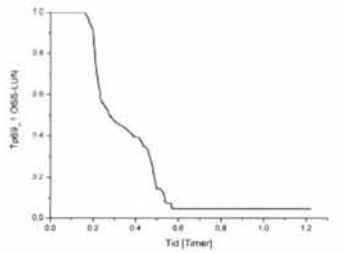
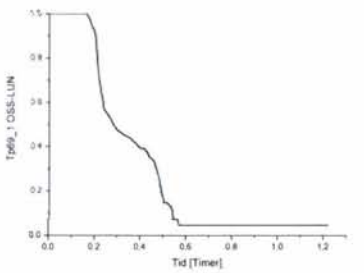
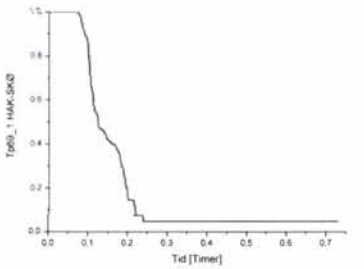
Tabell 11-1

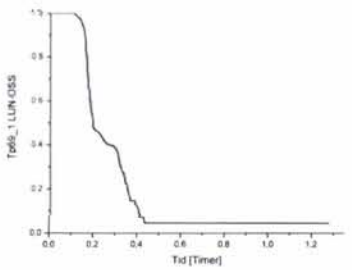
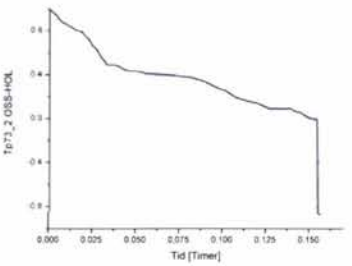
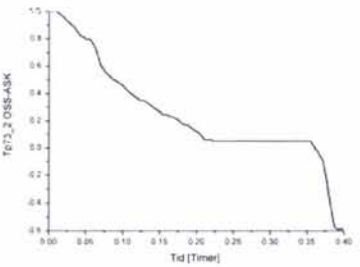
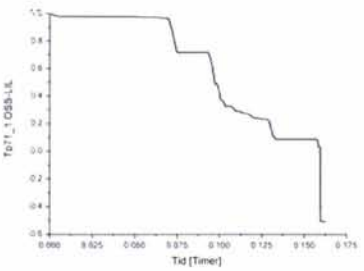
Distanse	Tog	Varighetskurve	Maksimal effekt [MW]
Flytoget: Gardermoen - GMB - Lillestrøm - Romeriksporten - Oslo - Askerbanen - Drammen	3758_Tp71_1 og 3762_Tp71_1		5,2 / -5,2
Flytoget: Gardermoen - GMB - Lillestrøm - Romeriksporten - Oslo	-	-	-
Flytoget: Drammen - Askerbanen - Oslo - Romeriksporten - Lillestrøm - GMB - Gardermoen	3771_Tp71_2 og 3769_Tp71_2		5,2 / -5,2
Flytoget: Oslo - Romeriksporten - Lillestrøm - GMB - Gardermoen	-	-	-
linje 440 Drammen-Askerbanen-Oslo S - Romeriksporten-Lillestrøm-Hovedbanen-Dal	-	-	-
linje 440 Dal-Hoevedbanen-Lillestrøm-Romeriksporten-Oslo S-Askerbanen-Drammen	1682-Tp74_2		12,856 / -6,3

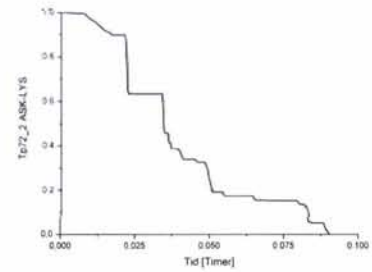
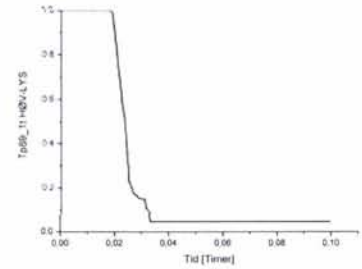
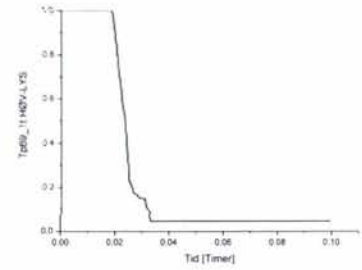
Distanse	Tog	Varighetskurve	Maksimal effekt [MW]
linje 560 Skøyen-Oslo-Ski (Østfoldbanen)-Mysen	1233_Tp72_2		6,5 / -4,8
linje 560 Skøyen-Oslo-Ski (Østfoldbanen)-Mysen-Rakkestad	-	-	-
linje 560 Mysen-Ski (Østfoldbanen)-Oslo-Skøyen	-	-	-
linje 002 Drammen-Askerbanen-Oslo-Romeriksporten-Lillestrøm-GMB-Lillehammer	333_Tp74_2		12,856 / -6,3
linje 002 Lillehammer-GMB-Lillestrøm-Romeriksporten-Oslo-Askerbanen-Drammen	-	-	-
linje 003 Larvik-Drammen-Askerbanen-Oslo-Romeriksporten-Lillestrøm-GMB-Eidsvoll	-	-	-
linje 003 Eidsvoll-GMB-Lillestrøm-Romeriksporten-Oslo-Askerbanen-Drammen-Larvik	833_Tp74_2		12,856 / -6,3
linje 003 Oslo-Askerbanen-Drammen-Skien	-	-	-
linje 003 Oslo-Askerbanen-Drammen-Tønsberg	-	-	-
linje 450 Kongeberg-Drammen-Askerbanen-Oslo-Romeriksporten-Lillestrøm-GMB- Eidsvoll	532_Tp74_2		12,856 / -6,3

Distanse	Tog	Varighetskurve	Maksimal effekt [MW]
linje 450 Eidsvoll-GMB-Lillestrøm-Romeriksporten-Oslo-Askerbanen-Drammen-Kongeberg	531_Tp74_2		12,856 / -6,3
linje 450 Oslo-Askerbanen-Drammen-Kongeberg	-	-	-
linje 450 Lysaker-Askerbanen-Drammen-Kongeberg	-	-	-
linje 400, Asker-Drammensbanen-Oslo-Brynsbakken/Hovedbanen-Lillestrøm	2132_Tp69_2, 2180_Tp69_2 og 2232_Tp69_2		3,84
linje 400, Lillestrøm-Brynsbakken/Hovedbanen-Oslo-Drammensbanen-Asker	2133_Tp69_1, 2181_Tp69_1, 2233_Tp69_1, 2281_Tp69_1 og 2283_Tp69_1		1,92
linje 550, Lysaker-Oslo-Moss (Østfoldbanen)	1181_Tp72_2		6,5 / -4,8
linje 550, Moss-Oslo-Lysaker (Østfoldbanen)	-	-	-

Distanse	Tog	Varighetskurve	Maksimal effekt [MW]
linje 460, Spikkestad-Askerbanen-Oslo-Romeriksporten-Kongsvinger	1033_Tp72_2		6,5 / -4,8
linje 460,Oslo S-Romeriksporten-Lillestrøm-Kongsvinger	Tp72_2		6,5 / -4,8
linje 460, Kongsvinger-Romeriksporten-Oslo-Drammenbanen-Spikkestad	1032_Tp72_2		6,5 / -4,8
linje 450, Moss (Østfoldbanen)-Oslo-Drammenbanen-Spikkestad	1180_Tp72_2		6,5 / -4,8
linje 510, Lysaker-Oslo-Kolbotn (Østfoldbanen)	-	-	-
linje 500, Lysaker-Oslo-Ski (Østfoldbanen)	2733_Tp69_2 og 2833_Tp69_2		3,84

Distanse	Tog	Varighetskurve	Maksimal effekt [MW]
linje 500, Ski (Østfoldbanen)-Oslo-Lysaker	2732_Tp69_1, 2780_Tp69_1 og 2832_Tp69_1		1,92
Gjøvikbanen Skøyen - Oslo - Hakadal	283_Tp69_1		1,92
Gjøvikbanen Oslo - Jaren	245_Tp69_1		1,92
Gjøvikbanen Oslo - Gjøvik	211_Tp69_1		1,92
Gjøvikbanen Hakadal - Oslo - Skøyen	282_Tp69_1		1,92

Distanse	Tog	Varighetskurve	Maksimal effekt [MW]
Gjøvikbanen Jaren - Oslo	252_Tp69_1		1,92
Gjøvikbanen Gjøvik - Oslo	-	-	-
IC linje 001, Oslo-Halden (Østfoldbanen)	131_Tp73_2 og 183_Tp70_2		7,8 / -4,36
IC linje 001, Halden (Østfoldbanen)-Oslo	-	-	-
Fjerntog, Oslo - Askerbanen - Hønefoss - (Bergen)	63_Tp73_2		7,8 / -4,36
Fjerntog, (Bergen) - Hønefoss - Askerbanen - Oslo	-	-	-
Fjerntog, Oslo-GMB-Lillehammer	47_Tp73_2		7,8 / -4,36
Fjerntog, Oslo - Askerbanen - Kristiansand - Stavanger	-	-	-
Godstog, (Alnabru) - Hjuksebø - Nelaug - (Stavanger)	-	-	-
Godstog, (Stavanger) - Nelaug - Alnabru	-	-	-
Godstog, (Bergen) - Hønefoss - Alnabru	-	-	-
TOMTOG, Kongsberg-Drammen	-	-	-
TOMTOG, Kongsberg-	-	-	-

Distanse	Tog	Varighetskurve	Maksimal effekt [MW]
(Askerbanen ?)_Oslo			
TOMTOG, Dal -Eidsvoll (Hovedbanen)	-	-	-
TOMTOG, Drammen-Askerbanen-Lysaker	11133_ Tp72_2		6,5 / -4,8
TOMTOG, Drammen-Askerbanen-Sandvika-Drammenbanen-Høvik	-	-	-
TOMTOG, Høvik-Sandvika-Askerbanen-Drammen	-	-	-
TOMTOG, Mysen -(Østfoldbane)-Filipstad	-	-	-
TOMTOG, Rakkestad-Mysen (Østfoldbane)	-	-	-
TOMTOG, Ski-(Østfoldbane)-Filipstad	-	-	-
TOMTOG, Spikkestad-Askerbanen-Skøyen-Filipstad	-	-	-
TOMTOG, Spikkestad-Askerbanen-Lysaker	-	-	-
TOMTOG, Høvik-Lysaker	22883_ Tp69_1t		1,92
TOMTOG, Lysaker-Høvik	12780_ Tp69_1t		1,92

12 APPENDIKS 4 - SIMULERING MED RIKTIG ORIGINAL FASEVINKEL FOR TOGSETT TYPE 74/75

Som påpekt i avsnitt 7.2.10 har det blitt benyttet feil fasevinkel for Type 74/75 i simuleringene og en vil her undersøke betydningen av å bruke den originale og riktige. I Figur 7-1 er riktig og feil fasevinkel vist henholdsvis som svart og rød kurve. Den blå kurven som ble testet ut for Type 74/75 i avsnitt 6.3.2 er muligens ikke så gunstig på grunn av store endringer for fasevinklene. En er redd for at dette kan gi problemer med å finne stabile arbeidspunkter. Viser det seg at den originale kurven kan benyttes vil det være det beste.

Simuleringer som er utført her med samme case som i avsnitt 6.3.1, - altså utfall av to aggregater i Asker, viste at ingen tog får spenning under 12,0 kV. Kun fem tog får kortvarig spenning på 12,0 kV og de fleste tog får spenning mellom 12 og 13 kV. Altså en merkbar forbedring i forhold til simuleringen der feil kurve for fasekompensering var benyttet. Når det gjelder belastningen av omformerstasjonene er endringen fra simuleringen i avsnitt 6.3.1 små, se Tabell 12-1.

Sammenligner vi dette med simuleringene i avsnitt 6.3.2 med større kompensering enn den originale ble spenningen for togene noe bedre med kun to tog som fikk spenning på 12,0 kV. Når det gjelder maksimale belastningstopper viser det seg at forskjellene mellom simuleringen her og i avsnitt 6.3.2 ikke er store. Av dette kan det se ut som om den originale

Tabell 12-1 Belastning av omformerstasjonene med trafikksimulering for rushtidsperiden mellom kl 15:00 og 18:00. Tiltakene fra kapittel 5 er innført, men to aggregater i Asker er falt ut og temperatur- og strømbegrensere er innført. Prosentvis belastning av innsatt ytelse.

Trafikksimulering med 12 % statikk i alle omformerstasjoner og omsetning 54,5/16,5 kV i Asker og 50 % lavere Xq i Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk. Utfall av to aggregater i Asker og tem/strøm begrensere i Asker, Holmlia og Alnabru. Tog Type 74 og 75 med riktig original kompensering ved lav spenning								
		Strøm		Effekt				
Omformerstasjon	Innsatt ytelse	2-sek		2-sek	6-minuitter		1-time	
	[MVA]	[kA]	%	[MVA]	[MVA]	%	[MVA]	%
Asker	1 x 10	1,029	87	14,457	9,550	68	8,910	89
Holmlia	2 x 10	1,343	57	20,401	14,660	52	12,236	61
Alnabru	2 x 10	1,341	57	20,986	14,608	52	12,656	63
Lillestrøm	3 x 12	2,643	104	40,589	28,004	67	23,203	64
Jessheim	2 x 12	1,480	87	23,782	16,273	58	14,487	60
Tangen	2 x 5,8	0,805	64	12,367	4,798	30	3,310	29
Rudshøgda	3,1	0,337	75	4,693	2,006	42	0,956	31
Fåberg	2 x 5,8	0,570	46	9,235	3,059	19	1,763	15
Smørbekk	2 x 12	1,521	90	24,749	14,255	51	12,731	53
Sarpsborg	1 x 12	0,472	56	7,621	4,587	33	3,583	30
Kongsvinger	1 x 5,8	0,490	78	7,264	3,653	46	2,227	38
Lunner	1 x 5,8	0,513	82	7,327	5,766	72	3,407	59
Hønefoss	1 x 5,8	0,356	28	5,468	3,341	42	2,602	45
Nordagutu	2 x 7	0,810	49	12,636	8,974	41	6,580	47
Nelaug	2 x 5,8	0,582	47	9,021	6,686	42	3,436	30
Skoppum	2 x 5,8	0,997	80	15,374	8,928	56	5,461	47
Larvik	2 x 5,8	0,667	53	10,639	5,162	32	3,578	62

13 REFERANSER

1. NSB Engeenering: "OL - 94, Banestrømforsyning, Foretatte målinger og Beregninger, Evaluering av resultater". 22. februar 1991.
2. Per Christian Bærø, Frode Johnsen og Kolbjørn Lofthus: "Gardermobanen, Kapasitetsvurderinger, Strømforsyning". NSB Bane Ingeniørtjenesten, 1. februar1994.
3. Per Christian Bærø og Kolbjørn Lofthus: "Simulering av banestrømforsyningen i Oslo-området". NSB Bane Ingeniørtjenesten, 20. mars 95.
4. Rune Øverås og Per Christian Bærø: Strømforsyningen på Gardermobanen". NSB Bane Ingeniørtjenesten, 13. mars 1996.
5. Ann Palesjö og Gunnar Hammarström: "Utredning av Oslo-området, Samkjörningsstudie och trafiksimulering - Projekt Gardermobanan". Teknisk Rapport. Adtranz Sweden, 28. mai 1997.
6. Anna Sofie Mørland og Frode Johannessen: "Kraftsystemplan - Utredning av energiforsyningen med simulering Oslo-området". Bane Partner 7. desember 1999.
7. Frode Johannessen: "Simulering av banestrømforsyningen i Oslo-området". Bane Partner, 20.november 2000. Prosjekt nr 199208.
8. Frode Johannessen: "Simulering av Oslo området 2002 - Beredskapsplan". Bane Partner 24. juni 2002. Prosjekt nr 292168. Saksref.: 02/3925 JI 760.
9. Frode Johannessen: "Utredning av samkjøringen i Oslo-området med hensyn på mulig reduksjon av energitap". Bane Partner, oktober 2003.
10. Frode Johannessen: "Utnyttelse av omformerkapasiteten i Oslo-området". Bane Partner, februar 2003. Prosjekt nr 292192. Saksref 02/4556 JI 135.
11. Per Sture og Frode Nilsen: "Kontaktledningsteknikk - Impedanser, spenningsfall, sporstrømmer og potensialer. Kompendium. Jernbaneverket, 11.5.2003.
12. Frank Martinsen: "Spenningsregulatorinnstilling i roterende omformerstasjoner - Undersøkelser og forslag til nye innstillingsverdier som kan øke belastbarheten og minke reaktiv effektflyt". Jernbaneverket BTPE, 05.10.2009.
13. Sigurd Sørbotten: "Beregning av fasevinklar mellom omformerstasjoner i Osloområdet". Statnett, 14.12.2009.
14. Steinar Danielsen: "Spenningsregulator med statorstrøm- og feltbegrensning for jernbanens roterende omformere". NTNU, Hovedoppgave, 11. juni 2002.
15. Frank Martinsen: "Lastflyt og fasevinkler mellom omformerstasjoner - Prinsipper og forslag til løsninger på noen kjente problemstillinger i dagen og fremtidens banestrømforsynging". Jernbaneverket, 27.6.2008.
16. Steinar Danielsen: "Vurdering av redundans- og dimensjoneringkriteriet for banestrømforsyningen". Utredning, Jernbaneverket, 06.12.2005. Dokument nr. 200404562-17X.
17. Øyvind Stensby: "Fremtidig banestrømforsyning på Gjøvikbanen". Bane Energi, Utredning, 01.02.2010. Dokument nr. EB. 100774-000.

VEDLEGG 1

10838	17:03	BM74	1T	T_10838	BM74_1T	P_10838
!!!!	NSB T,Tønsberg-Skien					
!!!!	NSB T,Høvik-Lysaker					
11135	17:08	BM72	1T	T_11135	BM72_1T	P_11135
11181	15:38	BM72	1T	T_11181	BM72_1T	P_11181
11183	16:38	BM72	1T	T_11183	BM72_1T	P_11183
12731	14:59	BM69	1T	T_12731	BM69_1T	P_12731
12733	15:59	BM69	1T	T_12733	BM69_1T	P_12733
12737	17:59	BM69	1T	T_12737	BM69_1T	P_12737
12781	15:29	BM69	1T	T_12781	BM69_1T	P_12781
12837	17:43	BM69	1T	T_12837	BM69_1T	P_12837
22735	16:59	BM69	1T	T_22735	BM69_1T	P_22735
22783	16:29	BM69	1T	T_22783	BM69_1T	P_22783
22785	17:29	BM69	1T	T_22785	BM69_1T	P_22785
22833	15:43	BM69	1T	T_22833	BM69_1T	P_22833
22835	16:43	BM69	1T	T_22835	BM69_1T	P_22835
22883	16:13	BM69	1T	T_22883	BM69_1T	P_22883
22885	17:13	BM69	1T	T_22885	BM69_1T	P_22885
!!!!	NSB T,Høvik-Skøyen					
!!!!	NSB T,Lodalen-Oslo					
!!!!	NSB T,Lysaker-Høvik					
11178	15:03	BM72	1T	T_11178	BM72_1T	P_11178
12730	15:43	BM69	1T	T_12730	BM69_1T	P_12730
12732	16:43	BM69	1T	T_12732	BM69_1T	P_12732
12734	17:43	BM69	1T	T_12734	BM69_1T	P_12734
12778	15:13	BM69	1T	T_12778	BM69_1T	P_12778
12780	16:13	BM69	1T	T_12780	BM69_1T	P_12780
12782	17:13	BM69	1T	T_12782	BM69_1T	P_12782
12830	15:29	BM69	1T	T_12830	BM69_1T	P_12830
12832	16:29	BM69	1T	T_12832	BM69_1T	P_12832
12834	17:29	BM69	1T	T_12834	BM69_1T	P_12834
12880	15:59	BM69	1T	T_12880	BM69_1T	P_12880
12882	16:59	BM69	1T	T_12882	BM69_1T	P_12882
12884	17:59	BM69	1T	T_12884	BM69_1T	P_12884
!!!!	NSB T,Skøyen-Høvik					
21181	15:20	BM72	1T	T_21181	BM72_1T	P_21181
END				T_END		P_END

!!!! NSB T,Filipstad-Skøyen

!!!! NSB T,Filipstad-Østfoldbanen-Rakkestad

!!!! NSB T,Filipstad-Østfoldbanen-Kolbotn

!!!! NSB T,Filipstad-Østfoldbanen-Ski

!!!! NSB T,Filipstad-Østfoldbanen-Moss

!!!! NSB T,Høvik-Kolbotn (Østfoldbanen)

!!!! NSB T,Høvik-Sandvika-Askerbanen-Drammen

21134	17:39	BM72	1T	T_21134	BM72_1T	P_21134

!!!! NSB T,Høvik-Filipstad

!!!! NSB T,Kolbotn-Oslo(Østfoldbane)

!!!! NSB T,Kolbotn-Filipstad(Østfoldbane)

!!!! NSB T,Kolbotn-Høvik(Østfoldbane)

!!!! NSB T,Kolbotn-Ski(Østfoldbane)

!!!! NSB T,Lysaker-Askerbanen-Drammen

!!!! NSB T,Lysaker-Filipstad

!!!! NSB T,Mysen -(Østfoldbane)-Filipstad

11282	17:29	BM72	1T	T_11282	BM72_1T	P_11282

!!!! NSB T,Oslo- Kolbotn -(Østfoldbane)

!!!! NSB T,Oslo- Filipstad

!!!! NSB T,Oslo- lodalen

!!!! NSB T,Rakkestad-Filipstad (Østfoldbane)

!!!! NSB T,Rakkestad-Mysen (Østfoldbane)

21286	17:17	BM72	1T	T_21286	BM72_1T	P_21286

!!!! NSB T,Ski-(Østfoldbane)-Filipstad

12783	17:31	BM69	1T	T_12783	BM69_1T	P_12783
12835	17:42	BM69	1T	T_12835	BM69_1T	P_12835

!!!! NSB T,Ski-(Østfoldbane)-Oslo

!!!! NSB T,Ski-(Østfoldbane)-Kolbotn

!!!! NSB T,Skien-Tønsberg

!!!! NSB T,Spikkestad-Askerbanen-Skøyen-Filipstad

21182	17:54	BM72	1T	T_21182	BM72_1T	P_21182

!!!! NSB T,Spikkestad-Drammen

!!!! NSB T,Spikkestad-Askerbanen-Lysaker

11180	17:25	BM72	1T	T_11180	BM72_1T	P_11180

!!!! NSB T,Tønsberg-Larvik

602	15:52	EL18	8B7		T_602	EL18_8B7	P_602
!!!!	Fjerntog, Halden (Østfoldbanen)-Gøteborg						
!!!!	Fjerntog, Gøteborg-Halden (Østfoldbanen)						
!!!!	NSB Pt, Fjerntog, Oslo-GMB-Lillehammer						
45	14:10	BM73		2	T_45	BM73_2	P_45
47	16:10	BM73		2	T_47	BM73_2	P_47
!!!!	Fjerntog, Oslo - Askerbanen - Kristiansand - Stavanger						
79	15:10	BM73		2	T_79	BM73_2	P_79
!!!!	Godstog, (Alnabru) - Hjuksebø - Nelaug - (Stavanger)						
5803	14:28	EL16		800	T_5803	EL16_800	P_5803
!!!!	Godstog, (Stavanger) - Nelaug - Alnabru						
5800	14:28	EL16		800	T_5800	EL16_800	P_5800
5804	16:04	EL16		800	T_5804	EL16_800	P_5804
!!!!	Godstog, (Bergen) - Hønefoss - Alnabru						
5504	17:08	EL16		800	T_5504	EL16_800	P_5504
!!!!	Godstog, Brevik - Eidanger						
6460	14:55	El14		800	T_6460	El14_800	P_6460
6462	15:45	El14		800	T_6462	El14_800	P_6462
6464	16:35	El14		800	T_6464	El14_800	P_6464
!!!!	NSB T,Kongsberg-Drammen						
10531	17:28	BM75	1T		T_10531	BM75_1T	P_10531
10583	17:55	BM75	1T		T_10583	BM75_1T	P_10583
!!!!	NSB T,Kongsberg-(Askerbanen ?)_Oslo						
10582	17:00	BM75	1T		T_10582	BM75_1T	P_10582
!!!!	NSB T,Drammen-Kongsberg						
!!!!	NSB T,Asker-Drammensbanen-Filipstad						
!!!!	NSB T,Drammen-Spikkestad						
!!!!	NSB T,Filipstad-Spikkestad						
!!!!	NSB T,Filipstad-Asker(Drammenbanen)						
!!!!	NSB T,Dal -Eidsvoll (Hovedbanen)						
11633	17:50	BM75	1T		T_11633	BM75_1T	P_11633
11683	17:26	BM75	1T		T_11683	BM75_1T	P_11683
!!!!	NSB T,Eidsvoll-Dal (Hovedbanen)						
!!!!	NSB T,Drammen-Askerbanen-Lysaker						
11131	14:56	BM72	1T		T_11131	BM72_1T	P_11131
11133	15:56	BM72	1T		T_11133	BM72_1T	P_11133
12881	15:00	BM69	1T		T_12881	BM69_1T	P_12881
22181	15:26	BM69	1T		T_22181	BM69_1T	P_22181
!!!!	NSB T,Drammen-Askerbanen-Skøyen						
!!!!	NSB T,Drammen-Askerbanen-Sandvika-Drammenbanen-Høvik						
21183	16:19	BM72	1T		T_21183	BM72_1T	P_21183
!!!!	NSB T,Drammen-Askerbanen-Oslo-GMB-Lillestrøm-Hovedbanen-Dal						
!!!!	NSB T,Filipstad-Høvik						
!!!!	NSB T,Filipstad-Oslo-Romeriksporten-Kongsvinger						

2730	15:00	BM69	1	T_2730	BM69_1	P_2730
2732	16:00	BM69	1	T_2732	BM69_1	P_2732
2734	17:00	BM69	1	T_2734	BM69_1	P_2734
2778	14:30	BM69	1	T_2778	BM69_1	P_2778
2780	15:30	BM69	1	T_2780	BM69_1	P_2780
2782	16:30	BM69	1	T_2782	BM69_1	P_2782
2784	17:30	BM69	1	T_2784	BM69_1	P_2784
2832	15:46	BM69	1	T_2832	BM69_1	P_2832
2834	16:46	BM69	1	T_2834	BM69_1	P_2834
2836	17:46	BM69	1	T_2836	BM69_1	P_2836
2880	15:16	BM69	2	T_2880	BM69_2	P_2880
2882	16:16	BM69	1	T_2882	BM69_1	P_2882
2884	17:16	BM69	1	T_2884	BM69_1	P_2884
!!!!	NSB Anbud, Skøyen - Oslo - Hakadal Gjøvikbanen					
279	14:00	BM69	1	T_279	BM69_1	P_279
281	15:09	BM69	1	T_281	BM69_1	P_281
283	16:09	BM69	1	T_283	BM69_1	P_283
285	17:19	BM69	1	T_285	BM69_1	P_285
!!!!	NSB Anbud, Oslo - Jaren Gjøvikbanen					
241	13:47	BM69	1	T_241	BM69_1	P_241
245	15:47	BM69	1	T_245	BM69_1	P_245
247	16:49	BM69	1	T_247	BM69_1	P_247
251	17:47	BM69	1	T_251	BM69_1	P_251
!!!!	NSB Anbud, Oslo - Gjøvik Gjøvikbanen					
207	13:07	BM69	1	T_207	BM69_1	P_207
209	15:07	BM69	1	T_209	BM69_1	P_209
211	16:13	BM69	1	T_211	BM69_1	P_211
213	17:07	BM69	1	T_213	BM69_1	P_213
!!!!	NSB Anbud, Hakadal - Oslo - Skøyen Gjøvikbanen					
282	15:28	BM69	1	T_282	BM69_1	P_282
!!!!	NSB Anbud, Jaren - Oslo Gjøvikbanen					
252	15:19	BM69	1	T_252	BM69_1	P_252
256	17:26	BM69	1	T_256	BM69_1	P_256
!!!!	NSB Anbud, Gjøvik - Oslo Gjøvikbanen					
214	13:34	BM69	1	T_214	BM69_1	P_214
216	15:35	BM69	1	T_216	BM69_1	P_216
218	17:34	BM69	1	T_218	BM69_1	P_218
!!!!	NSB Pt, IC linje 001, Oslo-Halden (Østfoldbanen)					
127	14:42	BM73	1	T_127	BM73_1	P_127
129	14:45	BM73	2	T_129	BM73_2	P_129
131	15:45	BM73	2	T_131	BM73_2	P_131
133	16:45	BM73	2	T_133	BM73_2	P_133
135	17:45	BM73	1	T_135	BM73_1	P_135
179	14:12	BM73	1	T_179	BM73_1	P_179
181	15:12	BM70	2	T_181	BM70_2	P_181
183	16:12	BM70	2	T_183	BM70_2	P_183
185	17:12	BM73	1	T_185	BM73_1	P_185
!!!!	NSB Pt, IC linje 001, Halden (Østfoldbanen)-Oslo					
130	14:08	BM73	1	T_130	BM73_1	P_130
132	15:08:00	BM73	1	T_132	BM73_1	P_132
134	16:08:00	BM73	1	T_134	BM73_1	P_134
136	17:08:00	BM73	1	T_136	BM73_1	P_136
138	18:08:00	BM73	1	T_138	BM73_1	P_138
!!!!	Fjerntog, Oslo - Askerbanen - Hønefoss					
63	16:00	BM73	2	T_63	BM73_2	P_63
!!!!	Fjerntog, Hønefoss - Askerbanen - Oslo					

2237	17:41	BM69	1	T_2237	BM69_1	P_2237
2279	14:11	BM69	1	T_2279	BM69_1	P_2279
2281	15:11	BM69	1	T_2281	BM69_1	P_2281
2283	16:11	BM69	1	T_2283	BM69_1	P_2283
2285	17:11	BM69	1	T_2285	BM69_1	P_2285
!!!!	NSB Pt, linje 550, Lysaker-Oslo-Moss (Østfoldbanen)					
1131	15:16	BM72	2	T_1131	BM72_2	P_1131
1133	16:16	BM72	2	T_1133	BM72_2	P_1133
1135	17:16	BM72	1	T_1135	BM72_1	P_1135
1179	14:46	BM72	1	T_1179	BM72_1	P_1179
1181	15:46	BM72	2	T_1181	BM72_2	P_1181
1183	16:46	BM72	2	T_1183	BM72_2	P_1183
1185	17:46	BM72	1	T_1185	BM72_1	P_1185
!!!!	NSB Pt, linje 550, Moss-Oslo-Lysaker (Østfoldbanen)					
1134	16:30	BM72	1	T_1134	BM72_1	P_1134
1178	14:00	BM72	1	T_1178	BM72_1	P_1178
1184	17:00	BM72	1	T_1184	BM72_1	P_1184
!!!!	NSB Pt, linje 460, Spikkestad-Askerbanen-Oslo-Romeriksporten-Kongsvinger					
1029	13:24	BM72	1	T_1029	BM72_1	P_1029
1031	14:24	BM72	1	T_1031	BM72_1	P_1031
1033	15:24	BM72	1	T_1033	BM72_1	P_1033
1035	16:24	BM72	1	T_1035	BM72_1	P_1035
1037	17:24	BM72	1	T_1037	BM72_1	P_1037
!!!!	NSB Pt, linje 460,Oslo S-Romeriksporte			T_!!!!		P_!!!!
1081	15:39	BM75	1	T_1081	BM75_1	P_1081
1083	16:39	BM75	1	T_1083	BM75_1	P_1083
!!!!	NSB Pt, linje 450, Spikkestad-Askerbanen-Oslo-Ski (Østfoldbanen)					
!!!!	NSB Pt, linje 460, Kongsvinger-Romeriksporten-Oslo-Drammenbanen-Spikkestad					
1028	13:02	BM72	1	T_1028	BM72_1	P_1028
1030	14:02	BM72	1	T_1030	BM72_1	P_1030
1032	15:00	BM72	1	T_1032	BM72_1	P_1032
1034	15:59	BM72	2	T_1034	BM72_2	P_1034
1036	17:05	BM72	2	T_1036	BM72_2	P_1036
!!!!	NSB Pt, linje 450, Moss (Østfoldbanen)-Oslo-Drammenbanen-Spikkestad					
1180	15:00	BM72	1	T_1180	BM72_1	P_1180
1182	16:00	BM72	1	T_1182	BM72_1	P_1182
!!!!	NSB Pt, linje 510, Lysaker-Oslo-Kolbotn (Østfoldbanen)					
2837	17:50	BM69	1	T_2837	BM69_1	P_2837
!!!!	NSB Pt, linje 500, Lysaker-Oslo-Ski (Østfoldbanen)					
2731	15:06	BM69	2	T_2731	BM69_2	P_2731
2733	16:06	BM69	2	T_2733	BM69_2	P_2733
2735	17:06	BM69	2	T_2735	BM69_2	P_2735
2779	14:36	BM69	2	T_2779	BM69_2	P_2779
2781	15:36	BM69	2	T_2781	BM69_2	P_2781
2783	16:36	BM69	2	T_2783	BM69_2	P_2783
2785	17:36	BM69	1	T_2785	BM69_1	P_2785
2831	14:50	BM69	2	T_2831	BM69_2	P_2831
2833	15:50	BM69	2	T_2833	BM69_2	P_2833
2835	16:50	BM69	2	T_2835	BM69_2	P_2835
2881	15:20	BM69	2	T_2881	BM69_2	P_2881
2883	16:20	BM69	2	T_2883	BM69_2	P_2883
2885	17:20	BM69	2	T_2885	BM69_2	P_2885
!!!!	NSB Pt, linje 510, Kolbotn (Østfoldbanen)-Oslo-Lysaker					
!!!!	NSB Pt, linje 500, Ski (Østfoldbanen)-Oslo-Lysaker					

829	13:30	BM74	1 T_829	BM74_1	P_829
831	14:30	BM74	1 T_831	BM74_1	P_831
833	15:30	BM74	2 T_833	BM74_2	P_833
835	16:30	BM74	2 T_835	BM74_2	P_835
837	17:30	BM74	1 T_837	BM74_1	P_837
!!!!	NSB IC Pt, linje 003 Oslo-Askerbanen-Drammen-Skien				
881	15:50	BM70	2 T_881	BM70_2	P_881
883	16:50	BM70	2 T_883	BM70_2	P_883
!!!!	NSB IC Pt, linje 003 Oslo-Askerbanen-Drammen-Tønsberg				
931	15:30	BM70	1 T_931	BM70_1	P_931
933	16:30	BM70	2 T_933	BM70_2	P_933
!!!!	NSB Pt, linje 450 Kongeberg-Drammen-Askerbanen-Oslo-Romeriksporten-Lillestrøm-GMB- Eidsvoll				
530	13:51	BM75	1 T_530	BM75_1	P_530
532	14:51	BM75	2 T_532	BM75_2	P_532
534	15:51	BM75	1 T_534	BM75_1	P_534
536	16:51	BM75	1 T_536	BM75_1	P_536
538	17:51	BM75	1 T_538	BM75_1	P_538
!!!!	NSB Pt, linje 450 Kongeberg-Drammen				
!!!!	NSB Pt, linje 450 Eidsvoll-GMB-Lillestrøm-Romeriksporten-Oslo-Askerbanen-Drammen-Kongeberg				
527	13:14	BM75	1 T_527	BM75_1	P_527
529	14:14	BM75	2 T_529	BM75_2	P_529
531	15:14	BM75	2 T_531	BM75_2	P_531
533	16:14	BM75	1 T_533	BM75_1	P_533
535	17:14	BM75	1 T_535	BM75_1	P_535
!!!!	NSB Pt, linje 450 Oslo-Askerbanen-Drammen-Kongeberg				
581	15:24	BM70	1 T_581	BM70_1	P_581
!!!!	NSB Pt, linje 450 Lysaker-Askerbanen-Drammen-Kongeberg				
583	16:33	BM70	1 T_583	BM70_1	P_583
!!!!	NSB Pt, linje 400, Asker-Drammensbanen-Oslo-Brynsbakken/Hovedbanen-Lillestrøm				
2130	14:46	BM69	2 T_2130	BM69_2	P_2130
2132	15:46	BM69	2 T_2132	BM69_2	P_2132
2134	16:46	BM69	1 T_2134	BM69_1	P_2134
2136	17:46	BM69	1 T_2136	BM69_1	P_2136
2178	14:16	BM69	1 T_2178	BM69_1	P_2178
2180	15:16	BM69	2 T_2180	BM69_2	P_2180
2182	16:16	BM69	1 T_2182	BM69_1	P_2182
2184	17:16	BM69	1 T_2184	BM69_1	P_2184
2230	14:32	BM69	1 T_2230	BM69_1	P_2230
2232	15:32	BM69	2 T_2232	BM69_2	P_2232
2234	16:32	BM69	1 T_2234	BM69_1	P_2234
2236	17:32	BM69	1 T_2236	BM69_1	P_2236
2278	14:02	BM69	1 T_2278	BM69_1	P_2278
!!!!	NSB Pt, linje 400, Lillestrøm-Brynsbakken/Hovedbanen-Oslo-Drammensbanen-Asker				
2129	13:56	BM69	1 T_2129	BM69_1	P_2129
2131	14:56	BM69	1 T_2131	BM69_1	P_2131
2133	15:56	BM69	1 T_2133	BM69_1	P_2133
2135	16:56	BM69	1 T_2135	BM69_1	P_2135
2137	17:56	BM69	1 T_2137	BM69_1	P_2137
2179	14:26	BM69	1 T_2179	BM69_1	P_2179
2181	15:26	BM69	1 T_2181	BM69_1	P_2181
2183	16:26	BM69	1 T_2183	BM69_1	P_2183
2185	17:26	BM69	1 T_2185	BM69_1	P_2185
2231	14:41	BM69	1 T_2231	BM69_1	P_2231
2233	15:41	BM69	1 T_2233	BM69_1	P_2233
2235	16:41	BM69	1 T_2235	BM69_1	P_2235

1635	17:10	BM75	1	T_1635	BM75_1	P_1635
1679	13:50	BM75	1	T_1679	BM75_1	P_1679
1681	14:50	BM75	1	T_1681	BM75_1	P_1681
1683	15:50	BM75	2	T_1683	BM75_2	P_1683
1685	16:50	BM75	1	T_1685	BM75_1	P_1685
1687	17:50	BM75	1	T_1687	BM75_1	P_1687
!!!!	NSB Pt: linje 440 Dal-Hoevedbanen-Lillestrøm-Romeriksporten-Oslo S-Askerbanen-Drammen					
1680	14:12	BM75	1	T_1680	BM75_1	P_1680
1682	15:12	BM75	2	T_1682	BM75_2	P_1682
1684	16:12	BM75	1	T_1684	BM75_1	P_1684
1686	17:12	BM75	1	T_1686	BM75_1	P_1686
!!!!	NSB Pt: linje 560 Skøyen-Oslo-Ski (Østfoldbanen)-Mysen					
1229	14:03	BM72	1	T_1229	BM72_1	P_1229
1231	15:03	BM72	1	T_1231	BM72_1	P_1231
1233	16:03	BM72	2	T_1233	BM72_2	P_1233
1235	17:03	BM72	1	T_1235	BM72_1	P_1235
!!!!	NSB Pt: linje 560 Skøyen-Oslo-Ski (Østfoldbanen)-Mysen-Rakkestad					
1281	15:33	BM72	1	T_1281	BM72_1	P_1281
1283	16:33	BM72	1	T_1283	BM72_1	P_1283
!!!!	NSB Pt, linje 560 Mysen-Ski (Østfoldbanen)-Oslo-Skøyen					
1230	13:56	BM72	1	T_1230	BM72_1	P_1230
1232	14:56	BM72	1	T_1232	BM72_1	P_1232
1234	15:56	BM72	1	T_1234	BM72_1	P_1234
1236	16:56	BM72	1	T_1236	BM72_1	P_1236
1238	17:56	BM72	1	T_1238	BM72_1	P_1238
!!!!	NSB Pt, linje 560 -Rakkestad-Mysen-Ski (Østfoldbanen)-Oslo-Skøyen					
!!!!	NSB IC Pt, linje 002 Drammen-Askerbanen-Oslo-Romeriksporten-Lillestrøm-GMB-Lillehammer					
327	14:35	BM74	1	T_327	BM74_1	P_327
329	13:59	BM74	1	T_329	BM74_1	P_329
331	14:59	BM74	2	T_331	BM74_2	P_331
333	15:59	BM74	2	T_333	BM74_2	P_333
335	16:59	BM74	2	T_335	BM74_2	P_335
337	17:59	BM74	1	T_337	BM74_1	P_337
!!!!	NSB IC Pt, linje 002 Lillehammer-GMB-Lillestrøm-Romeriksporten-Oslo-Askerbanen-Drammen					
328	12:17	BM74	1	T_328	BM74_1	P_328
330	13:17	BM74	1	T_330	BM74_1	P_330
332	14:17	BM74	1	T_332	BM74_1	P_332
334	15:17	BM74	1	T_334	BM74_1	P_334
336	16:15	BM74	1	T_336	BM74_1	P_336
338	17:17	BM74	1	T_338	BM74_1	P_338
!!!!	NSB IC Pt, linje 002 Hamar-GMB-Lillestrøm-Romeriksporten-Oslo					
!!!!	NSB IC Pt, linje 003 Larvik-Drammen-Askerbanen-Oslo-Romeriksporten-Lillestrøm-GMB-Eidsvoll					
828	14:57	BM74	1	T_828	BM74_1	P_828
830	13:53	BM74	1	T_830	BM74_1	P_830
832	14:53	BM74	1	T_832	BM74_1	P_832
834	15:53	BM74	1	T_834	BM74_1	P_834
836	16:53	BM74	1	T_836	BM74_1	P_836
838	17:53	BM74	1	T_838	BM74_1	P_838
!!!!	NSB Pt, linje 003 Skien-Drammen-Askerbanen-Oslo					
!!!!	NSB Pt, linje 003 Tønsberg-Drammen-Askerbanen-Oslo					
!!!!	NSB IC Pt, linje 003 Eidsvoll-GMB-Lillestrøm-Romeriksporten-Oslo-Askerbanen-Drammen-Larvik					
827	12:30	BM74	1	T_827	BM74_1	P_827

Train N	Departure	Train Type	Count of MU's c	Traffic	Train	Path
!!!!	Flytoget: Gardermoen - GMB - Lillestrøm - Romeriksporten - Oslo - Askerbanen - Drammen					
3754	14:15	BM71	2	T_3754	BM71_2	P_3754
3756	14:35	BM71	2	T_3756	BM71_2	P_3756
3758	14:55	BM71	1	T_3758	BM71_1	P_3758
3760	15:15	BM71	1	T_3760	BM71_1	P_3760
3762	15:35	BM71	1	T_3762	BM71_1	P_3762
3764	15:55	BM71	1	T_3764	BM71_1	P_3764
3766	16:15	BM71	1	T_3766	BM71_1	P_3766
3768	16:35	BM71	1	T_3768	BM71_1	P_3768
3770	16:55	BM71	1	T_3770	BM71_1	P_3770
3772	17:15	BM71	1	T_3772	BM71_1	P_3772
3774	17:35	BM71	1	T_3774	BM71_1	P_3774
3776	17:55	BM71	2	T_3776	BM71_2	P_3776
!!!!	Flytoget: Gardermoen - GMB - Lillestrøm - Romeriksporten - Oslo					
3556	14:45	BM71	1	T_3556	BM71_1	P_3556
3558	15:05	BM71	1	T_3558	BM71_1	P_3558
3560	15:25	BM71	1	T_3560	BM71_1	P_3560
3562	15:45	BM71	1	T_3562	BM71_1	P_3562
3564	16:05	BM71	1	T_3564	BM71_1	P_3564
3566	16:25	BM71	1	T_3566	BM71_1	P_3566
3568	16:45	BM71	2	T_3568	BM71_2	P_3568
3570	17:05	BM71	2	T_3570	BM71_2	P_3570
3572	17:25	BM71	1	T_3572	BM71_1	P_3572
3574	17:45	BM71	1	T_3574	BM71_1	P_3574
!!!!	Flytoget: Drammen - Askerbanen - Oslo Romeriksporten - Lillestrøm - GMB - Gardermoen					
3761	14:08	BM71	1	T_3761	BM71_1	P_3761
3763	14:28	BM71	1	T_3763	BM71_1	P_3763
3765	14:48	BM71	1	T_3765	BM71_1	P_3765
3767	15:08	BM71	1	T_3767	BM71_1	P_3767
3769	15:28	BM71	2	T_3769	BM71_2	P_3769
3771	15:48	BM71	2	T_3771	BM71_2	P_3771
3773	16:08	BM71	1	T_3773	BM71_1	P_3773
3775	16:28	BM71	1	T_3775	BM71_1	P_3775
3777	16:48	BM71	1	T_3777	BM71_1	P_3777
3779	17:08	BM71	1	T_3779	BM71_1	P_3779
3781	17:28	BM71	1	T_3781	BM71_1	P_3781
3783	17:48	BM71	1	T_3783	BM71_1	P_3783
!!!!	Flytoget: Oslo - Romeriksporten - Lillestrøm - GMB - Gardermoen					
3559	14:55	BM71	1	T_3559	BM71_1	P_3559
3561	15:15	BM71	1	T_3561	BM71_1	P_3561
3563	15:35	BM71	1	T_3563	BM71_1	P_3563
3565	15:55	BM71	1	T_3565	BM71_1	P_3565
3567	16:15	BM71	1	T_3567	BM71_1	P_3567
3569	16:35	BM71	1	T_3569	BM71_1	P_3569
3571	16:55	BM71	1	T_3571	BM71_1	P_3571
3573	17:15	BM71	2	T_3573	BM71_2	P_3573
3575	17:35	BM71	2	T_3575	BM71_2	P_3575
3577	17:55	BM71	1	T_3577	BM71_1	P_3577
!!!!	NSB Pt: linje 440 Drammen-Askerbanen-Oslo S - Romeriksporten-Lillestrøm-Hovedbanen-Dal					
1629	14:10	BM75	1	T_1629	BM75_1	P_1629
1631	15:10	BM75	2	T_1631	BM75_2	P_1631
1633	16:10	BM75	2	T_1633	BM75_2	P_1633

Vedlegg 2

```
!!!! Tittel:                                3vogns 69-sett
!!!! Filnavn:                               Tp69_1.train
!!!! Ansvarlig:                             SD      Dato: 2003-10-06
!!!! Kontrollert av:                        FrJ     Dato: 2003-11-11
!!!! Beskrivelse:                           Lokaltog type 69 med tre vogner
(BM+B+BS)
!!!!
!!!!                                                Vogn    Vekt    Pass
Passvekt        Dynvekt Lengde
!!!!                                                BM69d   60,5    93
4,55                            25,06
!!!!                                                B69d    35,0    114
27,04
!!!!                                                BS69d   35,5    93
25,06
!!!!                                                Sum             131
300             14,7                                77,16
!!!!                                                Total   145,7
!!!!
!!!!                                                70% belegg, 70 kg per
passasjer
!!!!                                                Gangmotstand fra X12
(x12_runres.xls) Usikker, beregnet som
!!!!                                                middel mellom 2 vogns og 4
vogns X12.
!!!!                                                Roterende masse fra "Estimat
av dynamisk vekt tp69.xls"
!!!! Arvet fra:
!!!!                                                Filnavn: BM691.txt
!!!!                                                Ansvarlig: FrJ   Dato: 2000
!!!!                                                Kontrolert av:   Dato:
!!!!                                                Beskrivelse: Enkelt togsett
(Motorvogn,styrevogn og mellomvogn)
!!!!Kommentar:
!!!!Strømgrensen på 160 A er tilnærmet ved å legge inn en effektbegrensning.
!!!!Dette begrenser maksimal strøm til tilnærmet riktig verdi. Det er imidl.
endel avvik ifht trekkraftkurven

 THYRISTORTRAIN Tp69_1
 {
 DYNMASS    155.7
 MASS       145.7
 ADHMASS    65.0
 MAXSPEED   130
 SPEEDMSORT KM/H
 SLENGTH    77.16
 MCDIST     38.5
 CR0        6.38
 CR1        55
 CRMIN      56
 RRA        2.0
 RRB        21.89E-3
 RRC        0.544E-3
!!!! RRSTART  0.
 ADH1       7.5
 ADH2       44.
 TC         0.5
 UNOM       15.
 PAUX       0.09
 PFAUX      0.8
```

```
 P0          0.002
 BRIDGES     4
 UMOTMAX     100
 FIRSTLIM    FLUX
 BASESPEED   62.
 BASECOSFI   0.84

 ACCREFV
 {
 0.   A  1.1  R 0.85  ;
 130. A  1.1  R 0.85  ;
 }
 FVTRAINMAX
 {
 0.   FMOT 130     EFF 30 ;
 20.  FMOT 130     EFF 68 ;
 40.  FMOT 130     EFF 76 ;
 60.  FMOT 130     EFF 80 ;
 130. FMOT 130     EFF 80 ;
 }
!!!! TRAINLIMIT1 130*62
 TRAINLIMIT1 8.06E3
 TRAINLIMIT2 37.
 PUSUPPLYLIM
 {
 10.5  PMOT  0.00     ;
 12.0  PMOT  0.89     ;
 15.0  PMOT  1.92     ;
 18.0  PMOT  1.92     ;
 18.1  PMOT  0.00     ;
 }
 FUSUPPLYLIM
 {
 10.5  FMOT  130   ;
 18.0  FMOT  130   ;
 }
 }
```

```
!!!! Tittel:                                Enkelsett Tp70
!!!! Filnavn:                               Tp70_1.train
!!!! Ansvarlig:                             SD      Dato: 2003-10-27
!!!! Kontrollert av:                        FrJ     Dato: 2003-11-11
!!!! Beskrivelse:                           Intercitytog med enkelsett type 70
!!!!
!!!!                                                Vogn    Vekt    Pass
Passvekt        Dynvekt Lengde
!!!!                                                BFM             66,0    40
1,96                            25,05
!!!!                                                B               44,0    80
26,40
!!!!                                                B               44,0    80
26,40
!!!!                                                ABS             52,0    37
26,95
!!!!                                                Total   206,0   237
11,6                            104,8
!!!!                                                Sum     217,6
!!!!                                                70% belegg, 70 kg per
passasjer
!!!!                                                Roterende masse 221-207=14
tonn (se brvpros-oversikt-sept02.xls)
!!!! Arvet fra:
!!!!                                                H:\Tap Flytoget\Store
simuleringsfil\trains\bm70_1.txt
!!!!                                                ASYNCTRAIN BM70_1
!!!! Data gjelder enkelt togsett (230 seter), tot. ant. passasjerer 230, 80%
fullt, 70 kg pr. passasjer
!!!! Kommentarer:
!!!! Mangler underlag på bremsekurve. Opprinnelse ikke kjent: FrJ/2003-11-11
!!!! Rullemotstand lik 69 sett er ikke verifisert, virker høyt:
FrJ/2003-11-11

 ASYNCTRAIN Tp70_1
 {

 DYNMASS    232
 MASS       218
 ADHMASS    68
 MAXSPEED   160
 SPEEDMSORT KM/H
 SLENGTH    104
 MCDIST     52
 CR0        6.38
 CR1        55
 CRMIN      56
 RRA        2.668
 RRB        29.18E-3
 RRC        0.647E-3
!!!! RRSTART  0.
 ADH1       7.5
 ADH2       44.
 TC         0.5
 UNOM       15.
 PAUXB      0.120
 PFAUXB     0.8
 PAUXT      0.
 PFAUXT     0.8
 P0         0.004
```

```
 ACCREFV
 {
 0.   A  1.0  R 0.85  ;
 160. A  1.0  R 0.85  ;
 }
 FIU
 {
 11.5  FIMOT  0.    FIBRAKE  24.  ;
 13.0  FIMOT  0.    FIBRAKE  26.  ;
 13.5  FIMOT  -10.               ;
 14.0  FIMOT  -19.  FIBRAKE  28.  ;
 14.5  FIMOT  -20.  FIBRAKE  20.  ;
 15.0  FIMOT  -11.  FIBRAKE  11.  ;
 16.0  FIMOT  8.    FIBRAKE  -8.  ;
 17.0  FIMOT  25.   FIBRAKE  -25. ;
 18.0  FIMOT  39.   FIBRAKE  -39. ;
 }

 FVTRAINMAX
 {
 0.   FMOT 130  FELBRAKE  83   EFF 45 ;
 10.  FMOT 130  FELBRAKE  83   EFF 62 ;
 30.  FMOT 130  FELBRAKE  83   EFF 78 ;
 50.  FMOT 130  FELBRAKE  83   EFF 82 ;
 160. FMOT 130  FELBRAKE  83   EFF 82 ;
}
!!!! TRAINLIMIT1 130*48
 TRAINLIMIT1 6.24E3
 TRAINLIMIT2 35.
 PUSUPPLYLIM
 {
 10.9  PMOT  0.00   PELBRAKE  1.5 ;
 11.0  PMOT  1.76                 ;
 13.0  PMOT  2.08                 ;
 13.5  PMOT  2.13                 ;
 18.0  PMOT  2.13   PELBRAKE  1.5 ;
 18.1  PMOT  0.00   PELBRAKE  0.0 ;
 }
FUSUPPLYLIM
 {
 11.0  FMOT  150   ;
 18.0  FMOT  150   ;
 }
}
```

Required vehicle information for power system studies and simulations

The following information must be prepared and submitted to respective National Rail Administration in accordance with requirements for acceptance of vehicle to national rail network in Norway and/or Sweden. The information is needed for traction power system simulations in Simpow ® Tracfeed ® simulations in order to develop traction power system for future, investigate power systems problems and do energy demand and loss calculations.

No comment means information not found/received.

Vehicle: Flytoget cl 71 FIM, four cars

Data required for all vehicles:

Item number	Description	Comment
1	Motor type (asynchronous motor or direct-current motor)	Async
2	Dynamic mass [metric tons] of vehicle including load	11.5 ton
3	Mass [metric tons] of vehicle including load	246.1 ton
4	Adhesion mass [metric tons] of vehicle	130.6 ton
5	Maximum speed [km/h] for vehicle	210 km/h
6	Length [m] of vehicle	109 m
7	Curve resistance CR0 [kNm/tons] and CR1 [m] as function of curve radius [m] as in formula (curve resistance)=CR0/((curve radius)-CR1)·MASS	CR0 = 6.33 kN/ton CR1 = 55 m
8	Minimum allowed curve radius [m] for the vehicle	90 m for uncoupled cars 120 m for coupled cars
9	Running resistance RRA [kN], RRB [kN/(km/h)] and RRC [kN/(km/h)^2] on straight track as function of speed [km/h] in formula (running resistance)=RRA+RRB·v+RRC·v^2	RRA = 2.655 RRB = 0.0114 RRC = 0.30038
10	Adhesion coefficients ADH1 [km/h] and ADH2 [km/h] in adhesion formula (adhesion)=ADHCOEFF+ADH1/(speed+ADH2). ADHCOEFF is track dependent and in this simulations presumed to be 0.161.	ADH1 = 7.5 ADH2 = 44
11	Nominal voltage [kV] at current collector	15.0 kV
12	Active power consumption [MW] for auxiliary power, train heating and air condition which is taken directly from the main transformer (no load losses not included)	Summer 215 kW Winther 183 kW
13	Power factor [] at zero speed for auxiliary power, train heating and air condition which is taken directly from the main transformer	Summer 0.83 Winther 0.93
14	Losses [MW] for the tractive equipment from current collector to wheel at no load, for instance the no load losses of the main transformer	Summer 10.2 kW Winther 8.92 kW
15	Maximum and continuous curve for tractive and	See diagram 2-3 in

	electric braking effort [kN] as function of speed [km/h] at nominal voltage	3EST000214-4045 and FIM Performance R0.xls
16	Desired acceleration and retardation [m/s^2] as function of speed [km/h]	A = no limitation implemented. Typical value in operation is 0.8* R = 0.9 alternatively 0.6*
17	Efficiency [%] for maximum tractive effort from current collector to wheel at maximum tractive effort as function of speed [km/h]. Auxiliary power not included	See FIM Performance R0.xls
18	Maximum power consumption and regeneration [MW] (measured at current collector) as function of contact line voltage [kV]. Power consumption for passenger coaches if vehicle is locomotive to be added.	See FIM Performance R1.xls. Valid in both traction and braking (there is no additional limit to braking effort point 17*)
19	Maximum tractive and braking effort [kN] as function of contact line voltage [kV]	See FIM Performance R1.xls
20	Main circuit schematics	See 3EST000208-7439
21	Filter configuration and component values/data including main transformer	No filters, see "Transformer impedance FIM.pdf", Windings a1b1 and a2b2 are not used.
22	Admittance frequency response including control system	See FIM "Input admittance.xls"
23	Software version(s)	VCU LTAA30_2.0.0.0 LCM LTAA50A0 MCM LTAA51A0 ACM LTAA52A0

Additional data required for phase angle controlled (thyristor) vehicles: N/A, removed

Additional data required for inverter vehicles:

Item number	Description	Comment
28	Power angle alternative power factor (measured at current collector) for power consumption and regeneration as function of contact line voltage [kV]	0.98-1.00 independent of line voltage
29	Active power consumption [MW] for auxiliary power, train heating and air condition which is taken from the converter bridge	208 kW
30	Power factor [] at zero speed for auxiliary power, train heating and air condition which is taken from the converter bridge	0.9

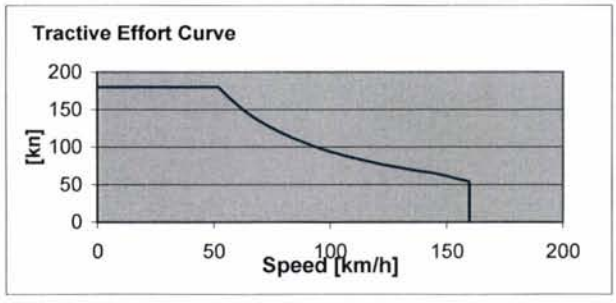
General comments: * = Information given by Jonas Hagvag in meeting 2009-04-24

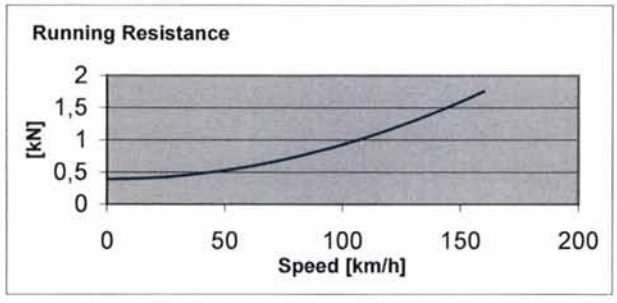
Date and signature: SD 2009-10-09

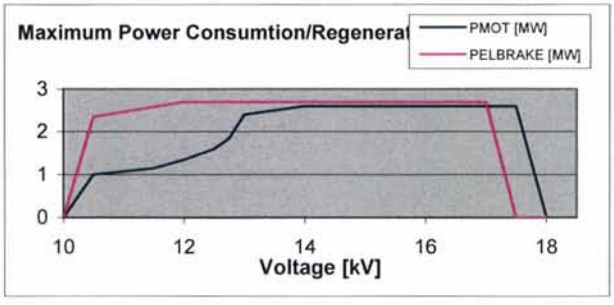
Asynchronous train BM72

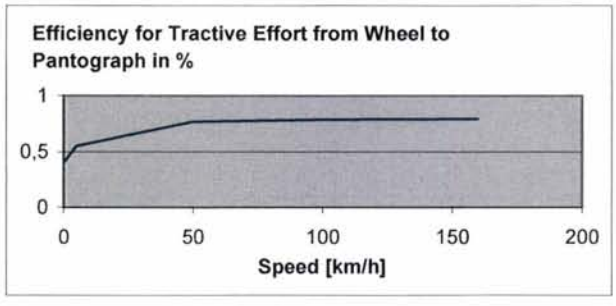
	Keyword	Value	Unit
Name of Train	ID	BM72	
Description of Train	NSB EMU Class 72 4 cars		
Dynamic mass including load	DYNMASS	214,5	[metric tons]
Mass of train including load	MASS	205,2	[metric tons]
Adhesion mass of train	ADHMASS	71,4	[metric tons]
Maximum speed	MAXSPEED	160	[km/h]
Speedmargin	SPEEDM	0	
Speedsort	SPEEDSORT	KM/H	
Signal length of train	SLENGHT	84,2	[m]
Distance between mass center and front of train	MCDIST	42,1	[m]
Curve resistance parameter 0	CR0	6,38	[kNm/tons]
Curve resistance parameter 1	CR1	55	[m]
Minimum allowed curve radius	CRMIN	56	[m]
Running resistance param. 1	RRA	0,38988	[kN]
Running resistance param. 2	RRB	0,00E+00	[kN/(km/h)]
Running resistance param. 3	RRC	5,34E-05	[kN/(km/h)^2]
Adhesion parameter 1	ADH1	7,5	[km/h]
Adhesion parameter 2	ADH2	44	[km/h]
Timeconstant for delay of pantograph current	TC	0,5	[s]
Nominal voltage at the patograph	UNOM	15	[kV]
Auxiliary Power taken from Converter Brigde	PAUXB	0	[MW]
Auxiliary Power factor at Converter Brigde	PFAUXB	0	[]
Auxiliary Power taken from Transformer	PAUXT	0,17	[MW]
Auxiliary Power factor at Transformer	PFAUXT	0,997	[]
Tractive Equipment No Load Losses	P0	0,0008	[MW]
Maximum value of F*V from the Tractive Effort	TRAINLIMIT1	9,38E+03	[kN*km/h]
Tractive effort at MAXSPEED and UNOM	TRAINLIMIT2	53,6	[kN]

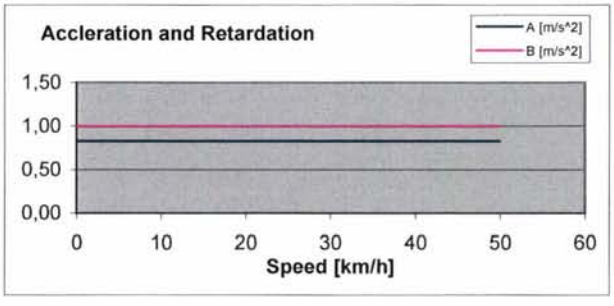
Characteristics for Asynchronous train BM72

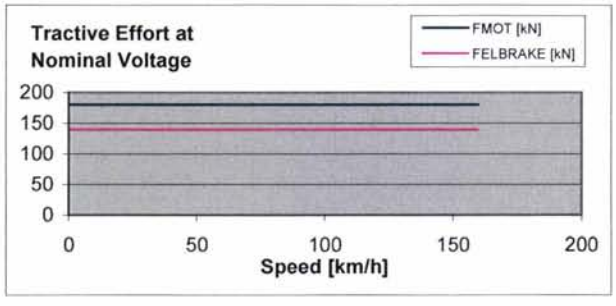


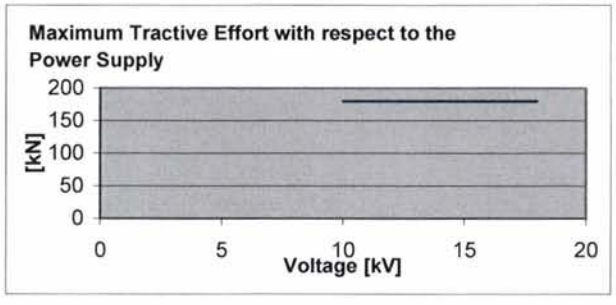


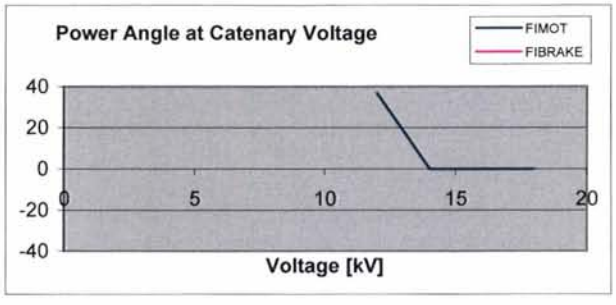












Asynchronous train BM73

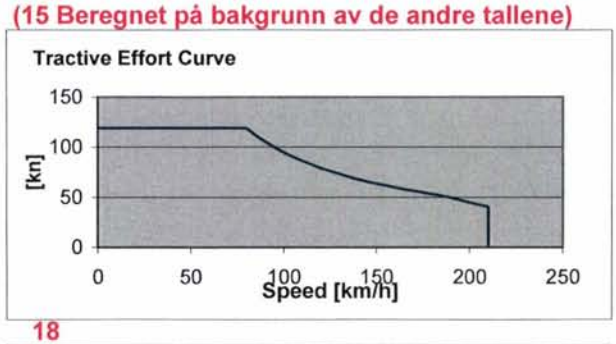
Jernbaneverket
BANVERKET

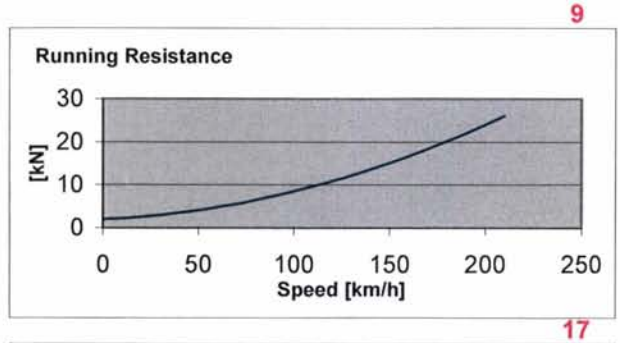
	Keyword	Value	Unit	
Name of Train	ID	BM73		
Description of Train	NSB EMU Class 73 4 cars			
Dynamic mass including load	DYNMASS	233,1	[metric tons]	2
Mass of train including load	MASS	222	[metric tons]	3
Adhesion mass of train	ADHMASS	96,2	[metric tons]	4
Maximum speed	MAXSPEED	210	[km/h]	5
Speedmargin	SPEEDM	0		-
Speedsort	SPEEDSORT	KM/H		-
Signal length of train	SLENGHT	108,8	[m]	6
Distance between mass center and front of train	MCDIST	54,4	[m]	-
Curve resistance parameter 0	CR0	6,38	[kNm/tons]	7
Curve resistance parameter 1	CR1	55	[m]	7
Minimum allowed curve radius	CRMIN	56	[m]	8
Running resistance param. 1	RRA	2	[kN]	9
Running resistance param. 2	RRB	1,82E-02	[kN/(km/h)]	9
Running resistance param. 3	RRC	4,60E-04	[kN/(km/h)^2]	9
Adhesion parameter 1	ADH1	7,5	[km/h]	10
Adhesion parameter 2	ADH2	44	[km/h]	10
Timeconstant for delay of pantograph current	TC	0,5	[s]	-
Nominal voltage at the patograph	UNOM	15	[kV]	11
Auxiliary Power taken from Converter Brigde	PAUXB	0,3	[MW]	29
Auxiliary Power factor at Converter Brigde	PFAUXB	0,8	[]	30
Auxiliary Power taken from Transformer	PAUXT	0	[MW]	12
Auxiliary Power factor at Transformer	PFAUXT	0,8	[]	13
Tractive Equipment No Load Losses	P0	0,004	[MW]	14
Maximum value of F*V from the Tractive Effort	TRAINLIMIT1	9,50E+03	[kN*km/h]	-
Tractive effort at MAXSPEED and UNOM	TRAINLIMIT2	40,5	[kN]	-

Characteristics for Asynchronous train BM73

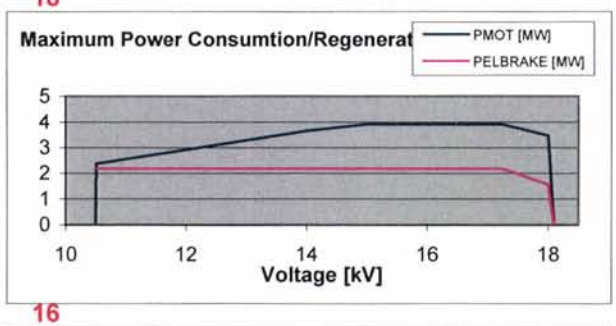
(15 Beregnet på bakgrunn av de andre tallene)

9

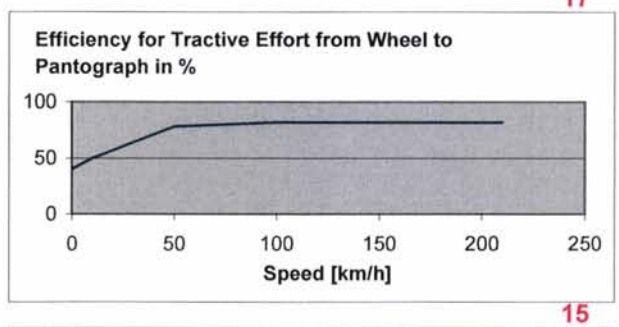




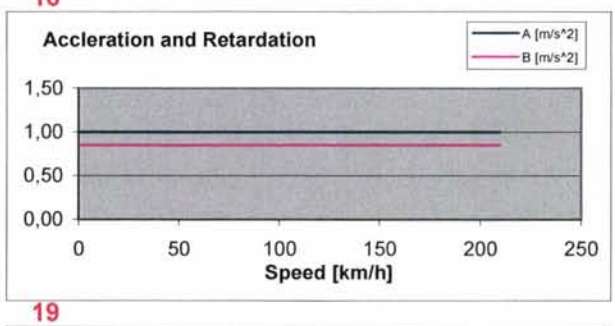
18



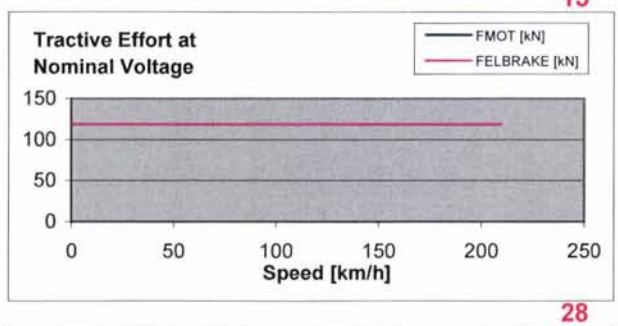
17



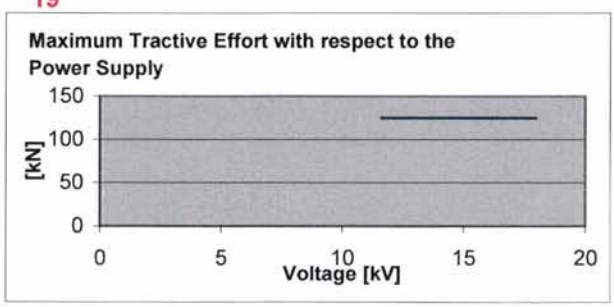
16



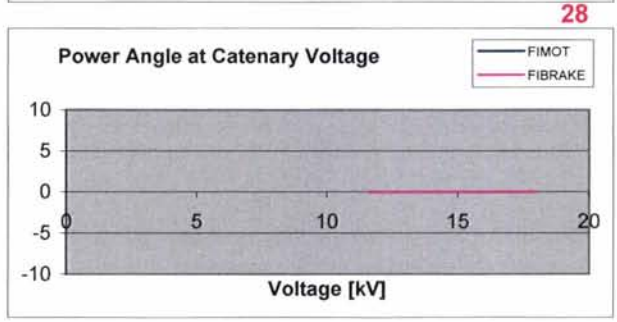
15



19



28



Required vehicle information for power system studies and simulations

The following information must be prepared and submitted to respective National Rail Administration in accordance with requirements for acceptance of vehicle to national rail network in Norway and/or Sweden. The information is needed for traction power system simulations in Simpow ® Tracfeed ® simulations in order to develop traction power system for future, investigate power systems problems and do energy demand and loss calculations.

No comment means information not found/received.

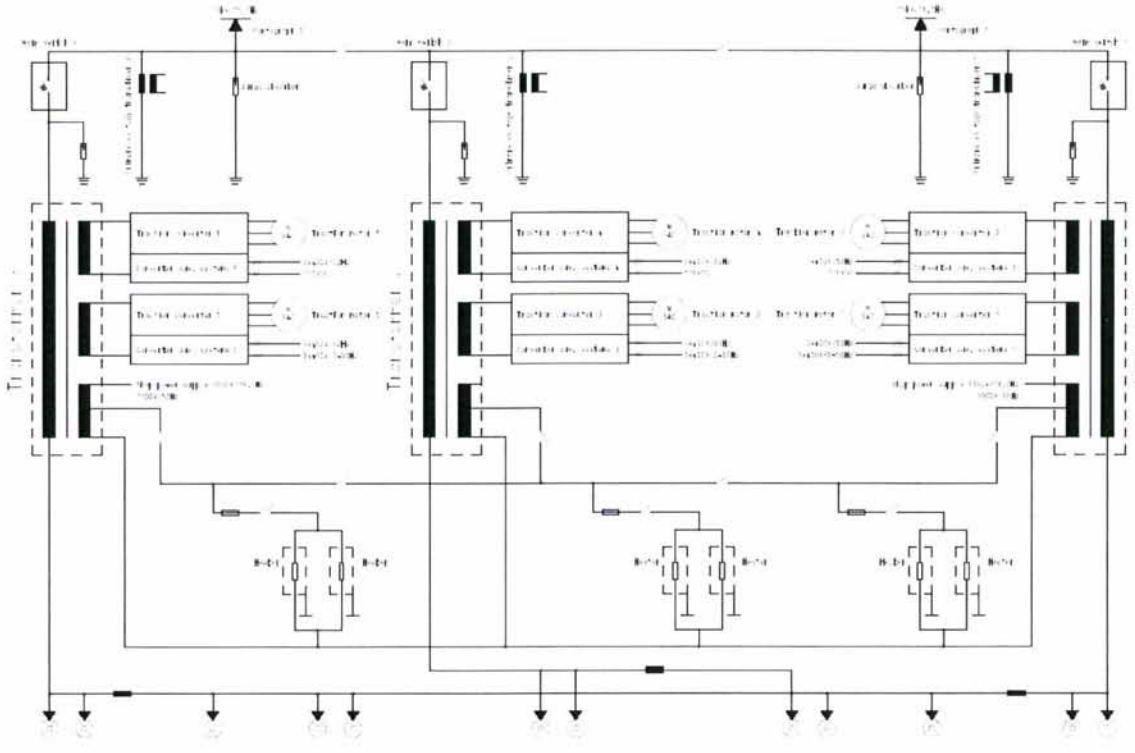
Vehicle: NSB FLIRT

Data required for all vehicles:

Item number	Description	Comment
1	Motor type (asynchronous motor or direct-current motor)	Asynchronous
2	Dynamic mass [metric tons] of vehicle including load	1.075 * static mass (see item no.3)
3	Mass [metric tons] of vehicle including load	220 t (empty)
4	Adhesion mass [metric tons] of vehicle	109 t
5	Maximum speed [km/h] for vehicle	200 km/h
6	Length [m] of vehicle	106 m
7	Curve resistance CR0 [kNm/tons] and CR1 [m] as function of curve radius [m] as in formula (curve resistance)=CR0/((curve radius)-CR1)·MASS	f = gauge / (2*R) = 0.72 / R
8	Minimum allowed curve radius [m] for the vehicle	
9	Running resistance RRA [kN], RRB [kN/(km/h)] and RRC [kN/(km/h)^2] on straight track as function of speed [km/h] in formula (running resistance)=RRA+RRB·v+RRC·v^2	F [N] = m [kg] * 9.81 * (0.0012 + v^2 [km/h] * 0.1235 * 10^{-6})
10	Adhesion coefficients ADH1 [km/h] and ADH2 [km/h] in adhesion formula (adhesion)=ADHCOEFF+ADH1/(speed+ADH2). ADHCOEFF is track dependent and in this simulations presumed to be 0.161.	a = (7.5 / v + 44) + 0.161
11	Nominal voltage [kV] at current collector	15 kV
12	Active power consumption [MW] for auxiliary power, train heating and air condition which is taken directly from the main transformer (no-load losses not included)	Taken directly from transformer is only heating current. Other auxiliary consumers are supplied from the converter`s DC link.

		Maximum power (=installed power) for heating is 250 kW. Power consumption in winter at -15 °C: 150 kW (heating)
13	Power factor [] at zero speed for auxiliary power, train heating and air condition which is taken directly from the main transformer	1.00 (>>0.98) (heating is taken from transformer winding=ohmic, everything else from DC link "beyond" the line converter="quasi ohmic")
14	Losses [MW] for the tractive equipment from current collector to wheel at no-load, for instance the no-load losses of the main transformer	appr. 16 kW (all converters in diode rectification mode)
15	Maximum and continuous curve for tractive and electric braking effort [kN] as function of speed [km/h] at nominal voltage	See xls table
16	Desired acceleration and retardation [m/s^2] as function of speed [km/h]	Acceleration: max. 1.4m/s2 Deceleration: max. 0.60/0.75/0.90/1.00 m/s2 (depends on Master Controller setting)
17	Efficiency [%] for maximum tractive effort from current collector to wheel at maximum tractive effort as function of speed [km/h]. Auxiliary power not included	See xls table
18	Maximum power consumption and regeneration [MW] (measured at current collector) as function of contact line voltage [kV]. Power consumption for passenger coaches if vehicle is locomotive to be added.	See xls table
19	Maximum tractive effort [kN] as function of contact line voltage [kV]	n.a.
20	Main circuit schematics	See below
21	Filter configuration and component values/data including main transformer	no filter
22	Admittance frequency response including control system	
23	Software version(s)	

Main Circuit Schematics (as of Concept Design)



Additional data required for phase angle controlled (thyristor) vehicles:

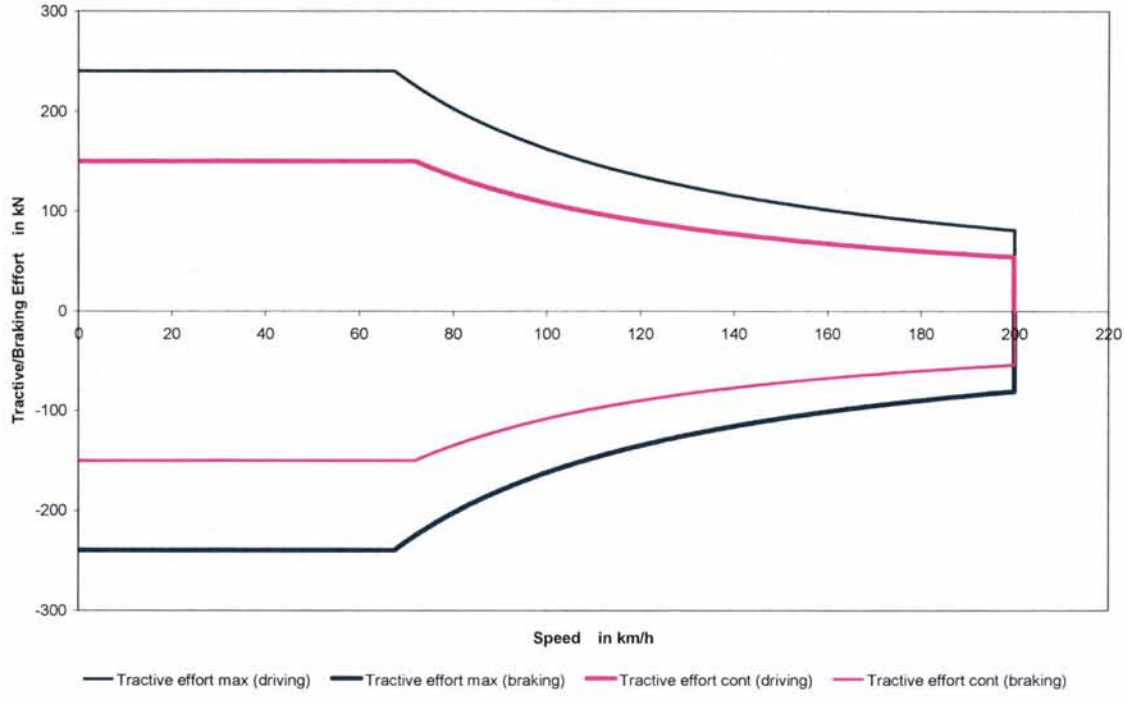
Item number	Description	Comment
24	Number of converter bridges in series with one motor	
25	Maximum allowed voltage between the motor's terminals under the worst conditions in [%]	
26	First limitation for the motors; current or flux	
27	Power factor [] of the motor when the control is with fully advanced angle	

Additional data required for inverter vehicles:

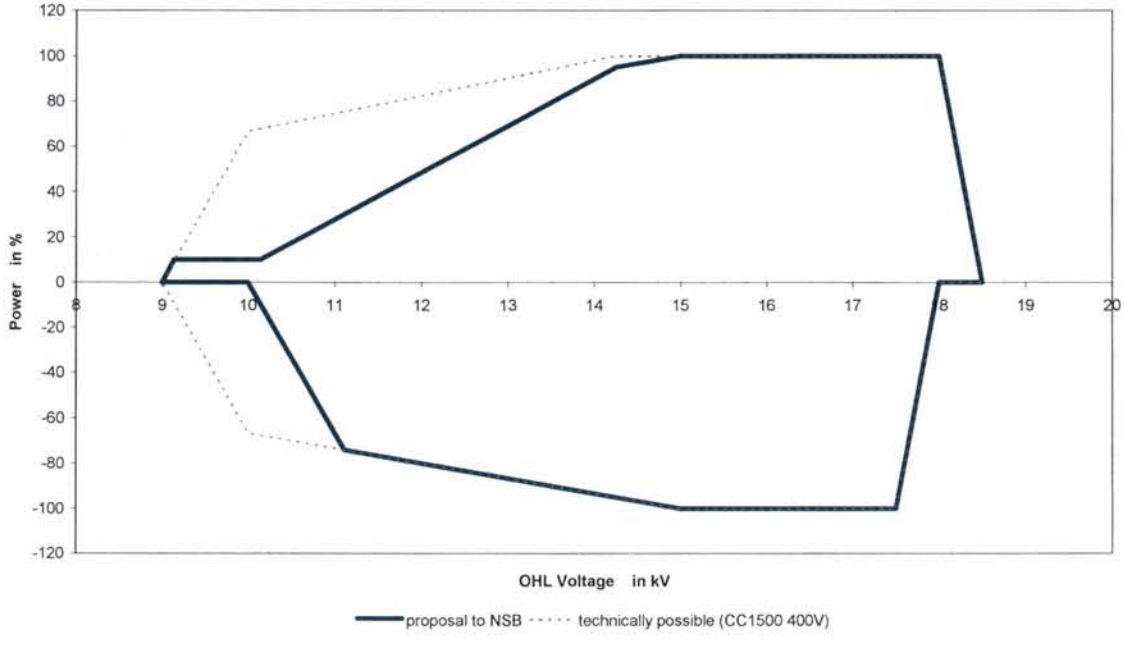
Item Number	Description	Comment
28	Power angle alternative power factor (measured at current collector) for power consumption and regeneration as function of contact line voltage [kV]	See xls table Note, that the reactive power correction will be subject to adjustment during type tests (related with network stability test).
29	Active power consumption [MW] for auxiliary power, train heating and air condition which is taken from the converter bridge	In winter at -15°C: 45 kW (traction aux) In summer at +25°C: 50 kW (traction aux) + 25 kW (cooling). Maximum installed power fro cooling 180 kVA.

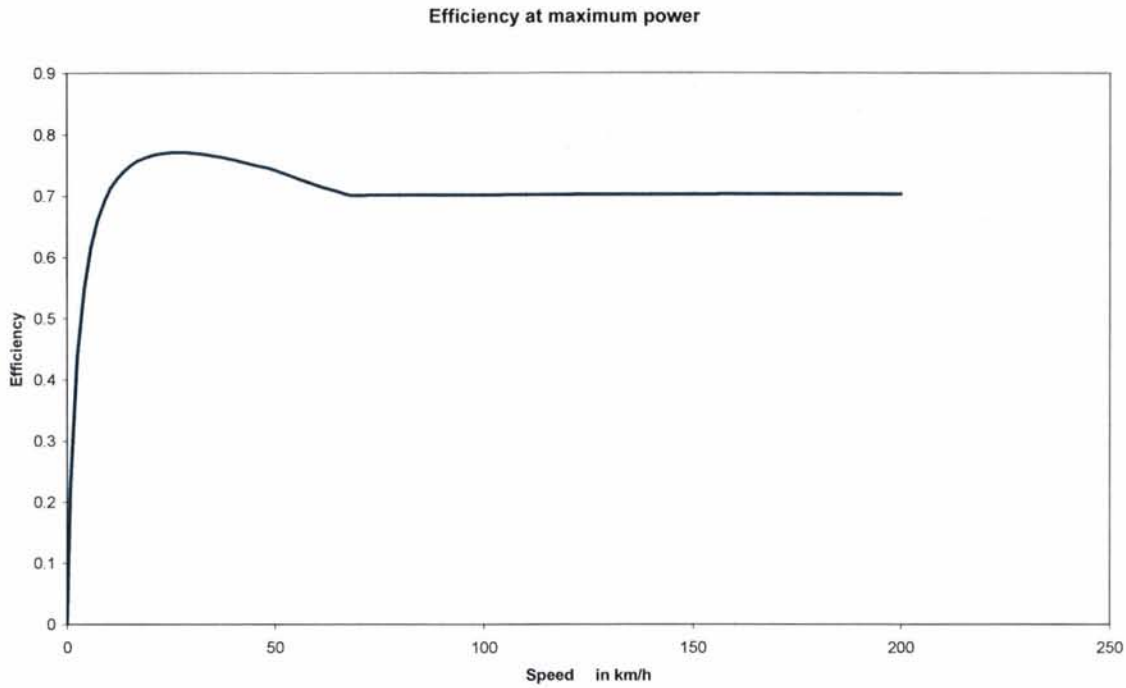
30	Power factor [] at zero speed for auxiliary power, train heating and air condition which is taken from the converter bridge	appr. 0.80

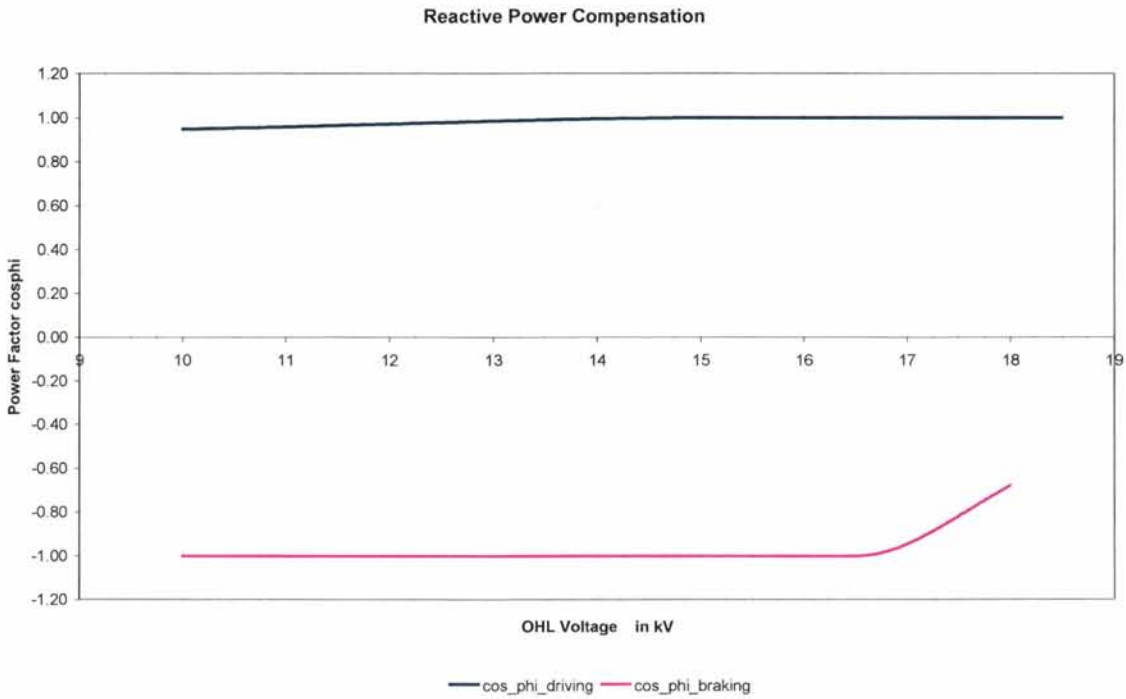
General comments:
Date and signature: _____



OHL Voltage Dependent Power Reduction




Efficiency at maximum power
Efficiency
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
50
100
150
200
250
Speed in km/h


Reactive Power Compensation
Power Factor cosphi
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
-0.20
-0.40
-0.60
-0.80
-1.00
-1.20
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
OHL Voltage in kV
cos_phi_driving
cos_phi_braking

```
!!!! Tittel:                                El14 med 800 tonn
!!!! Filnavn:                               El14_800.train
!!!! Ansvarlig:                             SD      Dato: 2003-09-26
!!!! Kontrollert av:                        Dato:
!!!! Beskrivelse:                           Godstog Enkel El14 med 800 tonn
lastvekt
!!!! Arvet fra:
!!!!                                                EL14 med 1355tonn totalvekt
!!!!                                                Utført av: FrJ  Dato:
27.06.00

 ASYNCTRAIN El14_800
 {
 DYNMASS     955.5
 MASS        905
 ADHMASS     105
 MAXSPEED    120
 SPEEDMSORT KM/H
 SLENGTH     507
 MCDIST      253.5
 CR0         6.38
 CR1         55
 CRMIN       56
 RRA         10.228
 RRB         7.839E-2
 RRC         3.781E-3
 COASTINGGRAD      -15
 COASTINGDIST      1.0
 COASTINGMINSPEED 40
!!!! RRSTART  0.
 ADH1        7.5
 ADH2        44.
 TC          0.5
 UNOM        15.
 PAUXB       0.
 PFAUXB      0.8
 PAUXT       0.040
 PFAUXT      0.8
 P0          0.005

 ACCREFV
 {
 0.   A  0.5  R 0.45  ;
 120. A  0.5  R 0.45  ;
 }
 FIU
 {
 10.5  FIMOT  35.   FIBRAKE  -35. ;
 12.0  FIMOT  31.   FIBRAKE  -31. ;
 13.5  FIMOT  27.   FIBRAKE  -27. ;
 15.0  FIMOT  25.   FIBRAKE  -25. ;
 }

 FVTRAINMAX
 {
 0.   FMOT 245  FELBRAKE  0   EFF 17 ;
 20.  FMOT 245  FELBRAKE  0   EFF 53 ;
 40.  FMOT 245  FELBRAKE  0   EFF 73 ;
 55.  FMOT 245  FELBRAKE  0   EFF 82 ;
 72.  FMOT 231  FELBRAKE  0   EFF 85 ;
```

```
 100. FMOT 231  FELBRAKE  0   EFF 89 ;
 120. FMOT 231  FELBRAKE  0   EFF 89 ;
 }
!!!!  TRAINLIMIT1 231*72
 TRAINLIMIT1 16.63E3
 TRAINLIMIT2 117.
 PUSUPPLYLIM
 {
 10.4  PMOT  0.01    PELBRAKE  0. ;
 10.5  PMOT  2.4                  ;
 12.0  PMOT  3.3                  ;
 13.5  PMOT  4.3                  ;
 15.0  PMOT  5.5                  ;
 18.0  PMOT  5.5     PELBRAKE  0. ;
 }

 FUSUPPLYLIM
 {
 10.5  FMOT  300   ;
 18.0  FMOT  300   ;
 }
 }
```

```
!!!! Tittel:                    El16 800 tonn
!!!! Filnavn:                           El16_800.train
!!!! Ansvarlig:                         SD      Dato: 2003-09-26
!!!! Kontrollert av:                    FrJ     Dato: 2003-11-06
!!!! Beskrivelse:                      Godstog Enkel El16 med 800 tonn
lastvekt

 THYRISTORTRAIN El16_800
 {
 DYNMASS          935
 MASS             880
 ADHMASS          80
 MAXSPEED         140
 SPEEDMSORT       KM/H
 SLENGTH          475
 MCDIST           237.5
 CR0              6.38
 CR1              55
 CRMIN            56
 RRA              10.003
 RRB              7.306E-02
 RRC              3.569E-03
 COASTINGGRAD     -15
 COASTINGDIST     1.0
 COASTINGMINSPEED 40
!!!! RRSTART      0.
 ADH1             7.5
 ADH2             44.
 TC               0.5
 UNOM             15.
 PAUX             0.04
 PFAUX            0.8
 PAUXB            -0.6 !!!!Reaktiv effekt produsert av
telefilterkondensatorene
 P0               0.007
 BRIDGES          2
 UMOTMAX          100
 FIRSTLIM         FLUX
 BASESPEED        72.
 BASECOSFI        0.88

 ACCREFV
 {
 0.   A  0.5  R 0.45  ;
 140. A  0.5  R 0.45  ;
 }
 FVTRAINMAX
 {
 0.   FMOT 300     EFF 30 ;
 20.  FMOT 298     EFF 68 ;
 60.  FMOT 294     EFF 80 ;
 140. FMOT 285     EFF 80 ;
 }

!!!! TRAINLIMIT1 293*72
 TRAINLIMIT1 21.1E3
 TRAINLIMIT2 132.
 PUSUPPLYLIM
 {
 10.0  PMOT  0.0     ;
```

```
10.5  PMOT  5.1     ;
13.5  PMOT  6.6     ;
15.0  PMOT  7.3     ;
18.0  PMOT  7.3     ;
18.1  PMOT  0.0     ;
}
FUSUPPLYLIM
{
10.5  FMOT  0.      ;
13.5  FMOT  300.    ;
18.0  FMOT  300.    ;
}
}
```

```
!!!! Tittel:                                El18 med 8 tp7-vogner
!!!! Filnavn:                               El18_8B7.train
!!!! Ansvarlig:                             SD      Dato: 2003-10-07
!!!! Kontrollert av:                        Dato:
!!!! Beskrivelse:                           Fjerntog med El18+AB7+5B7+BC7+FR7,
70% belegg, 70 kg/pass
!!!! Arvet fra:
!!!!                                              EL18 med 8 x B7 vogner
!!!!                                              Utført av: FrJ  Dato:
17.10.00
!!!!

 ASYNCTRAIN El18_8B7
 {
 DYNMASS 435
 MASS 409.2
 ADHMASS 80
 MAXSPEED 200
 SPEEDMSORT KM/H
 SLENGTH 227
 MCDIST 113.5
 CR0  6.38
 CR1  55
 CRMIN  56
 RRA  4.24
 RRB  1.263E-2
 RRC  1.066E-3
!!!! RRSTART  0.
 ADH1  7.5
 ADH2  44.
 TC  0.5
 UNOM  15.
 PAUXB  0.220
 PFAUXB  0.8
 PAUXT 0.
 PFAUXT 0.8
 P0 0.007
 ACCREFV
 {
 0.   A  1.0  R 0.85  ;
 200. A  1.0  R 0.85  ;
 }

 FIU
 {
 12.0  FIMOT  -5.   FIBRAKE  6. ;
 14.0  FIMOT  -5.   FIBRAKE  7. ;
 16.0  FIMOT  0.    FIBRAKE  0. ;
 18.0  FIMOT  0.    FIBRAKE  0. ;
 }

 FVTRAINMAX
 {
 0.   FMOT 275  FELBRAKE  150   EFF 45 ;
 10.  FMOT 275  FELBRAKE  150   EFF 62 ;
 40.  FMOT 275  FELBRAKE  150   EFF 79 ;
 45.  FMOT 275  FELBRAKE  240   EFF 82 ;
 200. FMOT 275  FELBRAKE  240   EFF 82 ;
 }
!!!! TRAINLIMIT1 275*77.4
```

```
 TRAINLIMIT1 21.29E3
 TRAINLIMIT2 99.
 PUSUPPLYLIM
 {
 10.9  PMOT  0.01    PELBRAKE  4.72 ;
 11.0  PMOT  3.6                   ;
 12.0  PMOT  5.0                   ;
 15.0  PMOT  7.1                   ;
 18.0  PMOT  7.1     PELBRAKE  4.72 ;
 18.1  PMOT  7.1     PELBRAKE  0.   ;
 }
 FUSUPPLYLIM
 {
 11.0  FMOT  300   ;
 18.0  FMOT  300   ;
 }
}
```

Vedlegg 3

UTREDNING

Spenningskarakteristikk i roterende omformere
Innvirkning på lavfrekvent stabilitet

000	Utarbeidet	09.07.10	SD	STOY	FM
Rev.	Revisjonen gjelder	Dato	Utarb. av	Kontr. av	Godkj. av

Banestrømforsyning	Ant. sider	Fritekst 1d	
Spenningskarakteristikk i roterende omformere	**28**	Fritekst 2d	
		Fritekst 3d	
Innvirkning på lavfrekvent stabilitet	Produsent		
	Prod. dok. nr.		
Utredning	Erstatning for		
	Erstattet av		
Jernbaneverket	Dokument nr.		Rev.
	EB.800105-000		**000**

1 INNLEDNING ... 3

1.1 BAKGRUNN ... 3
1.2 MÅL ... 3
1.3 AVGRENSNINGER ... 3

2 BAKGRUNNSTEORI ... 4

2.1 SPENNINGSREGULATORKARAKTERISTIKK ... 4
2.2 DYNAMIKK ... 5
2.2.1 Roterende omformer ... 5
2.2.2 Moderne lokomotiv ... 6
2.2.3 Roterende omformer og lokomotiv ... 7

3 BEREGNINGER OG SIMULERINGER ... 8

3.1 MODELL 1 – ÉN Q38 OG 60 KM LINJE ... 8
3.1.1 Beregningsmodell ... 8
3.1.2 Simuleringsmodell ... 8
3.1.3 Resultater ... 9
3.2 MODELL 2 – OSLOOMRÅDET ... 11
3.2.1 Simuleringsmodell ... 11
3.2.2 Resultater ... 12

4 MÅLINGER ... 13

4.1 OPPSETT ... 13
4.2 TESTOPPLEGG ... 13
4.3 RESULTATER ... 13
4.3.1 0 % statikk ... 14
4.3.2 12 % statikk ... 15

5 DISKUSJON OG KONKLUSJON ... 16

5.1 DISKUSJON ... 16
5.1.1 Fjernstrekning ... 16
5.1.2 Oslo-området ... 16
5.1.3 Målinger ... 17
5.2 KONKLUSJON ... 17
5.3 ANNET ... 18

6 REFERANSER ... 19

7 VEDLEGG ... 20

7.1 SIMULERINGSFIL FJERNSTREKNING ... 20
7.1.1 Optpow ... 20
7.1.2 Dynpow ... 21
7.2 SIMULERINGSFIL OSLO-OMRÅDET ... 24
7.2.1 Optpow ... 24
7.2.2 Dynpow ... 25

1 INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

I forbindelse med studie av bedre samkjøring av matestasjonene i banestrømforsyningen samt hindre overbelastning generelt ([1]) og i Oslo-området spesielt ([2]) er det foreslått endringer i karakteristikken for omformernes spenningsregulatorer. Et forslag er å redusere omformerens utspenning som funksjon av reaktiv strøm mer enn det som har vært vanlig i dag, dvs. øke den såkalte statikken fra rundt 4 % til 12 %. Et annet forslag ([3]) er å redusere omformerens utspenning når omformerens anker- eller feltstrøm, alternativt anker- eller feltviklingstemperatur, overstiger bestemte verdier, dvs. en såkalt strøm- eller temperaturbegrenser.

Felles for disse to forslagene er at omformerens utspenning reduseres når belastningen øker. Stabilitetsstudier utført i [4] viser at stabilitetsmarginene i kraftsystemet med tanke på lavfrekvente effektpendlinger reduseres når belastningen øker og når linjespenningen reduseres.

Det er derfor usikkerhet hvorvidt de foreslåtte løsningene er praktisk gjennomførbare, dvs. om stabilitetsmarginene reduseres for mye til at en kan tillate en slik endring.

1.2 Mål

Målet med denne studien er å undersøke om det stabilitetsmarginene med tanke på lavfrekvente pendlinger blir et praktisk problem dersom en spenningsregulatorens statikk økes til de foreslåtte 12 %.

1.3 Avgrensninger

Studien omhandler kun endring av statikken i seg selv og vurderer ikke andre dynamiske innstillinger på spenningsregulatoren.

Studien fokuserer på endret statikk og omhandler ikke strøm- eller temperaturbegrenserfunksjonen spesielt.

Studien har som utgangspunkt at den lave dempingen av den roterende omformerens elektromekaniske resonansfrekvens skyldes manglende dempeviklinger i omformermotoren, og ikke innvirkning fra omformervognens eventuelle vagging.

2 BAKGRUNNSTEORI

2.1 Spenningsregulatorkarakteristikk

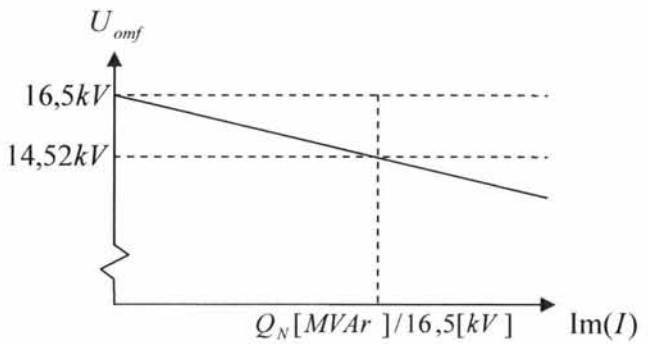
For å kompensere for spenningsfall mellom generator og last og for å dele last likt mellom generatorer elektrisk nært hverandre, benyttes ofte en karakteristikk for generatorenes utspenning som funksjon av reaktiv strøm. Dette er mer detaljert beskrevet i [3] og bare en kortversjon av forklaringen gis her.

Et forslag for bedre samkjøring mellom omformeraggregater, – og stasjoner i parallell, er at spenningen på omformernes 15 kV samleskinne senkes fra 16,5 kV i tomgang med 12 % til 14,52 kV ved en belastning på Q_N = 5,8 MVAr induktivt referert 16,5 kV. Det er den totale spenningssenkningen på en stasjon som er av interesse i denne studien, ikke den individuelle spenningssenkningen på hvert av flere aggregater i parallell i forhold til hverandre. I nærværende studie behandles derfor kun ett omformeraggregat alene.

Rent praktisk gjennomføres denne spenningssenkningen ved å endre på en kompenseringsreaktans X_c på omformergeneratorens spenningsregulator. På den måten manipuleres er-verdien, V_c, som spenningsregulatoren sammenligner med bør-verdien, V_{c_ref}, slik at den målte spenningen på 15-kV samleskinne, U_{omf}, kompenseres for generatorstrømmen, I. Det vil si ved hjelp av likning (1). Kompenseringsresistansen R_c kan benyttes for kompensering for aktiv strøm og studeres ikke her siden den er satt til 0 %. Det er spenningsfallet gitt av den induktive strømmen som er av hovedinteresse her, det vil si $\mathrm{Im}(I)\cdot X_c$.

$$V_c = \left|\vec{U}_{omf} + \vec{I}\left(R_c + jX_c\right)\right| \tag{1}$$

Dette gir en karakterstikk for spenningen U_{omf} som funksjon av induktiv strøm som vist i Figur 1.



Figur 1: Spenningskarakteristikk

Det bør imidlertid bemerkes at det med denne løsningen ikke er mulig å kun kompensere for aktiv eller reaktiv strøm uavhengig av hverandre. Aktiv strøm gir også et spenningsfall over X_c, dog betydelig mindre enn den reaktive strømmen.

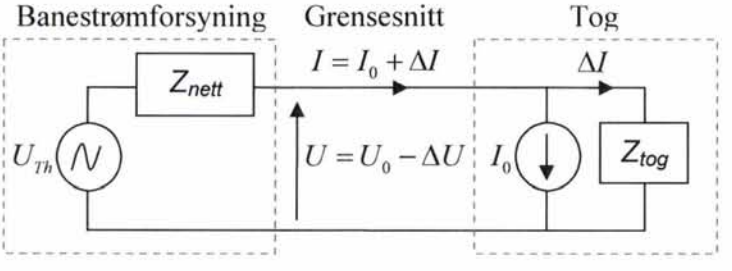
2.2 Dynamikk

Banestrømforsyningen i Norge kan karakteriseres på følgende måte:

- Stor andel roterende omformeraggregater med dårlig dempet elektromekanisk resonansfrekvens rundt 1,6 Hz
- Ytelsen for omformeraggregat og tog er i samme elektriske størrelsesorden
- Til dels stor avstand mellom omformerstasjonene gir høy impedans mellom matepunkt og tog

Studier utført i [4] viser at jo svakere banestrømforsyningen er sammenlignet med belastningen, jo mindre er marginene mot lavfrekvent ustabilitet og effektpendlinger. I de følgende avsnittene er hovedpunktene i denne studien gjengitt. For mer detaljert informasjon eller vurderinger henvises det til kilden.

Banestrømforsyningen og elektriske tog samvirker ved at banestrømforsyningen forsyner toget med en elektrisk en spenning $U = U_0+\Delta U$ som illustrert i Figur 2. Notering "0" betyr stasjonær verdi for et gitt arbeidspunkt og deltaverdien beskriver eventuelt avvik fra denne gjennom for eksempel en transient eller pendling.



Figur 2: Prinsipielt skjema av banestrømforsyning og elektrisk tog

Grensesnittet mellom banestrømforsyning og tog er valgt til der toget er i kontakt med infrastrukturen, det vil si strømavtaker og hjul. Toget kjører ved å regulere hastigheten og dermed momentet på drivhjulene, det vil si regulerer mekanisk effekt P. Denne effekten må leveres fra banestrømforsyningen. Toget kan derfor oppfattes som en strømkilde som trekker en strøm $I = I_0+\Delta I = P/U$.

Dersom spenningen endres vil toget måtte endre strømmen for å holde effekten konstant. Hvordan toget endrer strømmen er bestemt av de dynamiske egenskapene som her er representert med den dynamiske impedansen Z_{tog}. Tilsvarende vil endring i togets strøm påvirke spenningsfallet i banestrømforsyningen gitt av den dynamiske impedansen Z_{nett}. Basert på denne forenklede beskrivelsen kan tilsvarende forenklede analytiske uttrykk for både banestrømforsyningens og togets dynamikk utledes.

2.2.1 Roterende omformer

De roterende synkron-synkron omformerne benyttet i den norske banestrømforsyningen karakteriseres med en dårlig dempet elektromekanisk resonansfrekvens i området rundt 1,6 Hz. Det er i stor grad synkronmotorens egenskaper som bestemmer denne dempingen, men generatorens spenningsregulator kan ha innvirkning i samvirket mellom omformeren og elektriske tog på banestrekningen som forsynes.

Likning (8.15) i [4] beskriver kvalitativt hvordan dempingen av den roterende omformerens elektromekaniske egenfrekvens påvirkes av togets elektriske arbeidspunkt, gitt at togets dynamikk negligeres og erstattes med en last som alltid holder den aktive effekten konstant (og den reaktive effekten er lik null). Formelen er gjengitt her i likning (2) som et egenverdiuttrykk. Det er realdelen av egenverdien som beskriver dempingen av svingemoden. Under er forklart de parameterne som studeres. I uttrykket her er realdelen kun gitt av uttrykket utenfor rot-tegnet.

$$\lambda_{1,2} = -\frac{D_M \omega_{sM} - \frac{k_u P_0}{U_0^2 - RP_0}}{4H_{MG}} \pm \sqrt{\left(\frac{D_M \omega_{sM} - \frac{k_u P_0}{U_0^2 - RP_0}}{4H_{MG}}\right)^2 - \frac{K_{1M}\omega_{sM}}{2H_{MG}}} \tag{2}$$

D_M Synkronmotorens dempekonstant
ω_{sM} Synkronmotorens fundamentale vinkelfrekvens ($2\pi \cdot 50$ Hz)
k_u Beskriver forsterkningen til synkrongeneratorens spenningsregulator, her satt til 1
P_0 Togets aktive effekttrekk gitt arbeidspunktet
U_0 Spenning i grensesnitt mellom banestrømforsyning og tog gitt arbeidspunktet
R Resistans i kontaktledningen mellom roterende omformer og tog gitt arbeidspunktet
H_{MG} Omformerens massetreghetskonstant
K_{1M} Synkronmotorens synkroniserende momentkoeffisient (lineariseringskonstant)

Ut fra likningen kan en lese at økt effekt P_0, redusert spenning U_0 og økt impedans mellom omformer og tog, R, alle fører til redusert demping av omformeres elektromekaniske svingemodus. I denne studien er det redusert spenning som er i fokus, mens de andre variablene holdes uendret.

2.2.2 Moderne lokomotiv

Moderne lokomotiver med nettstrømrettere, DC-link, motorstrømrettere og induksjonsmotorer har også sin lavfrekvente dynamikk. Stasjonært og for veldig lave frekvenser regulerer toget som nevnt strømmen den trekker slik at effekten er konstant. Reguleringssystemets båndbredde er imidlertid begrenset oppad i frekvens, typisk opp til i området 1-5 Hz. Av flere forhold er det togets DC-link med tilhørende spenningsregulator samt strømregulator som er funnet å ha størst innvirkning på den lavfrekvente dynamikken og som gir opphav til en resonansfrekvens i samme frekvensområde.

Tilsvarende som for den roterende omformeren kan en sette opp et forenklet egenverdiuttrykk for togets svingemode. Linkning (8.16) i [4] er her gjengitt i likning (3). For typiske parameterverdier er realdelen av egenverdien bestemt av uttrykket utenfor rottegnet.

$$\lambda_{1,2} = -\frac{Kp_{VC}\left(1 - \frac{RP_0}{U_0^2}\right)}{2T_C} \pm \sqrt{\left(\frac{Kp_{VC}\left(1 - \frac{RP_0}{U_0^2}\right)}{2T_C}\right)^2 - \frac{Kp_{VC}\left(1 - \frac{RP_0}{U_0^2}\right)}{T_C Ti_{VC}}} \tag{3}$$

Kp_{VC} DC-linkspenningsregulatorens forsterkning
P_0 Togets aktive effekttrekk gitt arbeidspunktet
U_0 Spenning i grensesnitt mellom banestrømforsyning og tog gitt arbeidspunktet

R Resistans i kontaktledningen mellom ideell spenningskilde og tog gitt arbeidspunktet
T_C DC-linkens totale utladetid
Ti_{VC} DC-linkspenningsregulatorens integrasjonstid

Ut fra likningen kan en lese at økt effekt P_0, redusert spenning U_0 og økt resistans mellom spenningskilde og tog R alle fører til redusert demping av togets lavfrekvente svingemode. I denne studien er det redusert spenning som er i fokus, mens de andre variablene holdes uendret. Det gjøres imidlertid ikke beregninger for togets svingemodus i denne studien.

2.2.3 Roterende omformer og lokomotiv

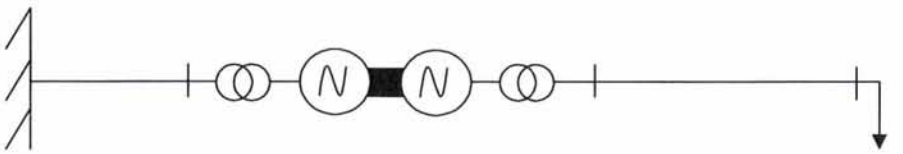
De to foregående avsnittene behandler henholdsvis lokomotivet og omformeren uten dynamikk. Det vil si at omformerens og lokomotivets dynamikk ikke uttrykkes eksplisitt i samme likning. Siden begge deler representerer dynamikk i samme frekvensområde er det nærliggende å tro at de påvirker hverandre og kan redusere stabilitetsmarginene ytterligere. Se for eksempel figur 8-6 i [4]. Eksplisitte formler som viser det eksisterer imidlertid ikke.

3 BEREGNINGER OG SIMULERINGER

Enkle beregninger og simuleringer er utført for å undersøke hvor mye 12 % statikk reduserer dempingen av den roterende omformerens elektromekaniske egenfrekvens. Disse beregningene og simuleringene er presentert i dette kapittelet.

3.1 Modell 1 – Én Q38 og 60 km linje

Modellen benyttet i denne studien er en etterligning av en situasjon med ett ASEA Q38-aggregat i Hønefoss omformer som illustrert med enlinjeskjema i Figur 3. Arbeidspunktet er et tog som trekker 3,81 MW 60 km fra omformeren og ensidig matet.



Figur 3: Enlinjeskjema for modell

Et slikt driftstilfelle tilsvarer (basert på opplysninger i [8]):

- To til tre typiske 4-akslede lokomotiver (for eksempel CE119) med en karakteristikk for reduksjon av maksimal effekt som funksjon av spenningen i henhold til EN50388 som tillater at det kan trekke 24 % av maksimal effekt ved 12 kV,
- Ett El18 som kan trekke 70 % av maksimal trekkraft ved 12 kV,
- Tre togsett type 72 som kan trekke 40 % av maksimal effekt ved 12 kV eller
- To togsett type 73 som kan trekke 75 % av maksimal effekt ved 12 kV.

NB: I sammenligningen over er ikke de dynamiske egenskapene til togene vurdert, kun hvor stor effekt de kan trekke for illustrasjonens skyld. Illustrasjonen forutsetter at togene ikke kompenserer reaktivt for den lave spenningen.

3.1.1 Beregningsmodell

Det er utført beregninger med den forenklede modellen gitt av likning (2). Parameterverdier for den roterende omformeren er hentet fra [4].

3.1.2 Simuleringsmodell

Simuleringsmodellen benyttet i denne studien er basert på modellen etablert i [5] som igjen bygger på modellen i [4]. Tilpasningene av modellen til nærværende studie begrenser seg til inkludering av lastkompenseringsalgoritmen VRRC ("voltage regulator rotary converter" eller "voltage regulator reactive compensation") som finnes i standardbiblioteket til Simpow. Parametriseringen legger til grunn at det bare er en Q38 i omformerstasjonen (S_{NS} = 4 MVA).

Nettet i modellen er simulert uten å ta hensyn til spenningsleddet gitt av transient endring av strømmen gjennom induktanser, dvs. $L \cdot di/dt$. Synkronmaskinmodellene er av femte orden.

Lasten som representerer lokomotivet er modellert ved hjelp av formel (4) med $MP = 0$.

$$P(t) = P_0 \left(\frac{U(t)}{U_0} \right)^{MP} \tag{4}$$

P_0 Togets aktive effekttrekk gitt arbeidspunktet
U_0 Spenning i grensesnitt mellom banestrømforsyning og tog gitt aktuelt arbeidspunkt
$P(t)$ Togets effekt gitt endring i spenningen som funksjon av tiden t
$U(t)$ Togets spenning som funksjon av tiden t
MP Eksponent som forteller lastens spenningsavhengighet

Ved $MP = 0$ er lasten spenningsuavhengig, dvs. konstant og $P = P_0$.

3.1.3 Resultater

Egenverdien som beskriver den elektromekaniske svingemoden til den roterende omformeren er beregnet både ved hjelp av likning (2) og ved lineæranalyse i Simpow. Lastflytresultatene fra simuleringsmodellen i Simpow har dannet grunnlag for beregning av arbeidspunktet benyttet i beregningsmodellen. I beregningsmodellen er det benyttet flere desimaler på inndataene enn det som er vist.

Resultatene er vist i henholdsvis Tabell 1 og Tabell 2 og egenverdiene er sammenlignet i Figur 4 som funksjon av X_c = [0,4,8,12,15[1]] %. Både beregningsmodellen og simuleringsmodellen viser at dempingen av den elektromekaniske svingemoden i omformeren reduseres ved økende statikk. Tallene er i samme størrelsesorden, men simuleringsmodellen indikerer at dempingen er mer følsom for endringer i X_c enn beregningsmodellen. Begge metodene viser også at reduksjonen av demping akselererer jo høyere statikken blir, det vi si at reduksjonen fra 8 til 12 % er mye større enn reduksjonen fra 0 til 4 %.

Beregningsmodellen er en sterk forenkling av virkeligheten og som kun benyttes for å forstå hvorfor simuleringsmodellen gir de resultatene den gir. Siden simuleringsmodellen er mer detaljert, antas denne å gi de kvantitativt mest riktige resultatene gitt den forenklede togmodellen som er benyttet.

Tabell 1: Resultater beregningsmodell med én Q38 og 60 km linje

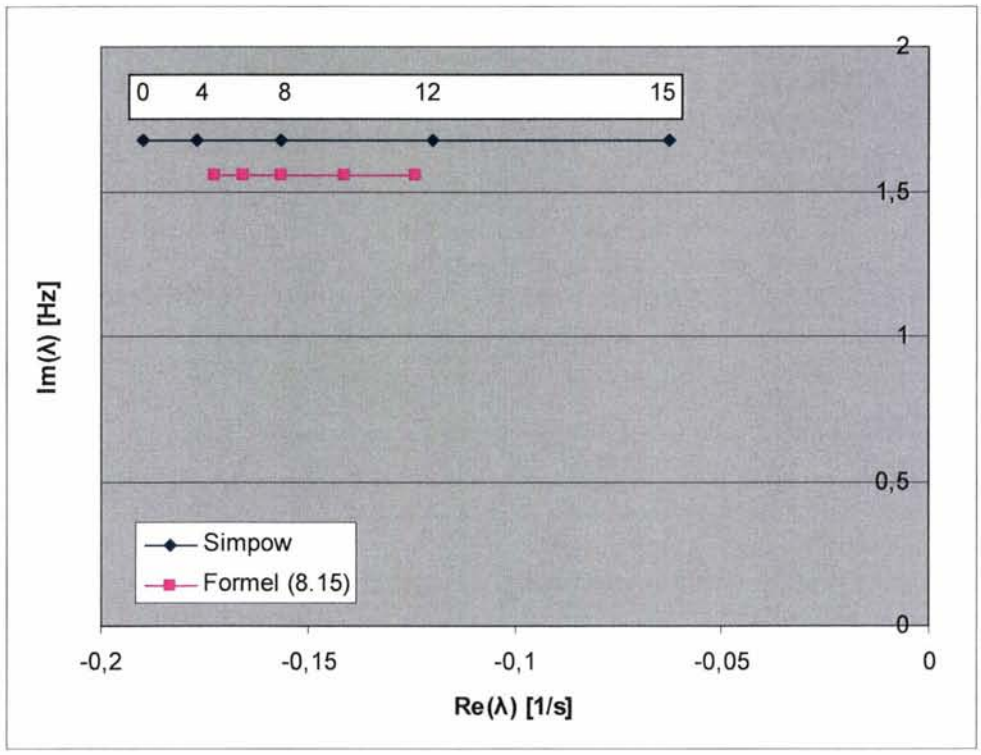
X_c %	D_m MWs/MVA	ω_{sM} rad/s	Ku pu	P_0 pu	U_0 pu	R pu	H_{MG} MWs/M	K_{1M} pu	Re(λ) 1/s	Im(λ) Hz
0	0,015	314,16	1	0,9525	0,775	0,161	3,74	2,27	-0,17262508	1,55377924
4	0,015	314,16	1	0,9525	0,762	0,161	3,74	2,27	-0,16578746	1,55379810
8	0,015	314,16	1	0,9525	0,745	0,161	3,74	2,27	-0,15627706	1,55382307
12	0,015	314,16	1	0,9525	0,721	0,161	3,74	2,27	-0,14126946	1,55385947
15	0,015	314,16	1	0,9525	0,698	0,161	3,74	2,27	-0,12377139	1,55389727
x	0,015	314,16	1	0	1	0,161	3,74	2,27	-0,31499926	1,55321324

Tabell 2: Resultater simuleringsmodell med én Q38 og 60 km linje

X_c %	$U_{5,8\ MVAr}$ kV	U_{omf0} kV	U_{tog0} kV	P_{tog0} MW	P_{omf0} MW	Q_{omf0} MVAr	Re(λ) 1/s	Im(λ) Hz
0	16,50	16,50	12,79	3,81	4,78	1,12	-0,189909	1,67255
4	15,84	16,36	12,57	3,81	4,82	1,16	-0,176993	1,67318
8	15,18	16,17	12,29	3,81	4,87	1,22	-0,156610	1,67398
12	14,52	15,94	11,90	3,81	4,93	1,30	-0,119791	1,67493
15	14,03	15,71	11,51	3,81	5,01	1,39	-0,062518	1,67545
x	x	16,50	16,50	0,00	0,00	0,00	-0,346364	1,59351

[1] Grunnen til at ikke 16 % er benyttet er at det ga så lav spenning over lasten at systemet kollapset da effekten ble rampet opp med den valgte hastigheten. Kunne sannsynligvis vært unngått ved valg av lavere hastighet.

Simuleringsmodellen viser at realdelen av egenverdien er redusert med 36 % fra flat statikk til 12 % statikk.



Figur 4: Egenverdier som funksjon av X_c for én Q38 og 60 km linje

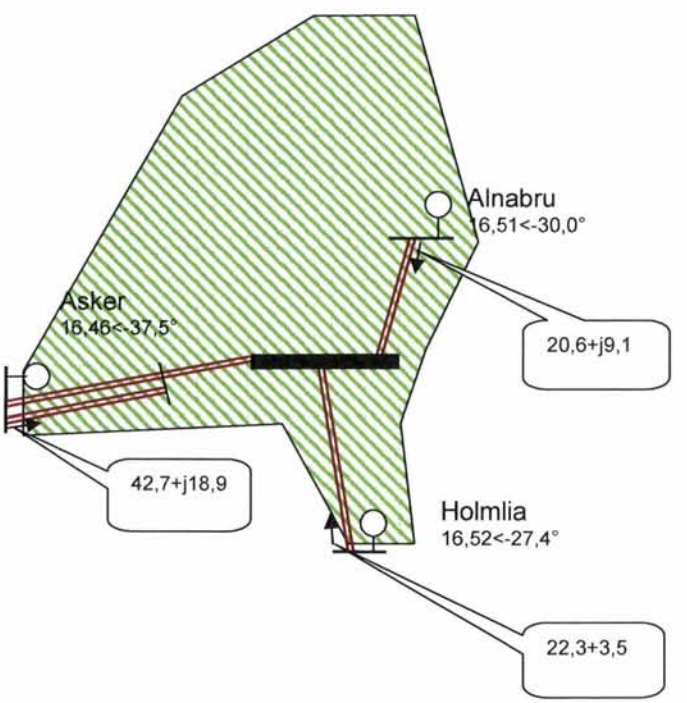
Selv ved 0 % statikk vil toget redusere dempingen av omformeren i forhold til tomgang, nærmere halvere egenverdiens realdel.

3.2 Modell 2 – Osloområdet

Modellen benyttet i denne studien er en sterk forenkling av nettet som formes av de tre omformerstasjonene med roterende omformeraggregater i det sentrale Oslo-området, det vil si Asker, Alnabru og Holmlia. Alle andre omformerstasjoner er for enkelthetsskyld tatt bort og all last er lagt til Oslo S.

3.2.1 Simuleringsmodell

Simuleringsmodellen er basert på banestrømforsyningen som er modellert for Oslo-området i [2]. Figur 5 viser forenklingen fra full Oslo-modell til modellen benyttet i denne studien. Modellen inneholder kun Asker (3x10 MVA), Alnabru (2x10 MVA) og Holmlia (2x10 MVA) roterende omformerstasjoner samt kontaktledningen mellom disse. Alle andre omformerstasjoner og linjer er tatt bort.



Figur 5: Systemmodell som utdrag fra figur 4-6 i [2]. Alle verdier for 2 sekunder. Effekt oppgitt i [MW]+j[MVAr].

Per i dag har en ikke synkronmaskinparameterverdier som en kan forvente gjenspeiler dempingen til 10 MVA-aggregatene, verken fra ASEA eller NEBB. Det er derfor valgt å benytte verdier fra ASEA Q38 i forrige avsnitt. Det vil si at merkeytelsen er endret fra 4 til 10 MVA for alle komponenter i omformeren.

For å gjøre modellen enklest mulig er de tre linjene ut fra Oslo S slått sammen til en enkelt omformer med kontaktledning som vist i Figur 3. Det vil si en omformerstasjon på 70 MVA, en linje på (0,326+j0,325)[Ohm]. Impedansen i trefasenettet er også redusert med forholdet gitt av den installerte ytelsen.

All last er lagt på samleskinnen på Oslo S som er i enden av den ekvivalente kontaktledningen. Belastningen på den ekvivalente omformeren er valgt lik den høyeste 2 sekundsbelastningen som oppstår (klokken 16.13.37) i simuleringen i [2] hvor alle perifere omformerstasjoner har en statikk på 12 %. Det vil si at belastningen er lik summen av de tre

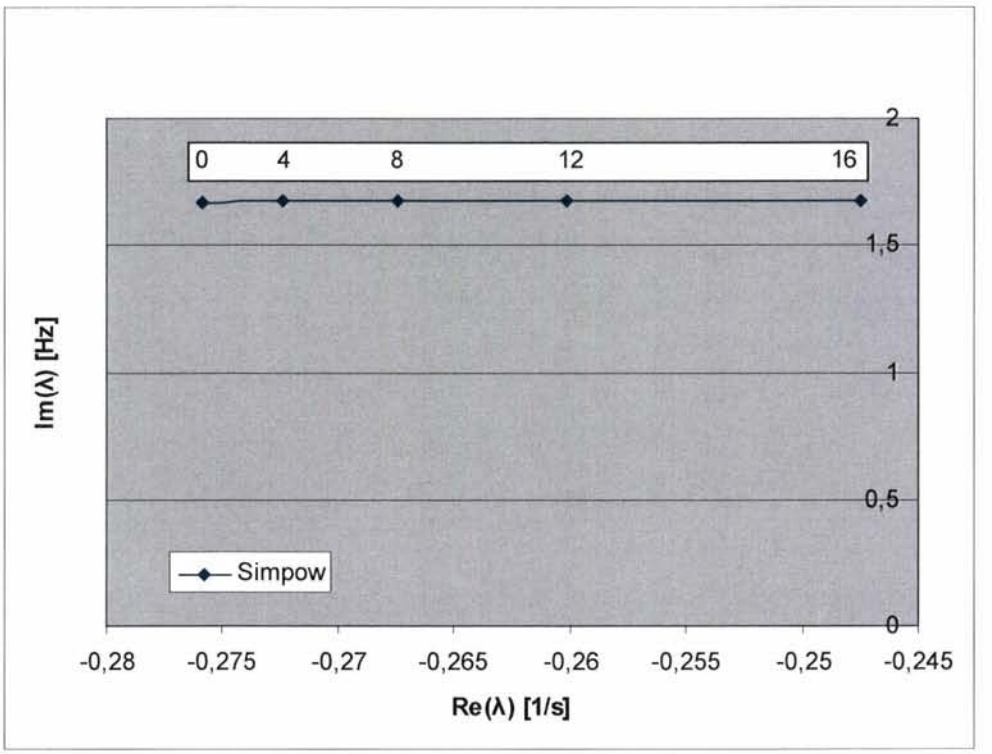
belastningene vist i Figur 5, altså (85,6+j31,5) MVA. Selve lasten på Oslo S er justert slik at last pluss tap gir riktig belastning av omformeren. Den aktive lasten er spenningsuavhengig ($MP = 0$) og den reaktive lasten er spenningsavhengig med tilsvarende $MQ = 1$.

3.2.2 Resultater

Resultatene fra simuleringene er vist i Tabell 3 og reduksjon av egenverdiens realdel er illustrert i Figur 6.

Tabell 3: Resultater simuleringsmodell for ekvivalent Oslo-område

X_c %	$U_{5,8\ MVAr}$ kV	U_{omf0} kV	U_{tog0} kV	P_{tog0} MW	P_{omf0} MW	Q_{omf0} MVAr	Re(λ) 1/s	Im(λ) Hz
0	16,50	16,50	14,27	72,76	82	32,5	-0,275864	1,67111
4	15,84	16,17	13,89	72,76	83	32,3	-0,272348	1,67179
8	15,18	15,77	13,43	72,76	83	32,2	-0,267459	1,67265
12	14,52	15,30	12,88	72,76	84	32,1	-0,260126	1,67382
15	14,03	14,71	12,16	72,76	85	32,2	-0,247484	1,67550



Figur 6: Resultater simuleringsmodell for ekvivalent Oslo-område

Dempingen reduseres med økt statikk. Mønsteret fra forrige avsnitt ved at reduksjonen av dempingen akselereres kan gjenkjennes. Men i tallverdier er reduksjonen liten, kun 6 % ved 12 % statikk.

Resultatene fra simuleringen for normal drift med alle tiltak, inkludert 12 % statikk er vist i Figur 6-1 i [2]. Belastningen av de tre aktuelle omformerstasjonene i retning Oslo S på bakgrunn av tiltakene redusert til (78,6+j25,2) MVA. Spenningen på omformernes samleskinner er henholdsvis 15,0, 15,5 og 15,5 kV. Det vi si at spenningen er sammenliknbar med den forenklede simuleringsmodellen benyttet i denne studien. Spenningen på Oslo S er funnet til 14,4 i [2], men er 12,9 i den forenklede modellen.

4 MÅLINGER

Enkle målinger er utført for å undersøke hvor mye 12 % statikk reduserer dempingen av den roterende omformerens elektromekaniske egenfrekvens. Disse målingene er presentert i dette kapittelet.

4.1 Oppsett

Målingene ble utført i Sira omformer søndag 20. juni 2010. Detaljer om måleoppsett osv. er gitt i målerapporten [6].

4.2 Testopplegg

Sira omformeraggregat nummer 2 (5,8 MVA) matet ett testtog som kjørte fra Ualand til Helleland stasjon, det vil si fra 30 til 42 km bort fra omformerstasjonen. Testtoget kjørte full akselerasjon til makshastighet (for linjen) og full elektrisk brems ned til 0 km/t i kontinuerlig syklus. Mellom hver syklus ble det vekselvis angitt spenningsstatikk (omtalt som "X %") på 0 % og 12 %. Linjekompenseringen (for hele stasjonen) var stilt på 0 %. Tiden og banestrekningen tillot fire tester som vist i Tabell 4.

Tabell 4: Tester

ID	*Statikk*	*Tidspunkt*
26 A	0 %	05.30.26
26 B	12 %	05.32.15
26 C	0 %	05.34.00
26 D	12 %	05.36.00

Det ble ikke utført målinger i testtoget, men laveste og høyeste linjespenning ble observert til henholdsvis 14 kV og 18 kV. Noen ganger begynte det å pendle da spenningen ved toget kom opp til 17 kV.

Det planlagte opplegget for testen er beskrevet i [7], men måtte fravikes på grunn av uforutsette hendelser tidligere i testen.

4.3 Resultater

Følgende målevariable er plottet i figurene for hver enkelt måle-ID:

P_3 Aktiv trefaseeffekt, beregnet i måleprogrammet

Q_1 Reaktiv enfaseeffekt, beregnet ved hjelp av $Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2}$

P_1 Aktiv enfaseeffekt, beregnet i måleprogrammet

Iq_1 Reaktiv enfasestrøm, beregnet ved $I_{q1} = Q_1 / U_1$

I_1 Enfasestrøm, målt, men RMS-verdi beregnet i måleprogrammet

S_1 Tilsynelatende enfaseeffekt, beregnet ved $S_1 = U_1 \cdot I_1$

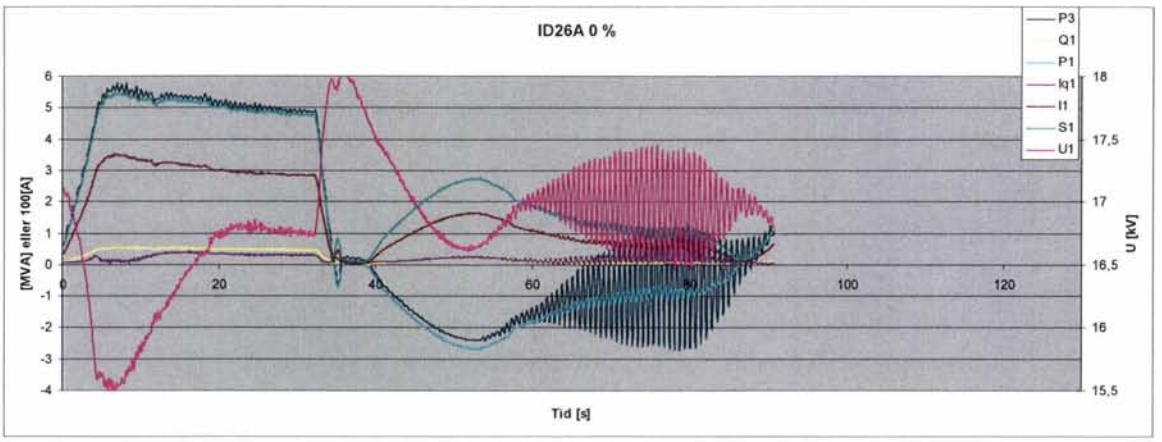
U_1 Enfasespenning, målt, men RMS-verdi beregnet i måleprogrammet

Det observeres ikke ustabilitet når testtoget akselererer, det vil si forbruker aktiv effekt. Både ved 0 % og 12 % statikk kan en observere at allerede eksiterte pendlinger dempes ut når effekten økes. Den reaktive effekten er omtrent Q_1= 0,5 MVAr ved maksimal aktiv effekt P_1= 5 MW. Endringen i statikken fører til at spenningen U_1 synker fra over 16,5 kV til ca 16 kV ved samme belastning.

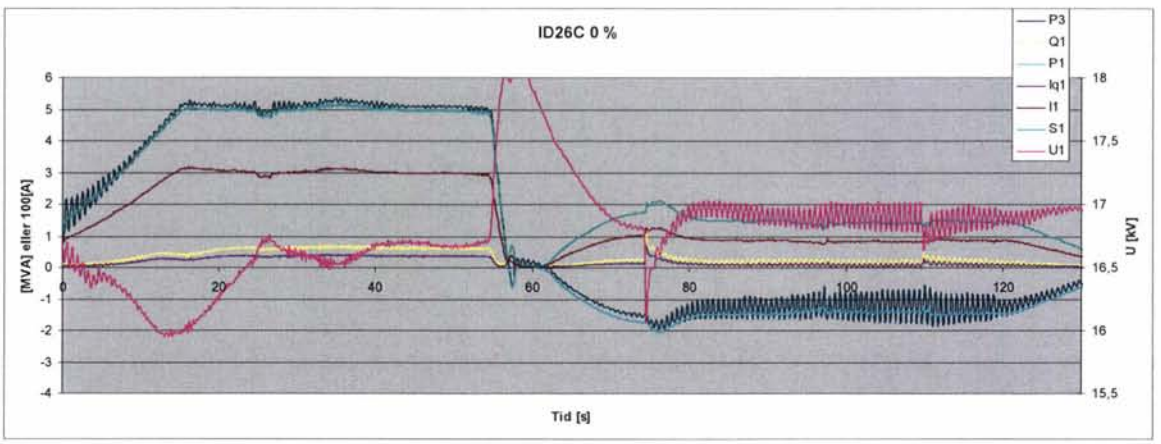
Systemet er ustabilt ved elektrisk brems i begge tilfeller.

4.3.1 0 % statikk

Figur 7 og Figur 8 viser måleresultater for to tilfeller med 0 % statikk.



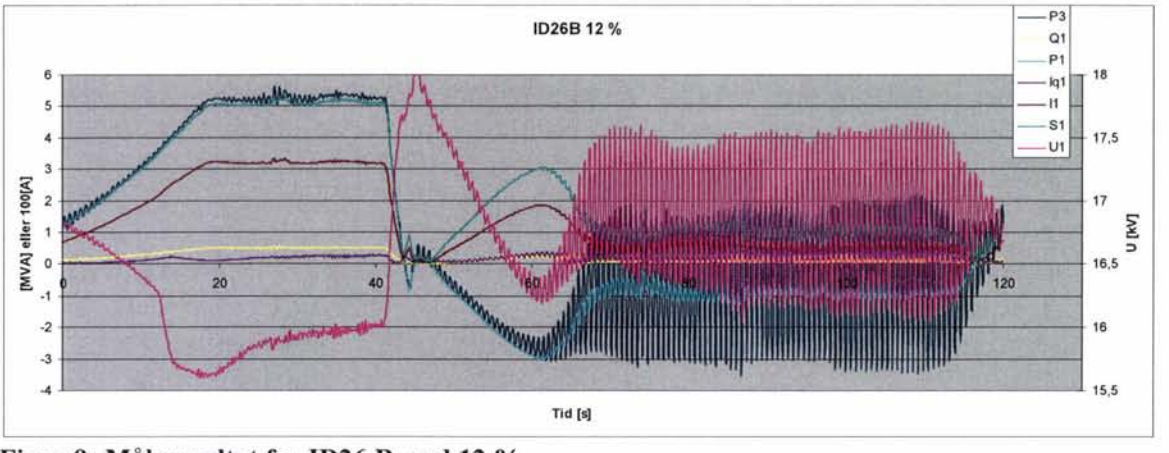
Figur 7: Måleresultat for ID26 A med 0 %



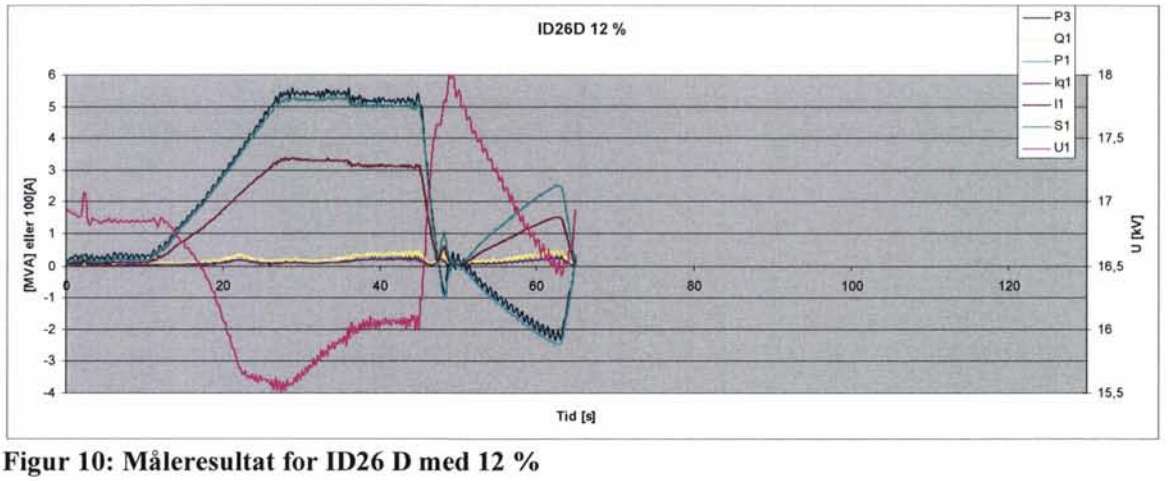
Figur 8: Måleresultat for ID26 C med 0 %

4.3.2 12 % statikk

Figur 8Figur 9 og Figur 10 viser måleresultater for to tilfeller med 12 % statikk.



Figur 9: Måleresultat for ID26 B med 12 %



Figur 10: Måleresultat for ID26 D med 12 %

5 DISKUSJON OG KONKLUSJON

5.1 Diskusjon

5.1.1 Fjernstrekning

Beregningene og simuleringene viser at konstanteffektlastvirkningen til et tog kan redusere dempingen av omformerens elektromekaniske egenfrekvens. Ved økning av spenningsstatikken fra 0 til 12 % reduseres dempingen av omformeren med 36 % i det studerte driftstilfellet på grunn av redusert linjespenning.

Sammenlignet med tomgang observerer en at toget selv ved 0 % statikk nærmest halverer systemets demping. Ved 12 % statikk reduseres dempingen med 2/3. Det er betydelig, men med denne lastmodelleringen er den likevel ikke nok til å gjøre systemet ustabilt. En konsekvens er imidlertid at det vil ta lenger tid før en eksitert pendling, for eksempel på grunn av lastendring, dempes ut dersom 12 % statikk benyttes.

Modellen som er benyttet er enkel. Likevel er det studerte tilfellet ikke urealistisk som en unormal driftsituasjon. De mest kritiske situasjonene vil sannsynligvis være dobbelsett type 73 eller El18 under tilsvarende mateforhold. Dobbelsett type 73 har vist seg å være ustabilt selv ved mindre statikk (for eksempel i Bergen [9]). De dynamiske egenskapene til El18 er ukjent. For vanlig drift med tosidig mating og mulighet for flere aggregater i drift vil stabilitetsmarginene være større. Spesielle tilfeller med problemer, slik som Ganddal, er imidlertid ikke studert.

5.1.2 Oslo-området

Modellen for Oslo-området i denne studien er også vesentlig forenklet. Den viser imidlertid at endringen i omformernes demping er begrenset (6 %) ved økning av statikken fra 0 til 12 %. Formildende er videre at all last i modellen er lagt lengst bort fra den ekvivalente omformeren i stedet for å distribueres utover linjen, noe som ville vært mer sannsynlig. Det gjør at spenningen på Oslo S blir lavere enn funnet ved trafikksimuleringer. Det er også mulig at koblingen til andre og statiske omformerstasjoner vil forbedre forholdene ytterligere. Det gjør sannsynligvis at den negative virkningen er overestimert.

Formildende er også at det er langt fra alle tog i Oslo-området som forventes å oppføre seg som en konstanteffektlast med den virkningen at dempingen reduseres. Flirt-togsettene type 74/75 skal tilpasses de roterende omformerne, CE 119 har oppvist en nøytral oppførsel, type 71 undersøkes i skrivende stund for å se om det kan gjøres forbedringer og type 69 er ikke forventet å ha slik en destabiliserende virkning på grunn av annen teknologi. Da gjenstår type 70, 72, 73 og El18 som mulige årsaker til ustabilitet ved omformerens elektromekaniske egenfrekvens. De vil neppe dominere Oslo-området.

Togenes egen dynamikk er ikke tatt hensyn til. Det ser imidlertid ut til at å forbedre togenes egenskaper ved omformerens elektromekaniske egenfrekvens også reduserer dynamikken ved togets egenfrekvens.

Det studerte tilfellet er regnet for å være "worst case" med størst mulig belastning og lavest spenning for togene. Dersom belastningen fra togene reduseres vil også spenningen for togene øke samtidig som de aktive tapene gitt av ($R \cdot I^2$) reduseres. Det øker stabilitetsmarginene til tross for at halvparten av omformeraggregatene også stoppes.

5.1.3 Målinger

De utførte målingene viser ingen klare indikasjoner på at stabiliteten ved traksjon reduseres. Det ser i tillegg ut som om statikken i omformeren til tross for angitte 12 % er nærmere 24 %. Dette fører til lavere spenning og skal i prinsippet redusere stabilitetsmarginene ekstra.

Det er imidlertid to forhold som ser ut til å gjøre situasjonen ikke er identisk med simuleringen. For det første oppnådde en ikke lenger avstand fra omformerstasjonen enn 42 km og for det andre kan det se ut som om toget kompenserer reaktivt. Dette resulterer i at spenningen ved toget ikke underskrider 14 kV.

Tilbakemating er ikke vurdert særskilt i denne studien ettersom effektforbruk har vært i fokus. Likevel observerer en at systemet er ustabilt ved tilbakemating både ved 0 to 12 % statikk.

Det har i tidligere diskusjoner, blant annet for Ofotbanen, vært usikkerhet i tilknytning til hvordan spenningsregulatoren virker ved tilbakemating. Oppfører den seg riktig når aktiv effekt er negativ, det vil si riktig funksjon i alle fire kvadranter (P og Q)? Omformeren skal senke samleskinnespenningen som funksjon av reaktiv (og aktiv) effekt selv ved tilbakemating for ikke å gi for høy spenning for tog som mater tilbake. Dette er viktigere å få klarlagt jo større statikken er.

Målingene utført her gir ikke endelig svar på dette for den benyttede EMA-regulatoren i Sira på grunn av manglende fortegn på enfase reaktiv effekt i måleresultatene og på grunn av pendlinger ved tilbakemating. Men det kan se ut som om midlere samleskinnespenning ligger høyere enn tomgangsspenningen, i det minste høyere enn 16,5 kV også ved 12 % statikk.

5.2 Konklusjon

Det er i denne studien vist ved beregning og simulering at økning av omformerens spenningsstatikk fra 0 til 12 % for generatoren reduserer marginene mot lavfrekvent ustabilitet.

For Oslo-området er innvirkningen så funnet liten og under så sterke formildende omstendigheter at endringen sannsynligvis kan innføres uten praktiske problemer. Med Oslo-området menes i denne sammenheng de sentrale roterende omformerne Asker, Alnabru og Holmlia.

For fjernsterkningene er reduksjonen av dempingen i realistiske unormale driftsituasjoner så stor at det muligens vil utgjøre en forskjell i et system hvor stabilitetsmarginene allerede er små på grunn av togene som trafikkerer strekningene. Målinger viser imidlertid ikke tydelige indikasjoner på mindre stabilitet ved test av ett av disse togene. Det anbefales at en eventuell innføring av 12 % statikk gjøres som et kontrollert forsøk med vurdering etter en prøveperiode. Dersom dette viser seg å være problematisk må en velge en mindre statikk, for eksempel 8 %.

5.3 Annet

Ved behandling av måleresultatene er det gjort følgende observasjoner:

- Omformerstasjonens tomgangsspenning er over 16,5 kV. Dette forverrer forholdene for tog som mater tilbake effekt.
- Spenningsregulatoren har en responstid som er betraktelig lengre enn eldre regulatorer. Dette fører til en stor og langvarig endring i spenningen når toget endrer effekten.
- Spenningssenkningen som funksjon av strømmen er større enn det en klarer å beregne at den skal være under samme belastning.
- Det er uklart om spenningsregulatoren øker eller senker samleskinnespenningen ved tilbakemating.

6 REFERANSER

[1] Frank Martinsen, *Spenningsregulatorinnstilling i roterende omformerstasjoner*. Rapport ved Jernbaneverket, tegning nummer EB.800094-000. 2009-10-05

[2] Frank Martinsen, Oslo-området: Økt trafikk etter ruteendring R2012 og behov for økt kapasitet for banestrømforsyningen – Fase 1: trafikk og infrastruktur i nær fremtid. Simuleringsrapport ved Jernbaneverket, under arbeid.

[3] Steinar Danielsen, *Spenningsregulator med statorstrøm- og feltstrømbegrensning for jernbanens roterende omformere*. Hovedoppgave ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. 2002-06-11.

[4] Steinar Danielsen, *Electric Traction Power System Stability – Low-frequency interaction between advanced rail vehicles and a rotary frequency converter*. PhD-avhandling ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. April 2010.

[5] Steinar Danielsen, *Output impedance for a rotary converter – A simulation study in the rotating reference frame (no-load)*. Rapport ved Jernbaneverket, tegning nummer EB.800100-000. 2010-03-16.

[6] Målerapport Sira PSS – under utarbeidelse

[7] Steinar Danielsen, *Spenningsregulator for roterende omformeraggregater – Plan for test av dempetilsats og endret spenningskarakteristikk på Sira 19-20. juni 2010.*Testplan/instrukts 2010-06-16.

[8] Steinar Danielsen, *Vurdering av redundans- og dimensjoneringskriteriet*. Jernbaneverket dokument nummer 200404562-17X

[9] Ingar Dalen, *Bergen omformerstasjon – Belastningsmåleringer 11. til 17. mars 2010*. Målerapport datert 2001-04-05.

7 VEDLEGG

7.1 Simuleringsfil fjernstrekning

7.1.1 Optpow

```
Etterligning Hønefoss (fra DQ-frequency sweep rapport)
SD 2010-02-03
**
CONTROL DATA
 EDIT=-1
 TAUCHECK=NO
 UBCHECK=NO
END

GENERAL
 SN=6.4
END

GLOBALS
END

NODES

!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Noder for 3fase innmating til omformere
!!!!-----------------------------------------------------------------------------

 OMF-22I     UB=22     PHASE=3    AREA=9

!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Noder for omformere
!!!!-----------------------------------------------------------------------------

 OMF-3-22    UB=22     PHASE=3    AREA=9
 OMFM1       UB=6.3    PHASE=3    AREA=9
 OMFG1       UB=4      PHASE=1    AREA=9
 OMF-1-15    UB=16.5   PHASE=1    AREA=9
 OMF-1-G     UB=16.5   PHASE=1    AREA=9


!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Noder for tog
!!!!-----------------------------------------------------------------------------

 LOCO1       UB=16.5   PHASE=1
 REF15       UB=15   PHASE=1
 !!STIFF       UB=15   PHASE=1

END

LINE
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Linjer for trefasenett
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
 !!OMF-66I   OMF-3-66   TYPE=1  R=4.356    X=16.87  !!!!Antatt ut fra Sk=250MVA
 OMF-22I   OMF-3-22 TYPE=1 R=0.49  X= 1.89

!!Z=U^2/Ssc = 22*22/248 = 1.95 Ohm
!! 1/4 resistiv gir R=1,95/4=0,49
!! X=sqrt(Z^2-R^2)=1.89


!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Linjeavganger omformere og koblingshus
!!!!-----------------------------------------------------------------------------

!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Kontaktledning
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
 OMF-1-15  LOCO1 R=0.183 X=0.211 L=60
   !!HON at km 96.72, Testlok rett på utsiden av Veme
   !!(Flirt at km 104-105, BR185 at km 100-106)
```

```
 !!OMF-1-15 STIFF TYPE=0
 OMF-1-15 OMF-1-G TYPE=1 X=0.001
END

TRANSFORMERS
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Transformatorer omformere
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
  OMF-3-22 OMFM1 SN=4.4 UN1=22.0 UN2= 6.3 ER12=0.0065 EX12=0.0714
 !!OMF-3-66  OMFM1 SN=4.4
 !!                UN1=66
 !!                UN2=6.3
 !!                ER12=0.0054 !!!!For Oppdal i TT MET05
 !!                EX12=0.079 !!!!For Oppdal i TT MET05

 OMFG1 OMF-1-G  SN=4.0
                UN1=4.0    !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                UN2=16.6   !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                ER12=0.014 !!!!Fra Prøveprotokoll R102, ved 75 grader (Per Kure)
                EX12=0.034 !!!!Fra Prøveprotokoll R102, ved 75 grader (Per Kure)
                !!PFE=0.0268 !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"

END

ROTARY CONVERTERS
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Roterende omformere
!!!!-----------------------------------------------------------------------------

 OMF_G1   OMFG1
                  SN=4.0   !!!!Opprinnelig merkeytelse
                  UN=4.    !!!!Merkespenning
                  XD=1.02  !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  XQ=0.47  !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  RA=0.0175!!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  POLES=4
                  !!!CTETA=6.728 !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  MOTOR=OMF_M1

 OMF_M1   OMFM1   SN=4.4   !!!!Opprinnelig merkeytelse
                  UN=6.3   !!!!Merkespenning
                  XD=0.90  !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  XQ=0.40  !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  RA=0.003 !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  POLES=12

END

LOADS
  !!LOCO1 NO=1 P=3.81
END

POWER CONTROL
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Power control
!!!!-----------------------------------------------------------------------------

 OMF_G1    TYPE=ROTA  RTYP=U      CNODE=OMF-1-15   U=16.5
 OMF_M1    TYPE=ROTA  RTYP=Q      Q=0.

 REF15     TYPE=NODE  RTYP=SW     U=16.5  FI=0.

!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Trefasenett
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
 OMF-22I   TYPE=NODE  RTYP=SW     U=22   FI=112.5642
END
END
```

7.1.2 Dynpow

```
Modell for test av omformer statikk sin innvirkning på LF-stab
SD 2010-04-12
**
```

```
CONTROL DATA
 LOADM=YES
 TEND=800
 DEND=-1
 UBCHECK=NO
END

GENERAL
 NREF=2
 REF= OMF-22I REF15
 FN=  50.      16.6666667
END

GLOBALS
 GLOBAL_LDIDT TYPE=REAL VALUE=0
END

COMMANDS
 AT 90.0
 ALTER SYNCOMF_M1 % D=000

 AT 100.0
 SAVE BASE

 !!ALTER SYNCOMF_G1 %XC=0.12
 !!a SS OMF_G1 2 31 % XCPU=0.044674546  !!!! -4% = 15.84 ved 5,8 MVAr
 !!a SS OMF_G1 2 31 % XCPU=0.089349115  !!!! -8% = 15.18 ved 5,8 MVAr
 a SS OMF_G1 2 31 % XCPU=0.134023672  !!!! -12% = 14.52 ved 5,8 MVAr
 !!a SS OMF_G1 2 31 % XCPU=0.17869823 !!!! -16% = 13.86 ved 5,8 MVAr
 !!a SS OMF_G1 2 31 % XCPU=0.167529591 !!!! -15% = 13.86 ved 5,8 MVAr

 AT 199
 POUT UNODE *-1-15

 AT 299
 POUT UNODE *-1-15
 POUT SYNC*_G*

 AT 799
 ALTER DYNPOW_VAR__GLOBAL_LDIDT=0!1 !!Ble tvunget til å bruke std simpow generator modell
 ALTER SYNCOMF_M1 % D=000
END

RUN INSTRUCTIONS
 !! Last for innstilling av spenningsregulator
 AT 200 INST CONNECT LOAD OMF-1-15 NO=2
 AT 300 INST DISCONNECT LOAD OMF-1-15 NO=2

 !! Legger inn riktig last
 AT 600 INST CONNECT LOAD LOCO1 NO=3
END

NODES
 OMF-22I      TYPE=1
 REF15        TYPE=1
END

LINES
 OMF-1-15 REF15    TYPE=1  R=0.  X=1. NCON=1
END

SYNCHRONOUS MACHINES
!!!!-----------------------------------------------------------------------
!!!! Synkronmaskiner
!!!!-----------------------------------------------------------------------
!!!! Maskinparametere for Q38 mottatt av Jan Lundblad, Alstom Hydro Power Västerås

  OMF_M1  OMFM1 TYPE=2A    !!!!Valgt modell
                SN=4.4    !!!!Opprinnelig merkeytelse
                UN=6.3    !!!!Merkespenning
                RA=0.003
                XA=0.11
                XD=0.90
                XDP=0.24
                TD0P=4.0
                XDB=0.165
                TD0B=0.04
```

```
                XQ=0.40
                XQB=0.34     !!!!Økt fra 0.24 til 0.34 for å tilpasse dempingen.
                TQ0B=0.10
                D=100.0
                H=1.70       !!!!Lagt til 5 % for aksel og exciter
                VREG=1

  OMF_G1  OMFG1 TYPE=2A     !!!!Valgt modell
                SN=4.0     !!!!Opprinnelig merkeytelse
                UN=4.0     !!!!Merkespenning
                RA=0.0175
                XA=0.096
                XD=1.02
                XDP=0.12
                TD0P=8.6
                XDB=0.10
                TD0B=0.08
                XQ=0.47
                XQB=0.11
                TQ0B=3.4
                D=0.0
                H=1.87       !!!!Lagt til 5 % for aksel og exciter
                VREG=2
                CNODE=OMF-1-15
END

REGULATORS
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Regulatorer med antatt Mag-A-Stat som side 300 i Andersen og Fouad
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
  1     TYPE=1   RC=0.0   !!!!Ingen aktiv kompensering
                XC=0.0   !!!!Ingen reaktiv kompensering
                TR=0.005 !!!!Satt til 1/4 periode
                TC=1.0   !!!!Blokken finnes/brukes ikke, satt lik TB
                TB=1.0   !!!!Blokken finnes/brukes ikke, satt lik TC
                TA=0.11  !!!!Bo Landström 2008-10-09
                KA=382    !!!!Antatt
                VRMAX=2.9!!!!side 48  i Stensby
                VRMIN=-2.9!!!!side 48  i Stensby
                TE=0.464 !!!!=Lexf/Km = 32.5/70 = 0.464, side 45 og 85 i Stensby
                KE=0     !!!!I følge KEH/STRI Justeres Rexf slik at KE i praksis blir 0
                KF=0.04  !!!!side 300 i Andersen og Fouad
                TF=0.7   !!!!Bo Landstrøm 2008-10-09
                SW2=0    !!!!Ut fra fig 47 side 85 i Stensby

!!!!Generatorregulatorparam. er basert på samme og antakelser som motoren YGUF
  2     TYPE=1   RC=0.0   !!!!Ingen aktiv kompensering
                XC=0.0   !!!!Antar ingen reaktiv kompensering, kanskje ikke riktig
                TR=100000000000.015 !!!!Satt til 1/4 periode
                TC=1.0   !!!!Blokken finnes/brukes ikke, satt lik TB
                TB=1.0   !!!!Blokken finnes/brukes ikke, satt lik TC
                TA=0.11  !!!!Bo Landström 2008-10-09
                KA=382   !!!!Antatt
                VRMAX=3.5 !!!! 110 V i forhold til beregnet basespg
                VRMIN=-3.5!!!!  0,208Ohm*148A = 30,784 V.
                KE=0     !!!!I følge KEH/STRI Justeres Rexf slik at KE i praksis blir 0
                !!TE=0.527 !!!!Målt Hønefoss ut fra tidskonstant 1 sekund (unøyaktig avlest)
                TE=0.395 !!!!Målt Hønefoss ut fra tidskonstant 0.75 sekund
                KF=0.15 !!0.04  !!!!Antatt ut fra side 300 i Andersen og Fouad
                TF=0.7   !!!!Bo Landström 2008-10-09
                SW2=0    !!!!Ut fra fig 47 side 85 i Stensby
                NSWS=1
                SWS=31

  31 TYPE=DSL/VRRC/ SNG=4.0 UNG=4.0
               ER12=0.014 EX12=0.034 SNT=4 UN1T=4 UN2T=16.6
               SNS=4 USB=16.5 XC=0.00 XS=0.00
               PREG=OMF-1-15 OMF-1-G
END

LOADS
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Laster
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
  OMF-1-15 NO=2 P=0.0001 Q=0.058 MP=1 MQ=1 PTAB=21 QTAB=22 NCON=1
  LOCO1    NO=3 P=0.0381         MP=0      PTAB=23         NCON=1
END
```

```
TABLES
 21 TYPE=0 F 0 1 200 1 275 100 300 100 !!!!400 1 500 1
 22 TYPE=0 F 0 1 200 1 275 100 300 100 !!!!400 1 500 1
 23 TYPE=0 F 0 1 600 1 700 100 800 100
END

END
```

7.2 Simuleringsfil Oslo-området

7.2.1 Optpow

```
Aggregert modell av sentrale Oslo med ASK, ALN og HOL
SD 2010-06-08
**
CONTROL DATA
 EDIT=-1
 TAUCHECK=NO
 UBCHECK=NO
END

GENERAL
 SN=70
END

NODES
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Noder for 3fase innmating til omformere
!!!!-----------------------------------------------------------------------------

 OMF-22I     UB=22    PHASE=3    AREA=9

!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Noder for omformere
!!!!-----------------------------------------------------------------------------

 OMF-3-22    UB=22    PHASE=3    AREA=9
 OMFM1       UB=6.3   PHASE=3    AREA=9
 OMFG1       UB=4     PHASE=1    AREA=9
 OMF-1-15    UB=16.5  PHASE=1    AREA=9
 OMF-1-G     UB=16.5  PHASE=1    AREA=9

!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Noder for tog
!!!!-----------------------------------------------------------------------------

 LOCO1      UB=16.5   PHASE=1
 REF15      UB=15   PHASE=1
 !!STIFF      UB=15   PHASE=1
END

LINE
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Linjer for trefasenett
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
 !!OMF-66I   OMF-3-66   TYPE=1  R=4.356    X=16.87  !!!!Antatt ut fra Sk=250MVA
 OMF-22I   OMF-3-22 TYPE=1 R=0.49  X= 1.89 L=0.057 !!=4/70 !!Reduserer med økt ytelse

!!Z=U^2/Ssc = 22*22/248 = 1.95 Ohm
!! 1/4 resistiv gir R=1,95/4=0,49
!! X=sqrt(Z^2-R^2)=1.89

!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Linjeavganger omformere og koblingshus
!!!!-----------------------------------------------------------------------------

!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Kontaktledning
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
 !!OMF-1-15  LOCO1 R=0.183 X=0.211 L=60
 OMF-1-15  LOCO1 R=0.326 X=0.325 L=1 !! Alle seks linjene under i parallell

 !!  OSS-SKY R=0.0412 X=0.188 L=4.38  Antall=2
 !!  SKY-LYS R=0.218  X=0.188 L=2.333 Antall=2
```

```
 !!  LYS-ASK R=0.218  X=0.188 L=17.117 Antall=2 Drammenbanen
 !!  LYS-ASK R=0.218  X=0.188 L=18.258 Antall=2 Askerbanen
 !!OSS-ASK R=0.110  X=0.123 L=23.83 Antall=2
 !!OSS-ALN R=0.170  X=0.162 L=8.8   Antall=2
 !!OSS-HOL R=0.190  X=0.186 L=10.8  Antall=2

 OMF-1-15 OMF-1-G TYPE=1 X=0.001
END

TRANSFORMERS
!!!!-----------------------------------------------------------------------
!!!! Transformatorer omformere
!!!!-----------------------------------------------------------------------
 OMF-3-22 OMFM1 SN=77 UN1=22.0 UN2= 6.3 ER12=0.0065 EX12=0.0714
 OMFG1 OMF-1-G  SN=70.0
                UN1=4.0    !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                UN2=16.6   !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                ER12=0.014 !!!!Fra Prøveprotokoll R102, ved 75 grader (Per Kure)
                EX12=0.034 !!!!Fra Prøveprotokoll R102, ved 75 grader (Per Kure)
END

ROTARY CONVERTERS
!!!!-----------------------------------------------------------------------
!!!! Roterende omformere
!!!!-----------------------------------------------------------------------

 OMF_G1   OMFG1
                  SN=70.0   !!!!Opprinnelig merkeytelse
                  UN=4.    !!!!Merkespenning
                  XD=1.02  !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  XQ=0.47  !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  RA=0.0175!!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  POLES=4
                  !!!CTETA=6.728 !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  MOTOR=OMF_M1

 OMF_M1   OMFM1   SN=77.0   !!!!Opprinnelig merkeytelse
                  UN=6.3   !!!!Merkespenning
                  XD=0.90  !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  XQ=0.40  !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  RA=0.003 !!!!Fra "Diverse datauppgifter på transp omformare"
                  POLES=12
END

POWER CONTROL
!!!!-----------------------------------------------------------------------
!!!! Power control
!!!!-----------------------------------------------------------------------

 OMF_G1    TYPE=ROTA  RTYP=U      CNODE=OMF-1-15   U=16.5
 OMF_M1    TYPE=ROTA  RTYP=Q      Q=0.

 REF15     TYPE=NODE  RTYP=SW     U=16.5  FI=0.

!!!!-----------------------------------------------------------------------
!!!! Trefasenett
!!!!-----------------------------------------------------------------------
 OMF-22I   TYPE=NODE  RTYP=SW     U=22   FI=0!!112.5642
END

END
```

7.2.2 Dynpow

```
Modell for test av omformer statikk sin innvirkning på LF-stab
SD 2010-04-12
**

CONTROL DATA
 LOADM=YES
 TEND=800
DEND=-1
 UBCHECK=NO
END

GENERAL
```

```
 NREF=2
 REF= OMF-22I REF15
 FN=  50.     16.6666667
END

GLOBALS
 GLOBAL_LDIDT TYPE=REAL VALUE=0
END

COMMANDS
 AT 90.0
 ALTER SYNCOMF_M1 % D=000

 AT 100.0
 SAVE BASE

 !!ALTER SYNCOMF_G1 %XC=0.12
 !!a SS OMF_G1 2 31 % XCPU=0.040486318  !!!! -4% = 15.84 ved 70 MVAr
 !!a SS OMF_G1 2 31 % XCPU=0.080972635  !!!! -8% = 15.18 ved 70 MVAr
 !!a SS OMF_G1 2 31 % XCPU=0.121458953  !!!! -12% = 14.52 ved 70 MVAr
 a SS OMF_G1 2 31 % XCPU=0.161945271 !!!! -16% = 13.86 ved 70 MVAr
 !!a SS OMF_G1 2 31 % XCPU=0.167529591 !!!! -15% = 13.86 ved 70 MVAr

 AT 199
 POUT UNODE *-1-15

 AT 299
 POUT UNODE *-1-15
 POUT SYNC*_G*

 AT 799
 ALTER DYNPOW_VAR__GLOBAL_LDIDT=0!1 !!Ble tvunget til å bruke std simpow generator modell
 ALTER SYNCOMF_M1 % D=000
END

RUN INSTRUCTIONS
 ! Last for innstilling av spenningsregulator
 AT 200 INST CONNECT LOAD OMF-1-15 NO=2
 AT 300 INST DISCONNECT LOAD OMF-1-15 NO=2

 !! Legger inn riktig last
 AT 600 INST CONNECT LOAD LOCO1 NO=3
END

NODES
 OMF-22I      TYPE=1
 REF15        TYPE=1
END

LINES
 OMF-1-15 REF15    TYPE=1  R=0.  X=1. NCON=1
END

SYNCHRONOUS MACHINES
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Synkronmaskiner
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Maskinparametere for Q38 mottatt av Jan Lundblad, Alstom Hydro Power Västerås

  OMF_M1  OMFM1 TYPE=2A     !!!!Valgt modell
                SN=77     !!!!Opprinnelig merkeytelse
                UN=6.3    !!!!Merkespenning
                RA=0.003
                XA=0.11
                XD=0.90
                XDP=0.24
                TD0P=4.0
                XDB=0.165
                TD0B=0.04
                XQ=0.40
                XQB=0.34    !!!!Økt fra 0.24 til 0.34 for å tilpasse dempingen.
                TQ0B=0.10
                D=100.0
                H=1.70      !!!!Lagt til 5 % for aksel og exciter
                VREG=1

  OMF_G1  OMFG1 TYPE=2A     !!!!Valgt modell
```

```
                SN=70.0     !!!!Opprinnelig merkeytelse
                UN=4.0     !!!!Merkespenning
                RA=0.0175
                XA=0.096
                XD=1.02
                XDP=0.12
                TD0P=8.6
                XDB=0.10
                TD0B=0.08
                XQ=0.47
                XQB=0.11
                TQ0B=3.4
                D=0.0
                H=1.87       !!!!Lagt til 5 % for aksel og exciter
                VREG=2
                CNODE=OMF-1-15
END

REGULATORS
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Regulatorer med antatt Mag-A-Stat som side 300 i Andersen og Fouad
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
  1    TYPE=1   RC=0.0   !!!!Ingen aktiv kompensering
                XC=0.0   !!!!Ingen reaktiv kompensering
                TR=0.005 !!!!Satt til 1/4 periode
                TC=1.0   !!!!Blokken finnes/brukes ikke, satt lik TB
                TB=1.0   !!!!Blokken finnes/brukes ikke, satt lik TC
                TA=0.11  !!!!Bo Landström 2008-10-09
                KA=382    !!!!Antatt
                VRMAX=2.9!!!!side 48  i Stensby
                VRMIN=-2.9!!!!side 48  i Stensby
                TE=0.464 !!!!=Lexf/Km = 32.5/70 = 0.464, side 45 og 85 i Stensby
                KE=0     !!!!I følge KEH/STRI Justeres Rexf slik at KE i praksis blir 0
                KF=0.04  !!!!side 300 i Andersen og Fouad
                TF=0.7   !!!!Bo Landstrøm 2008-10-09
                SW2=0    !!!!Ut fra fig 47 side 85 i Stensby

!!!!Generatorregulatorparam. er basert på samme og antakelser som motoren YGUF
  2    TYPE=1   RC=0.0   !!!!Ingen aktiv kompensering
                XC=0.0   !!!!Antar ingen reaktiv kompensering, kanskje ikke riktig
                TR=100000000000.015 !!!!Satt til 1/4 periode
                TC=1.0   !!!!Blokken finnes/brukes ikke, satt lik TB
                TB=1.0   !!!!Blokken finnes/brukes ikke, satt lik TC
                TA=0.11  !!!!Bo Landström 2008-10-09
                KA=382   !!!!Antatt
                VRMAX=3.5 !!!! 110 V i forhold til beregnet basespg
                VRMIN=-3.5!!!!  0,208Ohm*148A = 30,784 V.
                KE=0     !!!!I følge KEH/STRI Justeres Rexf slik at KE i praksis blir 0
                !!TE=0.527 !!!!Målt Hønefoss ut fra tidskonstant 1 sekund (unøyaktig avlest)
                TE=0.395 !!!!Målt Hønefoss ut fra tidskonstant 0.75 sekund
                KF=0.15 !!0.04  !!!!Antatt ut fra side 300 i Andersen og Fouad
                TF=0.7   !!!!Bo Landström 2008-10-09
                SW2=0    !!!!Ut fra fig 47 side 85 i Stensby
                NSWS=1
                SWS=31

  31 TYPE=DSL/VRRC/ SNG=70.0 UNG=4.0
               ER12=0.014 EX12=0.034 SNT=70 UN1T=4 UN2T=16.6
               SNS=70 USB=16.5 XC=0.00 XS=0.00
               PREG=OMF-1-15 OMF-1-G
END


LOADS
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
!!!! Laster
!!!!-----------------------------------------------------------------------------
  OMF-1-15 NO=2 P=0.0001 Q=0.70  MP=1 MQ=1 PTAB=21 QTAB=22 NCON=1
  LOCO1    NO=3 P=0.856  Q=0.315 MP=0 MQ=1 PTAB=23 QTAB=23 NCON=1

!!Fra Oslo-området rapport figur 4-6:
!! 2-sekundersverdier
!! ASK-OSS: 42,7+j18,9 MVA
!! ALN-OSS: 20,6+j9,1 MVA
!! HOL-OSS: 22,3+j3,5
!! Sum    : 85,6+j31,5
END
```

```
TABLES
 21 TYPE=0 F 0 1 200 1 275 100 300 100 !!!!400 1 500 1
 22 TYPE=0 F 0 1 200 1 275 100 300 100 !!!!400 1 500 1
 !!23 TYPE=0 F 0 1 600 1 700 100 800 100
 23 TYPE=0 F 0 1 600 1 700 85 800 85
END

END
```

Classic DFS, 15 mm for 121-150 sheets 628
www.bindomatic.com

JERNBANEVERKET
BIBLIOTEKET
10TU00408