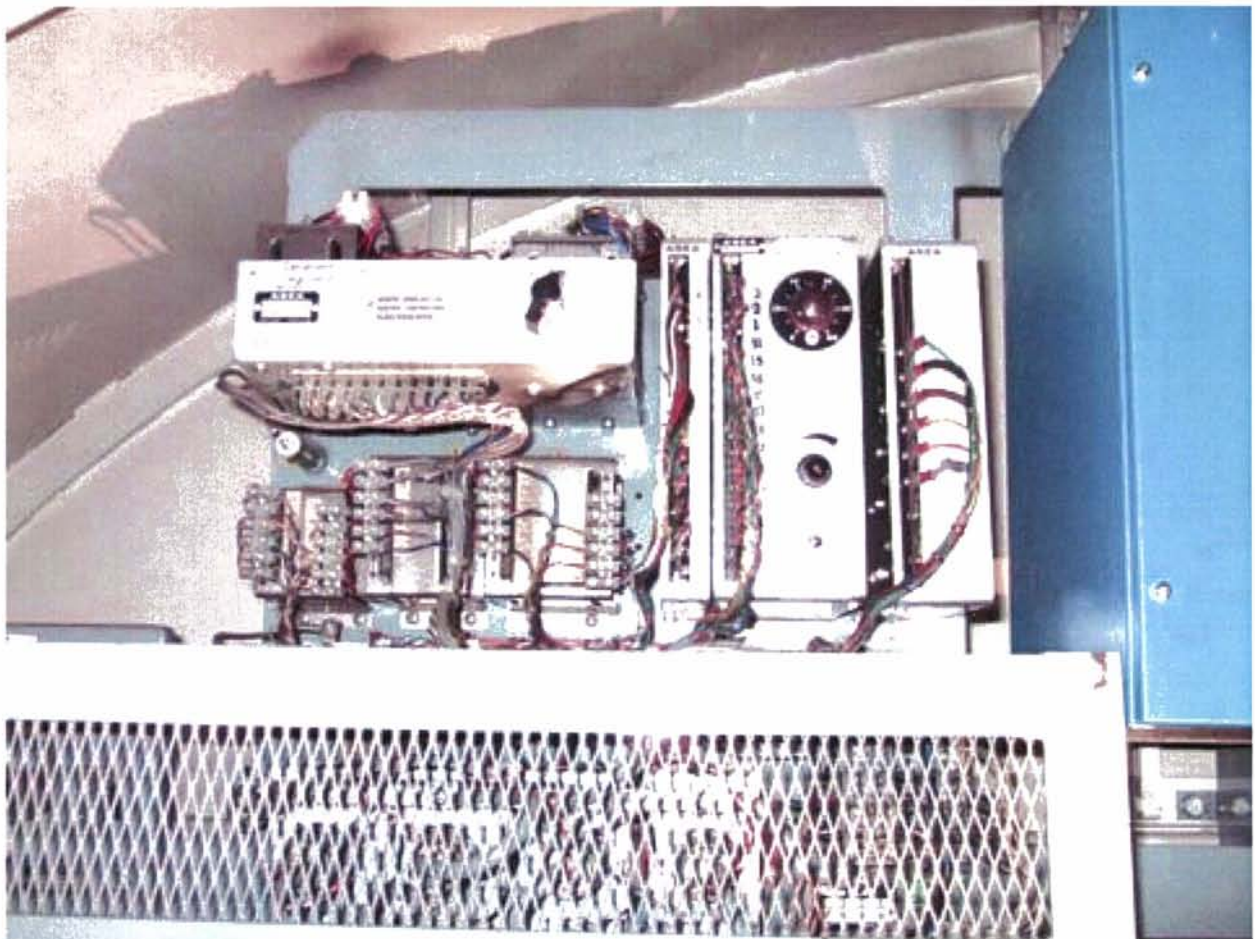


Jernbaneverket  
Biblioteket

Rapport

## SPENNINGSREGULATORINNSTILLING I ROTERENDE OMFORMERSTASJONER

Undersøkelser og forslag til nye innstillingsverdier som kan øke  
belastbarheten og minke reaktiv effektlyt




Ehs.1

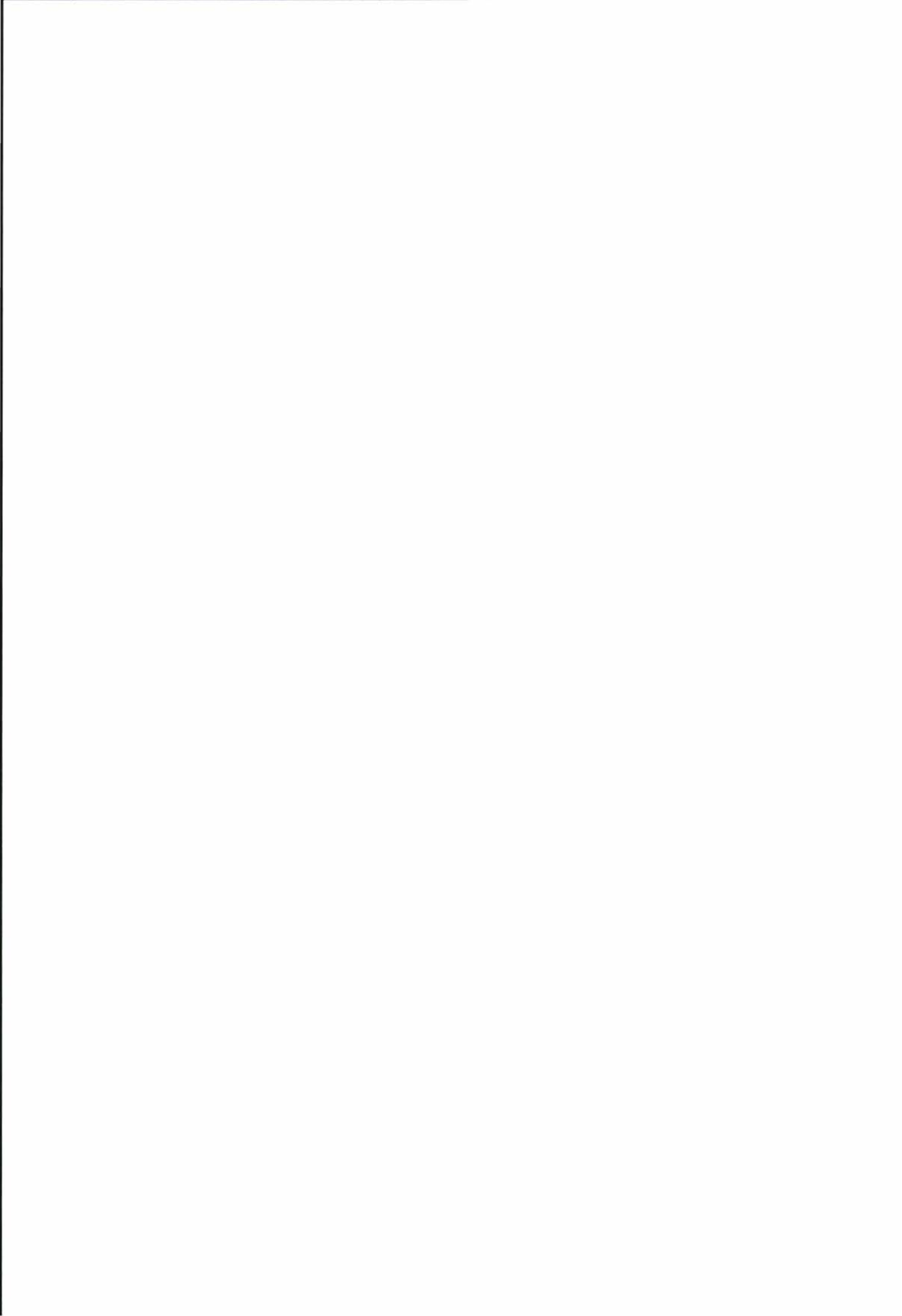
9627.332 YEV Sje

# RAPPORT

## Spenningsregulatorinnstilling i roterende omformerstasjoner

### Undersøkelser og forslag til nye innstillingsverdier som kan øke belastbarheten og minke reaktiv effektlyt

000	Endelig utgave	05.10.09	FM	STOY	JCS	
Rev.	Revisjonen gjelder	Dato	Utarb. av	Kontr. av	Godkj. av	
<b>Banestrømforsyning</b> <b>Det offentlige jernbanenettet i Norge</b> <b>Innstilling av spenningsregulatorer</b> <b>Rapport</b>		Ant. sider	Fritekst 1d			
		<b>155</b>	Fritekst 2d			
			Fritekst 3d			
			Produsent	Frank Martinsen (FM)		
		Prod. dok. nr.				
		Erstatning for				
Erstattet av						
 <b>Jernbaneverket</b>	Dokument nr. <b>EB.800094-000</b>			Rev.		



## Sammendrag

Innstillingen av spenningsregulatorerne til generatorne i Jernbaneverkets omformerstasjoner skal i henhold til Teknisk Regelverk JD548 primært ha en innstilling for å gi 16,5 kV.

Allikevel har det vært diskutert om en fallende statikk vil være mer gunstig, ettersom det produseres mye reaktiv effekt som utveksles mellom omformerstasjonene. Det er også i dag har behov for å gjøre en revisjon av omformerstasjonenes spenningsregulatorinnstillinger fordi de kan være noe forskjellige. Det finnes i dag også tilfeller der statikken er stigende.

Med roterende omformere av typen synkron - synkron og jernbanens spesielle kontaktledningssystem med høy resistans (R) og reaktans (X) oppstår mye reaktiv effektutveksling. Ved aktiv effektproduksjon i en stasjon oppstår en fasedreining, - den såkalte polhjulsvinkelen, på grunn av vinkelforskjell mellom statorens og rotorens magnetfelt både i omformerens motor og generator. Ulik fasedreining mellom omformerstasjoner fører til reaktiv effektutveksling mellom dem. I et vanlig kraftsystem kan det være en faseforskjell mellom stasjonene uten at dette fører til reaktiv effektutveksling. Det er forholdet mellom R og X som er årsaken. I et kl-anlegg er R og X nesten like stort, men i et vanlig trefase kraftsystem er gjerne X ti ganger større enn R.

Spenningsregulatorerne er konstruert for i utgangspunktet å holde spenningen konstant. Men det er vanlig å regulere spenningen noe ned proporsjonalt med reaktiv produksjon. Dette kalles fallende statikk og fører til en redusert reaktiv effektproduksjon. Tilfellet med konstant spenning uansett effektproduksjon kalles flat statikk. En har sett på muligheten av å redusere den reaktiv effektproduksjonen for å oppnå følgende:

- Unngå unødvendig reaktiv effektutveksling mellom omformerstasjoner i normal drift.
- Unngå overbelastning av omformerstasjonenes aggregater, spesielt i en situasjon der det ene av to aggregater er falt ut. Kan en oppnå dette kan en også belaste stasjonene hardere i normal drift og dermed, i alle fall i prinsippet, tillate større togtrafikk.
- Om mulig redusere kontaktledningstapene.

Det en imidlertid må unngå er å stille statikken så mye ned at det går ut over spenningens kvalitet for togene ute på matestrekningen. En må gjøre en avveining mellom gevinsten av redusert reaktiv effektopplasting på den ene siden og lavere spenning for togene på den andre.

I arbeidet som er gjort her har en rent prinsipielt undersøkt forholdene i et enkelt kraftsystem bestående av omformerstasjoner med roterende aggregater, spenningsregulatorer, kraftlinjer og laster. Det er utført et antall undersøkelser vedrørende antall og størrelsen av aggregater i hver omformerstasjon, avstand mellom stasjonene og tog med effektfaktor

$\cos \varphi = 1,0$  og  $0,7$  (induktiv). Undersøkelsene viser følgende:

- Med en fallende statikk på hele 12 % kan en tillate 1 - 2 MW større effektuttak til togene i normal drift når de er rett ved en omformerstasjon med installert ytelse på  $2 \times 5,8$  MVA.
- Når togene er ute på matestrekningen reduseres tillatt effektuttak med ca. 2 MW når statikken er 12 % istedenfor flat statikk. Dette for å unngå for lav spenning.
- Med en fallende statikk som øker til 24 % ved utfall av ett av to aggregater i en stasjon, vil belastningen fra toget utenfor tillates å være 1,45 MW større. Denne økningen er på 11 % og er muligens den viktigste årsaken til å velge fallende statikk. Denne økningen gjelder altså for aggregater på  $2 \times 5,8$  MVA i forhold til om det var en liten statikk på 5 % som er typisk i dag.

Valget av en statikk på 12 % er et kompromiss for å tillate høyest mulig belastning rett ved omformerstasjonen og ikke få for lav spenning for togene ute på matestrekningen. Når togene er ute på matestrekningen kan de uansett trekke noe mer effekt enn rett ved en stasjon. En statikk på 12 % vil gjøre at tillatt effektuttak rett ved en stasjon og midt mellom to stasjoner blir mer lik.

Det ble funnet at statikken kan være 12 % for alle omformerstasjoner uansett størrelse og avstand til neste stasjon, unntaket er de små omformerstasjonene på Rudshøgda og Otta der en statikk på hele 16 % ble funnet å være mest passende. En fant også, - rent prinsipielt, at det såkalte redundanskriteriet bør settes til 50 % og ikke intervallet 50 - 60 %. For AT-system fant en for de prinsipielle undersøkelsene at en fallende statikk på 16 % ville være gunstig.

For å teste ut resultatene fra de prinsipielle undersøkelsene ble det utført enkle trafikksimuleringer for 24 timer på Dovrebanen. Med togtrafikk der alle godstog trekkes med E114 og E116 lokomotiver så en at den fallende statikken på 12 % førte til mindre belastning på omformerstasjonene. Det ble også gjort en test med utfall av ett aggregat i Dombås som viste at bare fallende statikk kunne gjøre at en unngår utfall av det gjenværende aggregatet. For trafikksimuleringene med moderne lokomotiver av typen CE119 så en at fallende statikk fikk liten betydning for belastningen av omformerstasjonene. En antar imidlertid at trafikken i ruteplanen som ble benyttet er for liten til å se noen særlig effekt av fallende statikk. Moderne lokomotiver trekker så liten reaktiv effekt at de må kjøre med mindre togfølgetid for å belaste systemet like mye som E116 gjør. Trafikksimuleringene viste liten endring når det gjelder energiforbruket både for eldre lokomotivtyper og moderne.

Det anbefales å stille inn en statikk for omformerstasjonene som undersøkt her. Siden en er noe usikker på om ruteplaner med tettere trafikk kan føre til ugunstig lav spenning anbefales det først å teste dette ut på en banestrekning. Dovrebanen er foreslått som teststrekning.

<b>1</b>	<b>INNLEDING.....</b>	<b>4</b>
1.1	INNLEDING.....	4
1.2	MÅLSETTING .....	5
1.3	FORUTSETNINGER OG METODIKK.....	5
1.4	MODELLER .....	7
<b>2</b>	<b>UNDERSØKELSER FOR STILISERTE TILFELLER.....</b>	<b>10</b>
2.1	UNDERSØKELSER FOR TILFELLET MED EN OMFORMERSTASJON I SEPARAT DRIFT OG BELASTNING .....	10
2.1.1	<i>Forsøk med flat statikk.....</i>	11
2.1.2	<i>Forsøk med 4 % fallende statikk .....</i>	12
2.2	LIKE OMFORMERSTASJONER OG 80 KM LANG MATESTREKNING.....	15
2.2.1	<i>Undersøkelse av normal driftsituasjon med lasten rett ved omformerstasjonen.....</i>	16
2.2.1.1	Last 1 - Aktiv belastning .....	17
2.2.1.2	Last 2 - Aktiv og reaktiv belastning .....	19
2.2.2	<i>Undersøkelse av utfall av aggregat med lasten rett ved omformerstasjonen .....</i>	23
2.2.2.1	Last 1 - Aktiv belastning .....	23
2.2.2.2	Last 2 - Aktiv og reaktiv belastning .....	26
2.2.3	<i>Undersøkelse av normal driftsituasjon med lasten ute på matestrekingen.....</i>	30
2.2.3.1	Last 1 - Aktiv belastning .....	30
2.2.3.2	Last 2 - Aktiv og reaktiv belastning .....	33
2.2.4	<i>Undersøkelse av utfall av aggregat med lasten ute på matestrekingen.....</i>	37
2.2.4.1	Last 1 - aktiv belastning .....	37
2.2.4.2	Last 2 - aktiv og reaktiv belastning.....	40
2.2.5	<i>Undersøkelse av driftsituasjon med ensidig matet strekning .....</i>	42
2.2.5.1	Last 1 - aktiv belastning .....	43
2.2.5.2	Last 2 - aktiv og reaktiv belastning.....	45
2.2.6	<i>Oppsummering etter undersøkelser med 80 km matestreking og like omformerstasjoner .....</i>	48
2.3	STOR OMFORMERSTASJON MED NORMALT STORE NABOSTASJONER OG 80 KM LANG MATESTREKNING 50	
2.3.1	<i>Undersøkelse av normal driftsituasjon med lasten rett ved omformerstasjonen.....</i>	50
2.3.1.1	Last 1 - aktiv belastning .....	50
2.3.1.2	Last 2 - aktiv og reaktiv belastning.....	53
2.3.2	<i>Undersøkelse av utfall av aggregat med lasten rett ved omformerstasjonen .....</i>	56
2.3.2.1	Last 1 - aktiv belastning .....	56
2.3.2.2	Last 2 - aktiv og reaktiv belastning.....	58
2.4	OPPSUMMERING ETTER UNDERSØKELSER MED STOR OMFORMERSTASJON MED NORMALT STORE NABOSTASJONER OG 80 KM LANG MATESTREKNING.....	61
2.5	LIKE OMFORMERSTASJONER OG 40 KM LANG MATESTREKNING.....	61
2.5.1	<i>Undersøkelse av normal driftsituasjon med lasten rett ved omformerstasjonen.....</i>	62
2.5.1.1	Last 1 - aktiv belastning .....	62
2.5.1.2	Last 2 - aktiv og reaktiv belastning.....	64
2.5.2	<i>Undersøkelse av utfall av aggregat med lasten rett ved omformerstasjonen .....</i>	67
2.5.2.1	Last 1 - aktiv belastning .....	67
2.5.2.2	Last 2 - aktiv og reaktiv belastning.....	69
2.6	LITEN OMFORMERSTASJON MED NORMALT STORE NABOSTASJONER OG 40 KM LANG MATESTREKNING 72	
2.6.1	<i>Undersøkelse av utfall av aggregat med lasten rett ved omformerstasjonen .....</i>	72
2.6.1.1	Last 1 - aktiv belastning .....	72
2.6.1.2	Last 2 - aktiv og reaktiv belastning.....	75
2.7	OPPSUMMERING ETTER UNDERSØKELSER MED 40 KM LANG MATESTREKNING OG STOR OG LITEN OMFORMERSTASJON MED NORMALT STORE NABOSTASJONER .....	78
2.8	LIKE OMFORMERSTASJONER OG AT-SYSTEM MED 120 KM LANG MATESTREKNING .....	78
2.8.1	<i>Undersøkelse av normal driftsituasjon med lasten rett ved omformerstasjonen.....</i>	79
2.8.1.1	Last 1 - Aktiv belastning .....	79
2.8.1.2	Last 2 - Aktiv og reaktiv belastning .....	81
2.8.2	<i>Undersøkelse av utfall av aggregat med lasten rett ved omformerstasjonen .....</i>	84
2.8.2.1	Last 1 - Aktiv belastning .....	84
2.8.2.2	Last 2 - Aktiv og reaktiv belastning .....	87
2.8.3	<i>Undersøkelse av normal driftsituasjon med lasten ute på matestrekingen.....</i>	90
2.8.3.1	Last 1 - Aktiv belastning .....	90
2.8.3.2	Last 2 - Aktiv og reaktiv belastning .....	93

2.8.4	Oppsummering etter undersøkelse med 120 km mellom omformerstasjonene og AT-system .....	96
<b>3</b>	<b>TRAFIKKSIMULERING .....</b>	<b>98</b>
3.1	SIMULERINGER MED TOG PÅ DOVREBANEN MED EL14 OG EL16 LOKOMOTIVER OG NORMAL DRIFTSITUASJON.....	98
3.1.1	Omformerbelastning.....	98
3.1.2	Spenning for togene.....	101
3.1.3	Energiforbruk.....	106
3.2	SIMULERINGER MED TOG PÅ DOVREBANEN MED EL14 OG EL16 LOKOMOTIVER OG UTFALL AV ETT AGGREGAT PÅ DOMBÅS .....	107
3.2.1	Omformerbelastning.....	107
3.2.2	Spenning for togene.....	110
3.3	SIMULERINGER MED TOG PÅ DOVREBANEN MED MODERNE CE119 LOKOMOTIVER .....	111
3.3.1	Omformerbelastning.....	111
3.3.2	Spenning for togene.....	114
3.3.3	Energiforbruk.....	117
3.4	SIMULERINGER MED TOG PÅ DOVREBANEN MED MODERNE CE119 LOKOMOTIVER OG UTFALL AV ETT AGGREGAT PÅ FÅBERG.....	117
3.4.1	Omformerbelastning.....	118
3.4.2	Spenning for togene.....	120
<b>4</b>	<b>OPPSUMMERING, DISKUSJON OG ANBEFALINGER.....</b>	<b>123</b>
4.1	OPPSUMMERING AV RESULTATENE .....	123
4.1.1	Oppsummering av resultater for konvensjonell banestromforsyning.....	123
4.1.2	Oppsummering av resultater for banestromforsyning med AT-system .....	125
4.2	DISKUSJON .....	125
4.2.1	Dagens innstilling av spenningsregulatorene .....	125
4.2.2	Gevinsten med fallende statikk for omformerstasjonene .....	125
4.2.3	Belastningsprosent for utfall av ett omformeraggregat - redundanskriteriet.....	126
4.2.4	Fallende statikk for aktiv effektproduksjon kunne også vært fordelaktig.....	128
4.2.5	Fordelaktig med enda større redusert spenning ved utfall av aggregater .....	128
4.2.6	Overveielse mellom redusert spenning ved normal drift og fordelene av å unngå overbelastning ved utfall.....	128
4.2.7	Fallende statikk i omformerstasjoner i fremtidig AT-system.....	129
<b>5</b>	<b>KONKLUSJON OG ANBEFALINGER.....</b>	<b>130</b>
<b>6</b>	<b>APPENDIKS A - TRAFIKKSIMULERINGER FOR Å BESTEMME STED FOR LAVESTE SPENNING OG ANTALL TOG .....</b>	<b>131</b>
6.1	LAVESTE SPENNING FOR TILFELLE MED LIKE OMFORMERE PÅ 2 X 5,8 MVA OG 80 KM MELLOM DEM 132	
6.1.1	Tilfelle med normal drift .....	132
6.1.2	Tilfelle med utfall av et aggregat .....	134
6.2	LAVESTE SPENNING FOR TILFELE MED LIKE OMFORMERE PÅ 3 X 5,8 MVA OG 120 KM MELLOM DEM OG AT-SYSTEM .....	137
6.2.1	Tilfelle med normal drift .....	137
6.2.2	Tilfelle med utfall av ett aggregat .....	139
6.2.3	Tilfelle med to aggregater i drift og utfall av ett .....	142
<b>7</b>	<b>APPENDIKS B - SPENNINGSREGULATORENS MODELL I SIMPOW.....</b>	<b>144</b>
<b>8</b>	<b>REFERANSER.....</b>	<b>151</b>
<b>9</b>	<b>VEDLEGG 1 PARAMETERE FOR OMFORMERE .....</b>	<b>152</b>



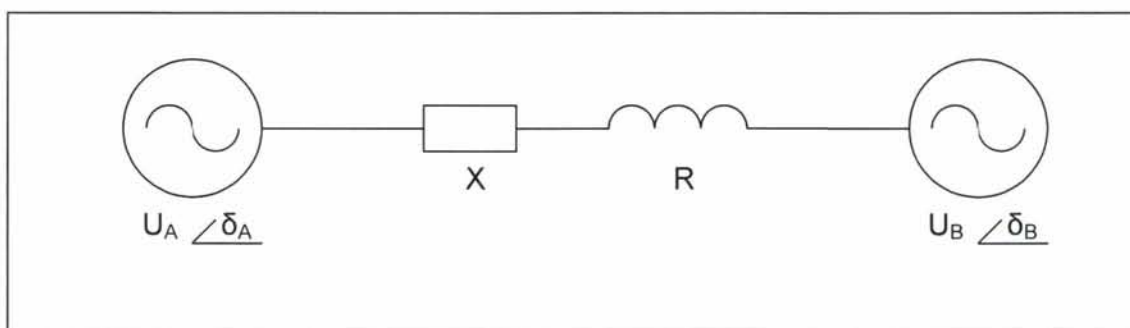
## 1 INNLEDING

### 1.1 Innledning

Omformerstasjonene til Jernbaneverket skal i henhold til Teknisk Regelverk JD548 - 18.2.2.b ha en innstilling av spenningsregulatorene som gir konstant spenning på 16,5 kV uavhengig av belastningen. Det er også gitt en mulighet for å velge fallende statikk der en måtte finne det nødvendig. Imidlertid er det fremdeles mange omformerstasjoner som er innstilt på 16,2 kV som var den tidligere vedtatte spenningen, endog er det tilfeller der spenningen stiger med økt reaktiv belastning. Bane Energi ønsker å endre på spenningsregulatorene sin innstilling, slik at dette blir i henhold til regelverket. I den forbindelse ønsker en å finne ut om fallende statikk kan være gunstigere for lastfordelingen mellom omformerstasjonene enn flat statikk. Store mengder reaktiv effekt flyter mellom omformerstasjonene når de belastes. Siden en gjennomgang av spenningsregulatorenes innstilling for alle stasjoner er et omfattende arbeid er det fornuftig å undersøke om det er fordelaktig med fallende statikk før arbeidet tar til.

Dagens innstilling med 16,2 kV gjør at spenningen til togene blir lavere enn hva en skulle ha ønsket og selv om økning til 16,5 kV ikke er mye, kan det i alle fall hjelpe noe. Stigende spenning ved økt belastning, kalt økende statikk, er sannsynligvis ikke særlig fordelaktig fordi dette fører til større belastning på aggregatene enn nødvendig. En ønsker først og fremst at stasjonene skal levere aktiv effekt til togene, - all reaktiv effektutveksling mellom omformerstasjonene fører bare til at en når belastningsgrensen raskere. Når denne grensen overskrides kobles aggregatene ut på grunn av høy strøm eller høy temperatur.

Dessverre er det en ugunstig egenskap med jernbanens banestrømforsyning at det oppstår mye reaktiv effektutveksling med roterende omformere av typen synkron - synkron. I Lærebøker i Jernbaneteknikk og i [1] er dette forklart ved at forholdet mellom resistans (R) og reaktans (X) i kontaktledningsanlegget er nesten likt. I andre kraftsystemer er ofte R mye mindre enn X (typisk 1/10) og en unngår dermed stor utveksling av reaktiv effekt mellom generatorer med ulike fasevinkler mellom dem. Nedenfor er det i Figur 1-1 skissert opp et meget enkelt kraftsystem der de to spenningskildene kan være to omformere (generatorer) forbundet med kl-anlegg som i banestrømforsyningen. Forlene som gjelder for effektutveksling er vist i Formel 1-1 og Formel 1-2 for henholdsvis aktiv og reaktiv effekt. Om en setter  $R \approx 0$  får formlene en mye enklere form, og for reaktiv effektutveksling må differensen for fasevinklene være meget stor for at ikke hele uttrykket skal bli lik null. En kan enkelt gjøre lastflytberegninger for å forvise seg om at dette faktisk stemmer.



Figur 1-1 Prinsippskisse av et enkelt kraftsystem med to spenningskilder A og B.

$$P_{AB} = \frac{R(U_A^2 - U_A \cdot U_B \cos(\delta_A - \delta_B)) + X \cdot U_A \cdot U_B \sin(\delta_A - \delta_B)}{R^2 + X^2} \quad \text{Formel 1-1}$$

$$Q_{AB} = \frac{X(U_A^2 - U_A \cdot U_B \cos(\delta_A - \delta_B)) - R \cdot U_A \cdot U_B \sin(\delta_A - \delta_B)}{R^2 + X^2} \quad \text{Formel 1-2}$$

hvor følgende størrelser inngår:

$P_{AB}$  = Aktiv effekt fra spenningskilde A til B

$Q_{AB}$  = Reaktiv effekt fra spenningskilde A til B

R = Resistans i linjen mellom spenningskilde A og B

X = Reaktans i linjen mellom spenningskilde A og B

$U_A$  = Spenning ved spenningskilde A

$U_B$  = Spenning ved spenningskilde B

$\delta_A$  = Fasevinkel for spenningen ved spenningskilde A

$\delta_B$  = Fasevinkel for spenningen ved spenningskilde B

## 1.2 Målsetting

Målet med arbeidet er å finne svar på følgende:

- Kan fallende statikk på spenningsregulatorene føre til mindre reaktiv effektutveksling? Samtidig ønsker en også å redusere tapene i kl-anlegget. Dette skal undersøkes for konvensjonelt kl-anlegg med 80 og 40 km mellom omformerstasjonene. Undersøkelse av om dette vil være forskjellige optimale verdier for graden av fallende statikk for store og små stasjoner.
- Undersøke om det for utfall av omformeraggregater vil være gunstig med en enda større fallende statikk enn det som er tilfelle i dag. Om det er tilfelle vil det bety at dagens redundanskriterium kan revideres. Redundanskriteriet sier at maksimal belastning av en omformerstasjon er 50 - 60 % (uten tillagte marginer) om en skal unngå utfall av en hel stasjon om ett aggregat faller ut. Dette gjelder stasjoner med to roterende aggregater.
- Disse tingene ønsker en også å finne ut av for AT-system.

Når en skal finne den optimale innstillingen må det også tas hensyn til at spenningen under alle forhold holder seg innenfor ønsket verdi.

## 1.3 Forutsetninger og metodikk

Simuleringene skal ta utgangspunkt i enkle stiliserte tilfeller med standard omformer- og kontaktledningsanlegg. For alle undersøkelsene forutsettes overliggende kraftnett å være uendelig stivt og uten fasevridning mellom omformerstasjonene. I utgangspunktet ønsker en at alle omformerstasjoner skal ha like stor statikk. Dermed vil de med en symmetrisk belastning på matestrekningen fordele reaktiv effekt likt mellom seg i forhold til innsatt ytelse.

- Prinsipielle undersøkelser med en isolert stasjon.
  - Undersøke forskjellige typiske stasjoners karakteristikk med hensyn på fasevinkel ved økende aktiv belastning og spenning ved økende reaktiv

- belastning. Se på stasjoner med 3,1 MVA, 2 x 5,8 MVA, 2 x 7,0 MVA, 2 x 10,0 MVA og 3 x 5,8 MVA.
- Undersøke med rent aktiv og reaktiv belastning, samt en belastning der aktiv og reaktiv belastning endres fra null til merkelast slik at tilsynelatende effekt er konstant.
  - Prinsipielle undersøkelser med en stasjon og økende last med stasjoner med 80 km mellom dem.
    - Undersøkelse for like stasjoner med aggregater på 2 x 5,8 MVA.
    - Liten stasjon med store nabostasjoner. 2 x 5,8 MVA og naboer med 2 x 7 MVA.
    - Stor stasjon med små naboer. 2 x 7 MVA og naboer med 2 x 5,8 MVA.
    - For alle disse undersøkelsene gjøres følgende:
      - Modell med fem omformerstasjoner.
      - En last settes utenfor en omformerstasjon med nabostasjoner og denne økes til overbelastning inntreffer. Undersøkelser med forskjellig trinn av statikken på 0, 4, 8 og 12 %.
      - Alle stasjonene gis samme statikk. Statikk angis som avhengighet mellom Q og U.
      - Benytte både last med  $\cos \varphi = 1,0$  og 0,7
      - Utfall av ett aggregat og undersøkelse av hvor stor belastningen kan være før utfall. Teste forskjellig fallende statikk også for individuelle aggregater.
      - Se på spenning og effektflyt.
  - Prinsipielle undersøkelser med en stasjon og økende last med stasjoner med 40 km mellom dem.
    - Undersøkelse for like stasjoner med aggregater på 2 x 5,8 MVA.
    - Liten stasjon med store nabostasjoner, - 3,1 MVA og naboer med 2 x 7 MVA.
    - Stor stasjon med små naboer, - 2 x 7 MVA og naboer med 2 x 5,8 MVA.
    - For alle disse tilfellene gjøres undersøkelser som ovenfor.
  - Prinsipielle undersøkelser med en stasjon og økende last med stasjoner med 120 km mellom dem og AT-system.
    - Undersøkelse for like stasjoner med aggregater på 3 x 5,8 MVA.
    - Undersøkelsene gjøres som ovenfor.
  - Prinsipiell undersøkelse med lastflyt når lasten flyttes langs en matestrekning på 80 km.
    - Simulering med modell med matestrekning og nabostasjoner der en undersøker lastfordelingen mellom stasjonene med forskjellig statikk. Benytter de verdiene for statikk som en fant nyttig ovenfor.
      - Modell med fire omformerstasjoner.
      - Stasjonene gis den statikk og omformerytelse som en fant interessante resultater for i tidligere undersøkelser.
      - Lastene gis effektreduksjon ved lav spenning slik som togene har.
      - Benytte både last med  $\cos \varphi = 1,0$  og 0,7 som flyttes ut over matestrekningen.
      - Fastslå om samme statikk kan brukes for alle stasjoner eller om individuelle valg er best.

- Prinsipiell undersøkelse med lastflyt når lasten flyttes langs en matestrekning på 40 km.
  - Simulering med modell med matestrekning og nabostasjoner der en undersøker lastfordelingen mellom stasjonene med forskjellig statikk. Benytter de verdiene for statikk som en fant nyttig ovenfor.
    - Modell med fem omformerstasjoner.
    - Ellers samme forutsetninger som ovenfor.
- Prinsipiell undersøkelse med lastflyt når lasten flyttes langs en matestrekning på 120 km med AT-system.
  - Simulering med modell med matestrekning og nabostasjoner der en undersøker lastfordelingen mellom stasjonene med forskjellig statikk. Benytter de verdiene for statikk som en fant nyttig ovenfor.
    - Modell med fem omformerstasjoner.
    - Ellers samme forutsetninger som ovenfor.
- Trafikksimuleringer for Dovrebanen med de resultater en har funnet overfor for å bekrefte at totale tap reduseres.

## 1.4 Modeller

Modellene som benyttes i undersøkelsene, er standardmodellene som finnes i SIMPOW, og de spesielle modellene for roterende omformere som er utviklet spesielt for banestrømforsyning. De parametrene som er definert pr 28.10.2004 i det interne notatet "Standard omformer parametere" benyttes. I vedlegg 1 er det vist modellene i SIMPOW som er benyttet for samtlige omformerstørrelser.

Det benyttes en intern stabilisering mellom aggregatene på 5 % (det vanlige) som utgangspunkt. Der endringer gjøres opplyses det spesielt om dette. Settpunkt for spenningsregulatoren for utmatingen for stasjonen settes til 16,5 kV slik som Teknisk regelverk JD 548 sier. Når det gjøres undersøkelser for fallende statikk for omformerstasjonene, er det kun for den reaktive delen av belastningen, såkalt reaktiv kompensering. Det kunne vært aktuelt å undersøke lastflyten også med statikk for aktiv effekt, men modellene i SIMPOW for spenningsregulatorer for roterende omformere har ikke denne funksjonen. (Om ønskelig kan selvsagt denne funksjonen utvikles i SIMPOW).

For omformeraggregater på 5,8 MVA oppstår spesielle formelle problemer som kan skape misforståelser. Disse aggregatene er i utgangspunktet konstruert for en merkeytelse på 4,0 MVA, men senere fant en ut at de var såpass rikelig dimensjonert at det kunne tillates med en kontinuerlig belastning på 5,8 MVA. Imidlertid har det vært vanlig praksis å angi pu-verdier med 4,0 MVA som basis for  $S_N$ . I dette arbeidet videreføres praksisen med 4,0 MVA som merkeytelse. Det kan også oppstå misforståelser med når det her gjøres innstillinger av statikk med et visst antall prosent fra tomgang til merkelast, - hva skal i så fall angis som merkelast? For å unngå misforståelser benyttes en belastning på 5,8 MVA rent reaktivt der ønsket fall i spenningen skal oppstå. Følgende viser prosenten om en senere skulle benytte 4,0 MVA som last.

**Tabell 1-1 Sammenheng mellom spenning og spenningsfall med 4,0 MVA som pu-base for aggregater på 5,8 MVA.**

Prosentvis spenningsfall	Spenning [kV]	Tilsvarende prosentvis spenningsfall ved ytelse 4,0 MVA	Spenning [kV] ved ytelse 4,0 MVA
2	16,17	1,38	16,27
4	15,84	2,76	16,04
6	15,51	4,14	15,82
8	15,18	5,52	15,59
10	14,85	6,90	15,36
12	14,52	8,28	15,13

For et konvensjonelt kontaktledningsanlegg benyttes en strekningsimpedans på  $0,18 + j0,19 \Omega/\text{km}$  som skal vise en typisk strekning med sugetransformatorer og retur gjennom skinnene. For AT-system benyttes en strekningsimpedans på  $0,039 + j0,049 \Omega/\text{km}$  som er "loop-impedansen" kun for negativ- og positivleder når disse har et tverrsnitt  $381 \text{ mm}^2$ , avstanden mellom dem er 1,0 m og den er referert fra 30 kV nivå til 15 kV, se [6] og [7].

Det ønskes ingen spenningsavhengighet til lastene som settes inn for å undersøke forhold ved lastuttak rett ved en omformerstasjon. Imidlertid kan det ofte skje at en ikke får simuleringene til å konvergere uten at en viss spenningsavhengighet angies. Imidlertid får dette ingen betydning for resultatet så lenge en oppgir lastens virkelige effekt opptak. Formelen nedenfor viser disse sammenhengene for SIMPOW og ved å sette  $MP = NP = MQ = NQ = 0$  oppnås det en ønsker:

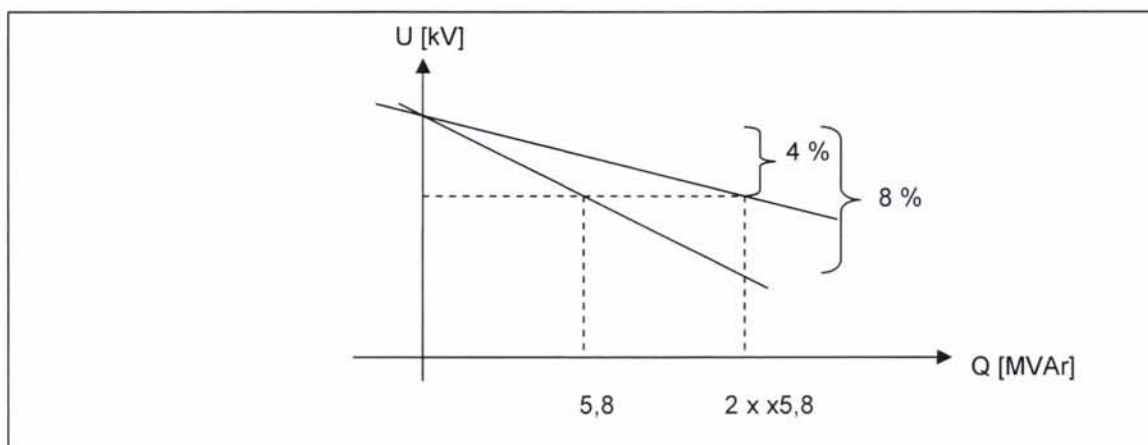
$$P = P'_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{MP} \cdot \left( \frac{f}{f_0} \right)^{NP} \quad Q = Q'_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{MQ} \cdot \left( \frac{f}{f_0} \right)^{NQ}$$

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.

Når det gjelder spenningens statikk i normaltstand med alle aggregater inne og ved utfall kan dette defineres på flere måter, her har en sakt at stasjonene får dobbelt så stor statikk ved utfall. I Figur 1-2 nedenfor er dette illustrert ved at stasjonen får en krappere kurve for sin spenningsstatikk om den blir forsøkt belastet helt opp til ytelsen om begge aggregatene på 5,8 MVA lå inne.

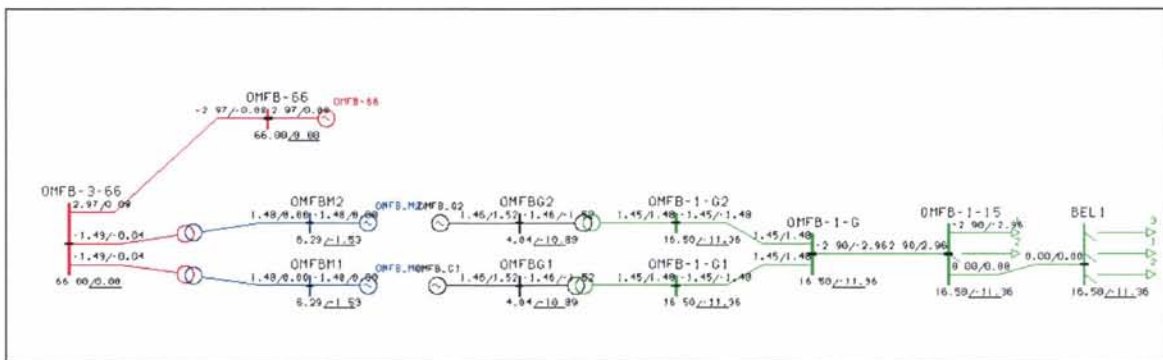


**Figur 1-2** Illustrasjon av definisjonen av spenningsstatikk før og etter utfall av aggregater i en stasjon med to aggregater på 5,8 MVA. I normal drift er statikken 4 % og ved utfall hele 8 %.

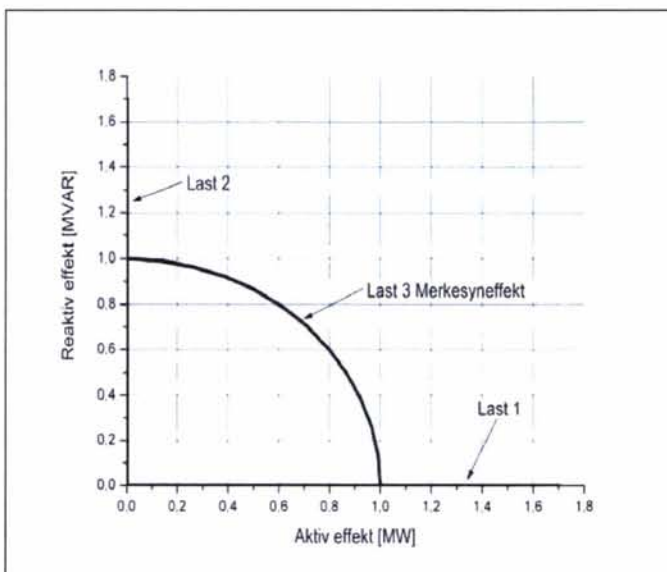
## 2 UNDERSØKELSER FOR STILISERTE TILFELLER

### 2.1 Undersøkelser for tilfellet med en omformerstasjon i separat drift og belastning

I disse undersøkelsene blir de forskjellige størrelsene av omformerstasjoner testet ut med forskjellige laster for å bli kjent med deres karakteristikk. Nedenfor viser Figur 2-1 enlinjeskjema for modellen med aggregater på 2 x 5,8 MVA og belastningen i OPTPOW. Overliggende trefasenett er ideelt stift og holder en spenning på 66 kV. Helt til høyre i figuren vises tre laster kalt "BEL1", nr 1, 2 og 3 som kobles inn etter tur. Disse tre belastningene har karakteristikk som vist i Figur 2-2, der 1,0 er merkeeffekten 1,0 pu av stasjonenes merkeytelse. Lastene og omformerstasjonene er isolert og det er undersøkt tilfeller med 0 og 4 % fallende statikk for å se forskjellen dette gir. Impedansen i linjene er liten og neglisjerbar.



Figur 2-1 Enkelt kraftsystem med to aggregater på 2 x 5,8 MVA. Situasjon med belastningen for lastflyt i OPTPOW satt inn. I tomgang vil fasevinkelen på 15 kV-siden være null grader. Samme oppsett brukes for de andre tilfellene der andre aggregatytelser skal undersøkes.

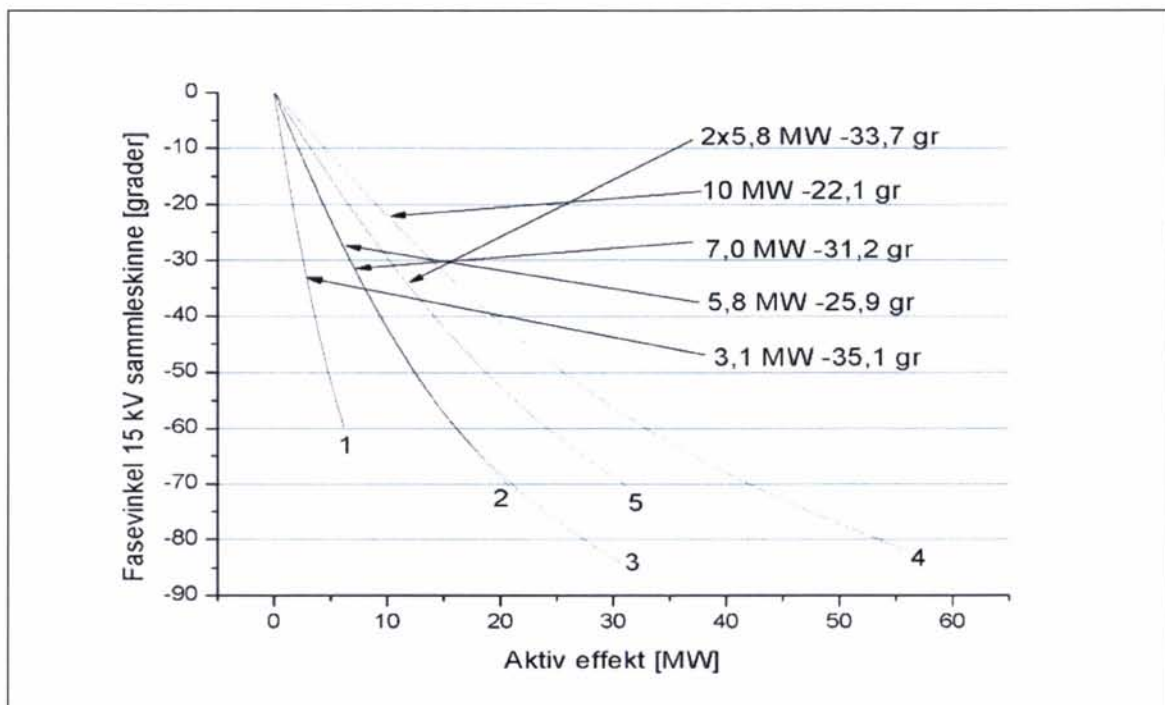


Figur 2-2 Karakteristikk for de tre lastene som testes ut for undersøkelsene med en isolert omformerstasjon. Alle lastenes effekt begynner med null og øker som funksjon av tiden for de tre mønstrene som er vist.

### 2.1.1 Forsøk med flat statikk

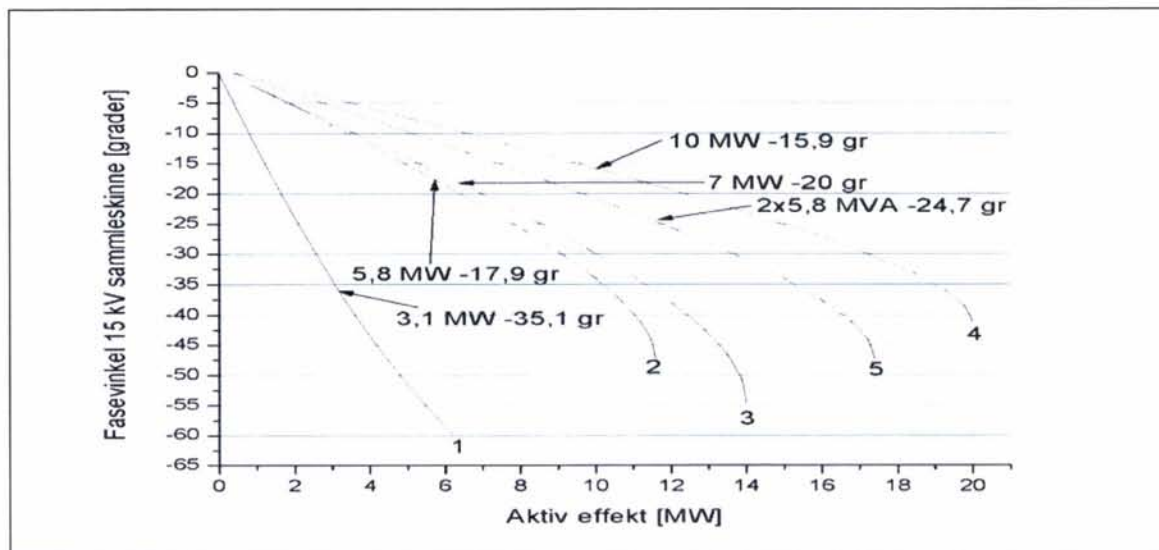
Nedenfor viser Figur 2-3 og Figur 2-4 fasevinkelens utslag for last 1 og 3, altså de to lastene som trekker aktiv effekt. Spenningen vil holde seg konstant for alle de tre lastene og med last 2 som trekker rent reaktiv effekt vil det ikke bli noen utslag for fasevinkelen. For hver av stasjonene med to aggregater er det merket av belastning og fasevinkelen med 50 % belastning, altså den belastningen som en minst vil tillate om redundanskriteriet, se JD 546 og [8], skal overholdes. Med ett aggregat på 3,1 MVA er det vist fasevinkelen ved belastningen på 100 % og med tre aggregater er det vist belastningen ved 66 %.

Som en ser oppstår endringer av fasevinkelen som er proporsjonale med ytelsen av omformerne, men som et unntak er tilfellet med 2 x 7,0 MVA aggregater. For denne er utslaget ikke en vinkel som ligger mellom den som oppstår for aggregater på 5,8 og 10 MVA. En ser at for last 3, der det leveres både aktiv- og reaktiv effekt, oppstår et mindre fasevinkelutslag enn for tilfellet med bare aktiv belastning (last 1).



Figur 2-3 Fasevinkel ved omformerstasjonen ved økende aktiv belastning som for last 1 for aggregater på 3,1 (kurve 1), 2 x 5,8 (kurve 2), 2 x 7,0 (kurve 3), 2 x 10,0 (kurve 4) og 3 x 5,8 MVA (kurve 5). Når aggregatene belastes opptil grensen der redundanskriteriet akkurat er oppfylt er fasevinkelen avmerket.

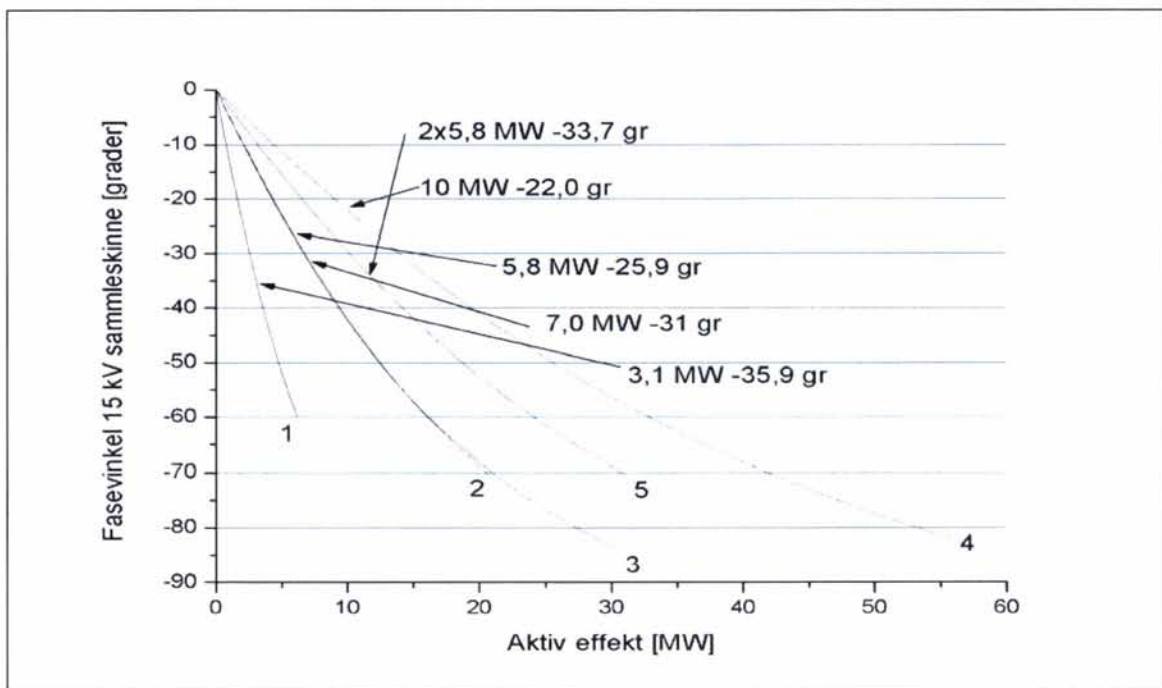




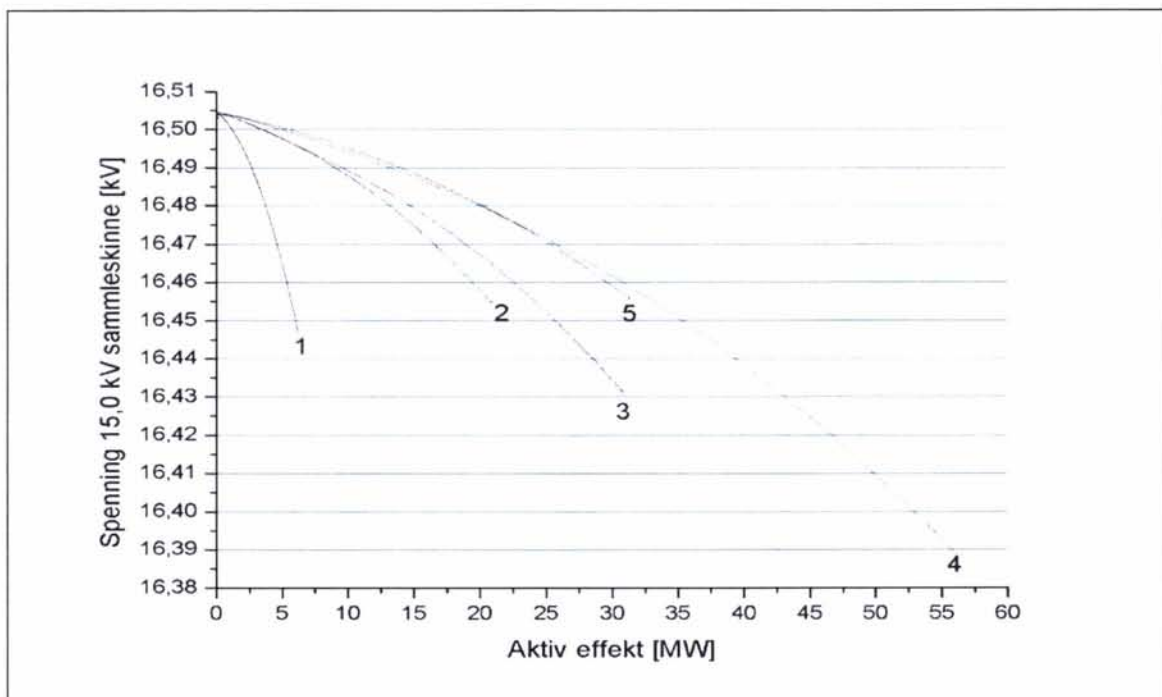
Figur 2-4 Fasevinkel ved omformerstasjonen ved økende aktiv belastning som for last 3 for aggregater på 3,1 (kurve 1), 2 x 5,8 (kurve 2), 2 x 7,0 (kurve 3), 2 x 10,0 (kurve 4) og 3 x 5,8 MVA (kurve 5). Når aggregatene belastes opptil grensen der redundanskriteriet akkurat er oppfylt er fasevinkelen avmerket.

### 2.1.2 Forsøk med 4 % fallende statikk

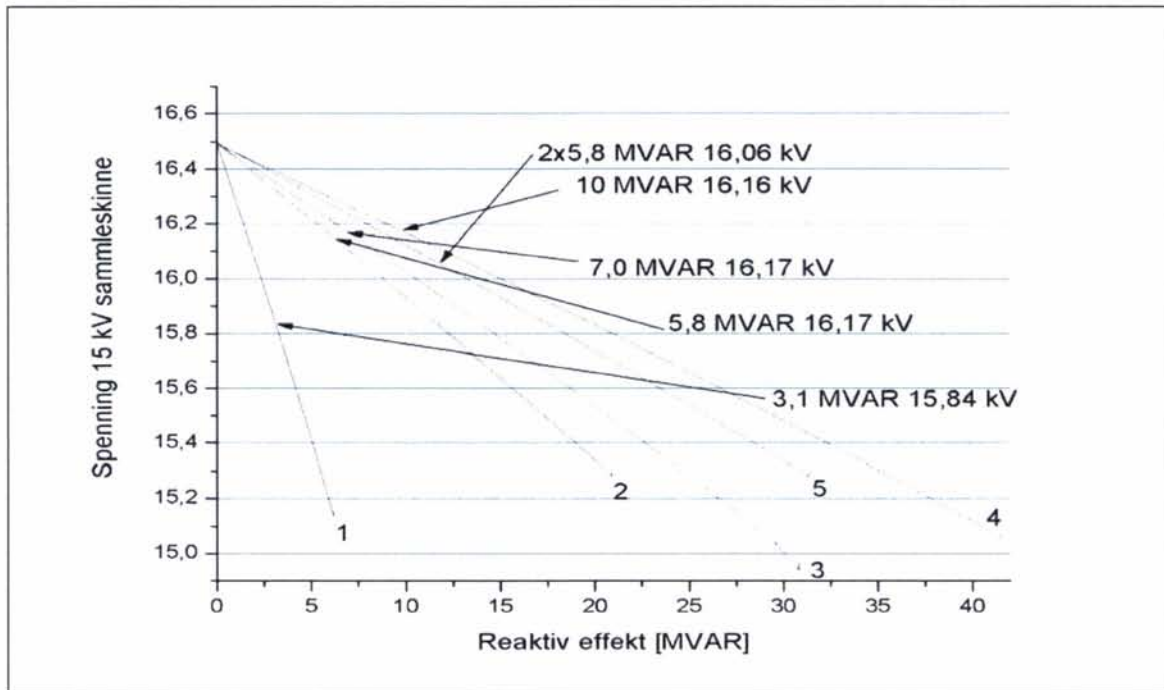
Når stasjonene med de forskjellige aggregatene gies 4 % fallende statikk oppstår ingen endring av fasevinkelutslaget av betydning for tilfellet med last 1 og 3, se Figur 2-5 og Figur 2-8. Videre viser Figur 2-9 hvordan spenningen synker som funksjon av reaktiv belastning for tilfellet med last 3. For tilfellet med last 2 med kun reaktiv effekt ser en av Figur 2-7 hvorledes spenningen reduseres med økende reaktiv effekt.



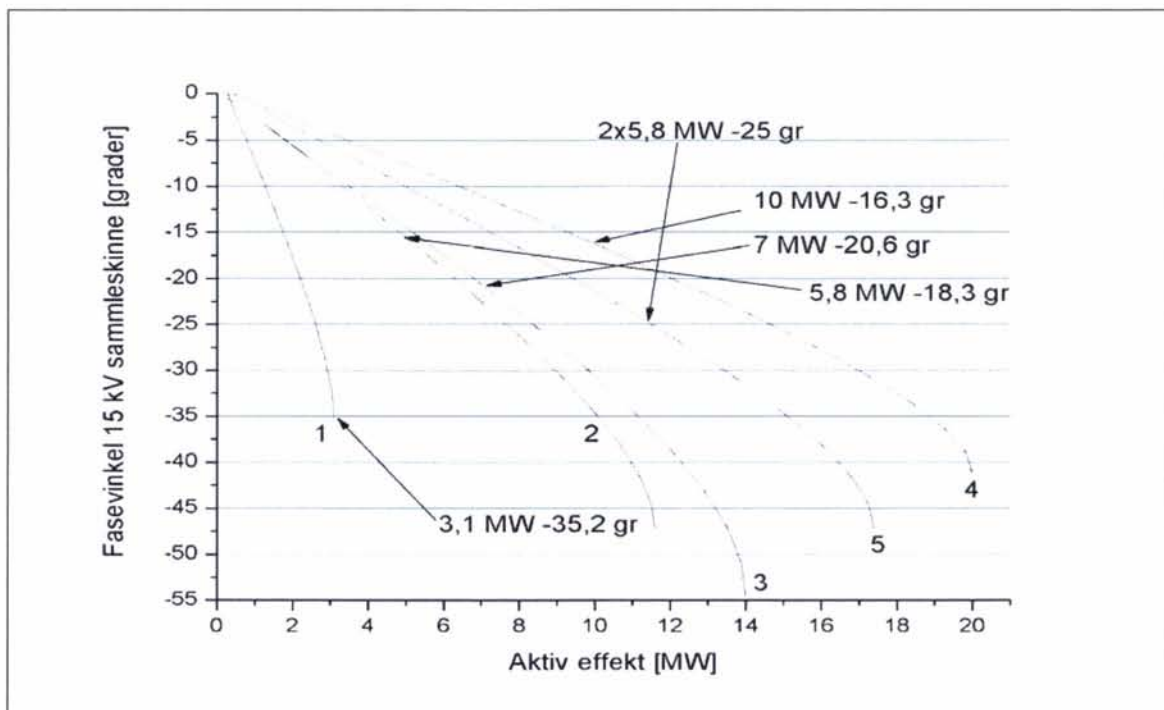
Figur 2-5 Fasevinkel ved omformerstasjonen ved økende aktiv belastning som for last 1 for aggregater på 3,1 (kurve 1), 2 x 5,8 (kurve 2), 2 x 7,0 (kurve 3), 2 x 10,0 (kurve 4) og 3 x 5,8 MVA (kurve 5). Når aggregatene belastes opptil grensen der redundanskriteriet akkurat er oppfylt er fasevinkelen avmerket.



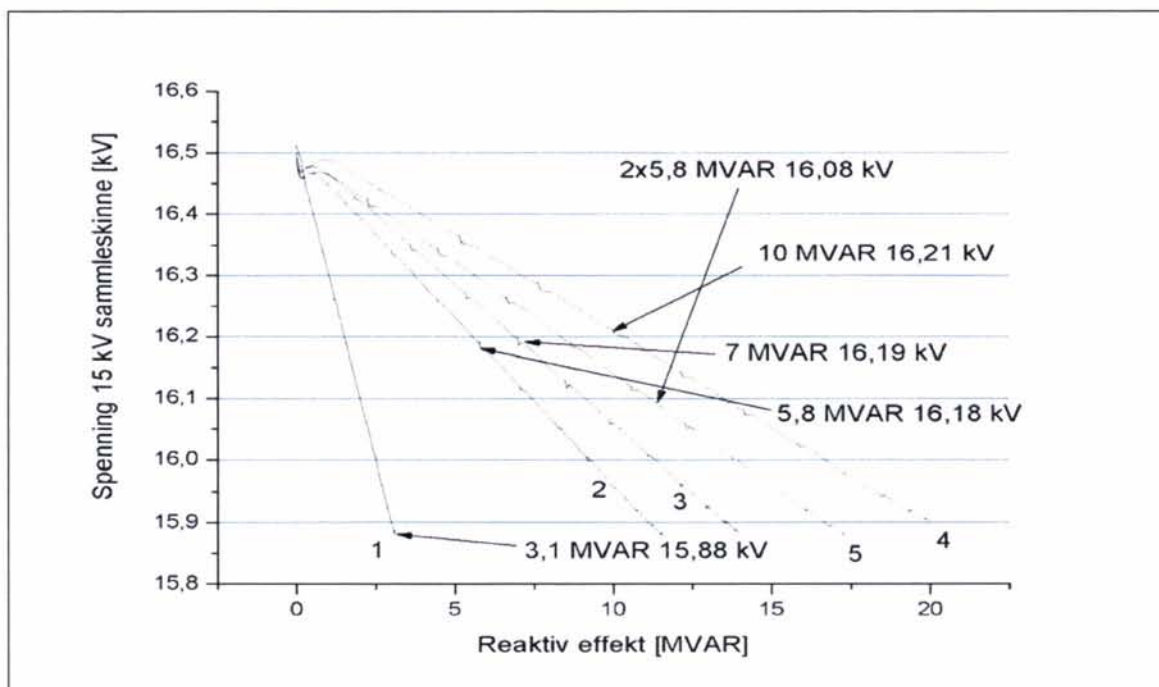
Figur 2-6 Spenningen ved omformerstasjonen ved økende aktiv belastning som for last 1 for aggregater på 3,1 (kurve 1), 2 x 5,8 (kurve 2), 2 x 7,0 (kurve 3), 2 x 10,0 (kurve 4) og 3 x 5,8 MVA (kurve 5).



Figur 2-7 Spenningen ved omformerstasjonen ved økende aktiv belastning som for last 2 for aggregater på 3,1 (kurve 1), 2 x 5,8 (kurve 2), 2 x 7,0 (kurve 3), 2 x 10,0 (kurve 4) og 3 x 5,8 MVA (kurve 5).



Figur 2-8 Fasevinkel ved omformerstasjonen ved økende aktiv belastning som for last 3 for aggregater på 3,1 (kurve 1), 2 x 5,8 (kurve 2), 2 x 7,0 (kurve 3), 2 x 10,0 (kurve 4) og 3 x 5,8 MVA (kurve 5). Når aggregatene belastes opptil grensen der redundanskriteriet akkurat er oppfylt er fasevinkelen avmerket.



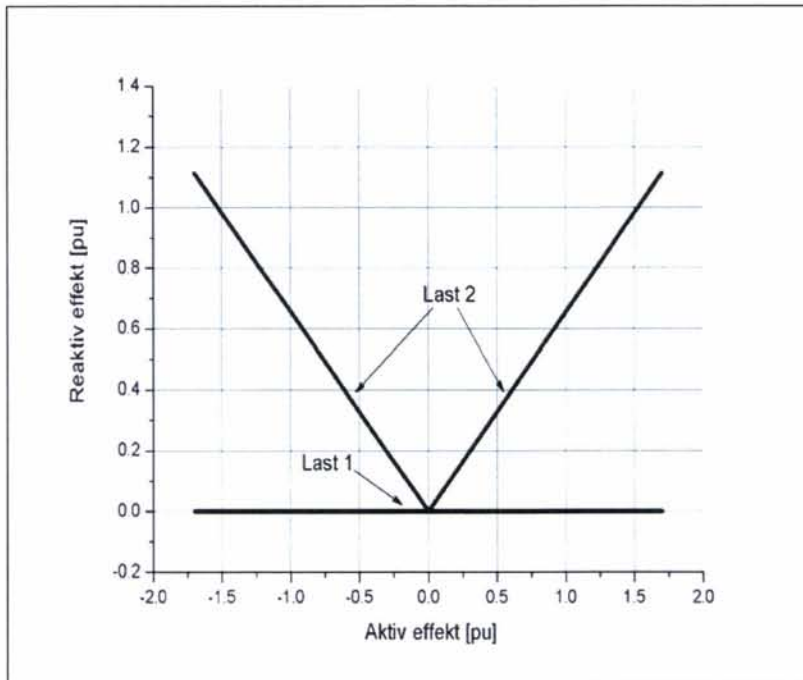
Figur 2-9 Spenningen ved omformerstasjonen ved økende aktiv belastning som for last 3 for aggregater på 3,1 (kurve 1), 2 x 5,8 (kurve 2), 2 x 7,0 (kurve 3), 2 x 10,0 (kurve 4) og 3 x 5,8 MVA (kurve 5). Når aggregatene belastes opptil grensen der redundanskriteriet akkurat er oppfylt er spenningen avmerket.

## 2.2 Like omformerstasjoner og 80 km lang matestrekning

I dette avsnittet skal det gjøres undersøkelser med omformerstasjoner med 2 x 5,8 MVA aggregater og 80 km mellom dem. Det skal gjøres undersøkelser både med lasten rett ved stasjonen og ute på linjen. Fem tilfeller skal undersøkes:

- Normal driftsituasjon og lasten rett ved omformerstasjonen
- Unormal driftsituasjon med utfall av ett aggregat i en stasjon og lasten rett utenfor
- Normal driftsituasjon med flere laster ute på linjen
- Situasjon med ensidig mating
- Unormal driftsituasjon med utfall av ett aggregat i en stasjon og laster ute på linjen

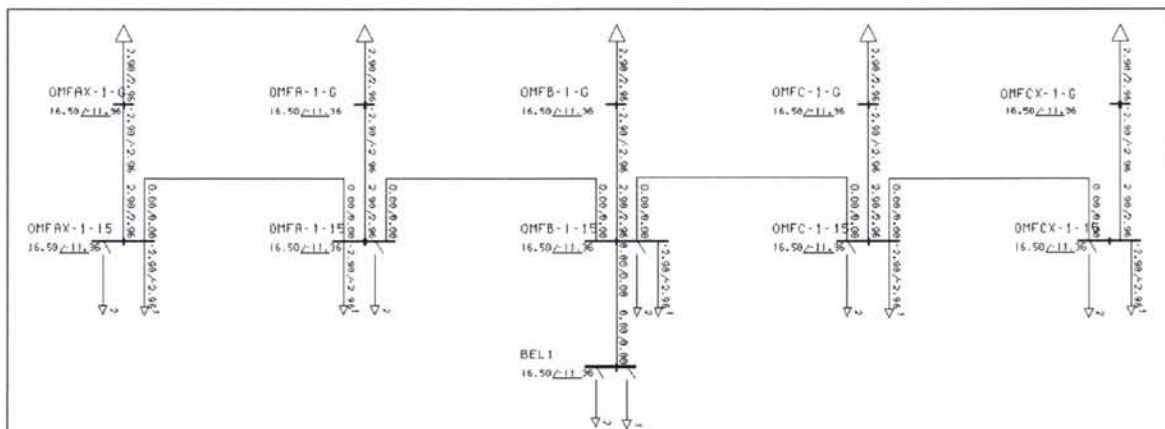
Nedenfor viser Figur 2-10 karakteristikken for belastningen som settes inn og som skal representere tog. Det settes først inn en last kalt "Last 1" som varierer sin aktive effekt over et stort område fra generering til opptak av effekt. Lasten har  $\cos \varphi = 1,0$ . "Last 2" varierer aktiv effekt i samme område, men denne har  $\cos \varphi = 0,7$ . En kan betrakte skalaen for belastningen som pu verdier der 1,0 er merkeeffekten for hele stasjonen. For aggregater av typen Q38 er det her benyttet 5,8 MVA som base. I flere av undersøkelsene varierer lasten over et enda større område enn figuren viser. Der innstilling av statikken ikke får betydning for forholdene med regenerering av effekt blir ikke dette omtalt i de kommende avsnitt.



Figur 2-10 Karakteristikk for de to lastene som testes ut for undersøkelsene med omformerstasjoner i samkjøring. Alle lastenes effekt begynner med generering av effekt og beveger seg over i området for forbruk.

### 2.2.1 Undersøkelse av normal driftsituasjon med lasten rett ved omformerstasjonen

Her skal det gjøres undersøkelser på en omformerstasjon B når det settes en variabel last rett ved den. Den omformerstasjonen som undersøkes har nabostasjoner med 80 km avstand i hver retning og disse har igjen nabostasjoner bortenfor, som vist i Figur 2-11. Hver omformerstasjon er bygget opp på samme måte som forklart i avsnitt 2.1 med stivt overliggende nett. Det er ingen faseforskyvning mellom de forskjellige overliggende nettene som forsyner de fem stasjonene AX, A, B C og CX.



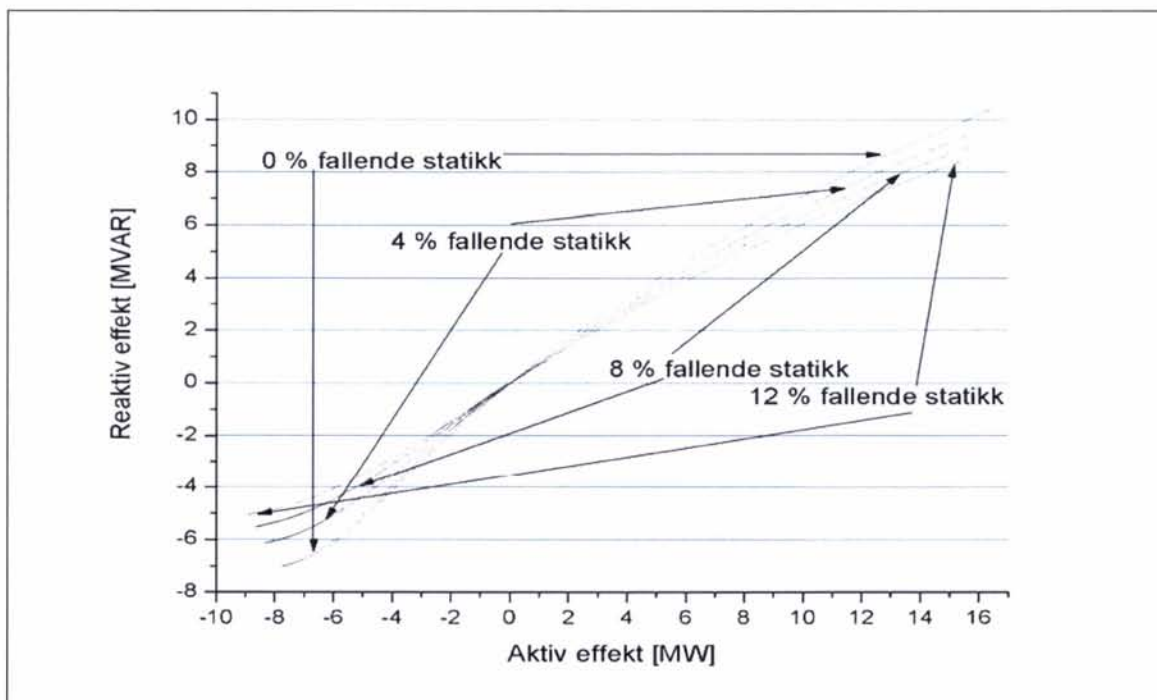
Figur 2-11 Enlinjediagram som viser strukturen av kraftsystemet som skal undersøkes. Det er fem omformerstasjoner kalt AX, A, B C og CX involvert og her er det vist situasjonen med initiell lastflyt med en last på 2,9 MW og  $\cos \phi = 0,7$  ved omformerstasjonene i OPTPOW.

### 2.2.1.1 Last 1 - Aktiv belastning

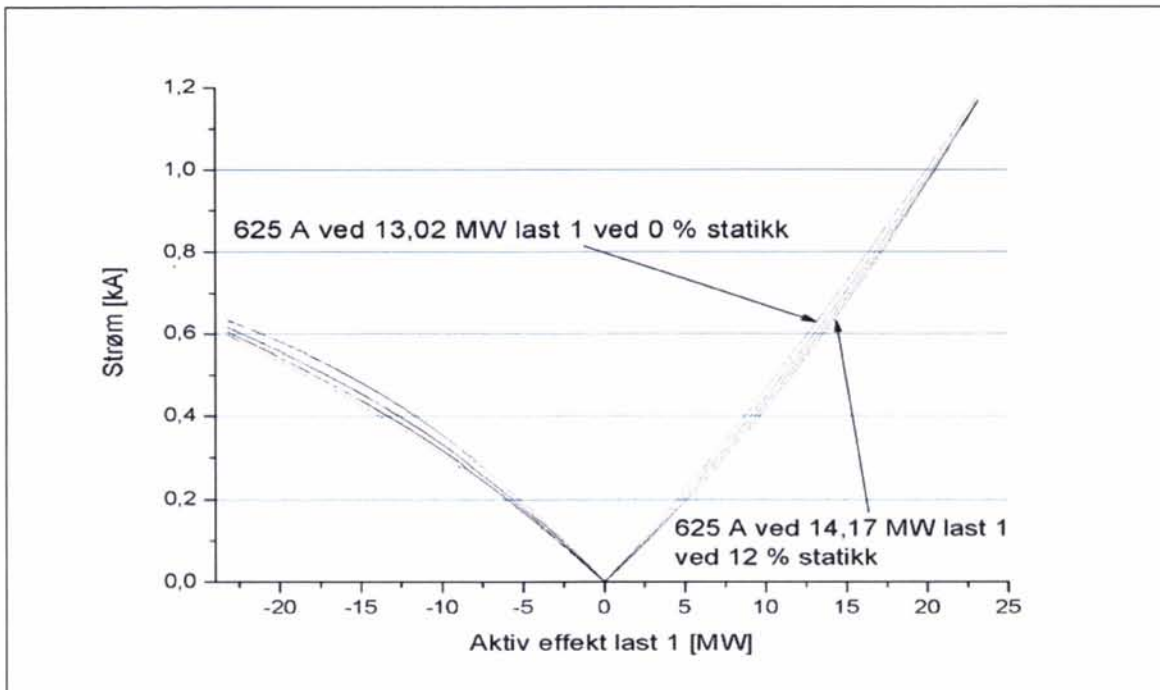
I Figur 2-12 er det vist hvorledes aktiv og reaktiv effekt fra stasjon B varierer når lasten rett ved varieres over ett stort område og det er forsøkt med forskjellig statikk for spenningsregulatoren. En ser at desto større fallende statikk, desto mindre reaktiv effekt genereres.

I Figur 2-13 og Figur 2-14 ser en på hvor stor aktiv belastning som kan trekkes rett ved omformerstasjonen før henholdsvis 2-sekunders strømgrense og 6-minutters effektverdi overskrides. En undersøker ved 50 % belastning for stasjonene, og ser at det kan trekkes ut 1,15 MW mer effekt før 2-sekundersverdien av strømmen (625 A) overskrides med 12 % statikk. For 6-minuttersverdien kan det trekkes ut 2,39 MW mer med 12 % statikk. Denne økningen er på henholdsvis 8 og 30 %. Om dette er nok til å tillate flere tog er vel tvilsomt, men marginene blir bedre.

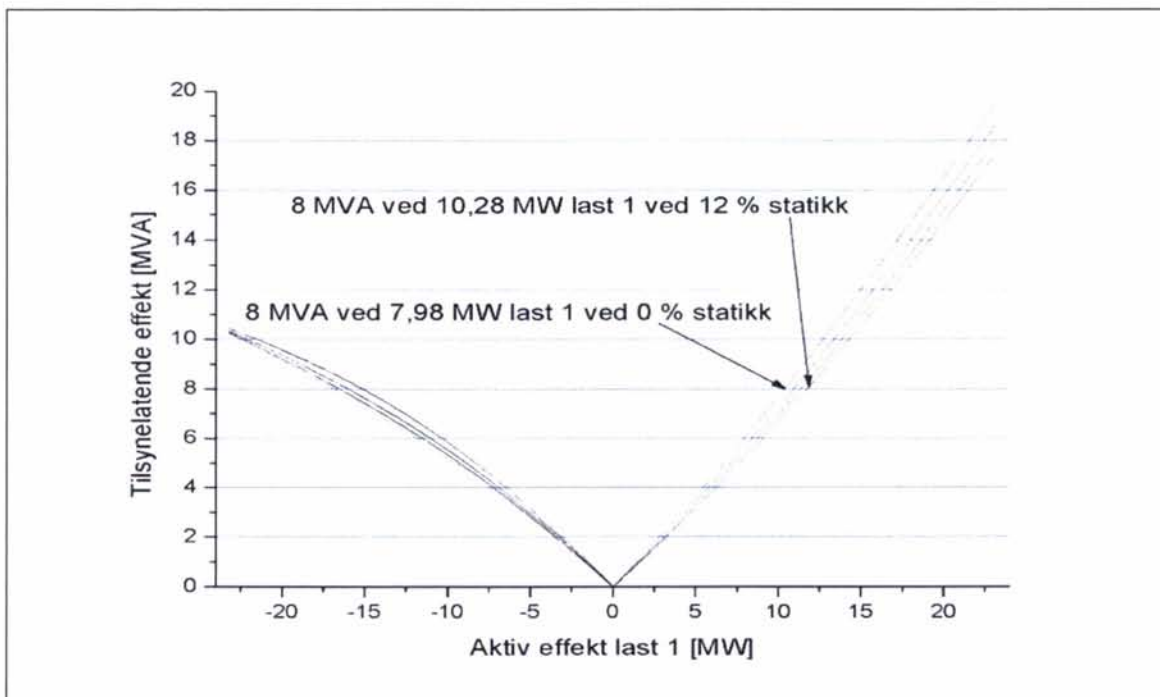
I Figur 2-15 er det undersøkt hvorledes spenningen på 15 kV-samleskinne faller med økende belastning for omformerstasjonen. Det er innlysende at spenningen ute på kontaktledningen ville blitt enda lavere om lasten var ute på den. Dermed kan det hende at en begrensning for hvor mye statikken kan tillates å være er bestemt av spenningen for togene ute på matestrekningen. Tapene blir påvirket, og i Figur 2-16 er det vist hvorledes tapene for både kontaktledning og omformere blir ved forskjellige innstillinger for statikken. Som en ser øker faktisk tapene når statikken er stor. Dette har sannsynligvis sin årsak i at stor fallende statikk gjør at mer effekt overføres fra nabostasjonene.



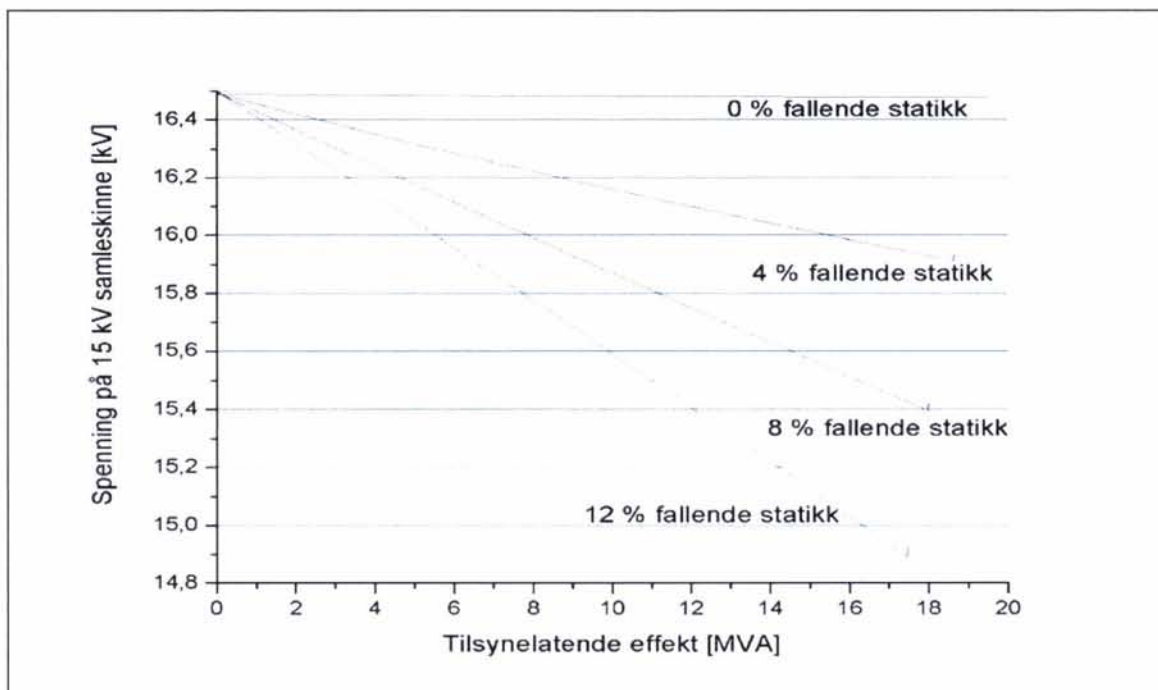
Figur 2-12 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 1 for aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



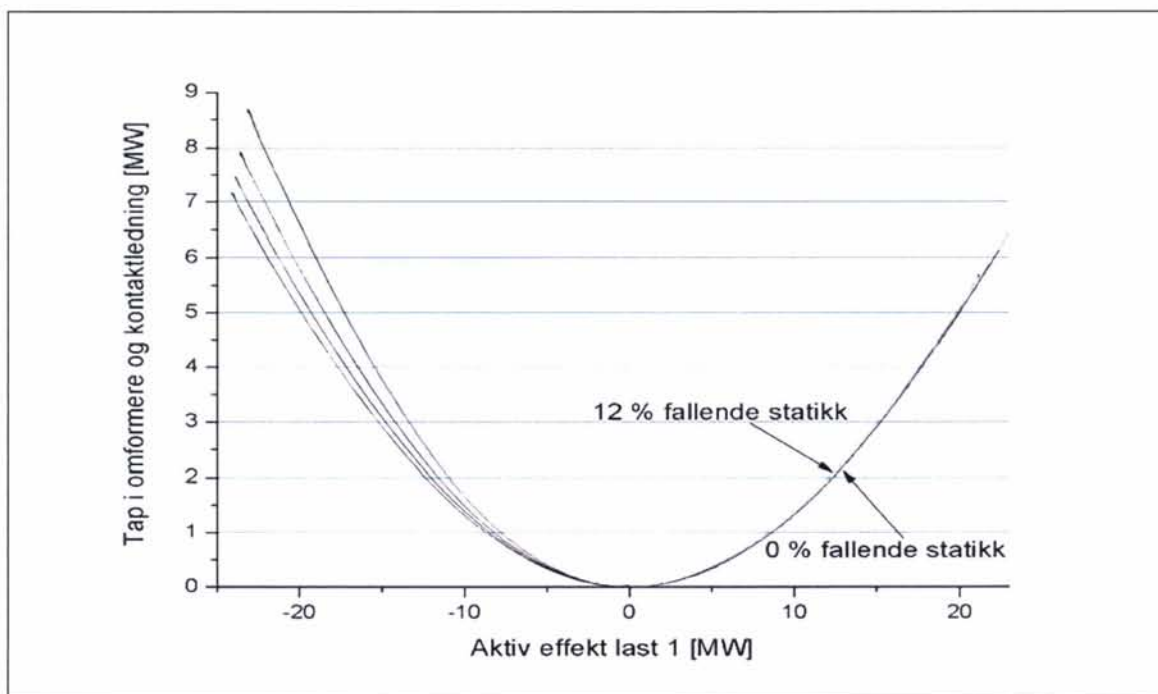
Figur 2-13 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-14 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-15 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-16 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til last 1. Tomgangstapene er ikke inkludert.

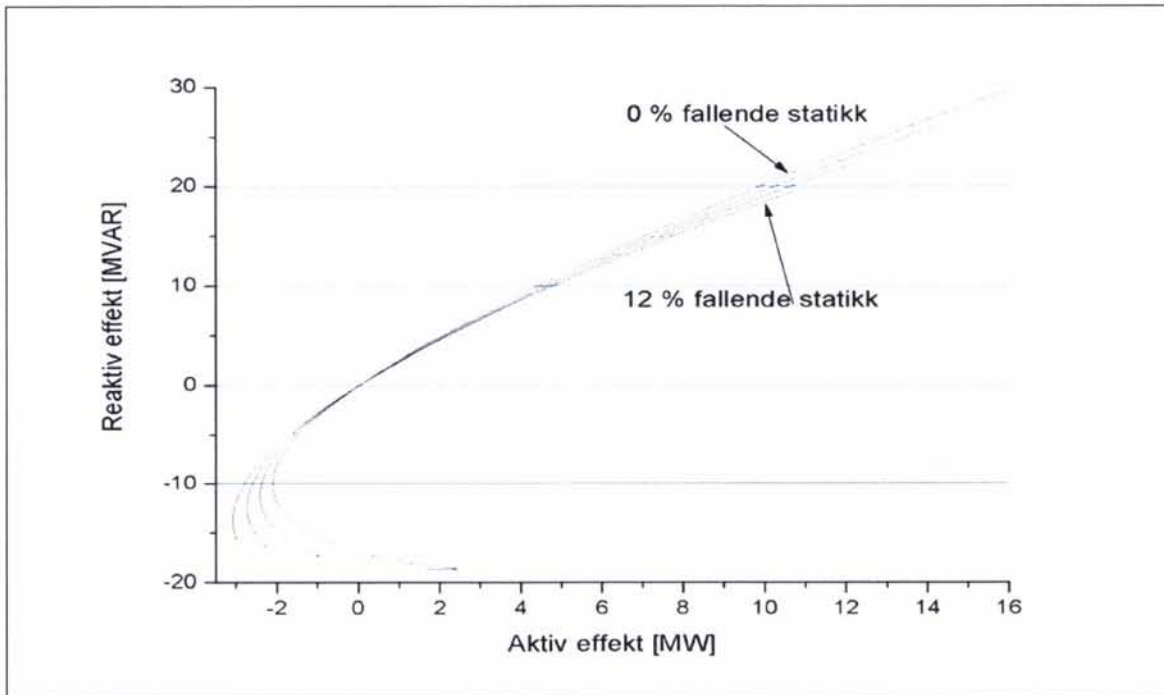
### 2.2.1.2 Last 2 - Aktiv og reaktiv belastning

Ved å sette en last med både aktiv og reaktiv belastning kan en si at en har samme situasjon som når et tog med E116 lokomotiv trekker full effekt rett ved omformerstasjonen. Figur 2-17

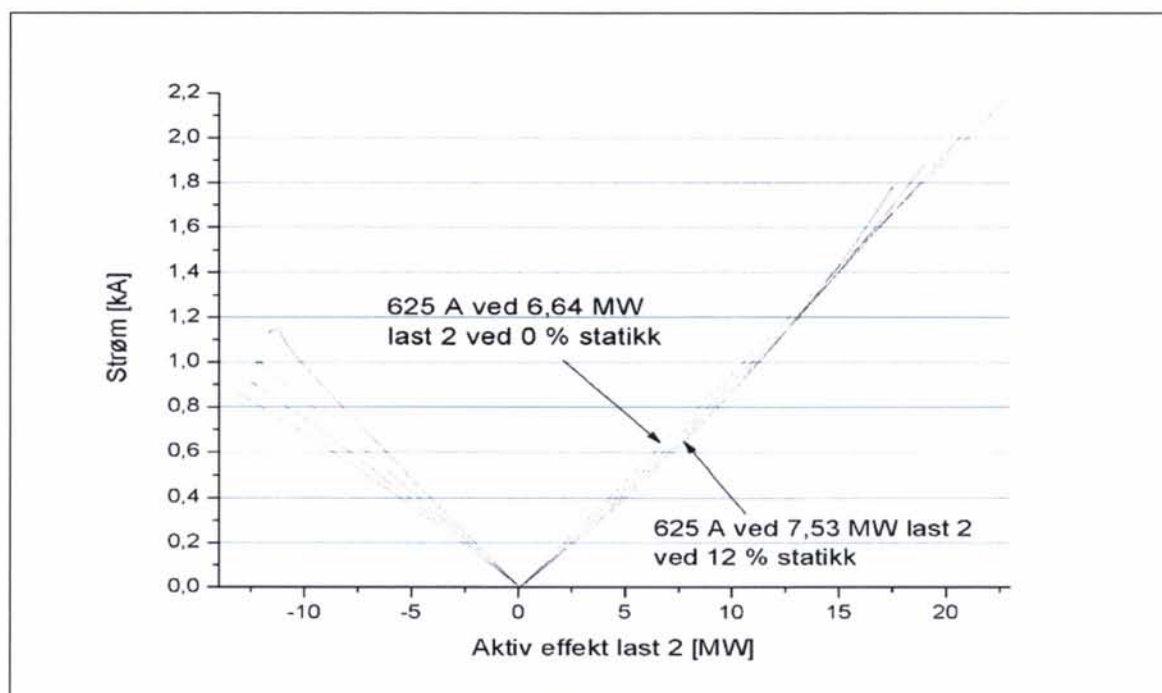


viser at det leveres veldig mye reaktiv effekt ved stasjon B når lasten varierer, men at en stor fallende statikk vil kunne redusere dette en del. Omformerstasjonen er så mye belastet med reaktiv effekt at stor fallende statikk ikke får veldig stor betydning for mulighetene for å øke belastningen ved 2-sekunders og 6-minuttersverdiene, se Figur 2-18 og Figur 2-19.

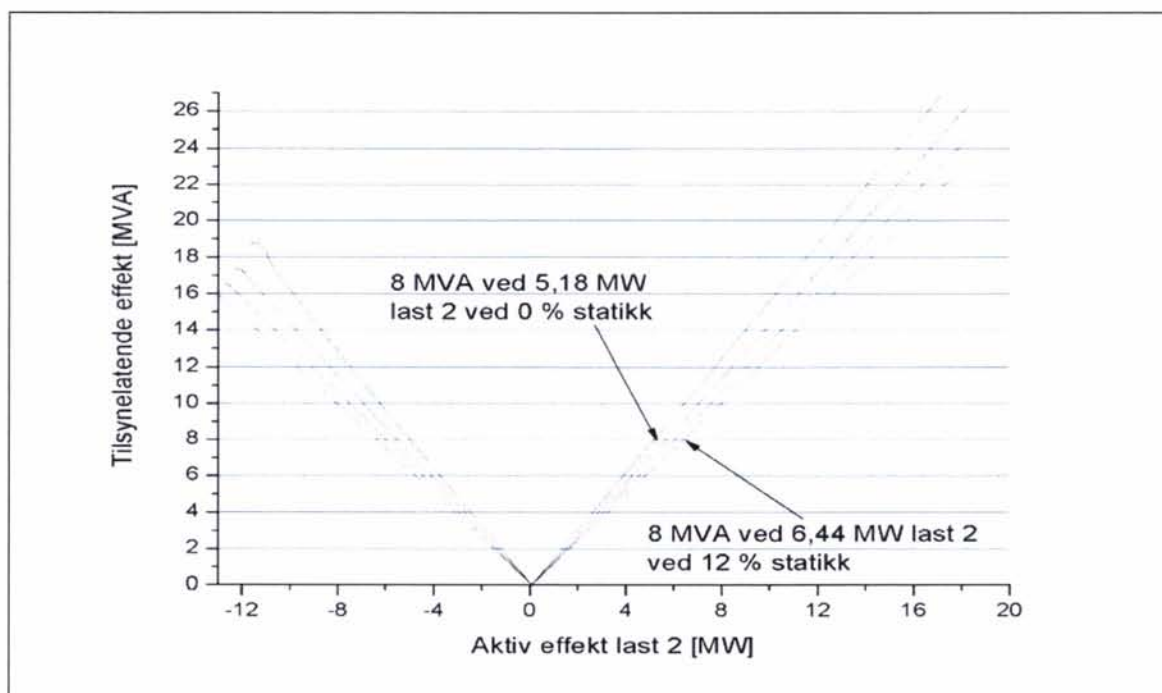
Spenningen på 15 kV-samleskinne blir som en ser av Figur 2-20 veldig lav, men en må undersøke spenningen ute på kontaktledningen før en kan si at statikken er stilt for mye ned. Tapene i overføringen blir ikke mye påvirket av om statikken er stor eller liten, se Figur 2-21.



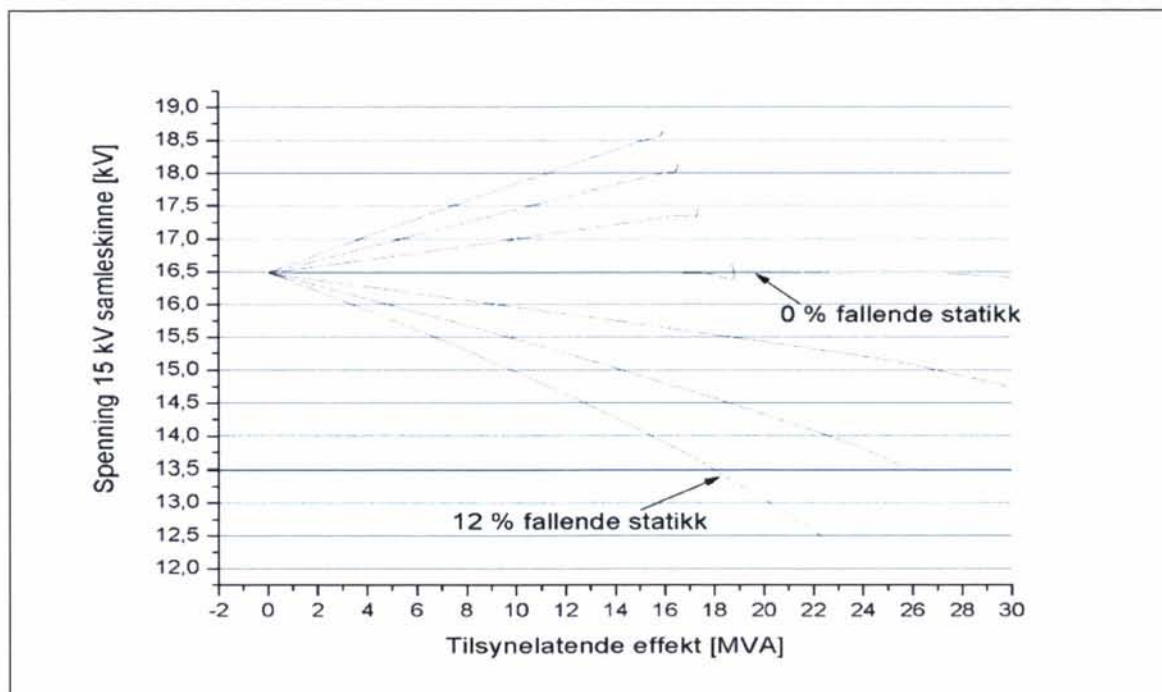
Figur 2-17 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 2 for aggregater på 2 x 5,8 MVA.



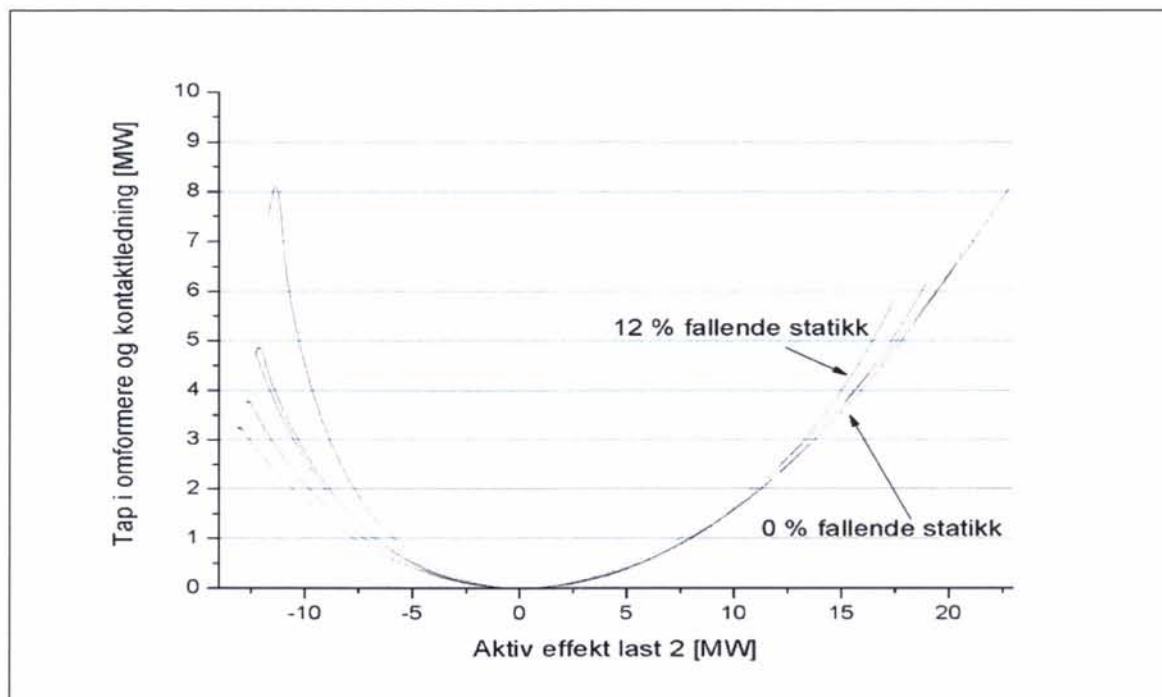
Figur 2-18 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-19 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-20 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-21 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til last 2. Tomgangstapene er ikke inkludert.

## 2.2.2 Undersøkelse av utfall av aggregat med lasten rett ved omformerstasjonen

Det skal her gjøres undersøkelser med utfall av ett aggregat i stasjon B i den samme modellen som i avsnitt 2.2.1. Innstillingen av spenningsregulatoren er slik at når ett aggregat faller ut får omformerstasjonen dobbelt så stor fallende statikk. Dermed vil det i omformerstasjon B bli en fallende statikk på 4, 8, 12 og 24 %, mens de øvrige beholder sin opprinnelige statikk<sup>1</sup>.

### 2.2.2.1 Last 1 - Aktiv belastning

Nedenfor viser Figur 2-22 forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt når ett aggregat tas ut i stasjon B og last 1 settes rett ved stasjonen. En ser tydelig hvordan stor fallende statikk reduserer reaktiv effektproduksjon i omformerstasjonen og desto mer av kapasiteten kan brukes til å levere aktiv effekt.

Figur 2-23 viser strømmen stasjon B leverer som funksjon av lastuttaket og med 625 A som absolutt grenseverdi ser en hvor mye aktiv effekt lasten maksimalt kan trekke. Den øvrige effekten leveres fra de andre stasjonene. Med 24 % statikk ved utfall vises det at lasten rett ved stasjonen kan trekke 14,35 MW. Dette er 11 % mer aktiv effekt enn for tilfellet med 4 % statikk ved utfall. I Figur 2-23 ser en på forholdene med 6-minuttersverdien for 5,8 MVA aggregater på 8 MVA som grense. Nå ser en at det kan trekkes ut 13,01 MW ved omformerstasjonen med 24 % statikk. Økningen er på 22 % i forhold til 4 % statikk.

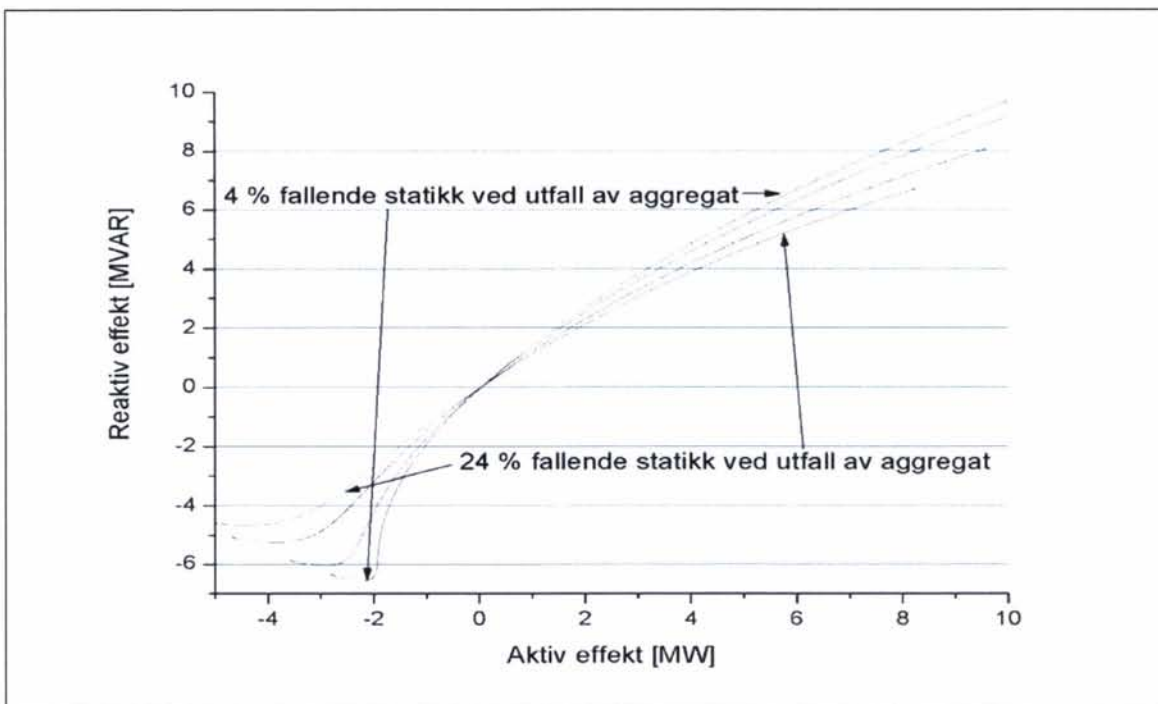
Figur 2-24 viser spenningen på 15 kV samleskinne som funksjon av aktivt effektuttak ved utfall. Spenningen blir noe lav når statikken er stor, men det som er avgjørende er spenningen ute på kl-anlegget når togene er ute på matestrekningen. Mer om dette i avsnitt 2.2.3.

Ved å velge en stor statikk på for eksempel 12 % får man den fordel at med utfall av ett aggregat vil spenningen ved omformerstasjonen bli lav når det trekkes stor effekt. Dersom et dobbelt CE119 lokomotiv trekker full effekt på ca 12 MW rett ved omformeren, kan man anta at den leverer mye av effekten til dette toget, muligens oppimot 12 MVA. Da blir spenningen ca 12,5 kV, og om samme effekt trekkes under normale forhold blir spenningen ca 15,4 kV. Dermed vil lokomotivet redusere effektpådraget. Med en innstilling for flat statikk vil spenningen ikke påvirkes i det hele tatt og det er dermed lettere å overbelaste det gjenværende aggregatet.

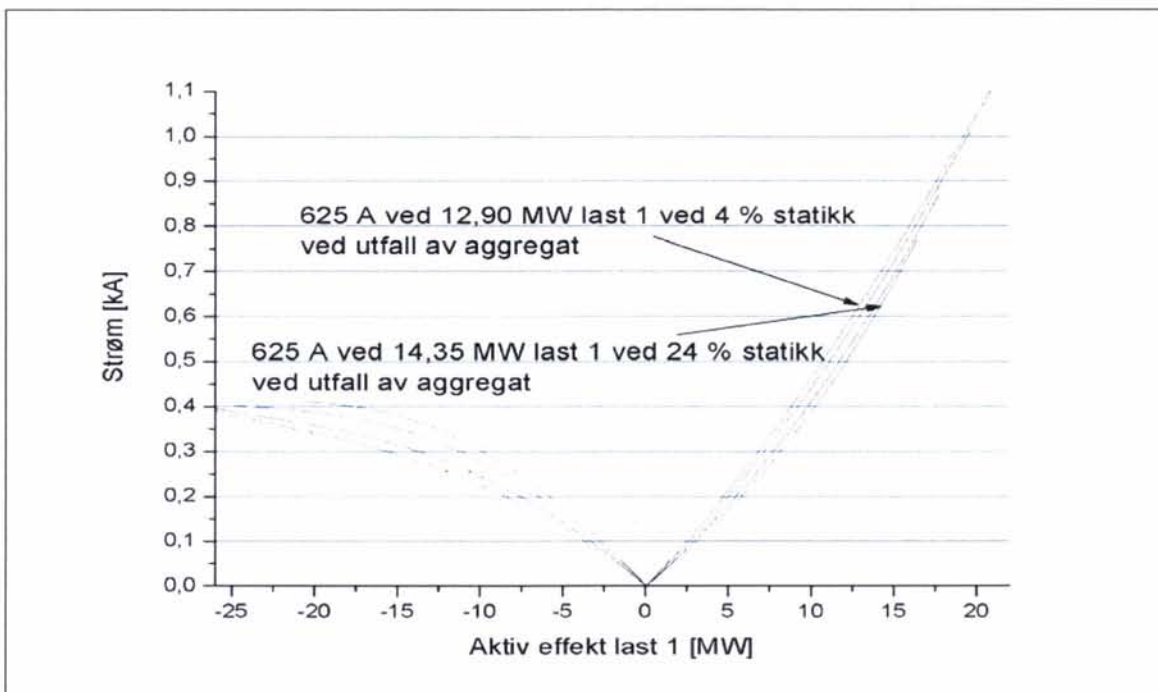
I Tabell 2-1 og Tabell 2-2 er det laget en fremstilling som viser høyeste prosentvise belastning av stasjonen før utfall med henholdsvis 2-sekunders strøm og 6-minutters effekt. Verdien av aktiv belastning som lasten trekker, ved høyeste akseptable verdi for 2-sekunders strøm og 6-minutters effekt som ett aggregat kan levere, er funnet ved utfall i stasjon A. Så er strøm og effekt funnet ved tilsvarende aktiv last ved stasjonen i normal drift i avsnitt 2.2.1.1 og prosentverdien av stasjonens ytelse regnet ut. Verdiene i kolonnen merket "Tilsvarende belastning av stasjonen i normal drift med denne lasten ved stasjonen" er funnet nøyaktig ved å avlese selve resultatfilene.

Som en ser er det en belastningsgrad bare litt over 50 % som kan tillates, selv når spenningsregulatoren stilles inn for å gi en fallende spenningsstatikk på 12 %.

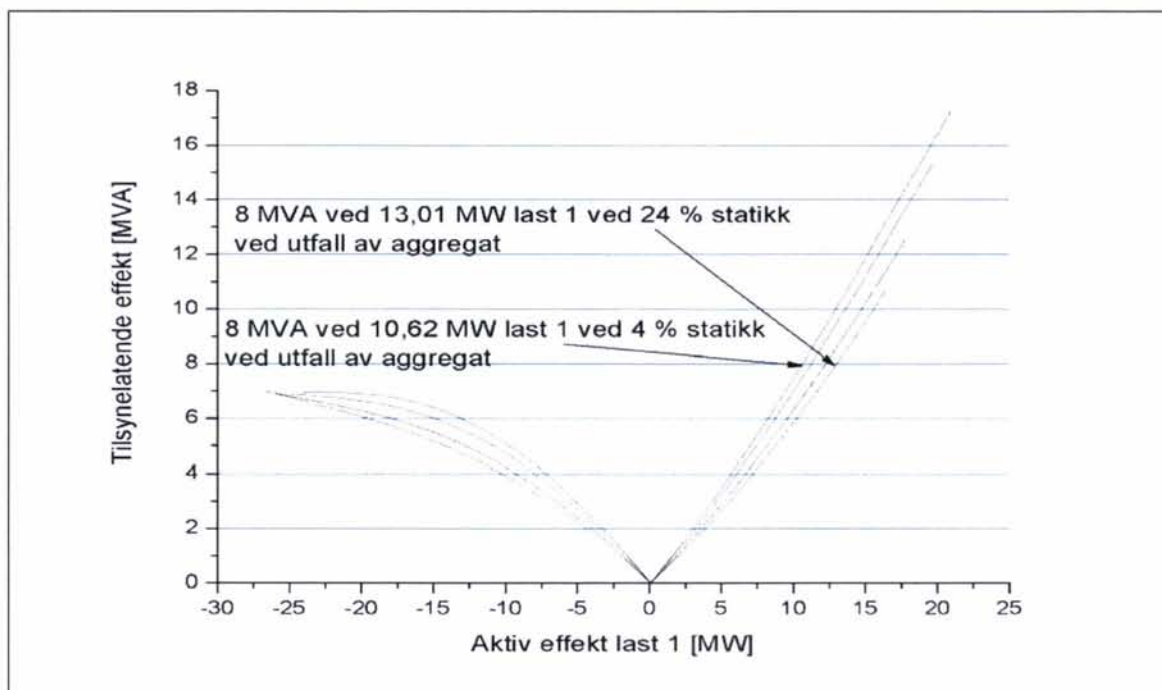
<sup>1</sup> Det er benyttet en statikk på 2 % for de stasjonene som ikke er falt ut i tilfellet med 4 % statikk ved utfall. Grunnen til dette er metoden som er benyttet for innstilling av spenningsregulatoren, der det ikke lyktes å få riktig forhold mellom statikk i normal drift og ved utfall. Mer om dette i appendiks B. Selv om det skulle vært flat statikk ansees forskjellene mellom dette og 2 % til å være så liten at det ikke spiller noen særlig rolle.



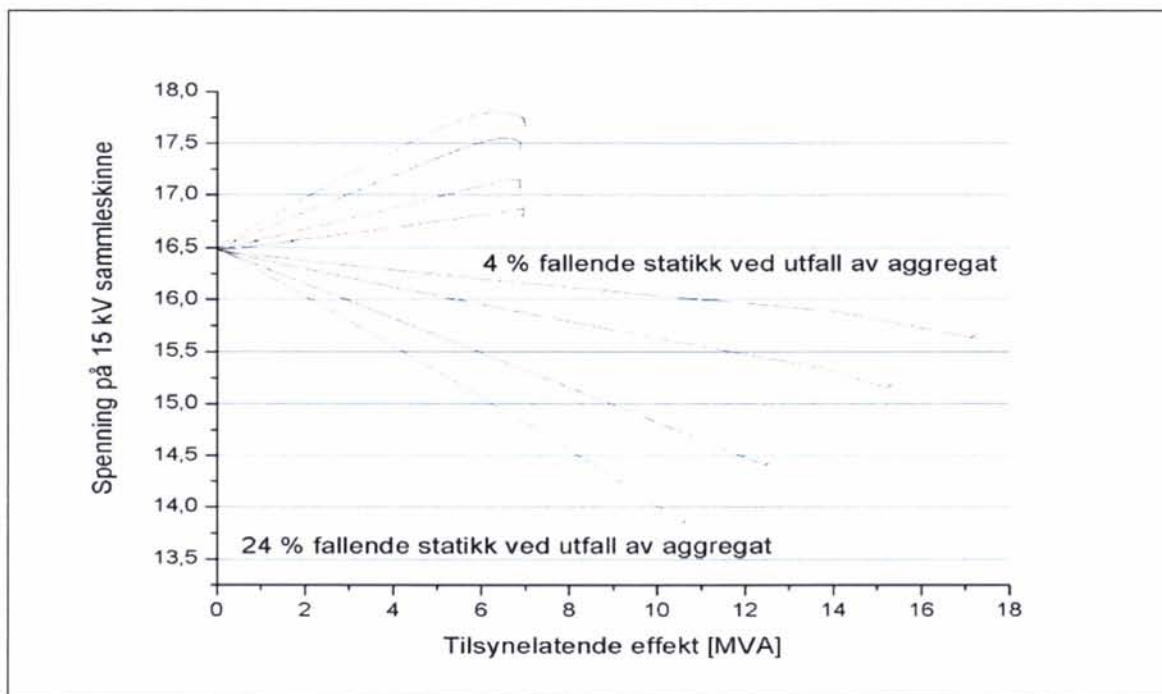
Figur 2-22 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 1 for aggregater på 2 x 5,8 MVA.



Figur 2-23 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-24 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-25 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

**Tabell 2-1 Undersøkelse av høyeste mulig belastningsgrad av omformerstasjonen før utfall av aggregat. Skal redundans (n-1 kriterium) være oppfylt må belastningen ved utfall ikke være større en høyeste 2-sekunders verdi av strømmen til det gjenværende aggregatet. Undersøkelse med kun aktiv belastning ved stasjonen.**

Statikk normal og utfall	Effekt til last 1 når 625 A trekkes fra stasjonen med ett aggregat i drift [MW]	Tilsvarende belastning av stasjonen i normal drift med begge aggregater i drift [A]	Belastning i forhold til stasjonsytelse 2 x 625 A [%]
2 og 4 %	12,90	614 <sup>2</sup>	49
4 og 8 %	13,41	618 <sup>2</sup>	49
8 og 16 %	13,96	632	51
12 og 24 %	14,35	640	51

**Tabell 2-2 Undersøkelse av høyeste mulig belastningsgrad av omformerstasjonen før utfall av aggregat. Skal redundans (n-1 kriterium) være oppfylt må belastningen ved utfall ikke være større en høyeste 6-minutters verdi av effekten til gjenværende aggregat. Undersøkelse med kun aktiv belastning ved stasjonen.**

Statikk Normal og utfall	Effekt til last 1 når 8 MVA trekkes fra stasjonen med ett aggregat i drift [MW]	Tilsvarende belastning av stasjonen i normal drift med begge aggregater i drift [MVA]	Belastning i forhold til stasjonsytelse 2 x 8 MVA [%]
2 og 4 %	10,62	8,17	51
4 og 8 %	11,21	8,19	51
8 og 16 %	12,23	8,70	54
12 og 24 %	13,01	8,96	56

#### 2.2.2.2 Last 2 - Aktiv og reaktiv belastning

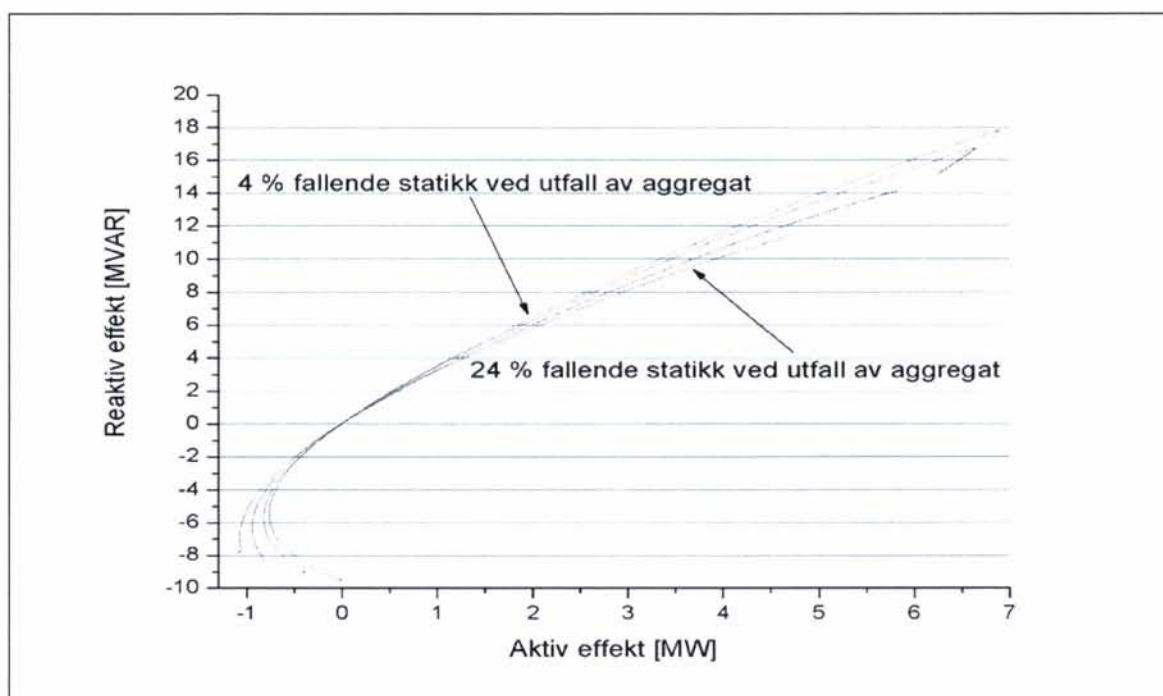
I tilfellet med både reaktiv og aktiv effekt med last 2 viser Figur 2-26 hvorledes stor fallende statikk begrenser den reaktive effekten fra omformerstasjon B. Figur 2-27 viser hvorledes lasten ved omformerstasjon A kan trekke en aktiv effekt på hele 7,69 MW før strømgrensen på 625 A for det gjenværende aggregatet overskrides om statikken er 24 % ved utfall. Det vil si at et E116 lokomotiv kan tillates å akselerere slik at det trekker maksimal effekt ved sin dårligste effektfaktor rett ved stasjonen. Med en statikk på 4 % kan derimot et slik lokomotiv lettere få det gjenværende aggregatet til å falle ut. Samme store forskjellen ser en i Figur 2-28 for grensen på 8 MVA, der lasten kan tillates å trekke 7,27 MW om statikken er 24 % ved utfall. Når det gjelder spenningen ser en av Figur 2-29 at denne blir meget lav med stor fallende statikk. Egne undersøkelser for spenningen for togene ute på matestrekningen viser hva som kan tillates, se avsnitt 2.2.3 og 2.2.4.

I Tabell 2-3 og Tabell 2-4 er det undersøkt belastningsprosenten som kan tillates før utfall av ett aggregat. Samme fremgangsmåte som i avsnitt 2.2.2.1 er gjort. Her er det tydeligvis omentrent samme belastning som kan tillates som i tilfelle med bare aktiv effekt. Med 12 % fallende statikk i normal drift kan en altså for 2-sekunders strøm tillate 51 % belastning i

<sup>2</sup> I dette tilfellet ser en at belastningen faktisk blir mindre når to aggregater settes inn. Dette kan komme av at stasjonen avlastes reaktivt med to aggregater i drift, men aktiv effektbelastning vil øke. Det er mulig i dette spesielle tilfellet at reaktiv avlastning er større enn aktiv opplasting.

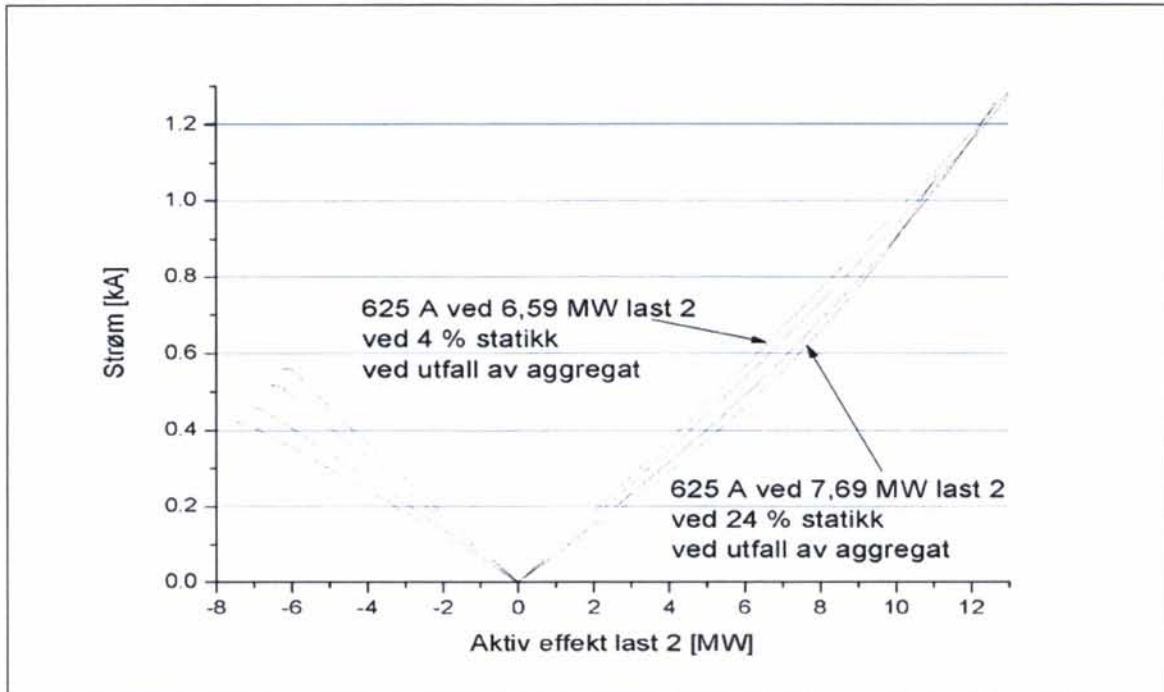
normal drift. For 6-minutters effekt kan en tillate 57 %. Stor fallende statikk er altså meget gunstig for reaktiv belastning. Det som står igjen å undersøke er spenningen som oppnås når togene er ute på matestrækningen, mer om dette i avsnittene 2.2.3 og 2.2.4, og kapittel 3 der en simulerer med trafikk.

Dersom et E116 lokomotiv trekker full effekt på ca 7 MW rett ved omformeren og  $\cos \varphi = 0,7$ , kan man anta at omformeren leverer mye av effekten til dette toget, oppimot 10 MVA ( $Q = 7,14 \text{ MVAr}$ ,  $S = 10 \text{ MVA}$ ). Da blir spenningen ca 12,8 kV og om samme effekt trekkes under normale forhold blir spenningen ca 15,0 kV. Lokomotivføreren vil dermed redusere pådraget og unngå at det gjenværende aggregatet overbelastes.

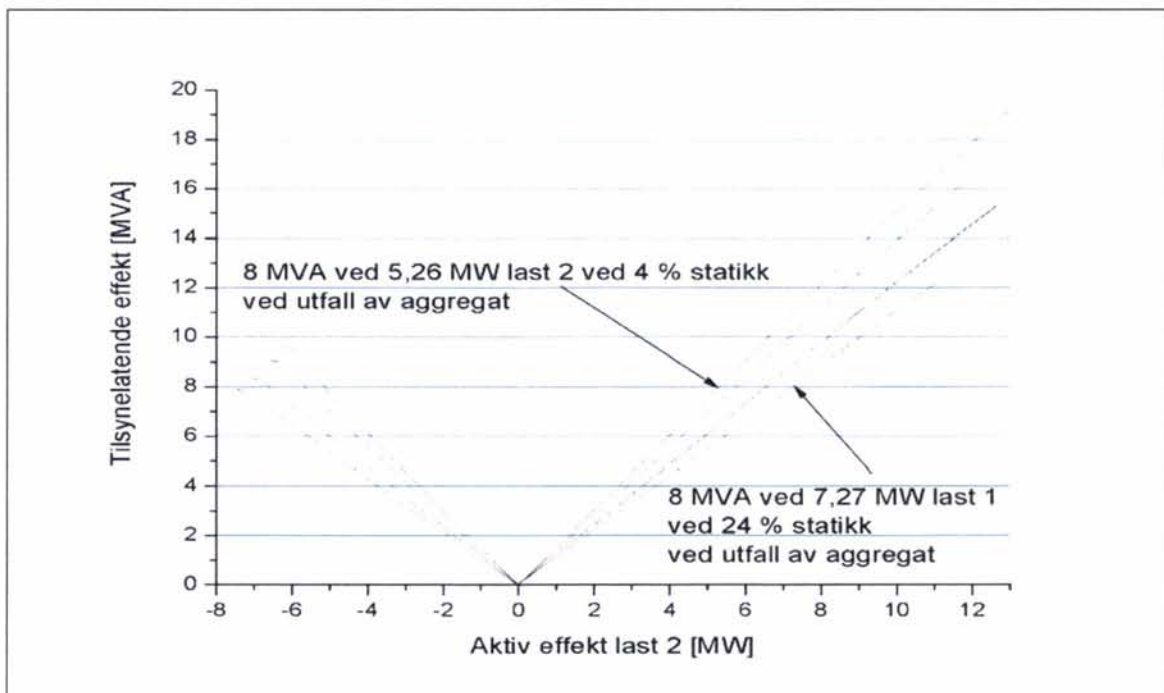


Figur 2-26 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 2 for aggregater på 2 x 5,8 MVA.

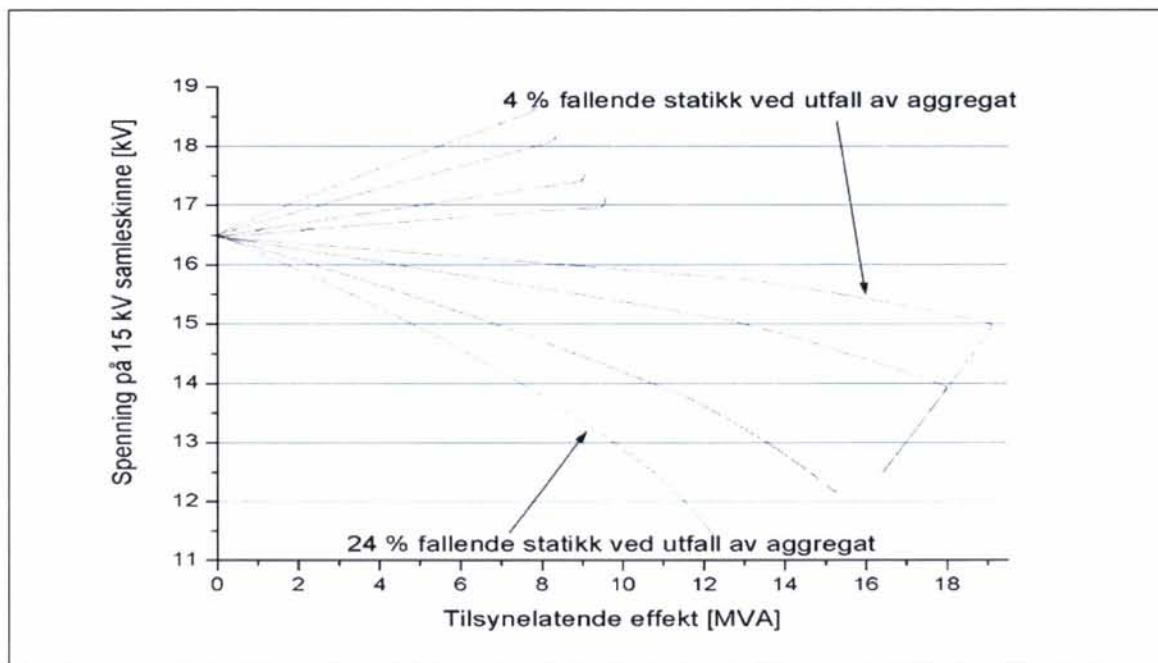




Figur 2-27 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-28 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-29 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

Tabell 2-3 Undersøkelse av høyeste mulig belastningsgrad av omformerstasjonen før utfall av aggregat. Skal redundans (n-1 kriterium) være oppfylt må belastningen ved utfall ikke være større en høyeste 2-sekunders verdi av strømmen til gjenværende aggregat. Undersøkelse med last 2 rett ved stasjonen.

Statikk Normal og ved utfall	Effekt til last 2 når 625 A 2-sekunders verdi for strøm oppnåes ved utfall [MW]	Tilsvarende belastning av stasjonen i normal drift med denne lasten ved stasjonen [A]	Belastning i forhold til stasjonsytelse 2 x 625 A [%]
0 og 4 %	6,59	619	50
4 og 8 %	6,91	615	50
8 og 16 %	7,40	633	51
12 og 24 %	7,70	641	51

Tabell 2-4 Undersøkelse av høyeste mulig belastningsgrad av omformerstasjonen får utfall av aggregat. Skal redundans (n-1 kriterium) være oppfylt må belastningen ved utfall ikke være større en høyeste 6-minutters verdi av effekten til gjenværende aggregat. Undersøkelse med last 2 rett ved stasjonen.

Statikk Normal og utfall	Effekt til last 2 når 8 MVA 6-minutters verdi for effekt oppnåes ved utfall [MW]	Tilsvarende belastning av stasjonen i normal drift med denne lasten ved stasjonen [MVA]	Belastning i forhold til stasjonsytelse 2 x 8 MVA [%]
0 og 4 %	5,29	8,28	52
4 og 8 %	5,79	8,32	52
8 og 16 %	6,59	8,67	54
12 og 24 %	7,24	9,05	57

### 2.2.3 Undersøkelse av normal driftsituasjon med lasten ute på matestrekingen

Undersøkelsene i avsnitt 2.2.1 og 2.2.2 som ble gjort for en belastning rett ved en omformerstasjon viste at fallende statikk kan redusere den reaktive effekten og øke den aktive som denne leverer. Det ble påpekt at det som må undersøkes før en kan si hvor stor statikk som kan tillates er spenningen ute på kontaktledningsanlegget. For å undersøke forholdene vil en forsøke å belaste matestrekingen og omformerstasjonene slik at:

- Laveste spenning som kan oppstå avdekkes og statikk justeres slik at ikke spenningen blir for lav.
- Omformerstasjonene belastes helt opp til sin grense for 2-sekunders eller 6-minutters verdi.
- Det tillates ikke tog som trekker mer enn 700 A i henhold til utkast til Network Statement 2011, og antallet tog må økes om denne grensen overskrides.
- EI16 lokomotivene belaster banestrømforsyningen mest ved at det trekkes mye reaktiv effekt, for disse togene vil det være naturlig å se spesielt på effektopptak. Maksimalt kan de trekke 7,3 MW fra kontaktledningen med  $\cos \varphi = 0,7$ .

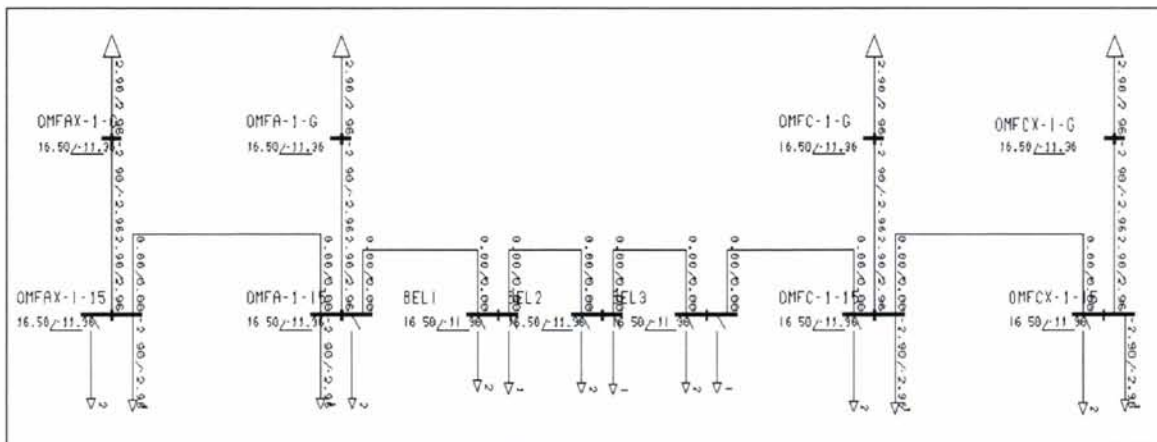
For dette tilfellet er det gjort undersøkelser i appendiks A for å finne høyeste antall tog som kan tillates og hvor de har sin posisjon når laveste spenning oppstår. Disse plasseringene er benyttet i de stiliserte simuleringene der belastningen gradvis økes.

#### 2.2.3.1 Last 1 - Aktiv belastning

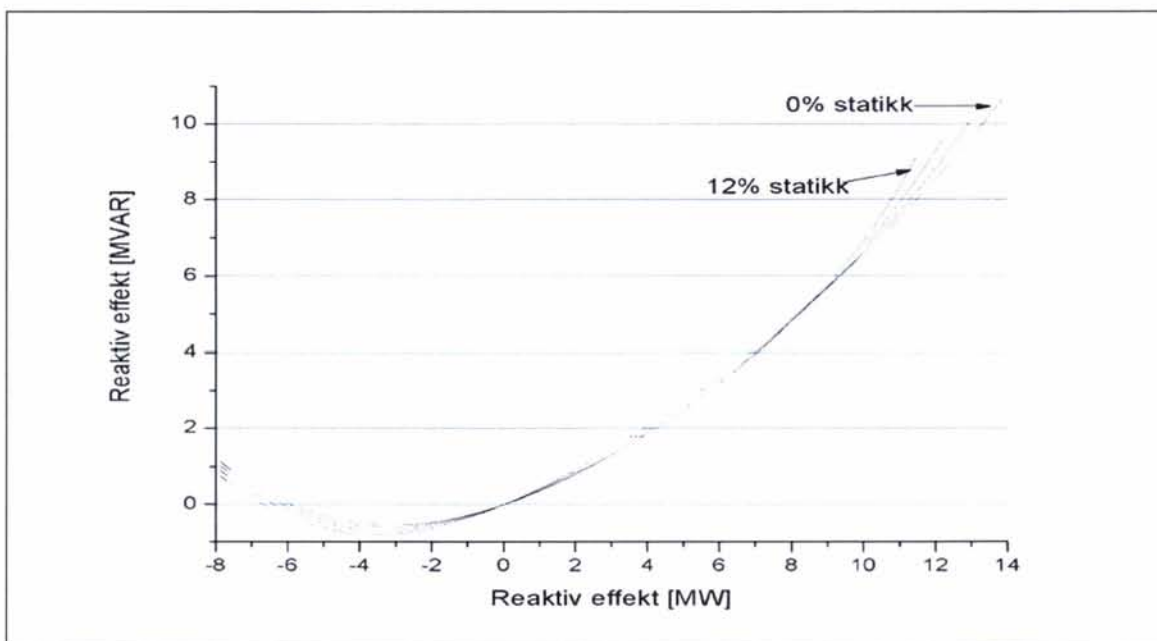
I denne undersøkelsen er det satt inn tre tog midt på matestrekingen med 10 km mellom dem. Figur 2-31 viser hvorledes aktiv og reaktiv effekt forholder seg til hverandre ved omformerstasjon A når lastene økes gradvis over et stort område. Som en ser vil fallende statikk føre til en del mindre reaktiv effektproduksjon. En ser også at strømgrensen på 625 A inntreffer når lastene trekker 16,8 MW med 12 % statikk, mens for flat statikk kan lastene tillates å trekke 18,6 MW, se Figur 2-32. For den tilsynelatende effekten sin 6-minuttersverdi er det knapt noen forskjell, se Figur 2-33.

Når lastene trekker effekt helt ned til 12,0 kV, - laveste tillat verdi, blir samlet effekt som lastene kan trekke noe forskjellig, se Figur 2-34. Med 12 % fallende statikk ser det ut til at totalt 14 MW kan trekkes av lastene, mens ved 0 % ser det ut til at omentrent 16 MW kan trekkes før spenning under 12,0 kV oppstår. Forskjellen er ikke veldig stor, men det kan altså kortvarig trekkes 2 MW mindre effekt med 12 % statikk enn med flat statikk. Noen større statikk ser ikke ut til å være aktuelt.

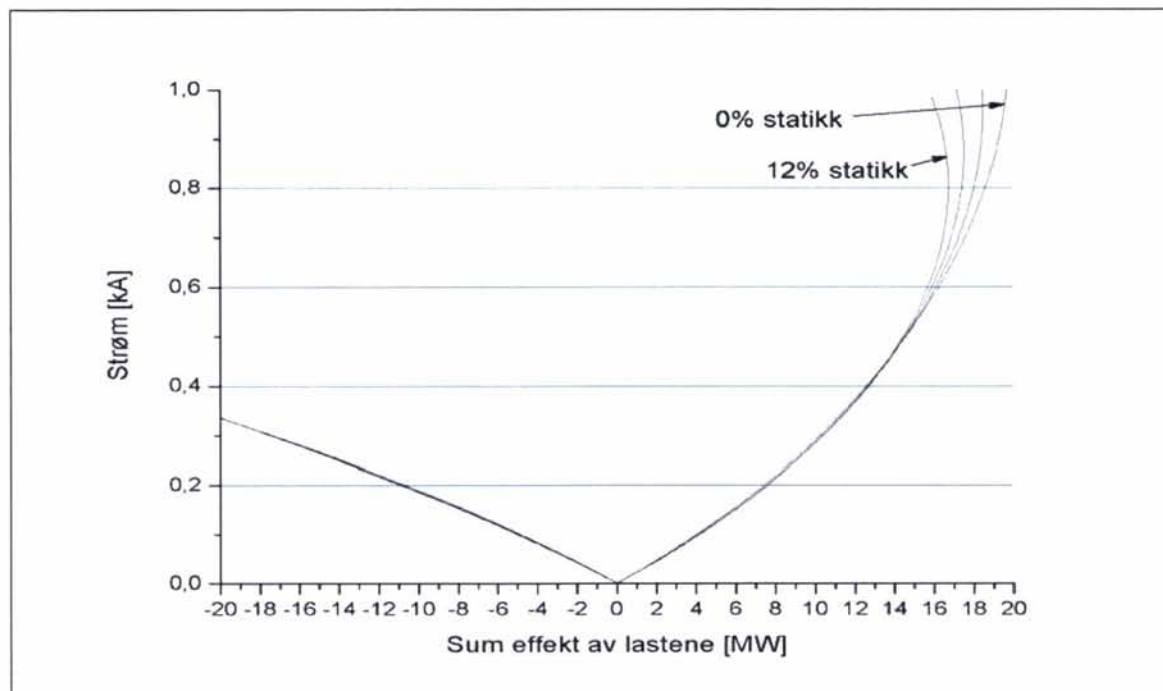
Når det gjelder tap viser Figur 2-35 at disse blir mindre når statikken er stor. Dette er motsatt situasjon av tilfelle med lastene rett ved omformerstasjonen, se avsnitt 2.2.2.1. I sum vil tapene forventes å bli redusert når det velges en fallende statikk fremfor flat.



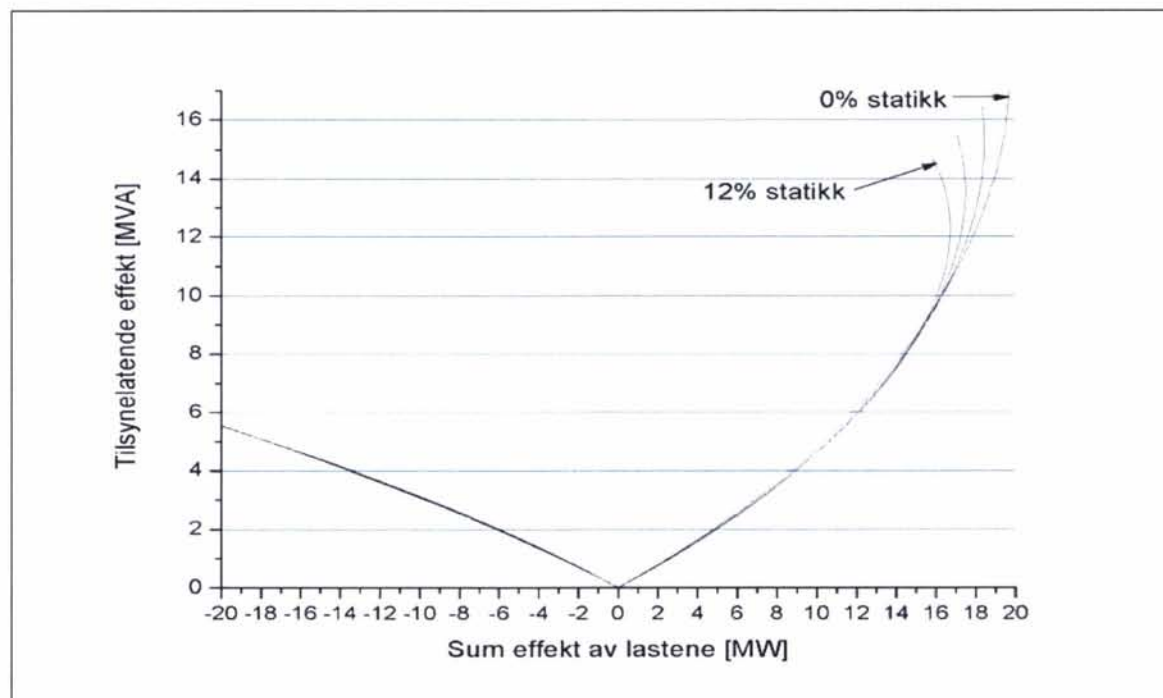
Figur 2-30 Enlinjediatram som viser strukturen av kraftsystemet som skal undersøkes. Det er fire omformerstasjoner kalt AX, A, C og CX involvert og her er det vist situasjonen med initiell lastflyt i OPTPOW.



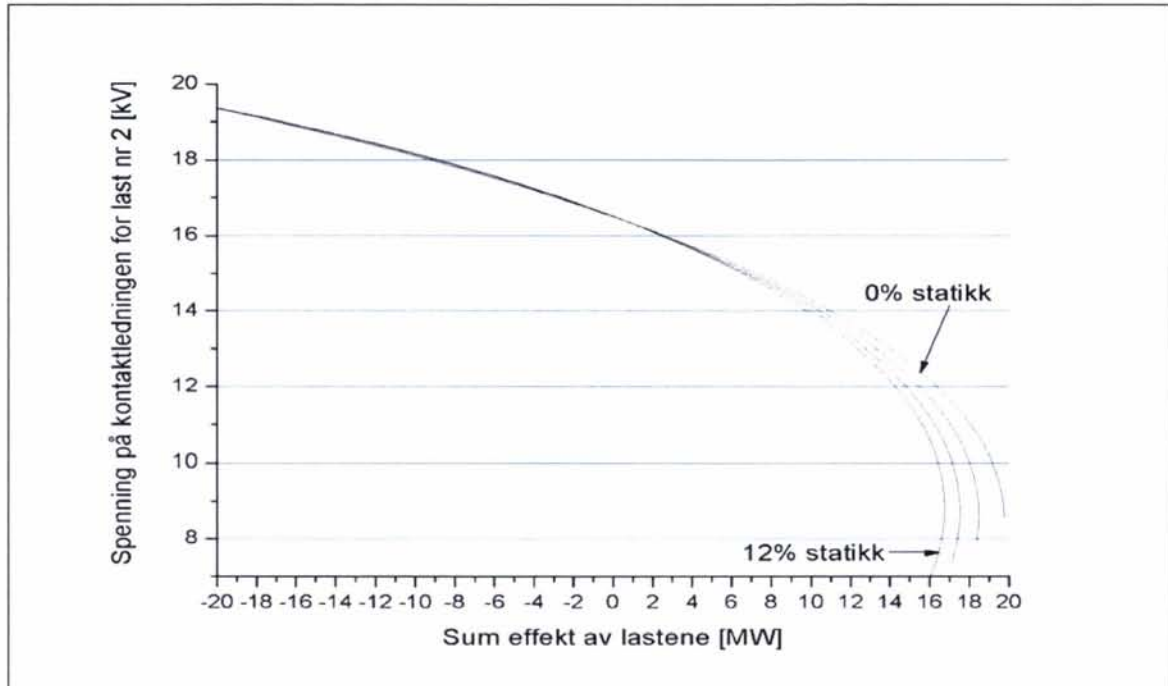
Figur 2-31 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon A ved økende aktiv belastning som til lastene av type 2 for aggregater på 2 x 5,8 MVA.



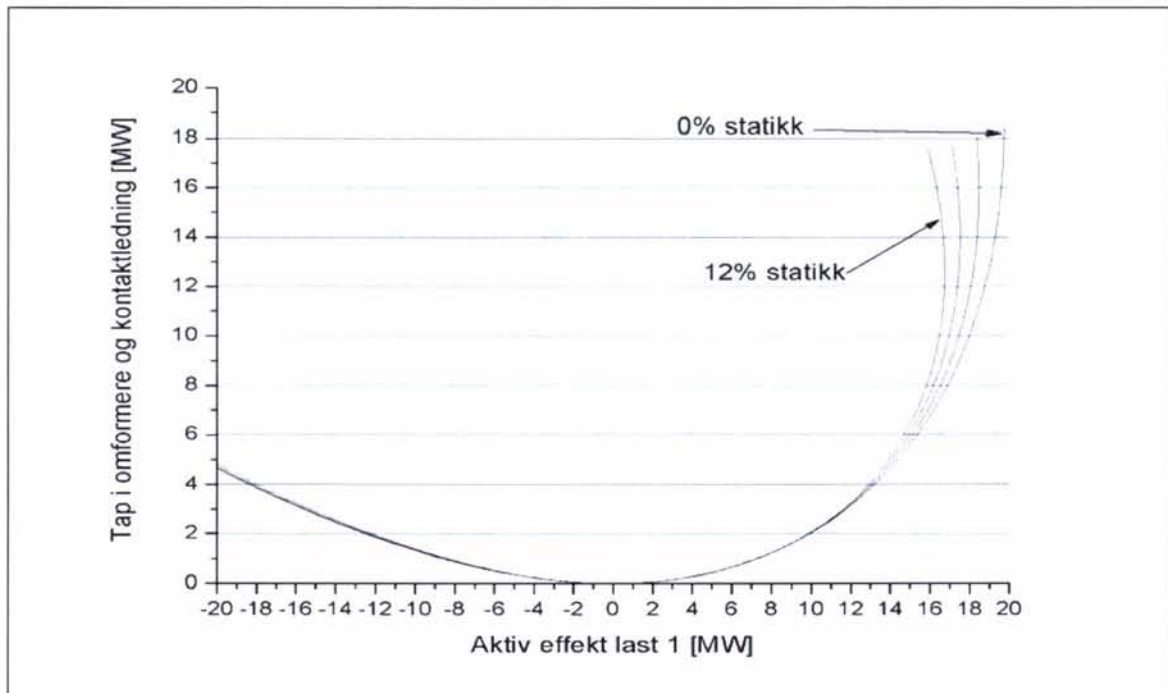
Figur 2-32 Strøm levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til lastene av type 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-33 Effekt levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til lastene av type 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-34 Spenningen på kontaktledningen ved last (tog) nr 2 som funksjon av effekt til lastene av type 1 ved økende aktiv belastning.



Figur 2-35 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til lastene av type 1. Tomgangtapene er ikke inkludert.

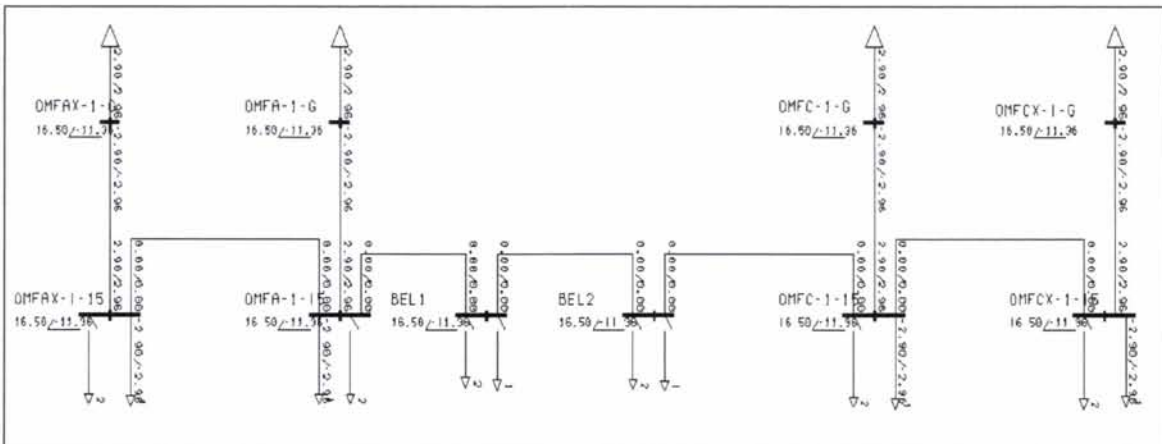
### 2.2.3.2 Last 2 - Aktiv og reaktiv belastning

For belastning med både aktivt og reaktivt effektopptak benyttes det kun to laster ute på matestrekingen, se Figur 2-36. Last nr 1 (BEL 1) er 10 km fra stasjon C mens last nr 2 (BEL

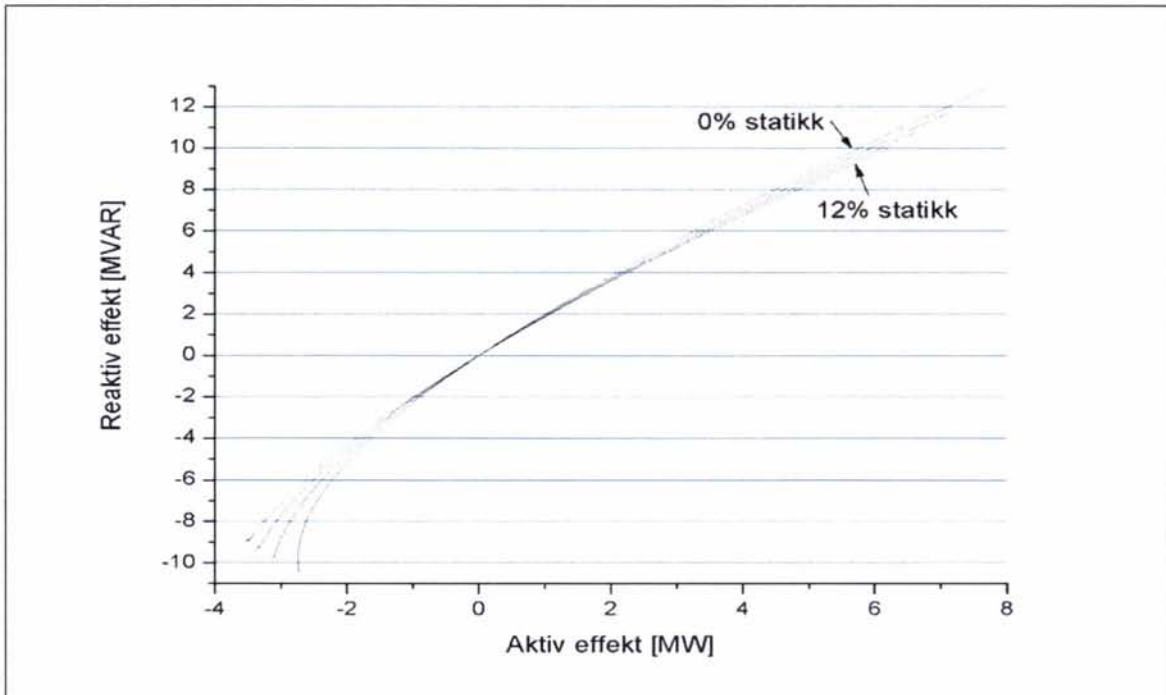
2) er 30 km fra stasjon A. Med belastning slik at  $\cos \varphi = 0,7$  ser en av Figur 2-37 at valg av statikk får en viss betydning. Med 12 % statikk og stort effektbehov er det noe mindre reaktiv effektproduksjon enn med flat statikk. Av Figur 2-38 ser en at høyeste verdier for 2-sekunders strøm er noe avhengig av statikken, ca 0,5 MW mer kan leveres med 12 % statikk istedenfor flat. Figur 2-39 viser at for 6-minuttersverdier av effekten kan en tillate en litt større last på matestrekningen med 12 % fallende statikk, nesten 1 MW.

Det avgjørende for statikken er spenningen ute på matestrekningen når de to lastene trekker stor effekt, se Figur 2-40. Her er det spenningen for last (tog) nr 2, som får lavest spenning, som er undersøkt. Uten fallende statikk oppstår høyest spenning og togene kunne ha trukket stor effekt, ca 13 MW, uten at spenningen blir lavere enn 12,5 kV. Med 12 % statikk blir høyeste mulige effektuttak ca 9 MW om spenningen skal være over 12,5 kV. Betraktes 2-sekunders strømverdi i Figur 2-38 igjen ser en at med lav eller høy statikk kan lastene tillates å trekke omentrent 9 - 10 MW til sammen før grensen på 625 A er overskredet. (Som betyr at hvert tog trekker 5 MW.) Det er ikke nødvendig å ha spenning over 12,5 kV samtidig som risikoen for overbelastning er tilstede. Dermed kan det være fornuftig å la spenningen bli lav når denne grensen nærmer seg, og ved 12 % statikk skjer dette.

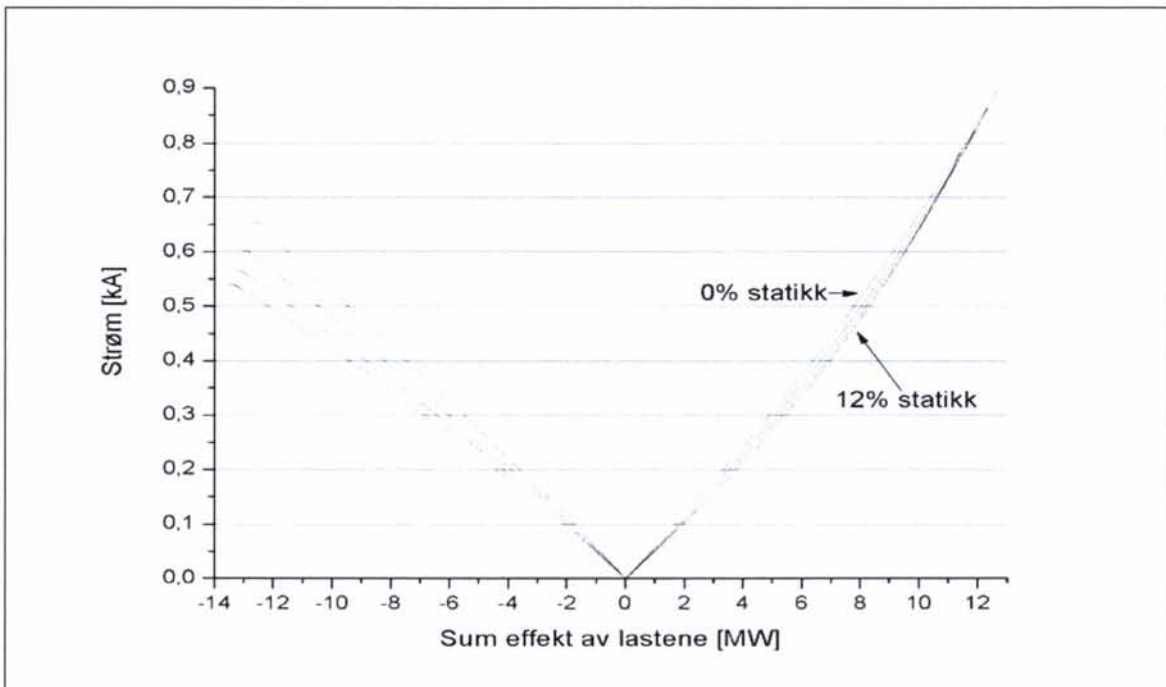
I Figur 2-41 som viser tapene, ser en at for last som trekker både aktiv og reaktiv effekt får ikke fallende statikk den virkningen som det hadde med rent aktiv belastning. Det er nå liten forskjell på tapene selv om statikken velges stor.



Figur 2-36 Enlinjediagram som viser strukturen av kraftsystemet som skal undersøkes. Det er fire omformerstasjoner kalt AX, A, C og CX involvert og her er det vist situasjonen med initiell lastflyt i OPTPOW.

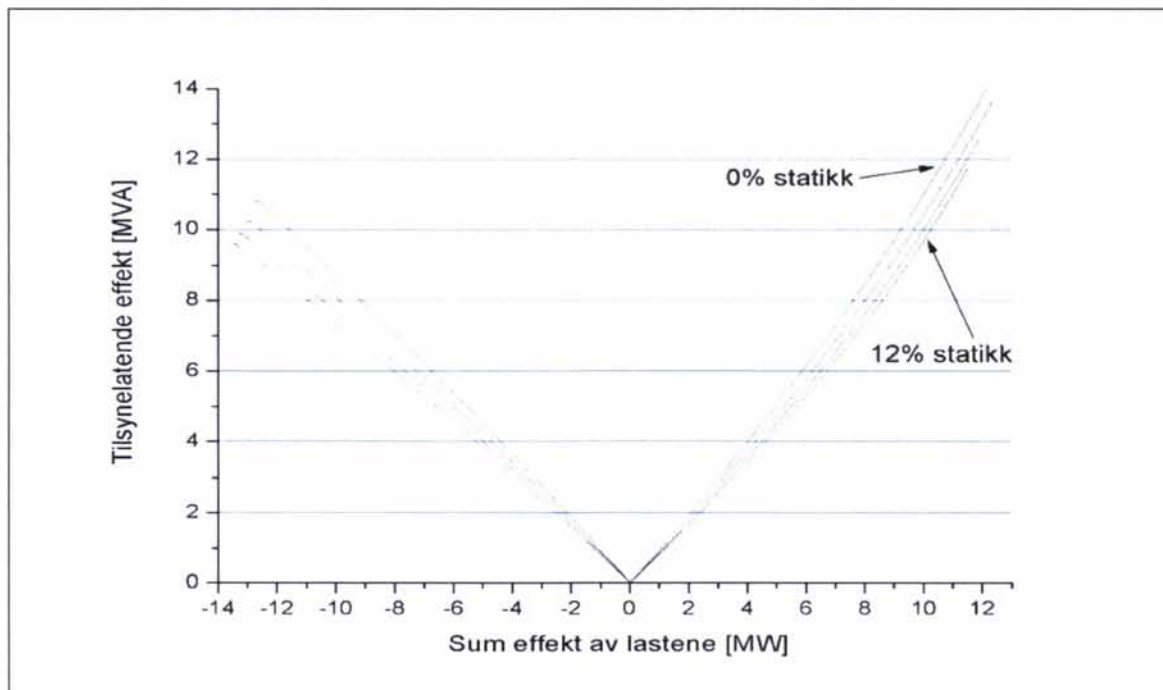


Figur 2-37 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon A ved økende aktiv belastning som for lastene av type 2 for aggregater på 2 x 5,8 MVA.

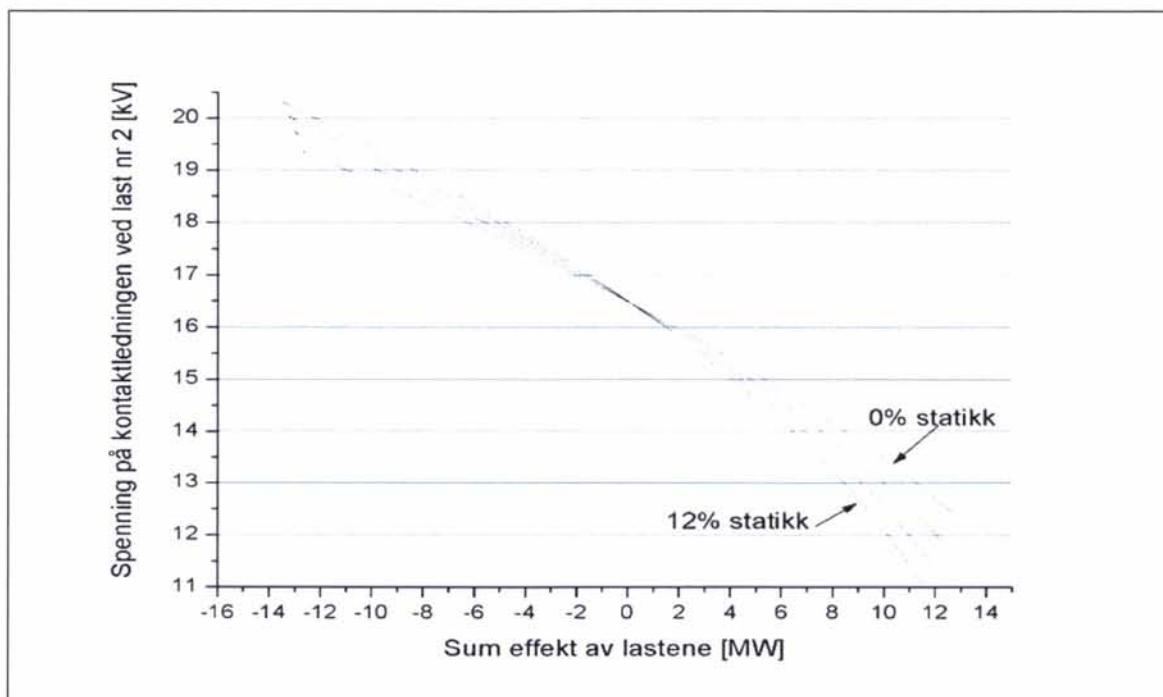


Figur 2-38 Strøm levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til lastene av type 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

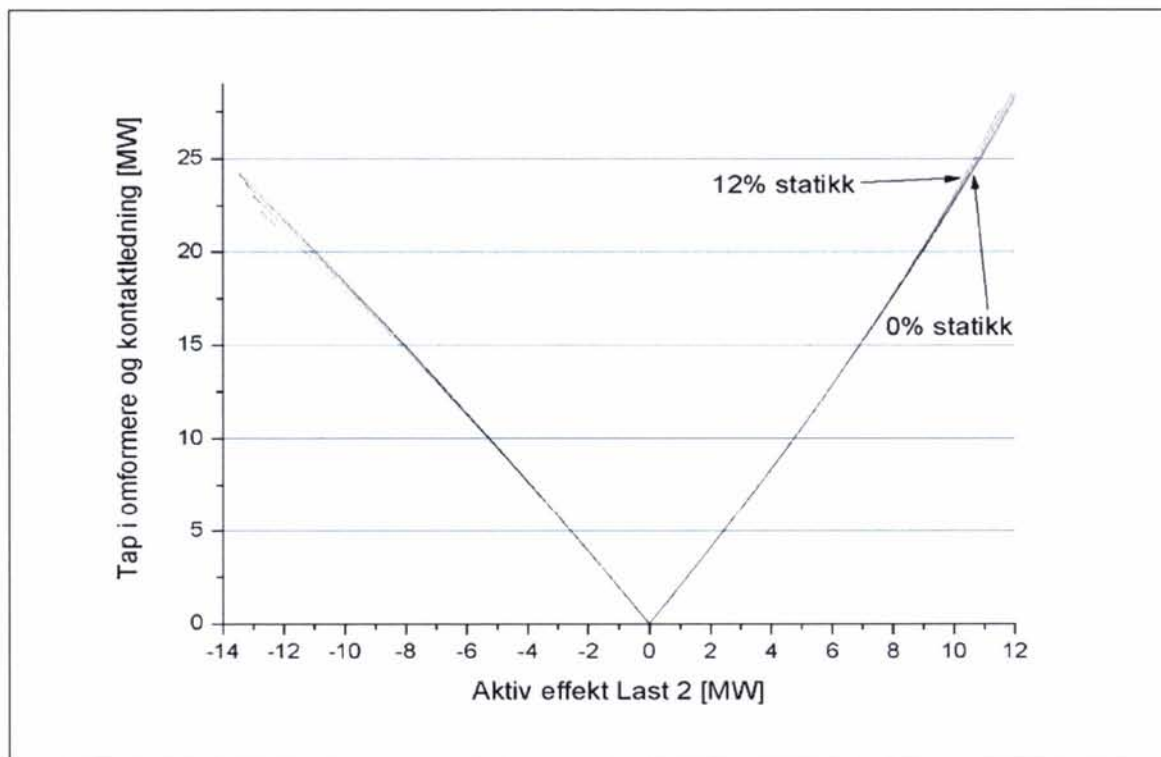




Figur 2-39 Effekt levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til lastene av type 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-40 Spenningen på kontaktledningen ved last (tog) nr 2 som funksjon av effekt til lastene av type 2 ved økende aktiv belastning.



Figur 2-41 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til lastene av type 2. Tomgangstapene er ikke inkludert.

#### 2.2.4 Undersøkelse av utfall av aggregat med lasten ute på matestrekingen

Også for tilfellet med utfall av ett aggregat i stasjon A er det gjort undersøkelser i appendiks A for å finne høyeste antall tog som kan tillates og hvor de har sin posisjon når laveste spenning oppstår. Disse plasseringene er benyttet i de stiliserte simuleringene der belastningen gradvis økes. Ved utfall av ett aggregat vil statikken for stasjonen fordobles slik at for eksempel de stasjonene som har begge omformere i drift har 12 %, mens i stasjon A blir statikken 24 %.

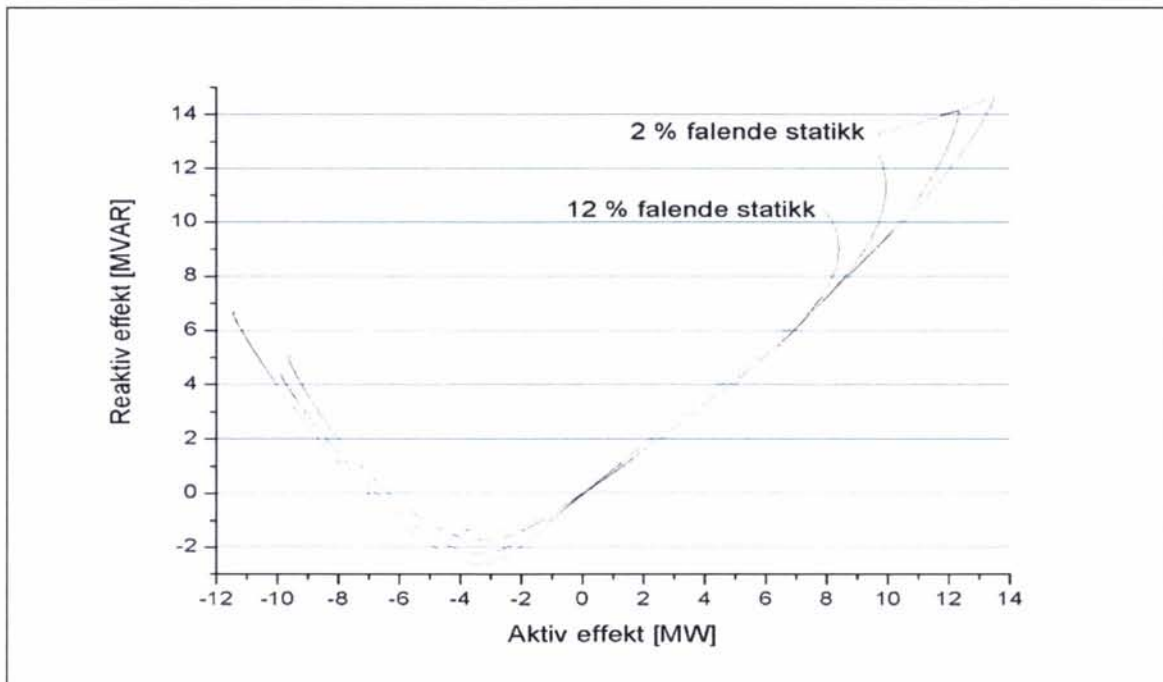
##### 2.2.4.1 Last 1 - aktiv belastning

Det er tre aktive laster ute på linjen med innbyrdes avstand 10 km og der last nr 2 er 32 km fra stasjon A. Figur 2-42 viser forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt fra omformerstasjon A når belastningene varierer ute på matestrekingen. Som en ser har innstillingen av statikk først betydning når summen av belastningen er stor. Også Figur 2-43 viser at forskjellig statikk kun får betydning for strømmen levert fra stasjon A når belastningen blir stor. Ved belastning på 2-sekunders strømgrense på 625 A, vil forskjellen mellom høyeste mulige effektopptak for lastene være omtrent 1 MW. Figur 2-44 viser at for 8 MVA effektgrense vil det også være en forskjell på rundt 1 MW for mulig effektopptak.

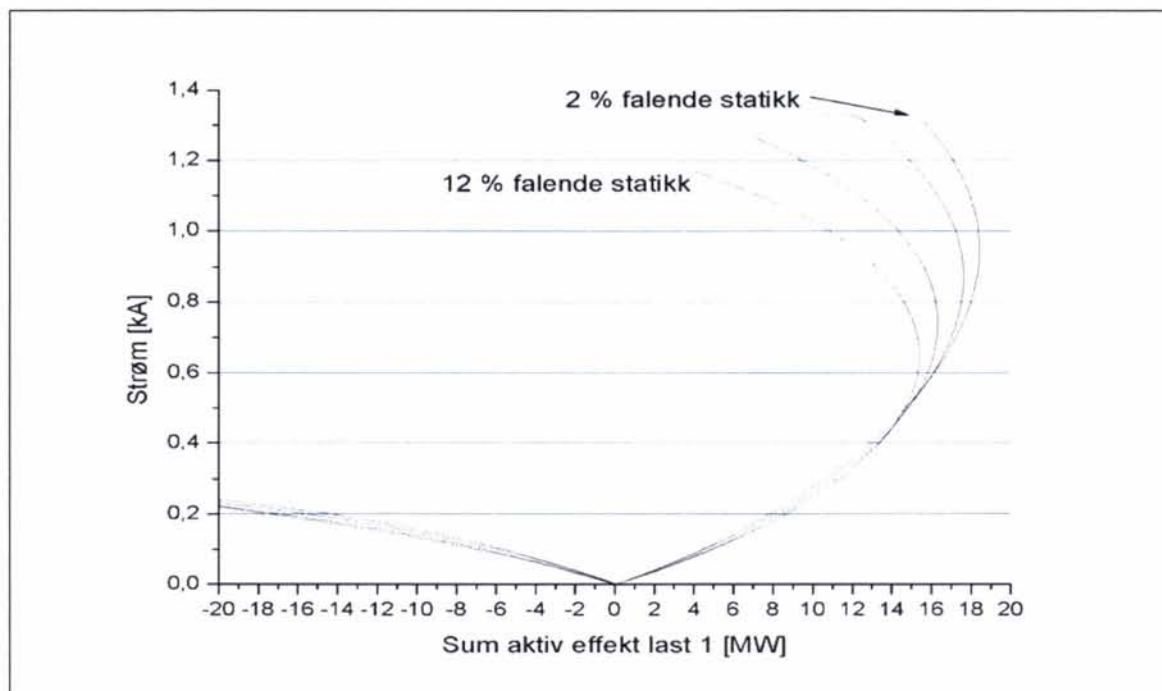
Figur 2-45 viser mulig effektoverføringskapasitet, og kurven har en typisk nesekurveform. Det vil si at en har funnet en kurve som viser hvor spenningskollaps oppstår, se [5]. Omentrent 18 MW kan trekkes ved lastene ved statikk på 2 %, mens med 12 % kan det trekkes ca 15 MW. Mer effekt enn dette kan ikke taes ut av kraftsystemet. Altså et betydelig høyere effekttuttak enn i avsnitt 2.2.2 der lasten lå rett ved stasjonene ved utfall av ett

aggregat. Av dette ser en at selv en statikk på 24 % ved utfall av ett aggregat har liten påvirkning på spenningen når lastene (togene) trekker kun aktiv effekt.

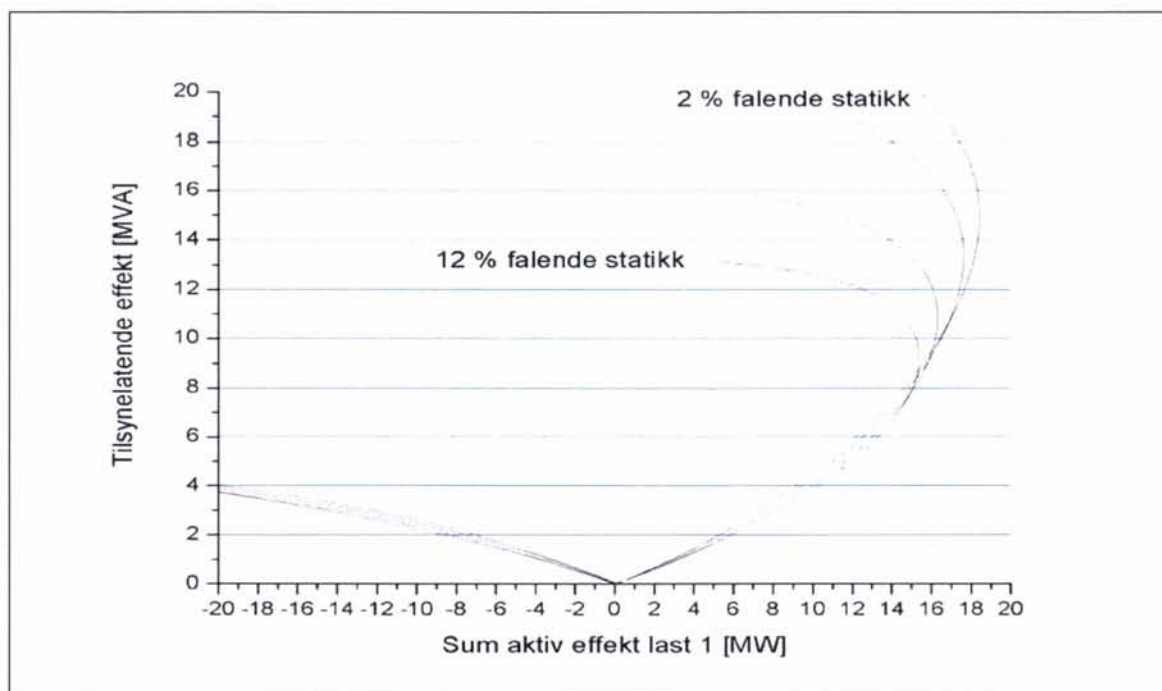
Det oppstår en meget gunstig situasjon med 12 % statikk ved at lasten ikke kan greie å trekke ut mer enn 14 MW og at omformerstasjonen, med ett gjenværende aggregat, dermed sannsynligvis ikke overbelastes. Imidlertid vil togene i en posisjon nærmere omformereren allikevel kunne overbelaste den. For togenes lokomotivførere må det også være mer gunstig med en spenning som faller nokså mye når effekten økes, fremfor at spenningen er mer konstant, se Figur 2-45.



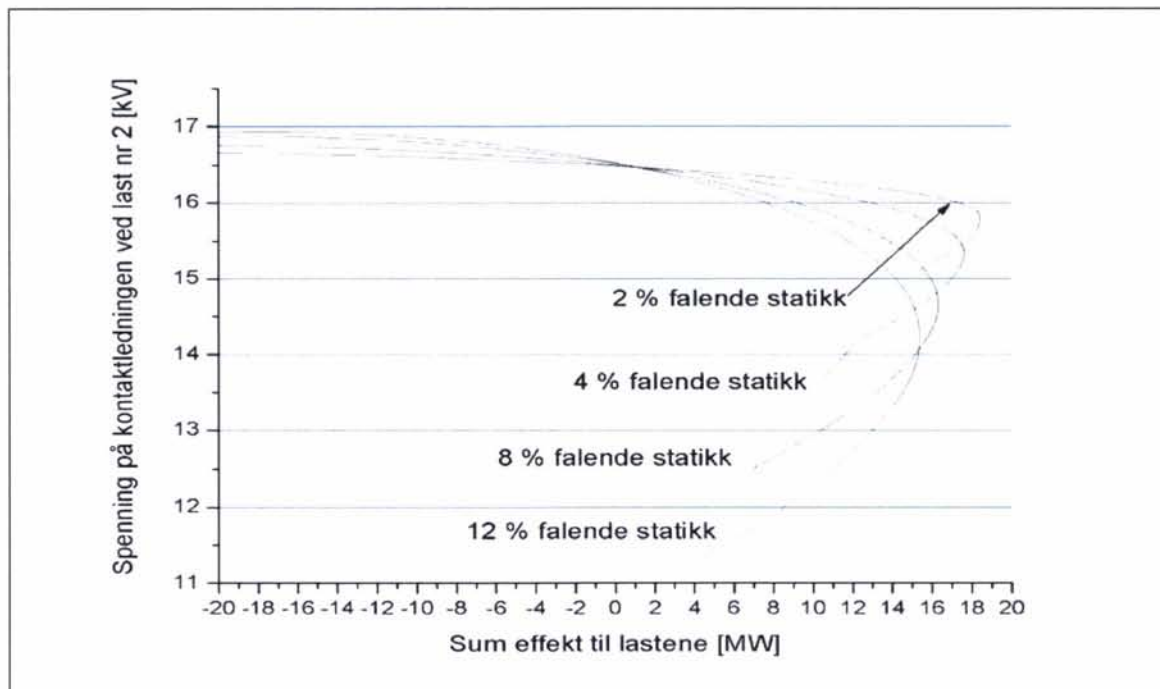
Figur 2-42 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon A ved økende aktiv belastning til lastene av type 1 for aggregater på 2 x 5,8 MVA.



Figur 2-43 Strøm levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til lastene av type 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-44 Effekt levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til lastene av type 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-45 Spenningen på kontaktledningen ved last (tog) nr 2 som funksjon av effekt til lastene av type 1 ved økende aktiv belastning.

#### 2.2.4.2 Last 2 - aktiv og reaktiv belastning

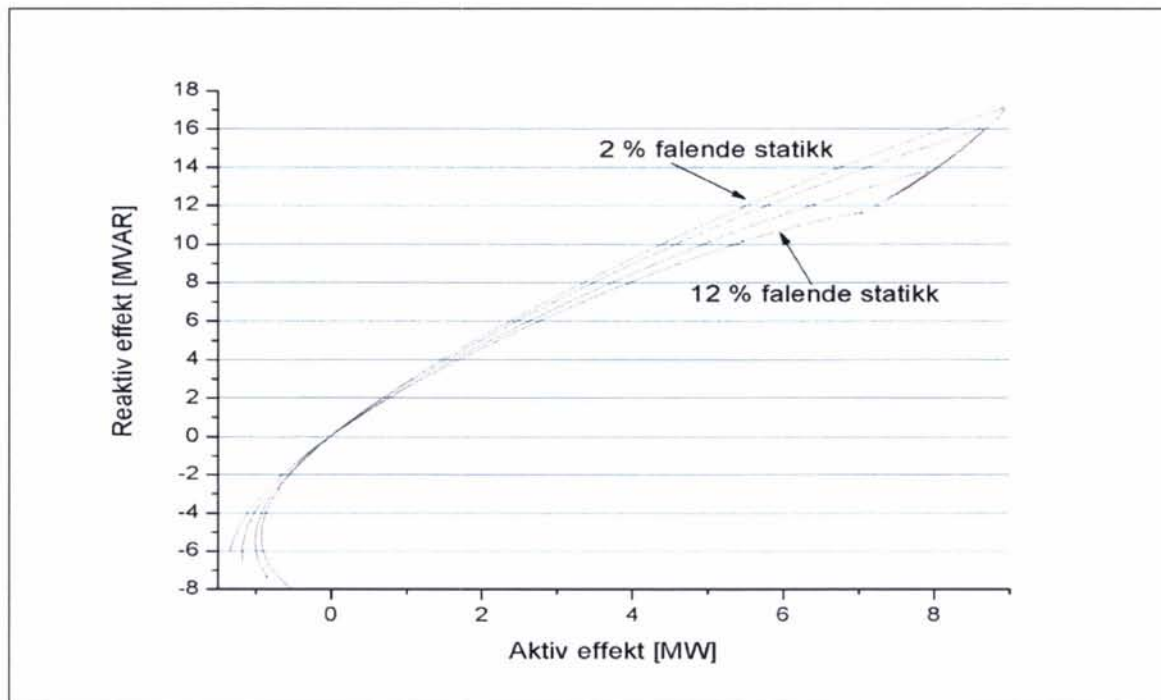
I denne undersøkelsen er det to laster ute på linjen av type 2 som trekker både aktiv og reaktiv effekt. Lastene har innbyrdes avstand 40 km og last nr 2 som spenningen undersøkes ved er 49 km fra stasjon A. I Figur 2-46 ser en forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt levert fra stasjon A. Det er betydelig forskjell på reaktiv effektproduksjon om det gis 2 % statikk eller 12 %, og altså det dobbelte ved utfall som her. Figur 2-47 og Figur 2-48 viser en del større verdier for henholdsvis levert strøm og tilsynelatende effekt fra stasjon A. Med 8 eller 12 % fallende statikk, som gir 16 eller 24 % spenningsfall ved utfall, kan lastene trekke 1 - 2 MW mer effekt uten at gjenværende aggregat overbelastes.

Spenningen som oppstår ute ved last nr 2 er vist i Figur 2-49, og ved 2 % statikk kan lasten trekke hele 15 MW uten at spenningen faller mer enn til 15 kV. Da er omformerstasjon A, med ett gjenværende aggregat, for lengst overbelastet og falt ut. Det må være mye mer gunstig med en sterkt fallende spenning ved utfall av ett aggregat slik at enten toget reduserer effektopptaket eller lokomotivføreren gjør det.

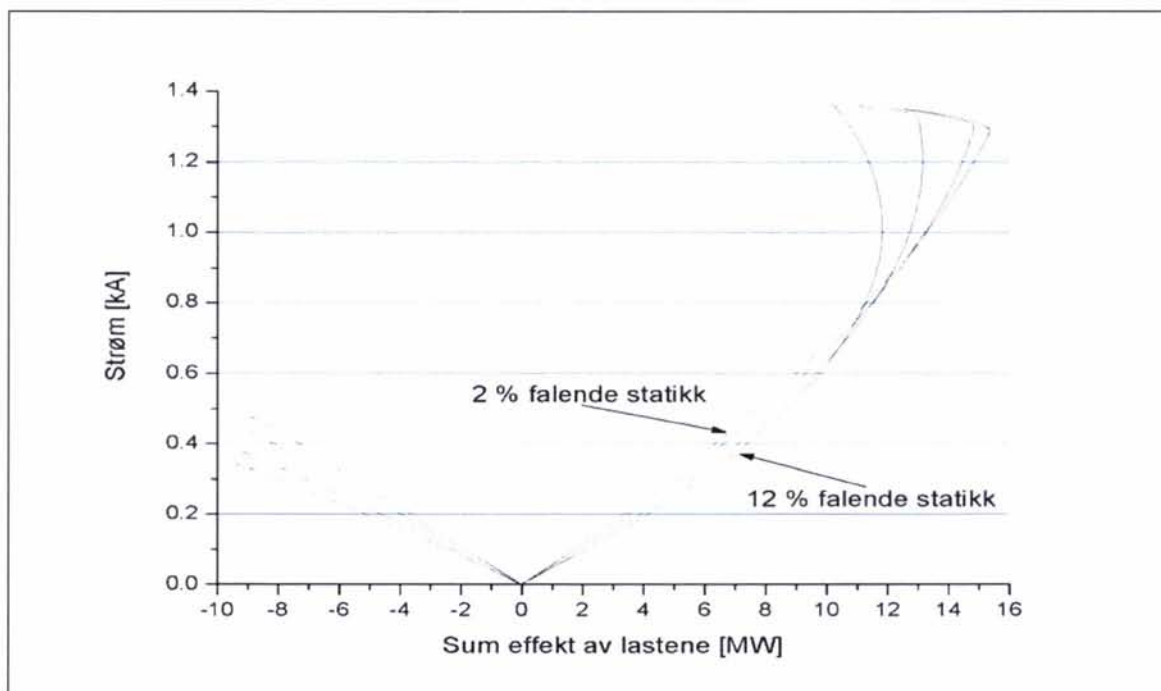
Det er interessant å se at spenningen ved last nr 2 blir akseptabel selv med 24 % fallende statikk i stasjon A. Overført effekt reduseres fra omtrent 15 til 12 MW, noe som gjør at også nå vil det gjenværende aggregatet i stasjon A overbelastes. Sammenlignes dette med spenningen som oppstod ute ved last nr 2 i avsnitt 2.2.3.2 ser en at spenningen faller raskere med økende effektopptak i normal drift enn med utfall av ett aggregat. Dette er et forbløffende resultat, men det er ikke gjort noen undersøkelse på hva dette kan skyldes.

Nesekurvens form er mye mer gunstig med 12 % statikk, og altså 24 % ved utfall, fordi spenningen faller mye ved økt belastning og enten togene eller lokomotivføreren vil

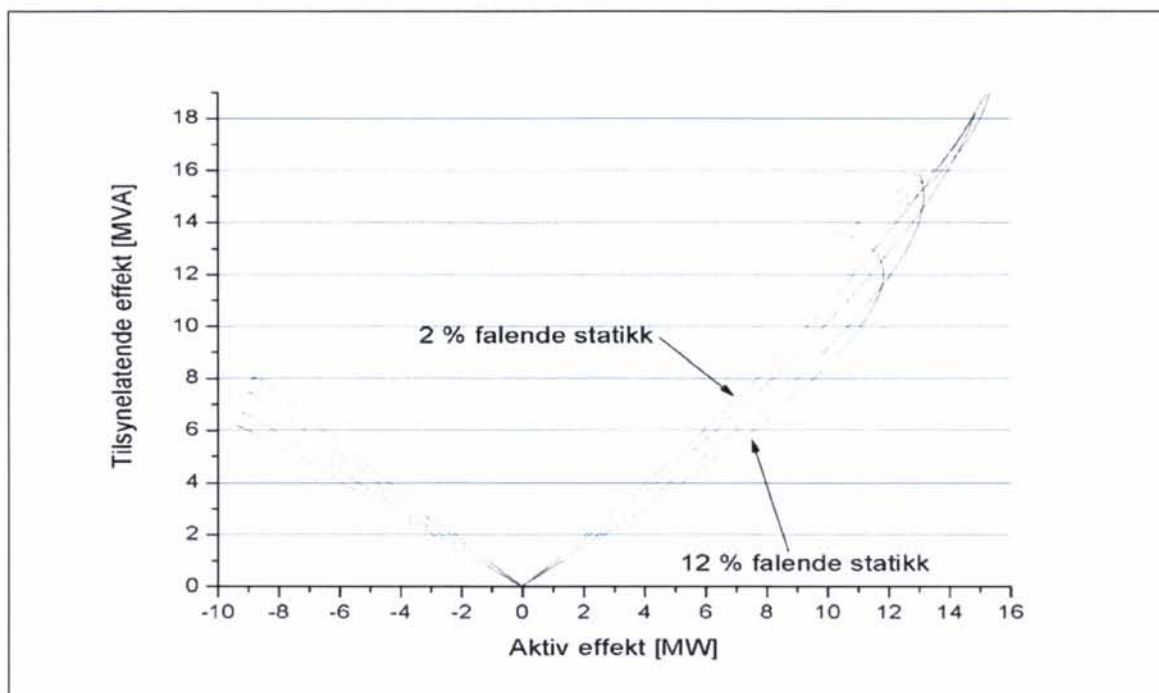
automatisk redusere effektopptaket. Dermed kan en lettere unngå overbelastning av det gjenværende aggregatet i stasjonen.



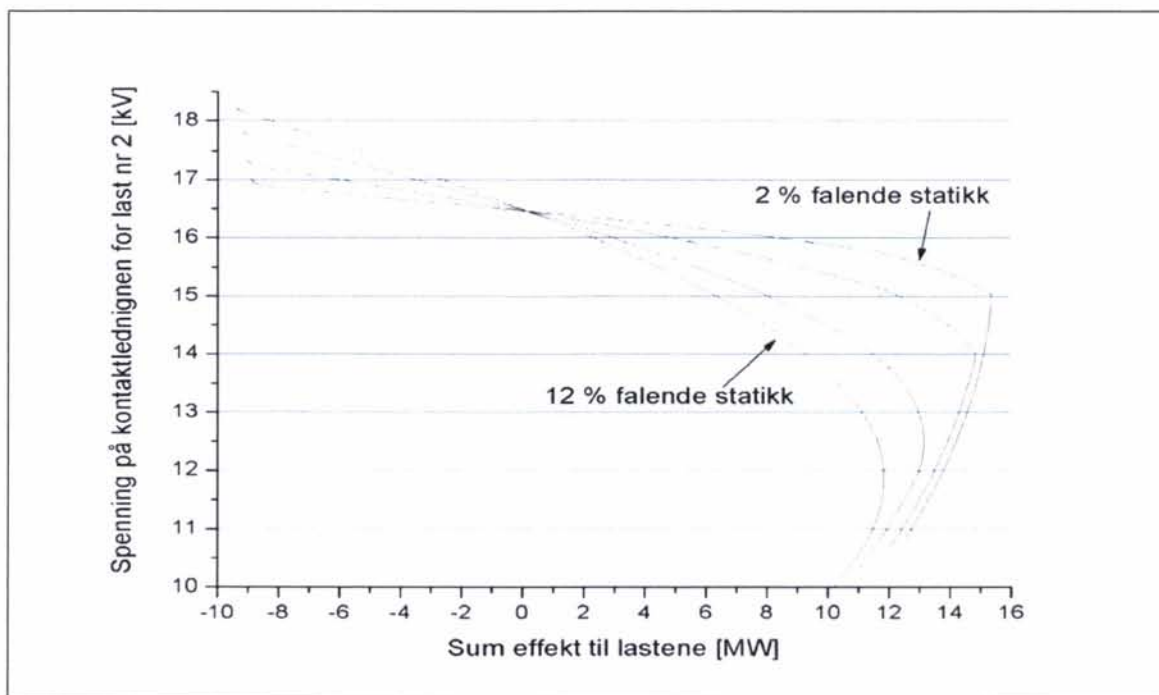
Figur 2-46 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon A ved økende aktiv belastning til lastene av type 2 for aggregater på 2 x 5,8 MVA.



Figur 2-47 Strøm levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til lastene av type 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-48 Effekt levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til lastene av type 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

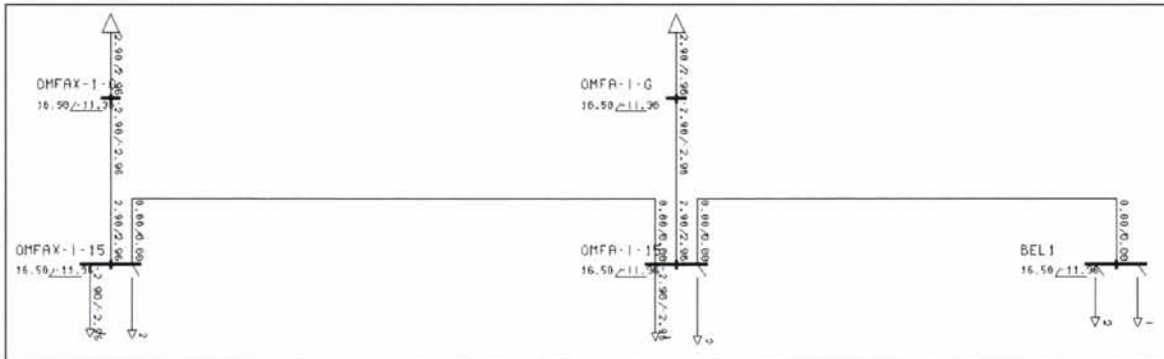


Figur 2-49 Spenningen på kontaktledningen ved last (tog) nr 2 som funksjon av effekt til lastene av type 2 ved økende aktiv belastning.

### 2.2.5 Undersøkelse av driftsituasjon med ensidig matet strekning

Ensidig matet strekning har en ved utfall av en omformerstasjon på enden av en bane eller ved brudd på kl-anlegget på en matestrekning, for eksempel ved arbeid. Det er også tilfeller med

lange ensidige matede strekninger, som Flåmsbanen og Gjøvikbanen. Ved brudd på kontaktledningen for arbeid må en vente til tog er såpas langt unna bruddstedet at endematet strekning ikke blir for lang. Typisk må en vente til togene er nesten helt ute av matestrekningen og rett utenfor omformerstasjonene. Det gjøres her en undersøkelse med en 60 km lang ensidig matet strenging, dette tilsvarer omentrent Gjøvikbanen sin avstand fra Lunder omformerstasjon til Gjøvik. Ved å gjøre denne undersøkelsen får en undersøkt om spesielle forutsetninger for valg av innstilling av spenningsregulatoren gjelder.

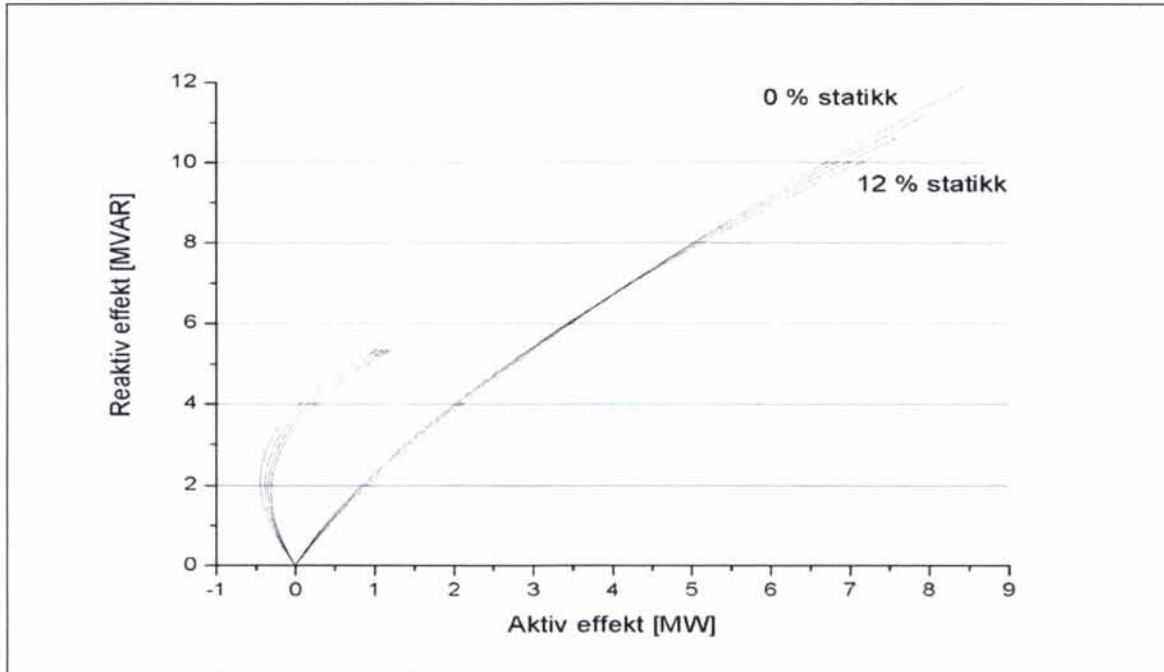


**Figur 2-50 Enlinjediagram som viser strukturen av kraftsystemet som skal undersøkes. Det er fire omformerstasjoner kalt AX og A involvert og her er det vist situasjonen med initiell lastflyt i OPTPOW.**

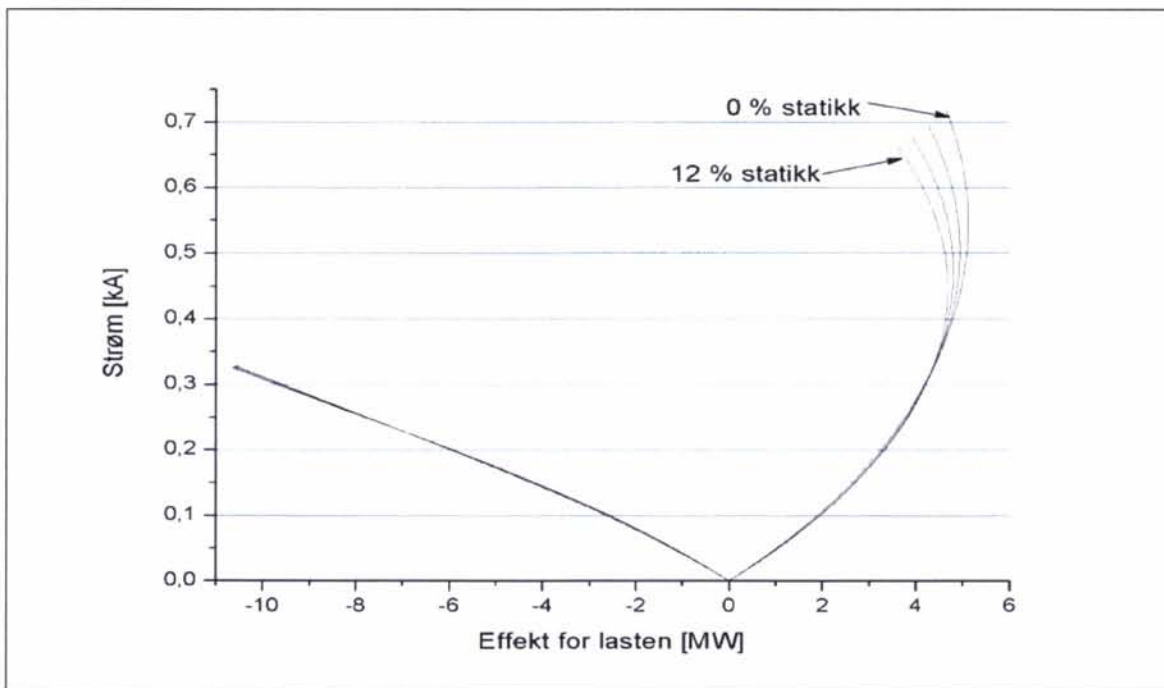
### 2.2.5.1 Last 1 - aktiv belastning

Figur 2-51 viser at forskjellig statikk for spenningsregulatoren har liten betydning for last som trekker kun aktiv effekt. I Figur 2-52 og Figur 2-53 ser en at henholdsvis grensen for 2-sekunders strøm, 625 A, og for 6-minutters effekt, 8 MVA, blir påvirket på den måten at om det gies 12 % fallende statikk vil lasten kunne trekke omentrent 1 MW mer effekt. Det kan se ut til at ved laveste tillat spenning på 12,0 kV kan lasten trekke ca 0,5 MW mer effekt med flat statikk istedenfor 12 % fallende, se Figur 2-54. Av dette ser det ut til at statikk mellom 0 og 12 % får liten betydning når lasten trekker rent aktiv effekt.

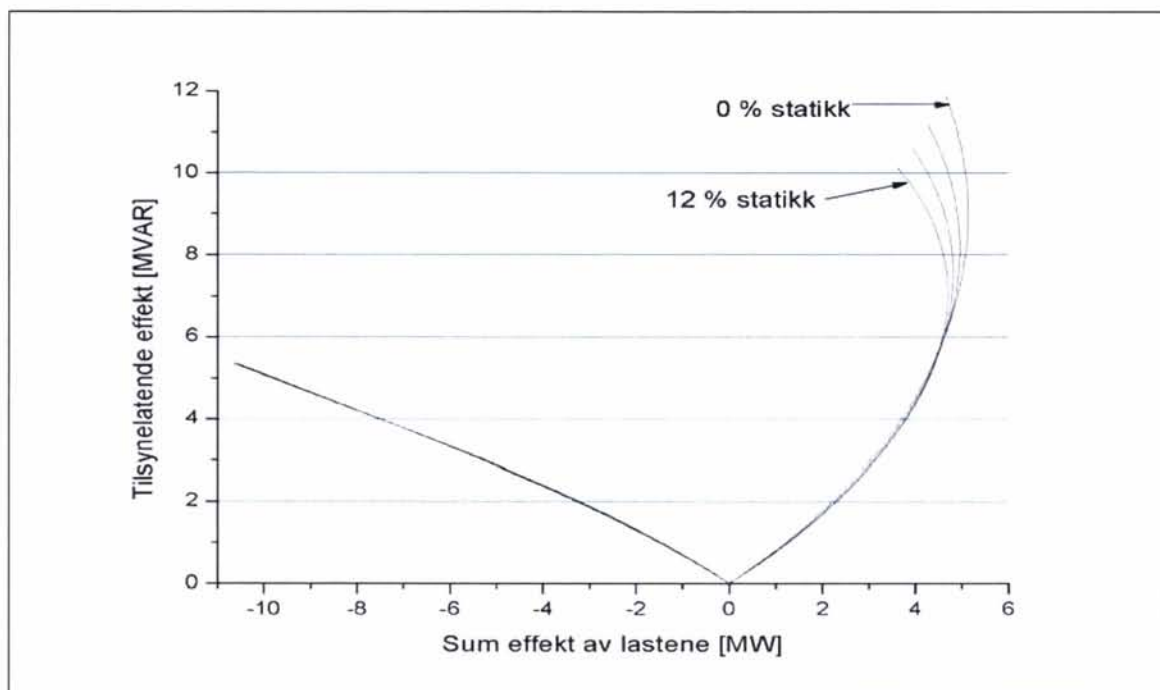




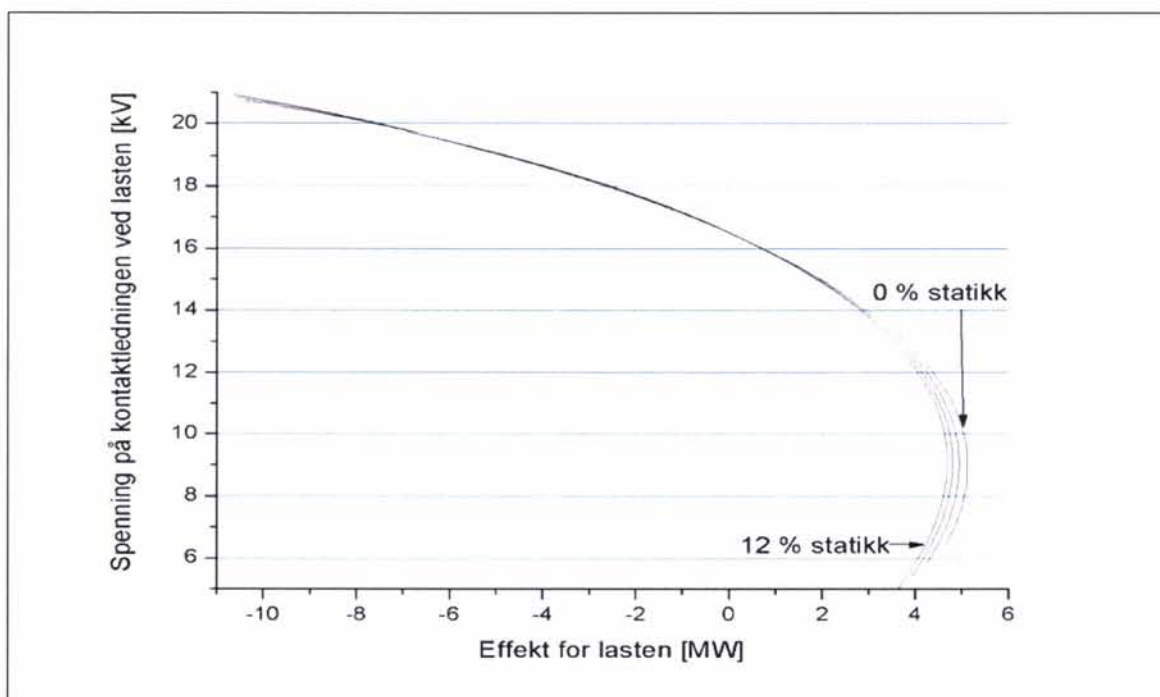
Figur 2-51 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon A ved økende aktiv belastning som for last 1 for aggregater på 2 x 5,8 MVA.



Figur 2-52 Strøm levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-53 Effekt levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til lastene 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



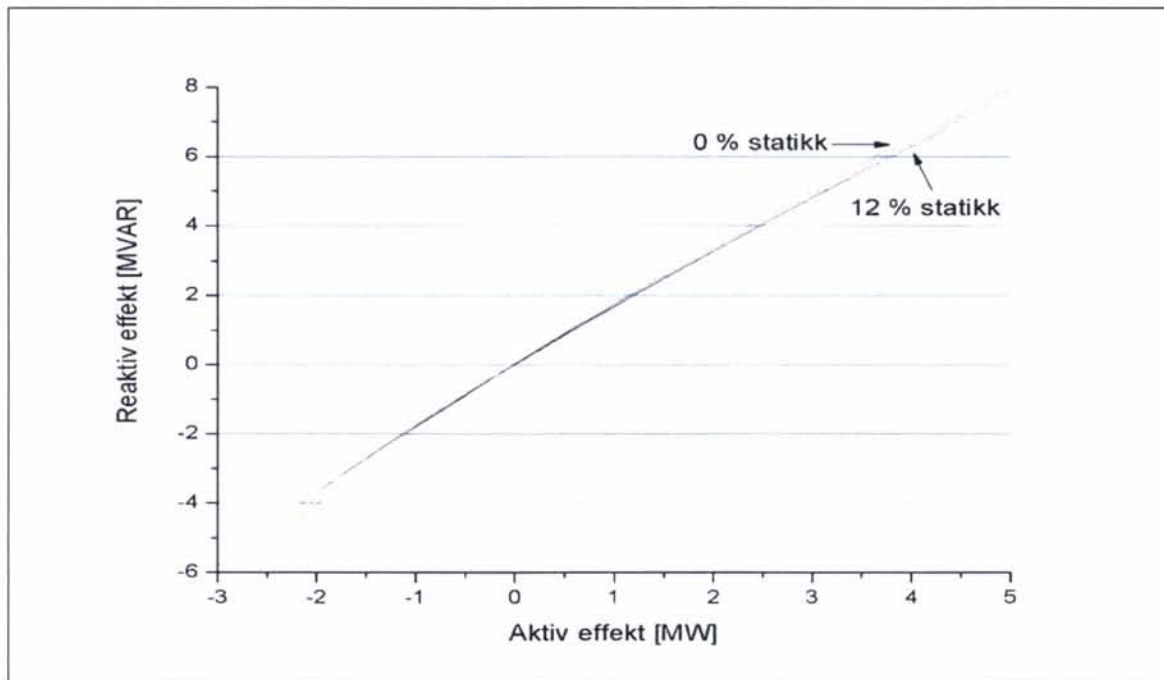
Figur 2-54 Spenningen på kontaktledningen ved last (tog) nr 2 som funksjon av effekt til lastene av type 2 ved økende aktiv belastning.

### 2.2.5.2 Last 2 - aktiv og reaktiv belastning

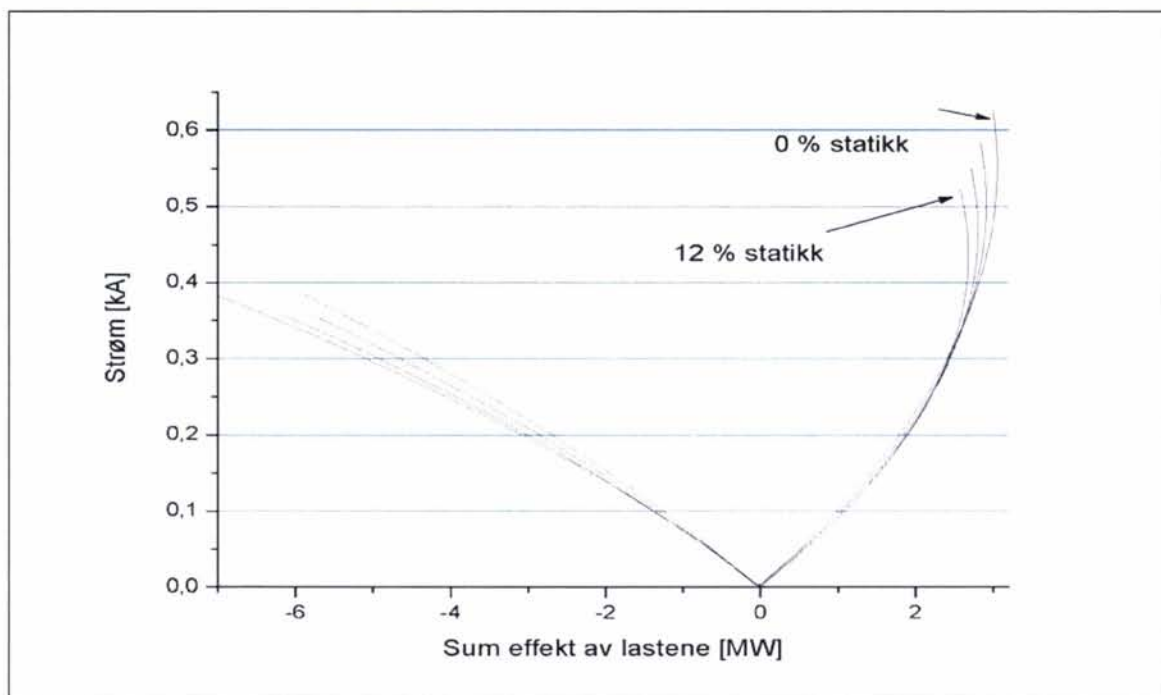
I Figur 2-55 ser en at valg av statikk også får lite å si når lasten er både aktiv og reaktiv. Av strømgrensen for 2-sekundersverdi på 625 A ser en av Figur 2-56 at forskjellig statikk har noe

å si for lastens muligheter for å trekke aktiv effekt. Det kan tillates med ca 0,8 MW mer last med flat statikk. Imidlertid ser en at med 12 % fallende statikk kan aldri stasjonen overbelastes. Mer effekt må komme fra nabostasjonene, samtidig som spenningen vil falle mye. For effektgrense for 6-minuttersverdi på 8 MVA ser en av Figur 2-57 at med 12 % statikk leverer stasjonen mindre effekt til lasten, men fare for overbelastning unngås med statikk lavere enn 4 % (og 8 % ved utfall). Spenningen derimot ser ut til å bli svært lav, se Figur 2-58.

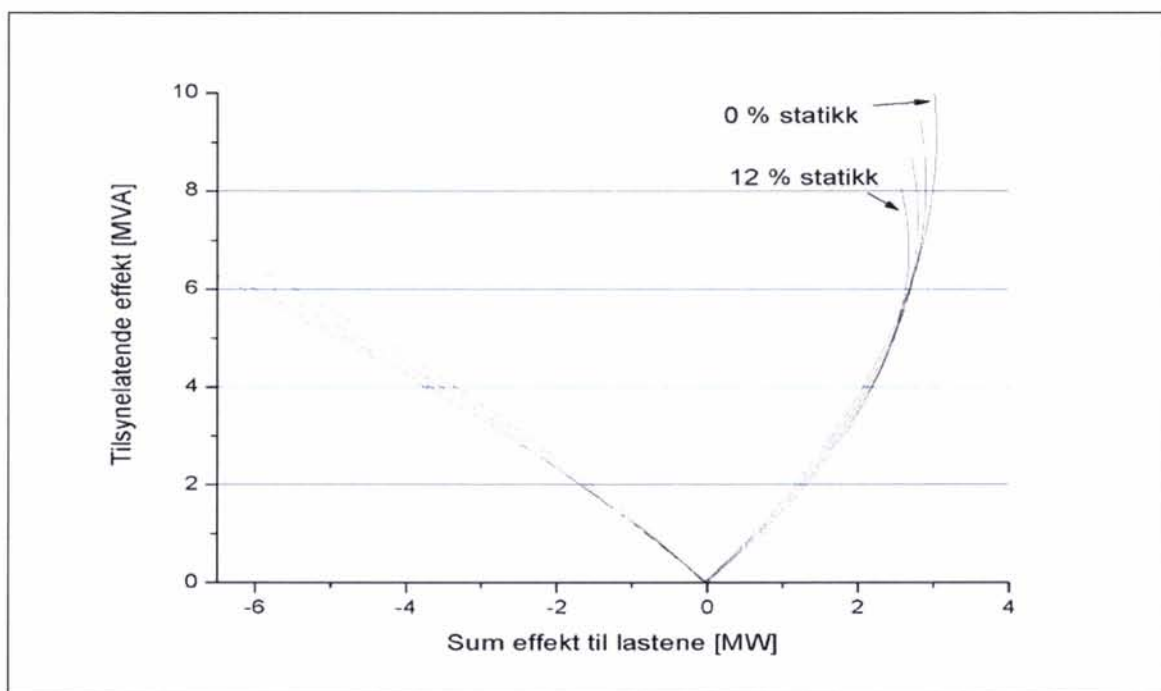
For dette spesielle tilfellet med stort reaktiv effektopptak på en ensidig matet strekning ser det ut til at en statikk på 4 eller 8 % er gunstig, men at 12 % er unødvendig mye. Spenningen blir lav, men fordelene av å redusere faren for overbelastning er gunstig.



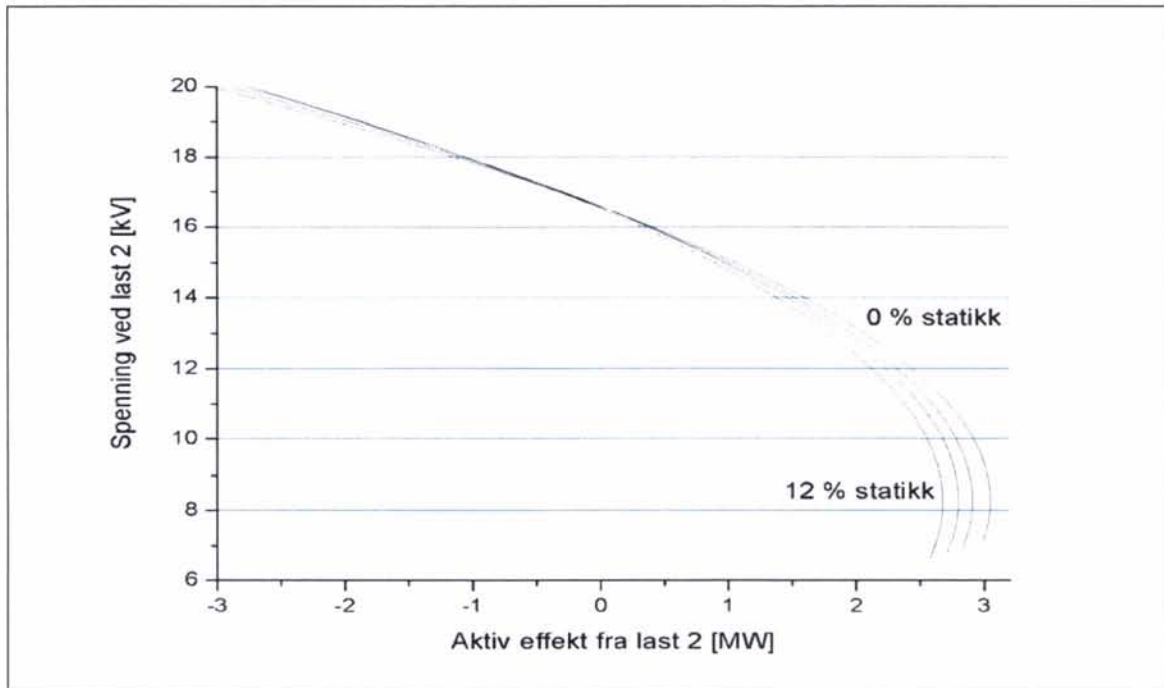
Figur 2-55 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon A ved økende aktiv belastning som for last 2 for aggregater på 2 x 5,8 MVA.



Figur 2-56 Strøm levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-57 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-58 Spenningen på kontaktledningen ved last (tog) nr 2 som funksjon av effekt til lastene av type 2 ved økende aktiv belastning.

## 2.2.6 Oppsummering etter undersøkelser med 80 km matestrekning og like omformerstasjoner

Etter å ha gjort undersøkelser med laster som trekker effekt under forskjellige forhold har en kommet frem til følgene som raskt oppsummeres her:

- I normal drift med alle aggregater inne og lasten rett utenfor stasjonen
  - Innstilling av statikk for spenningsregulatoren har en viss betydning ved aktiv belastning. Med 12 % fallende statikk kan lasten ta ut 1 - 2 MW mer effekt enn med flat statikk uten at stasjonen overbelastes.
  - Med last som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  er det mulig for lasten å trekke ca 1 MW mer med en fallende statikk på 12 %. Spenningen ved stasjonen blir lav.
- Ved utfall av ett aggregat og belastningen rett utenfor omformerstasjonen
  - Ved utfall av ett aggregat er spenningsregulatoren slik innstilt at statikken fordobles fra normal drift.
  - Med en fallende statikk på 24 % (12 % i normal drift) kan det tas ut 11 % mer effekt enn med 4 % (2 % i normal drift).
  - Ved å velge en stor fallende statikk oppnår en lav spenning ved omformerstasjonen når det trekkes stor effekt og lokomotivet vil automatisk kunne redusere effektopptaket eller lokomotivførerne kan gjøre det.
  - Selv med en fallende statikk på 12 % kan ikke belastningen på stasjonen tillates å være noe høyere enn 50 % før utfall av aggregat. Dette gjelder med last som trekker kun aktiv effekt. Spenningen ved stasjonen blir lav med så stor statikk.

- Dette tyder på at redundanskriteriet ikke kan økes fra dagens 50 - 60 % til høyere verdier. En bør muligens heller innskjerpe kravet og si at belastning over 50 % ikke tillates.
- Med en last som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  kan belastningen før utfall av aggregatet være mellom 50 og 57 %.
- I normal drift med laster (tog) ute på matestrekningen
  - Fallende statikk på 12 % istedenfor flat statikk gjør at høyeste effekt som kan trekkes reduseres med 2 MW om ikke spenningen skal bli for lav, -under 12 kV.
  - Større statikk enn 12 % bør ikke velges når det skal tas hensyn til at spenningen ikke skal bli for lav.
  - For belastninger ute på matestrekningen som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  har en funnet at statikken har en viss betydning for å begrense reaktiv effektproduksjon i omformerstasjonene.
  - Ved belastninger som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  og statikk på 12 % vil en få spenning på rundt 12,5 kV når belastningen er i det området som overbelastning vil kunne skje ved utfall av aggregat. Dette vurderes som en gunstig egenskap.
- For ensidig matet strekning
  - Om statikken er 0 eller 12 % får liten betydning når effekten som lasten trekker 60 km unna er rent aktiv.
  - For en last som har  $\cos \varphi = 0,7$  blir spenningen raskt for lav uansett valgt statikk, dette selv for en last som trekker svært liten aktiv effekt. Med en statikk på 4 eller 8 % reduseres risikoen for overbelastning. 12 % reduserer spenning og laveste effektopptak for mye.
- Ved utfall av ett aggregat og laster (tog) ute på matestrekningen slik at lavest spenning oppstår
  - Med fallende statikk på 12 % i normalsituasjon og 24 % ved utfall av ett aggregat vil spenningen ved ren aktiv belastning ikke bli for lav.
  - Det kan se ut til at med en statikk på 24 % ved utfall av ett aggregat er det en viss sannsynlighet for at en unngår overbelastning. Dette gjelder imidlertid når togene er ute på matestrekningen.
  - Med laster som har  $\cos \varphi = 0,7$  blir spenningen på kontaktledningen akseptabel selv for 24 % fallende statikk i stasjonen med ett gjenværende aggregat. Med en slik statikk oppnår en å få et stort spenningsfall ved økende pådrag, noe som gjør at lokomotivet automatisk vil redusere effektopptaket eller at lokomotivføreren vil gjøre det. Nesekurvens form blir med andre ord mer gunstig med denne store statikken.

Av disse undersøkelsene ser det ut til at en fallende statikk på 12 % for omformerstasjonene vil være det mest optimale. Dette forutsetter også at statikken øker til 24 % ved utfall av ett aggregat. For tilfelle med laster som trekker kun aktiv effekt (moderne lokomotiver<sup>3</sup>) oppstår det motstridende resultater ved at maksimal overført effekt øker med 12 % fallende statikk og

<sup>3</sup> Moderne lokomotiver trekker kapasitiv strøm ved lave spenninger. Jmf. CE119, som har  $\tan \varphi = 0,2$  når spenningen synker til under ca. 13 kV. Dermed blir spenningen til toget faktisk høyere igjen, og den nevnte begrensningen er kanskje ikke til stede. Imidlertid er dette ikke inkludert i modellen her.

lasten rett ved omformerstasjonene, mens reduseres med last ute på matestrekningen. For tilfeller der det trekkes både aktiv- og reaktiv effekt (E116 lokomotiver) ser det ut som om 12 % fallende statikk vil være fordelaktig i alle situasjoner.

For ytterligere undersøkelser er det først og fremst undersøkelse av spenningen i normal driftsituasjon og tog ute på matestrekningen som må gjøres for tilfelle med forskjellig størrelse på omformerstasjonene og kortere avstand mellom dem enn 80 km.

## **2.3 Stor omformerstasjon med normalt store nabostasjoner og 80 km lang matestrekning**

I dette avsnittet skal det gjøres undersøkelser med omformerstasjoner med 2 x 7,0 MVA aggregater og 80 km mellom nabostasjoner med 2 x 5,8 MVA. Dette er nokså typisk situasjon i banestrømforsyningen, Dombås, Tangen, Lundamo, Nordagutu, Haugastøl og Mjølfjell har slike aggregater eller større. Selv om forholdene for flere av disse ikke er helt typiske, som for eksempel fjernledningen med tilknytning til Nordagutu. Ikke alle undersøkelsene som ble gjort i avsnitt 2.2 er nødvendig å gjøre her. En vil anta at 12 % statikk er passende også for stasjoner med 2 x 7,0 MVA, en vil kun kontrollere at det er i orden. Følgende anses som relevante undersøkelser:

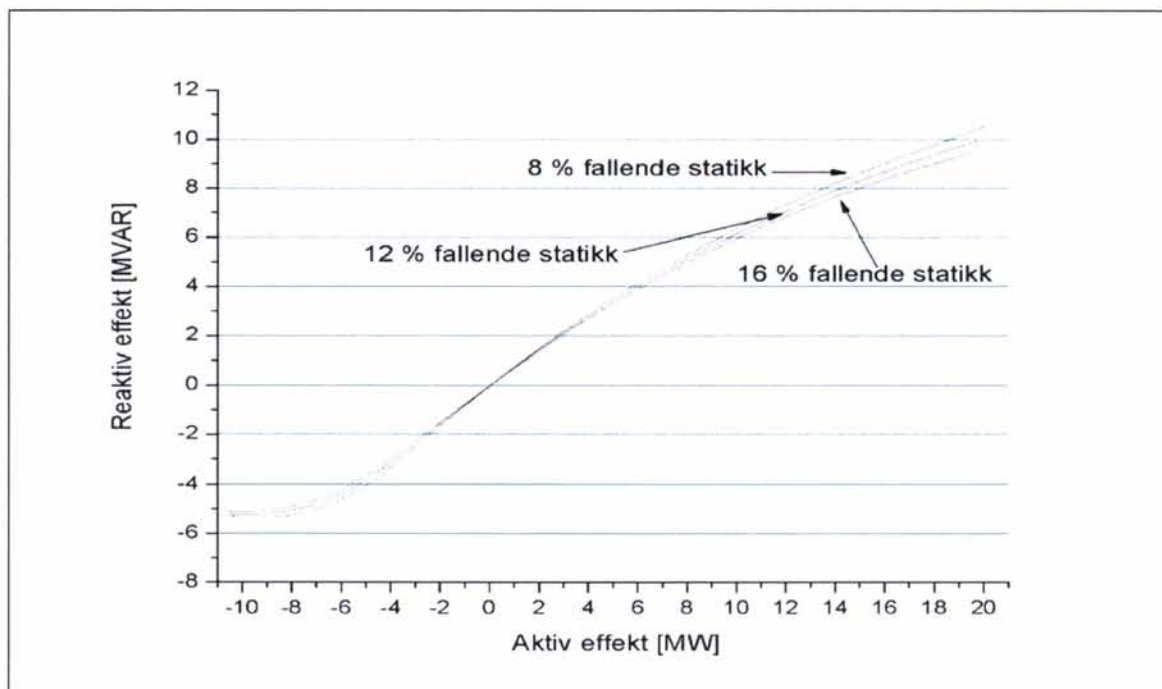
- Normal driftsituasjon og lasten rett ved omformerstasjonen.
- Unormal driftsituasjon med utfall av ett aggregat i en stasjon og lasten rett utenfor.

Spenningen ute på linjen må antas å bli bedre ute på matestrekning med en stor stasjon i den ene enden og derfor undersøkes ikke disse forholdene.

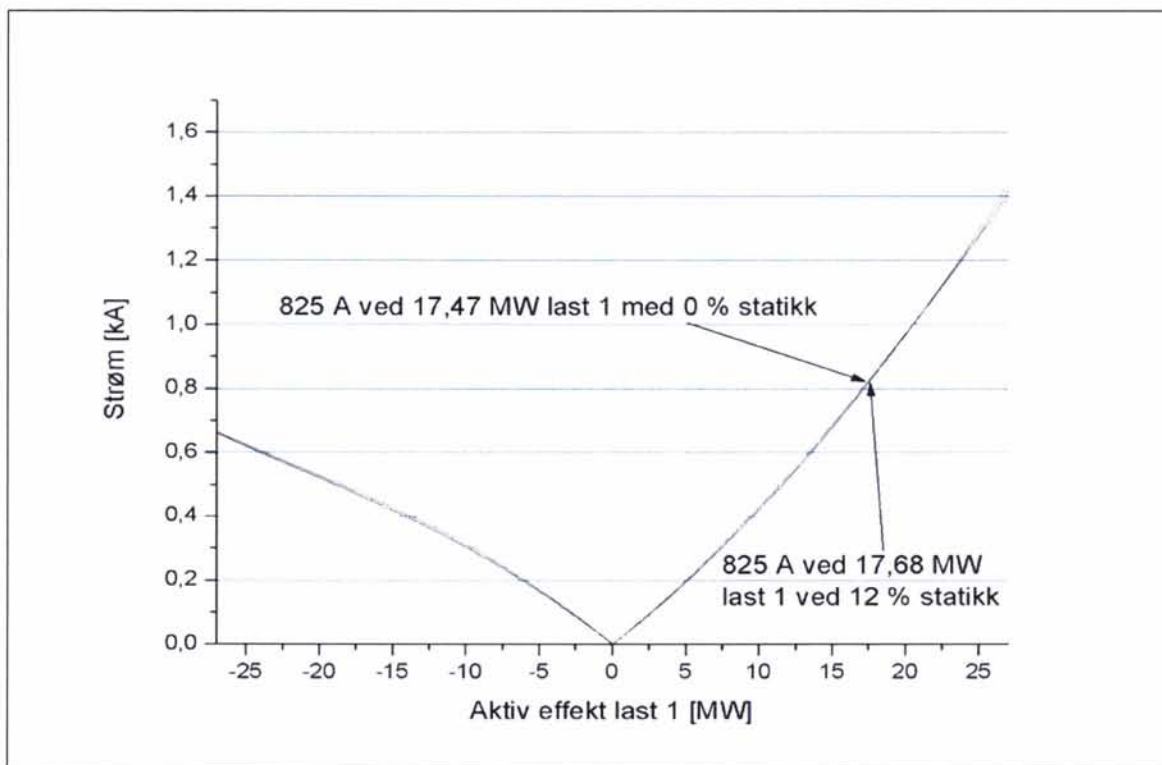
### **2.3.1 Undersøkelse av normal driftsituasjon med lasten rett ved omformerstasjonen**

#### **2.3.1.1 Last 1 - aktiv belastning**

I Figur 2-59 ser en hvordan forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt levert fra stasjon B blir når denne har samme statikk for spenningen som naboene og når statikken er 4 % mer eller mindre. Som en ser er dette av en viss betydning. Videre ser en av Figur 2-60 og Figur 2-61 at for henholdsvis 2-sekunders verdi av strømmen og for 6-minutters verdi av effekten vil 16 % statikk gi noe større mulighet for belastning av stasjonen. Endringen er liten, men Figur 2-62 viser at for spenningen ved stasjonen får det en del betydning. Når det gjelder tapene ser en også her at når lasten er rett ved stasjoner er disse størst når statikken er stor, se Figur 2-63.

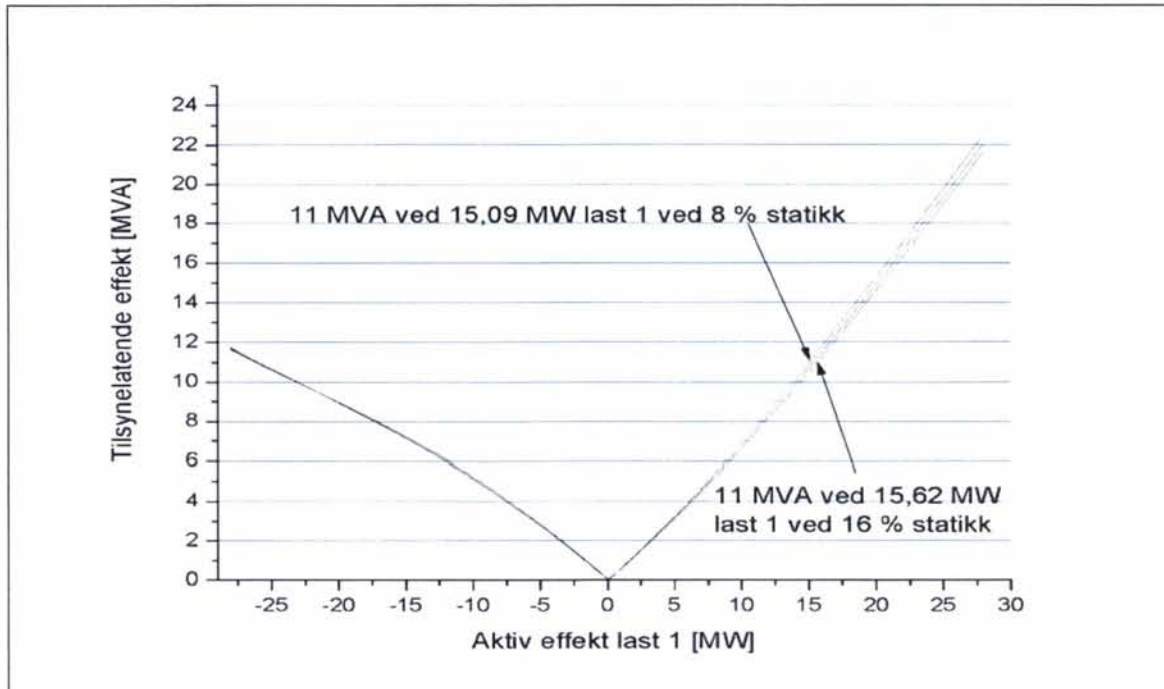


Figur 2-59 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 1. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.

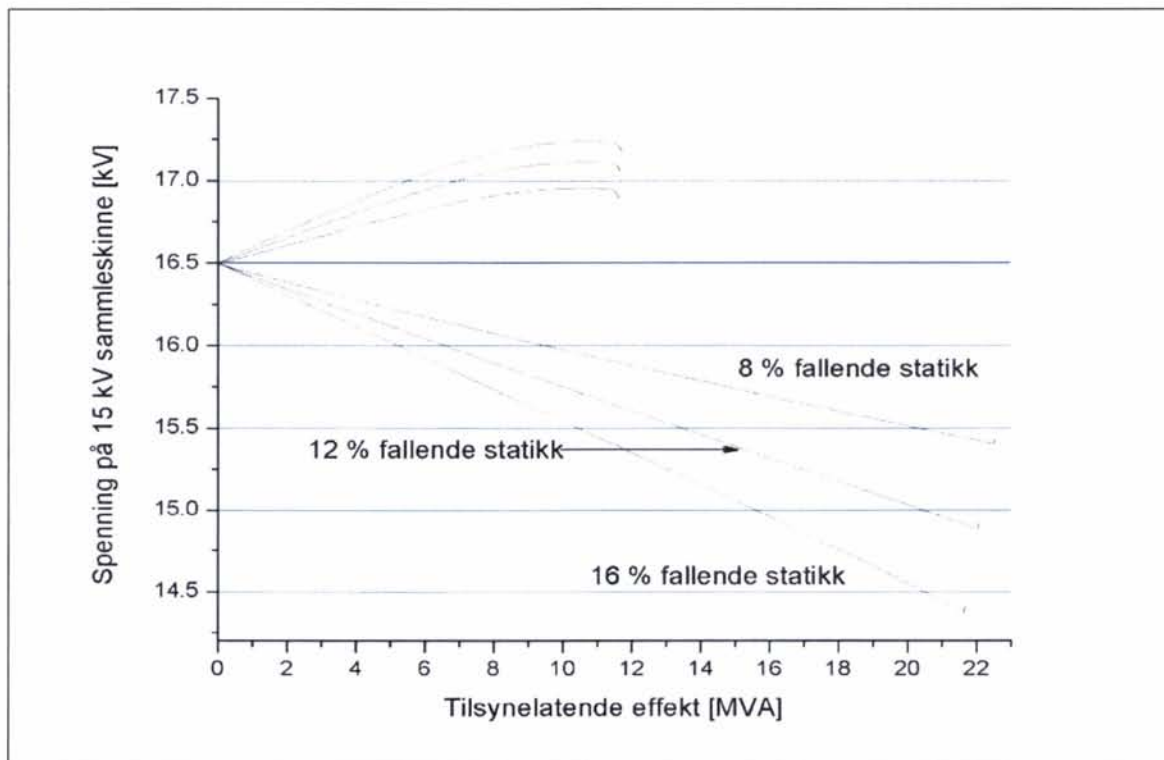


Figur 2-60 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til lastene av type 1 ved økende aktiv belastning. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.

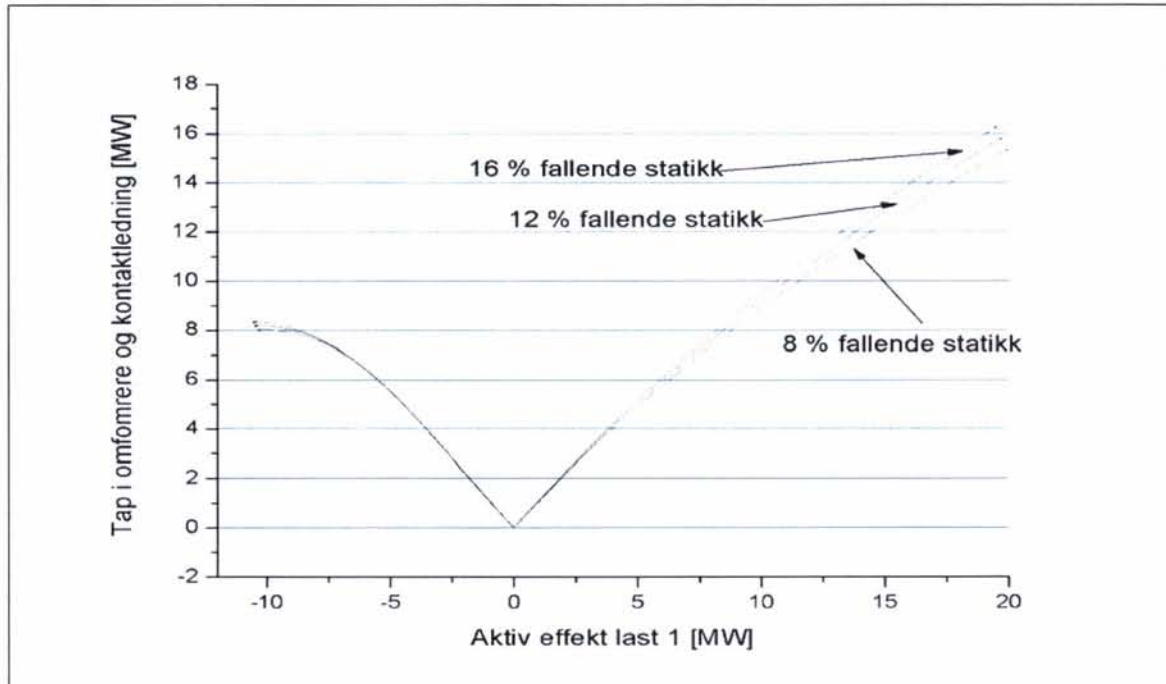




Figur 2-61 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til lastene av type 1 ved økende aktiv belastning. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.



Figur 2-62 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.

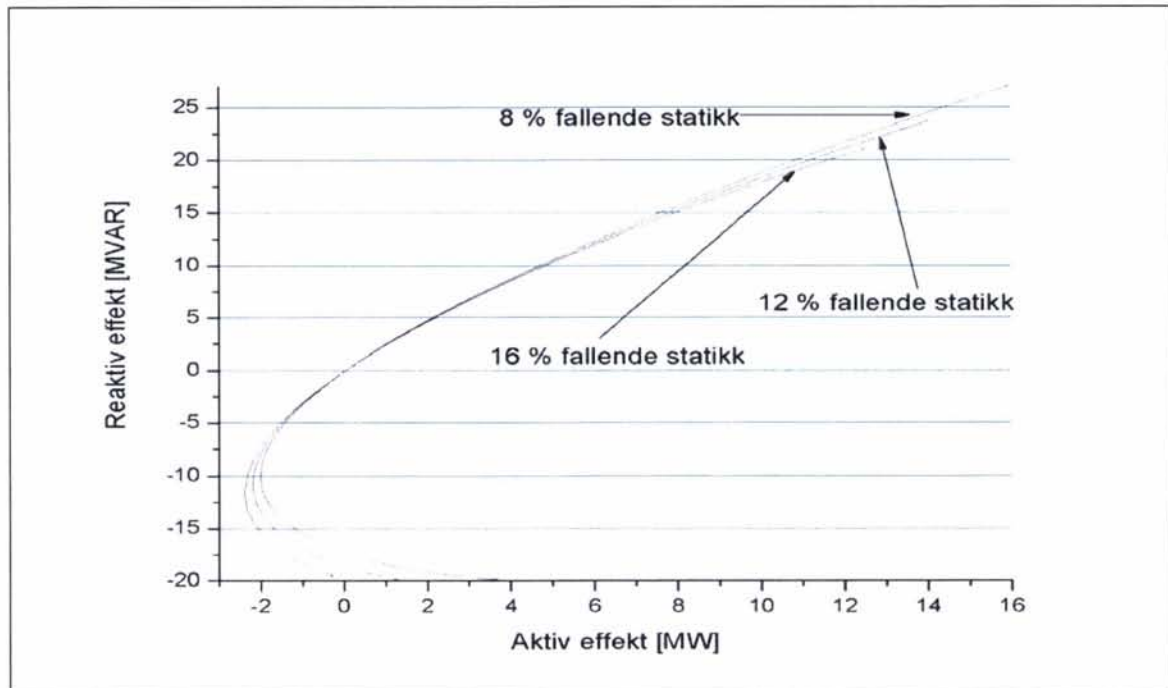


Figur 2-63 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til last 1. Tomgangstapene er ikke inkludert.

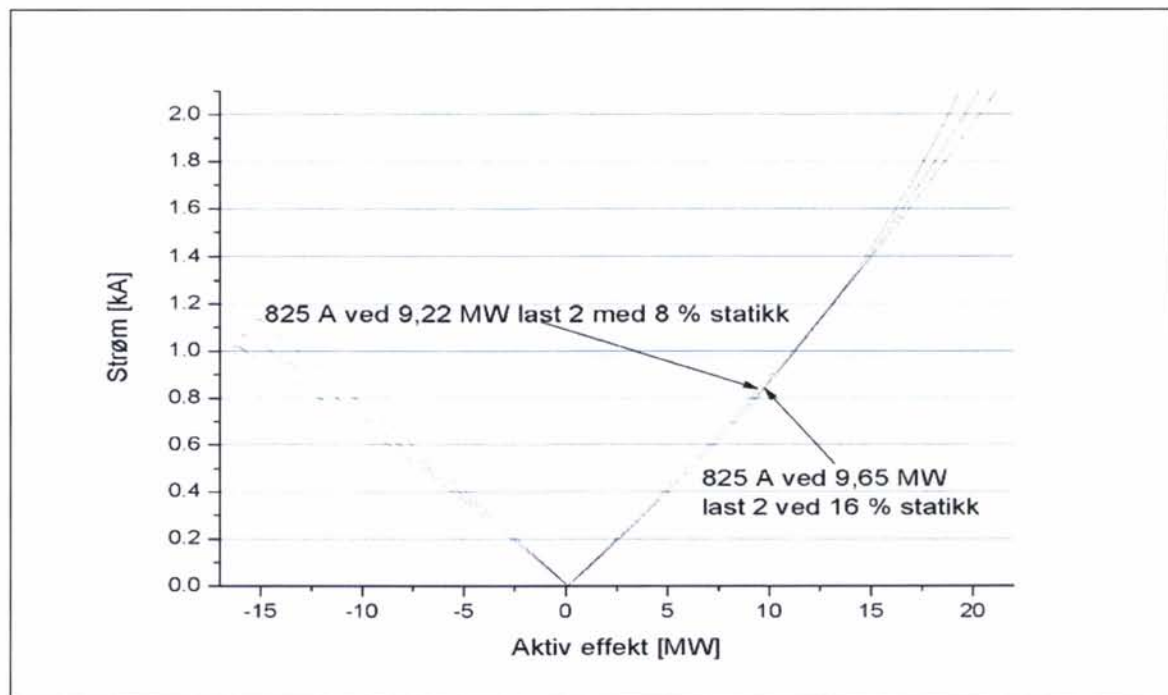
### 2.3.1.2 Last 2 - aktiv og reaktiv belastning

Med en last ved omformerstasjonen som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  er det en viss mulighet for å endre forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt med valg av statikk, se Figur 2-64. Når lasten trekker effekt slik at stasjonen belastes 50 % av nominell ytelse for 2-sekunders strøm ser en at en liten økning av levert aktiv effekt til lasten kan gjøres med en statikk på 16 %, se Figur 2-65. Det samme ser en i Figur 2-66 at en liten økning av levert aktiv effekt er mulig for 6-minuttersverdi av effekt. Figur 2-67 viser at når det gjelder spenningen på 15 kV samleskinne vil valg av statikk får en del mer å si. Ved stort effektopptak blir spenningen lav, men for de effekter som det er rimelig å belaste omformereren med (opptil omtrent 11 MVA med 50 % redundans) ser en at spenningen er tilfredsstillende. Det vil her si over 14 kV. Figur 2-68 viser tapene som endrer seg en hel del avhengig av statikken som velges.

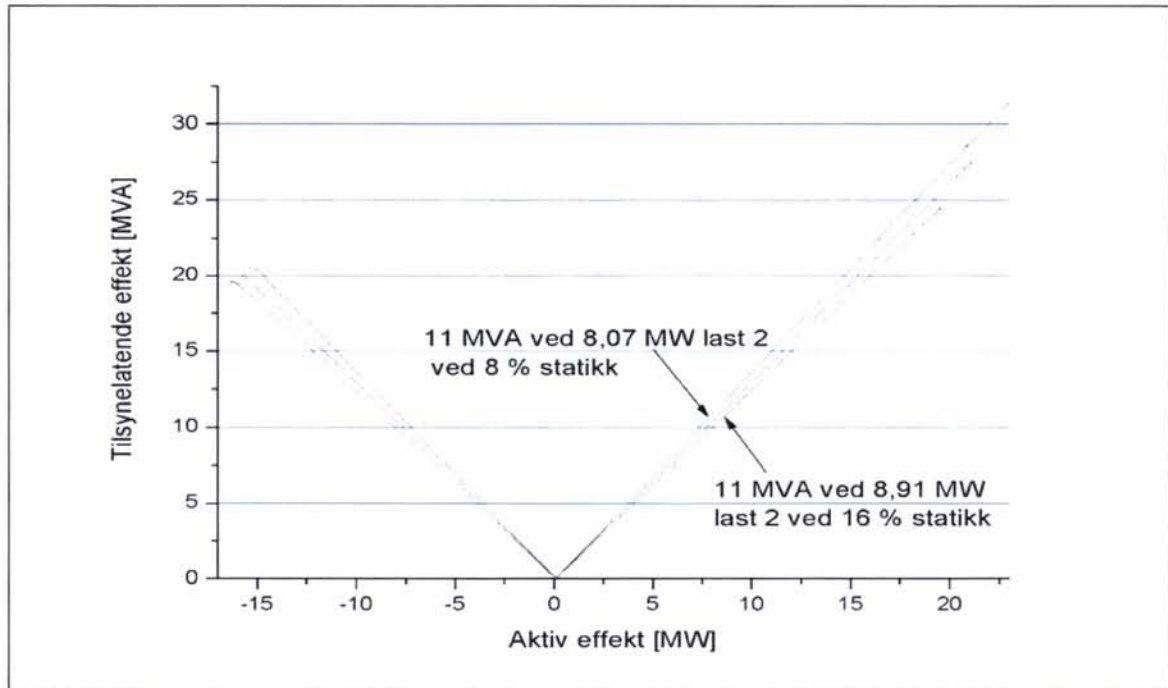
Valg av statikk vil ikke få særlig stor betydning og det ser ikke ut til å være noen grunn til å velge annen statikk for stasjoner med 2 x 7,0 MVA aggregater enn for de med 2 x 5,8 MVA.



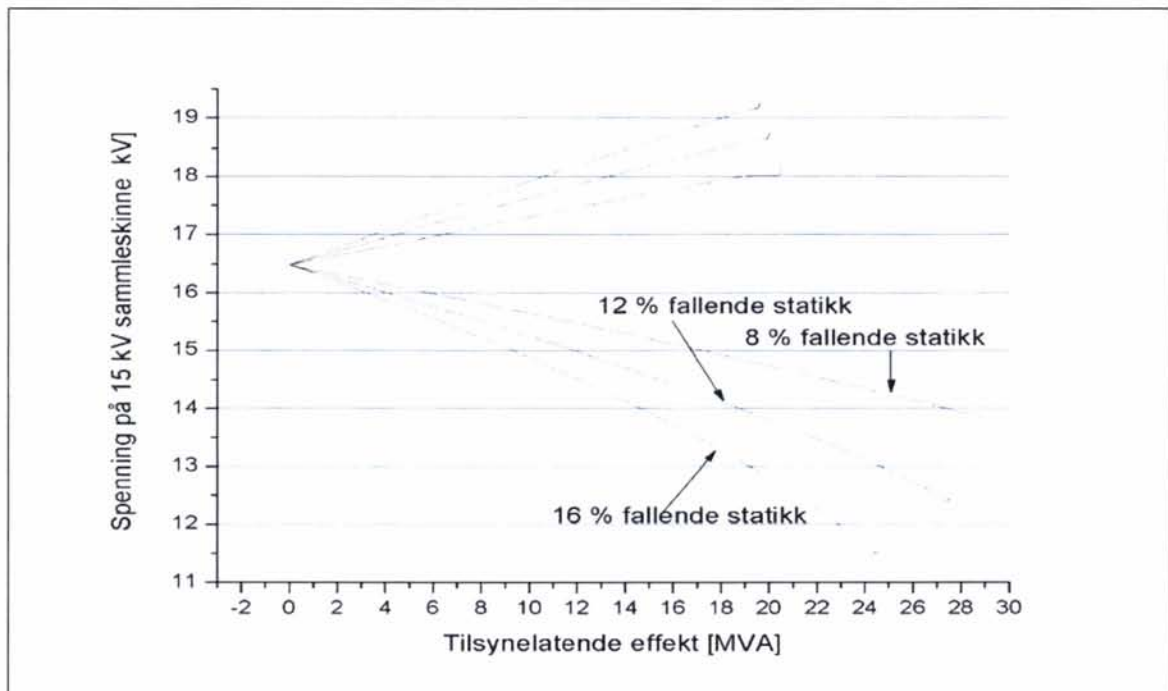
Figur 2-64 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 2. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.



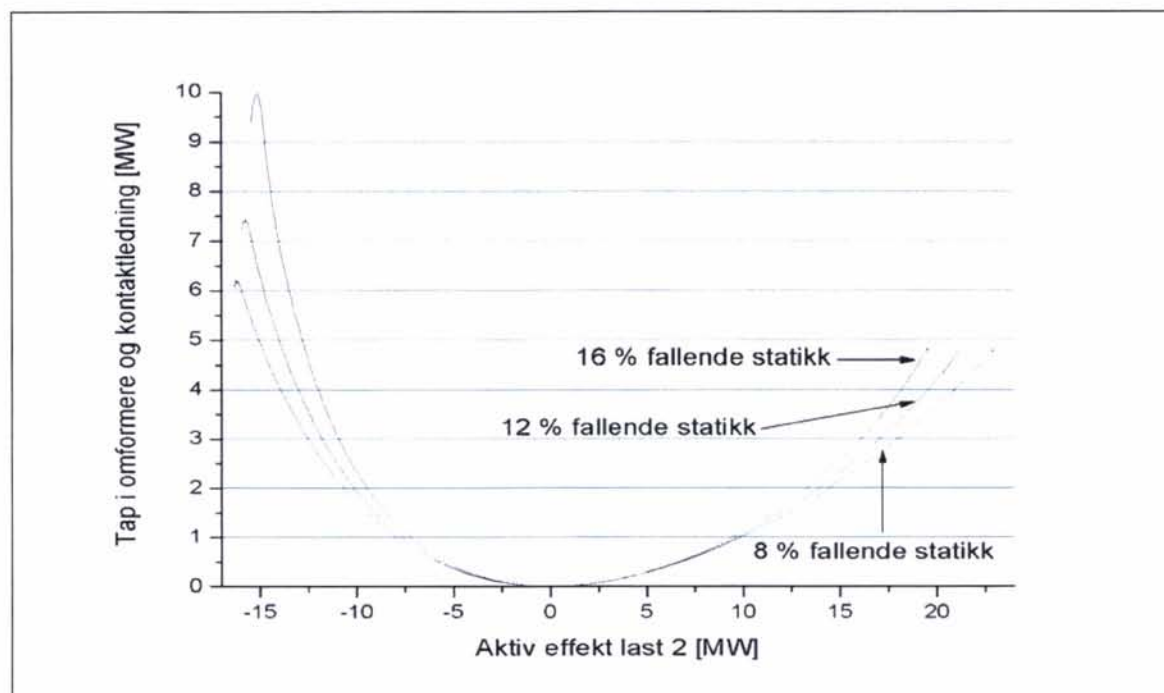
Figur 2-65 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.



Figur 2-66 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.



Figur 2-67 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.



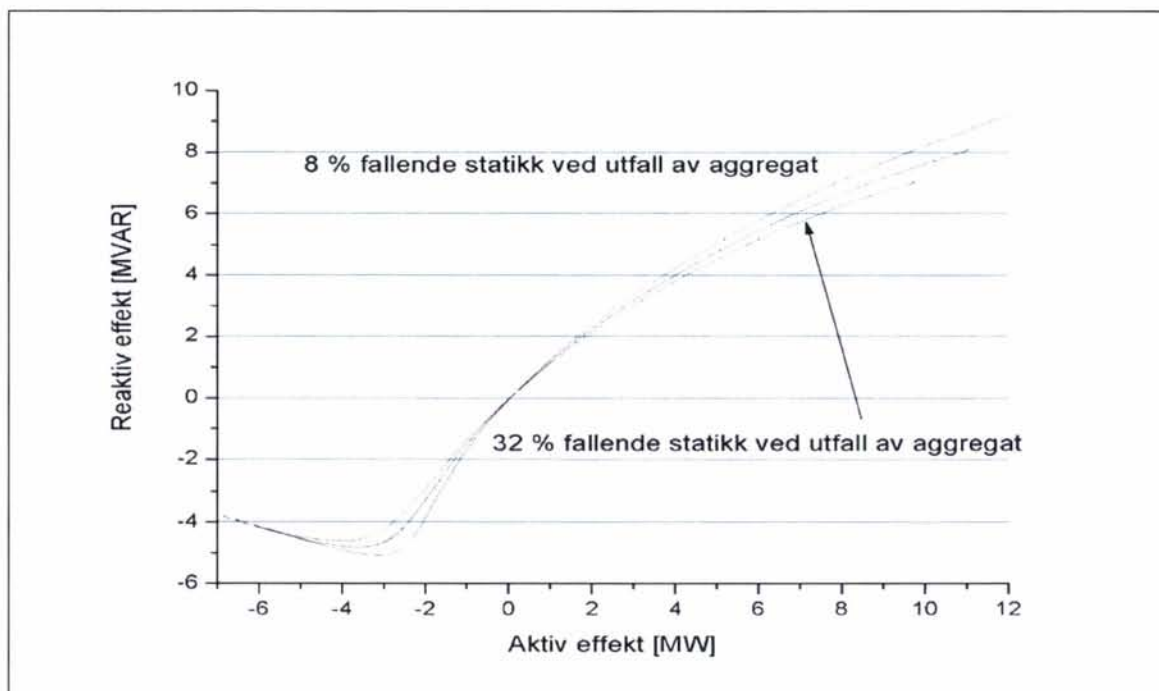
Figur 2-68 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til last 2. Tomgangstapene er ikke inkludert.

### 2.3.2 Undersøkelse av utfall av aggregat med lasten rett ved omformerstasjonen

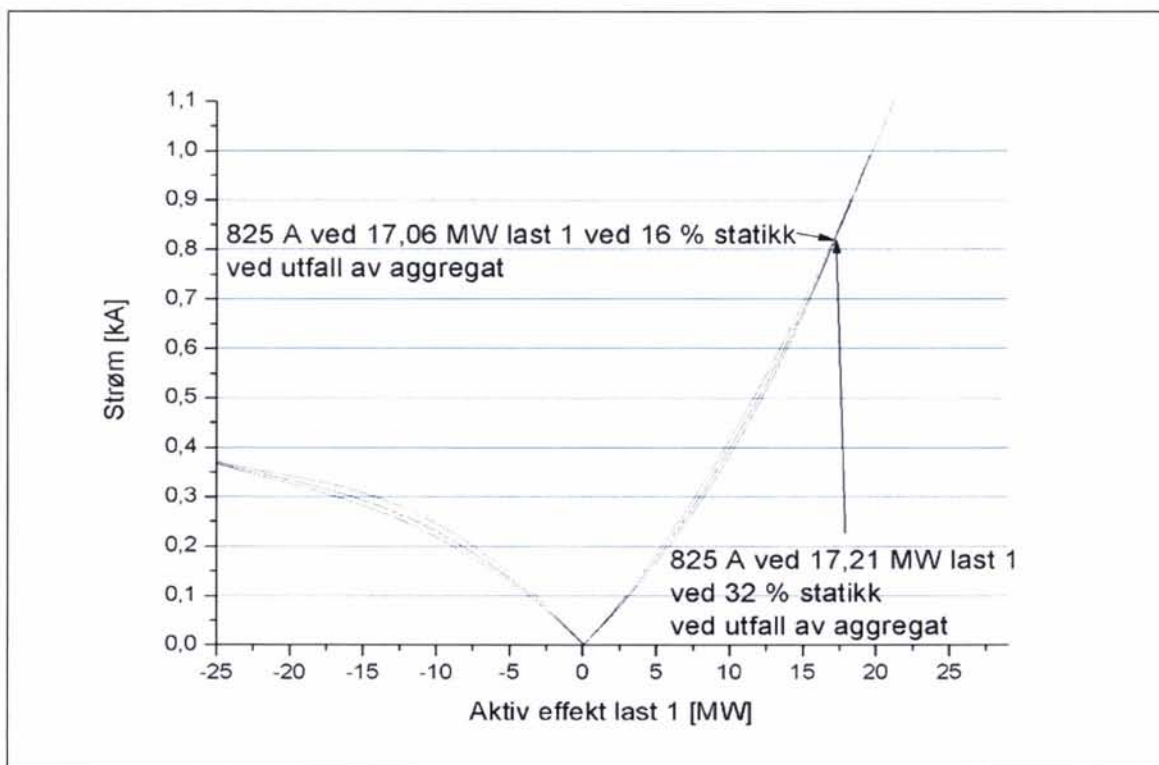
#### 2.3.2.1 Last 1 - aktiv belastning

Figur 2-69 viser at ved utfall av ett av aggregatene i stasjon B vil statikken, når den fordobles i denne stasjonen, påvirke den reaktive effektproduksjonen noe. Også her er det forsøkt med en statikk 4 % -poeng over og under den mest opplagte verdien på 12 %. Ved utfall av ett aggregat får man en fordobling i statikken i stasjon B. For strømmen sin del skjer en minimal endring av hvor mye lasten utenfor stasjonen kan trekke når statikken endres, vist i Figur 2-70. Derimot for effekten er endringen større, se Figur 2-71. Spenningen som oppstår ved samleskinnen er vist i Figur 2-72 og med så mye som 32 % spenningsfall blir spenningen lav ved stor effekt.

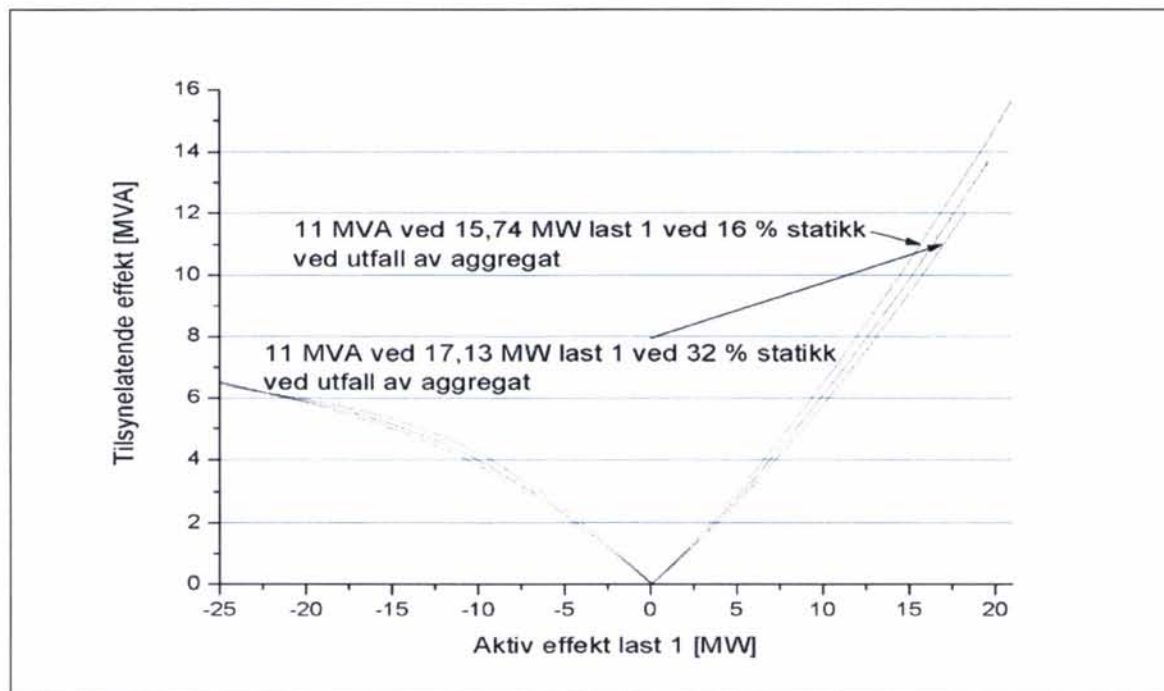
Ved å velge en stor fallende statikk får man igjen fordelene med stor forskjell på spenningen rett ved omformerstasjonen ved normale og unormale forhold. Se avsnitt 2.2.2 der dette er undersøkt.



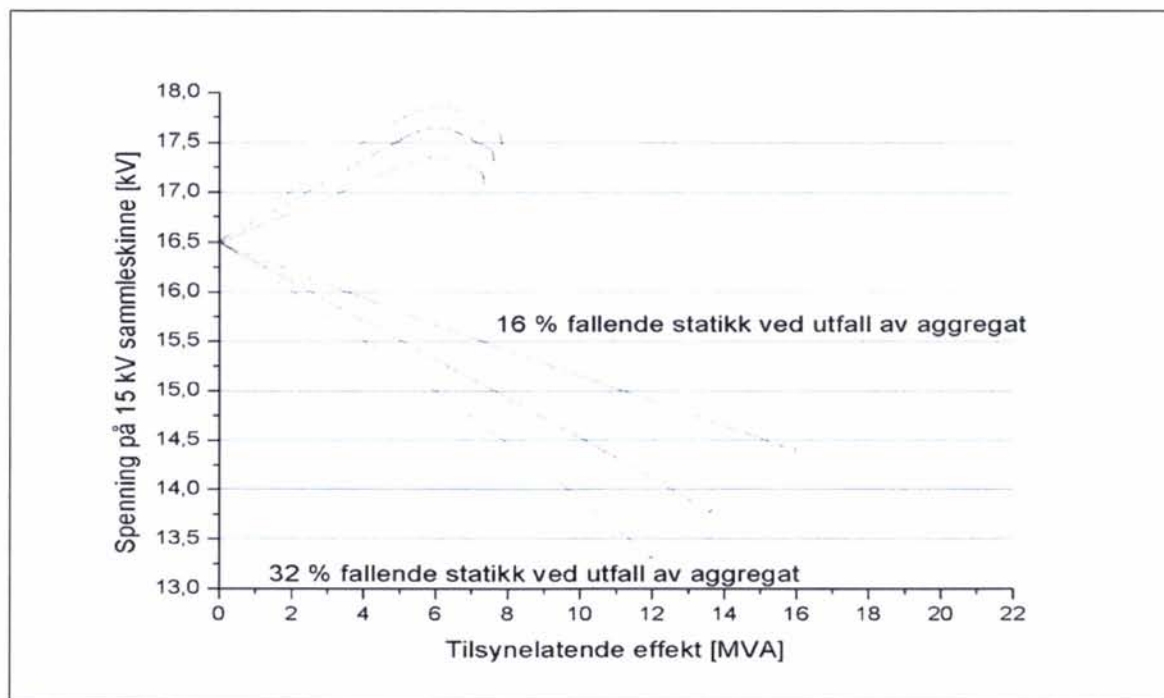
Figur 2-69 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 1. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.



Figur 2-70 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.



Figur 2-71 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til laste 1 ved økende aktiv belastning. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.

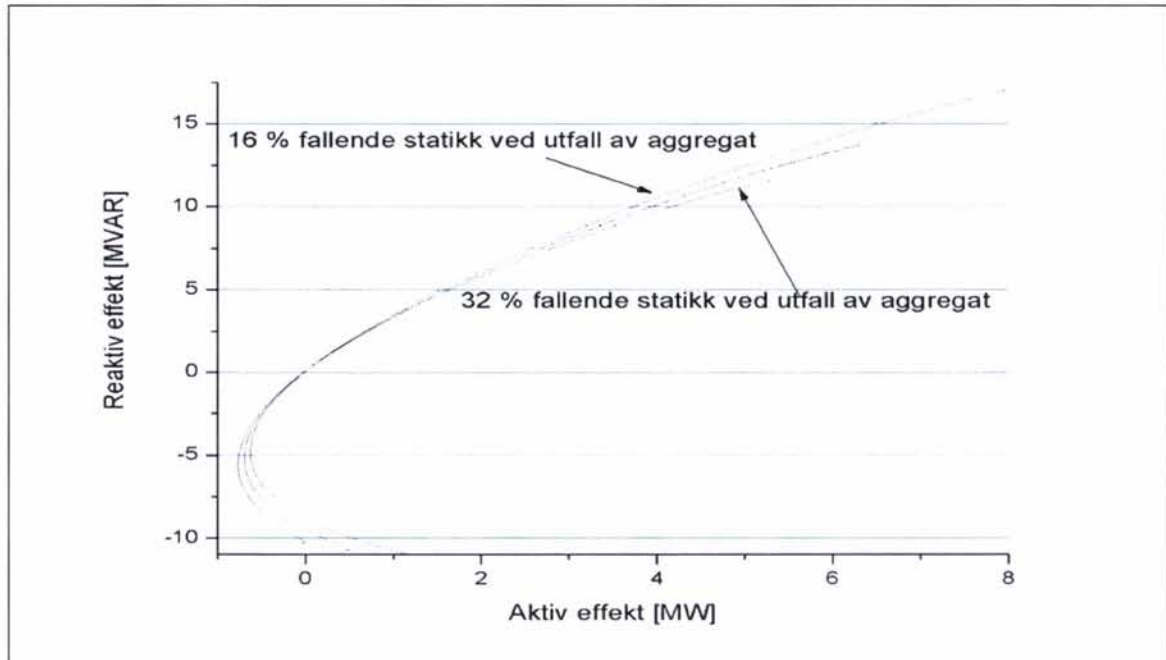


Figur 2-72 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.

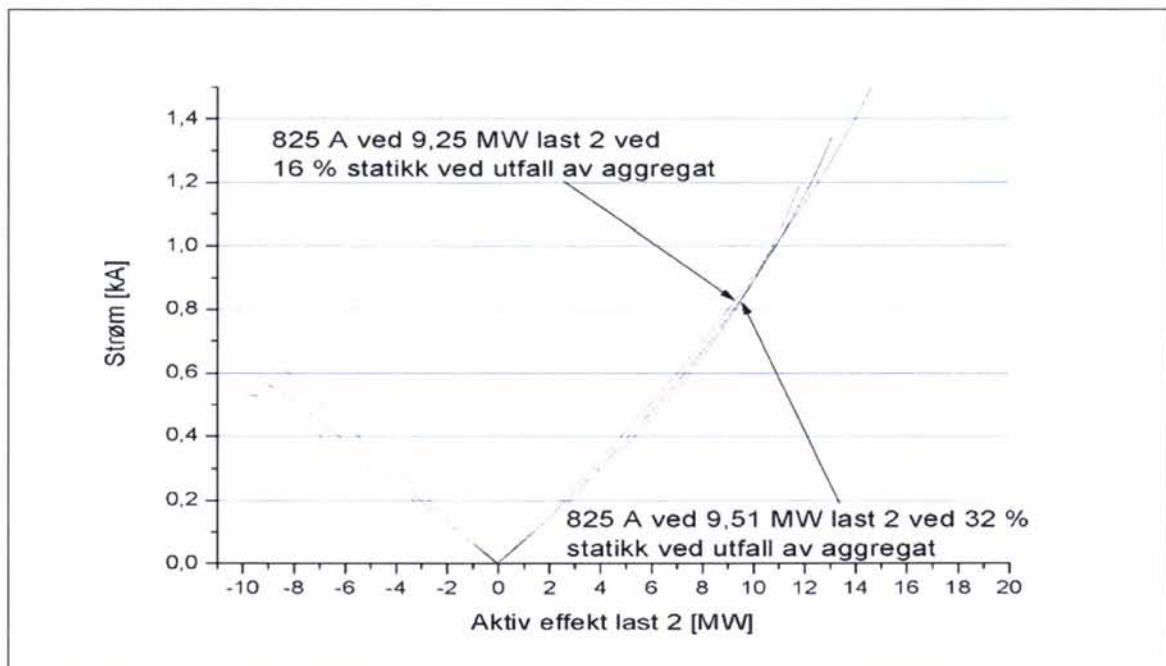
### 2.3.2.2 Last 2 - aktiv og reaktiv belastning

Når lasten som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  settes utenfor stasjonen og ett aggregat har falt ut ser en at valg av statikk påvirker reaktiv effektproduksjon noe mer enn under normale

forhold, se Figur 2-73. En ser også at lasten sin mulighet til å trekke aktiv effekt økes mye med stor fallende statikk når omformerstasjonen ikke skal belastes mer enn 50 % av nominell ytelse for 6-minutters verdi av strøm og effekt, se Figur 2-75. For 2-sekunders verdi ser denne muligheten ut til å være mye mindre som Figur 2-74 viser. Dette har imidlertid sin pris ved at spenningen blir noe lav om statikken velges til 16 % (og altså 32 % ved utfall), se Figur 2-76.

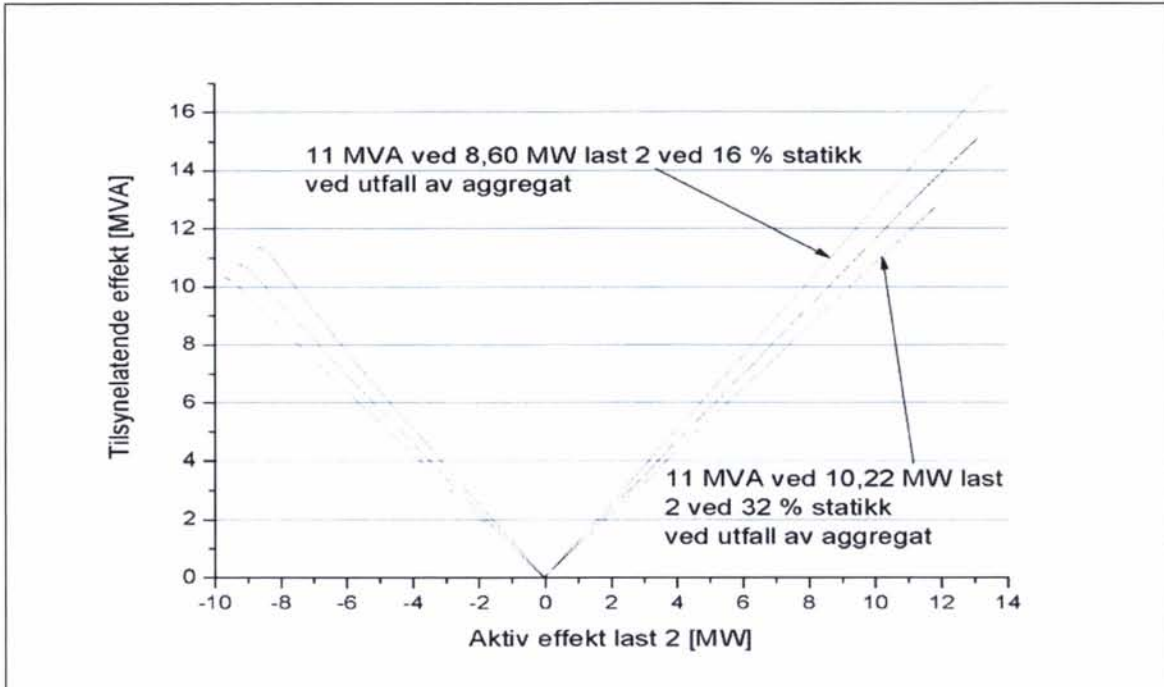


Figur 2-73 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 2. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.

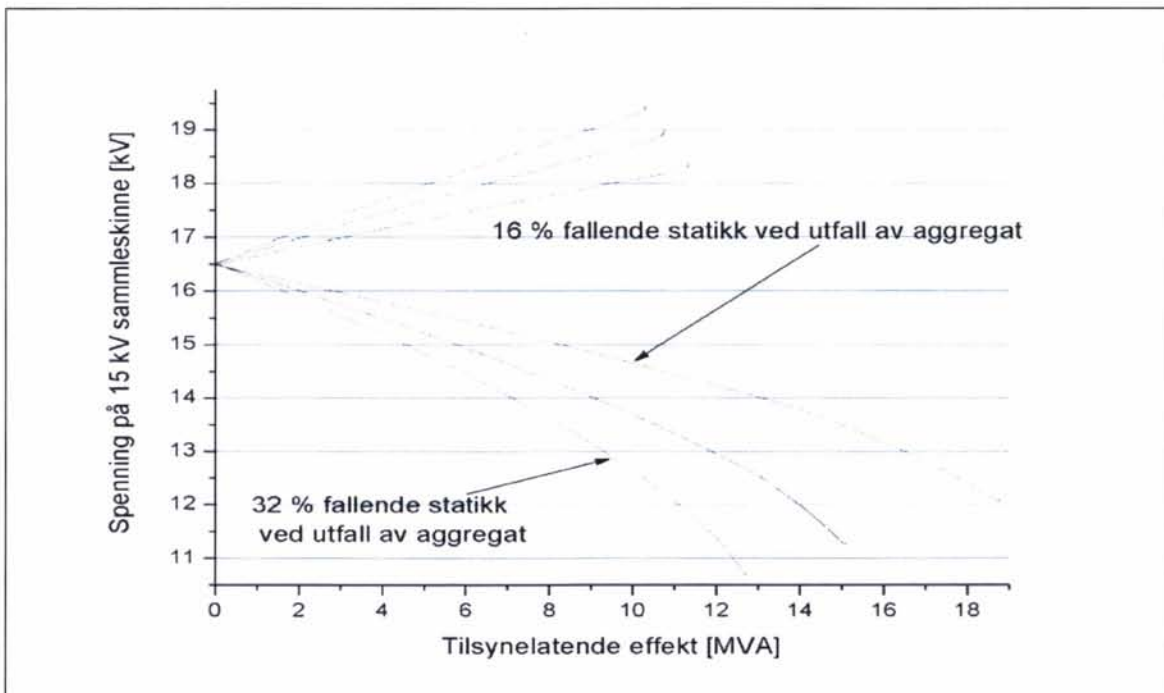


Figur 2-74 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.





Figur 2-75 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.



Figur 2-76 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning. Omformerstasjon B med 2 x 7,0 MVA og de øvrige med 2 x 5,8 MVA.

## 2.4 Oppsummering etter undersøkelser med stor omformerstasjon med normalt store nabostasjoner og 80 km lang matestrekning

Etter å ha gjort undersøkelser med laster på en 80 km lang matestrekning og en stor omformerstasjon har en kommet frem til følgene som raskt oppsummeres her:

- Undersøkelsene gjøres med 12 % statikk som utgangspunkt (samme som en fant som passende for normalt store omformerstasjoner) og det forsøkes å endre denne 4 % opp eller ned.
- I normal drift med alle aggregater inne og lasten rett utenfor stasjonen
  - Med ren aktiv belastning her en sett at endringer over eller under 12 % får en viss betydning. Det blir produsert noe mindre reaktiv effekt om det velges større statikk. For spenningen sin del er endringen liten selv med meget stor effektproduksjon.
  - Med last som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  er det også en viss forskjell med større eller mindre statikk en 12 %.
  - Det ser ikke ut til å være noen grunn til å velge annen statikk for de store stasjonene enn for de små. 12 % for både stasjoner med 2 x 5,8 og 2 x 7 MVA gir lik prosentvis fordeling av reaktiv effekt.
- Ved utfall av ett aggregat og belastningen rett utenfor omformerstasjonen
  - Med ren aktiv belastning oppstår tilfredsstillende spenning ved 12 % statikk under normal drift og 24 % ved utfall. Noen stor forskjell mellom spenningen ved normale forhold og utfall fåes ikke.
  - Med last som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  oppnås også tilfredsstillende spenning med denne statikken.

## 2.5 Like omformerstasjoner og 40 km lang matestrekning

Mellom Kristiansand og Stavanger er det omtrent 40 km mellom omformerstasjonene, og hver av dem er på 2 x 5,8 MVA (bortsett fra Kjelland som har statiske aggregater). Mellom Bergen og Dale, samt mellom Lundamo og Stavne er det også ganske kort avstand. De samme to testene som ovenfor ansees som relevante å undersøke:

- Normal driftsituasjon og lasten rett ved omformerstasjonen.
- Unormal driftsituasjon med utfall av ett aggregat i en stasjon og lasten rett utenfor.

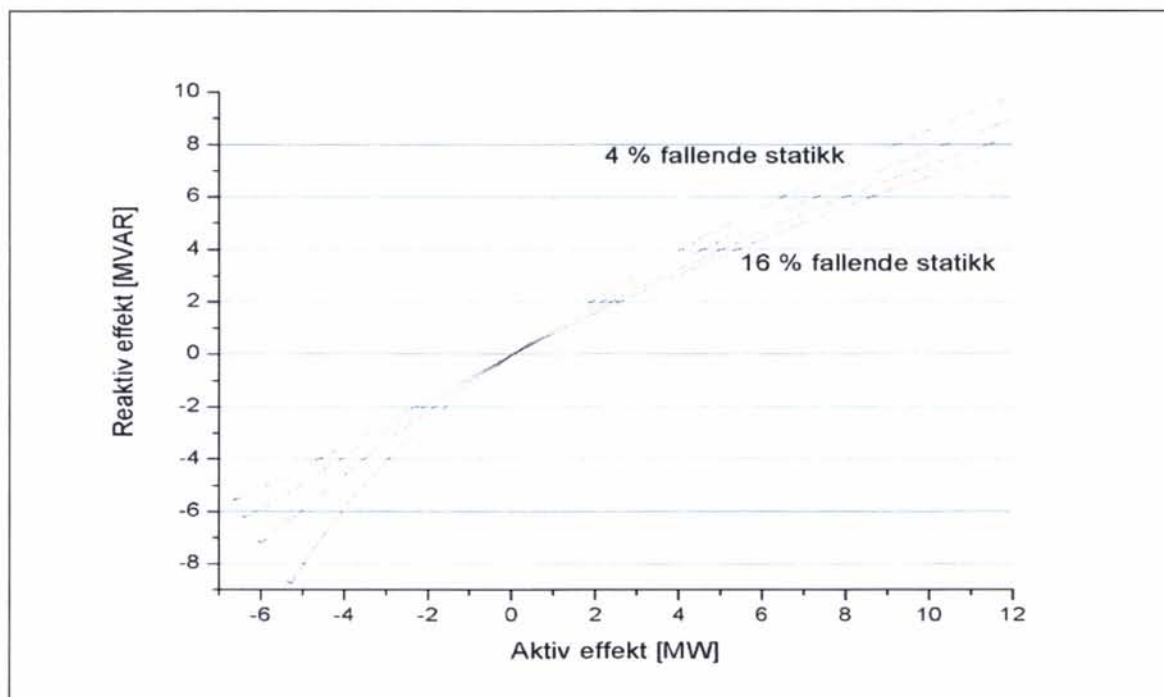
Også her må det antas at spenningen ute på linjen blir atskillig bedre enn den vanligvis vil være med 80 km mellom omformerstasjonene. Som tidligere beskrevet antas det at 12 % statikk er passende for omformerstasjonene, vil en her undersøke om det er noen grunn til å endre dette for stasjoner med kort avstand mellom. Modellen i undersøkelsen består av fem omformerstasjoner med 2 x 5,8 MVA aggregater med 40 km mellom. Testene utføres rett utenfor stasjon B, se Figur 2-11.

## 2.5.1 Undersøkelse av normal driftsituasjon med lasten rett ved omformerstasjonen

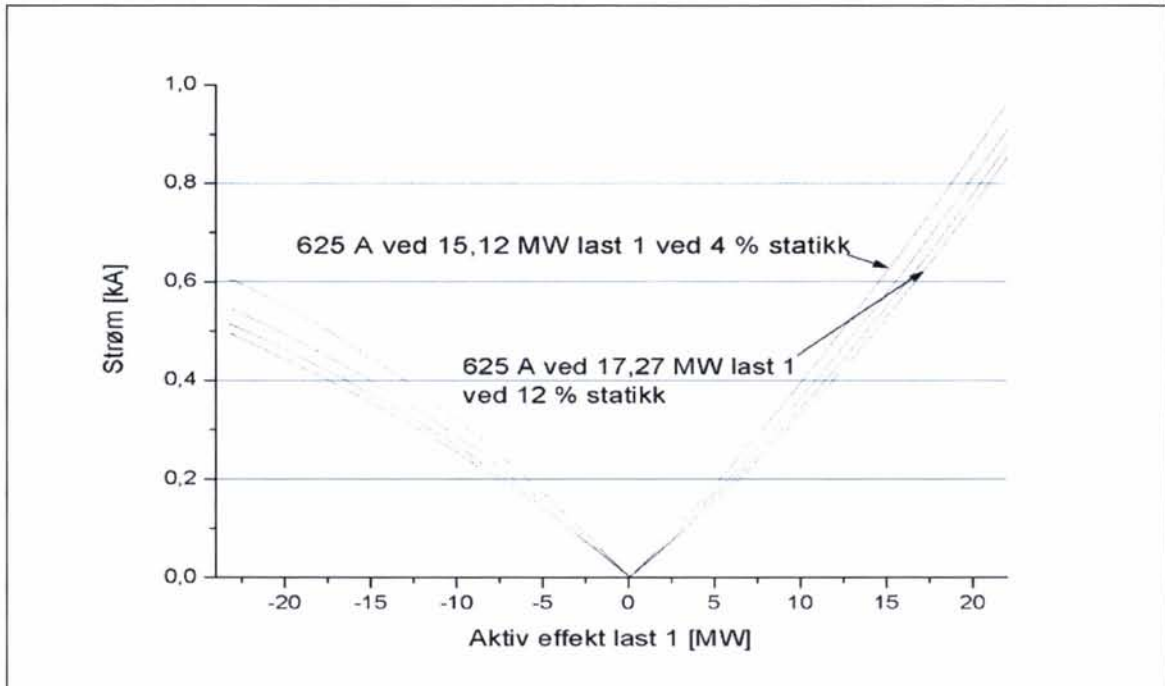
### 2.5.1.1 Last 1 - aktiv belastning

Nedenfor viser Figur 2-77 hvorledes forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt endres når en endrer statikken i trinn fra 4 til 16 % når lasten endres over et stort område. Det ser ut som at det nå faktisk er mer reaktiv effekt som leveres fra stasjon B enn i tilfellet med 80 km mellom stasjonene, se Figur 2-12. Dette betyr altså noe større overføring av reaktiv effekt med 40 km mellom stasjonene enn med 80 km. Videre viser Figur 2-78 og Figur 2-79 at 2-sekunders og 6-minutters verdier kan påvirkes en hel del for ved hvilken last som kan trekkes før 50 % belastning oppstår. Sammenlignes dette med resultatene i avsnitt 2.2.1.1 ser en også at mer av effekten nå overføres til nabostasjonene. Med 40 km mellom omformerstasjonene deles den aktive effekten bedre mellom stasjonene, men det utveksles også noe mer reaktiv effekt.

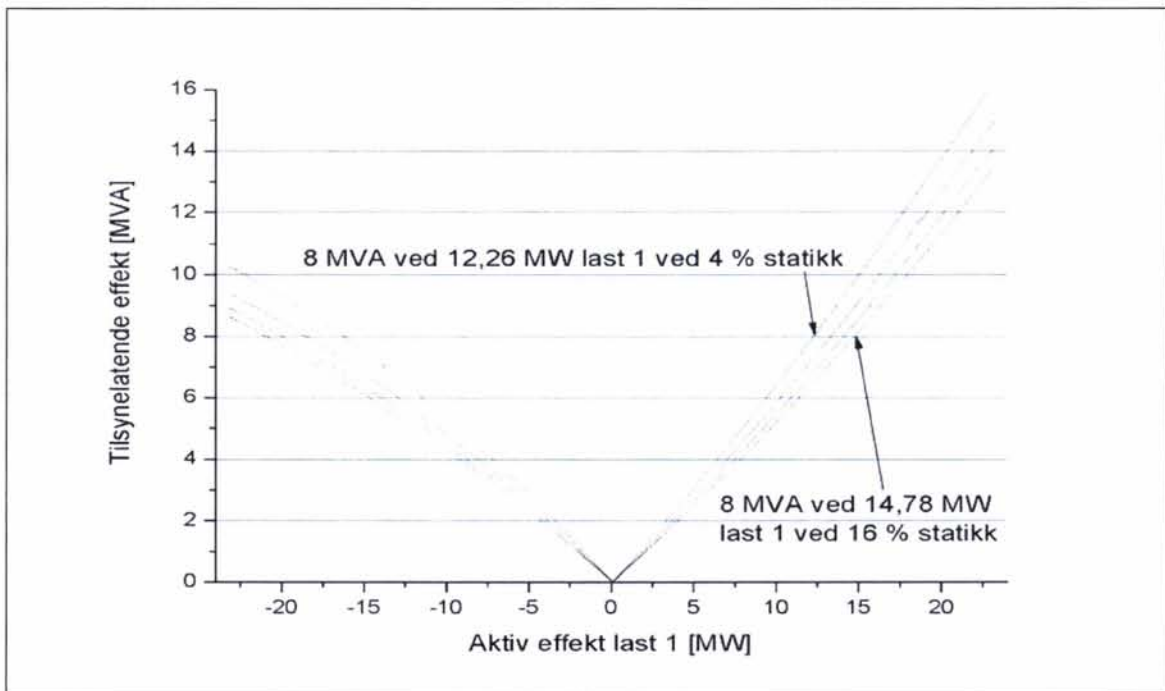
Av Figur 2-80 ser en at spenningen faller omentrent like mye som da det var 80 km mellom omformerstasjonene, se Figur 2-15. For eksempel ser en at med 12 % statikk og en belastning av omformerstasjon B på 12 MVA ble spenningen ca 15,4 kV, mens nå ser det ut til at den samme belastningen gir ca 15,3 kV. Tapene er vist i Figur 2-81 og det kan se ut som om de er større nå for samme belastning og statikk enn med 80 km mellom stasjonene.



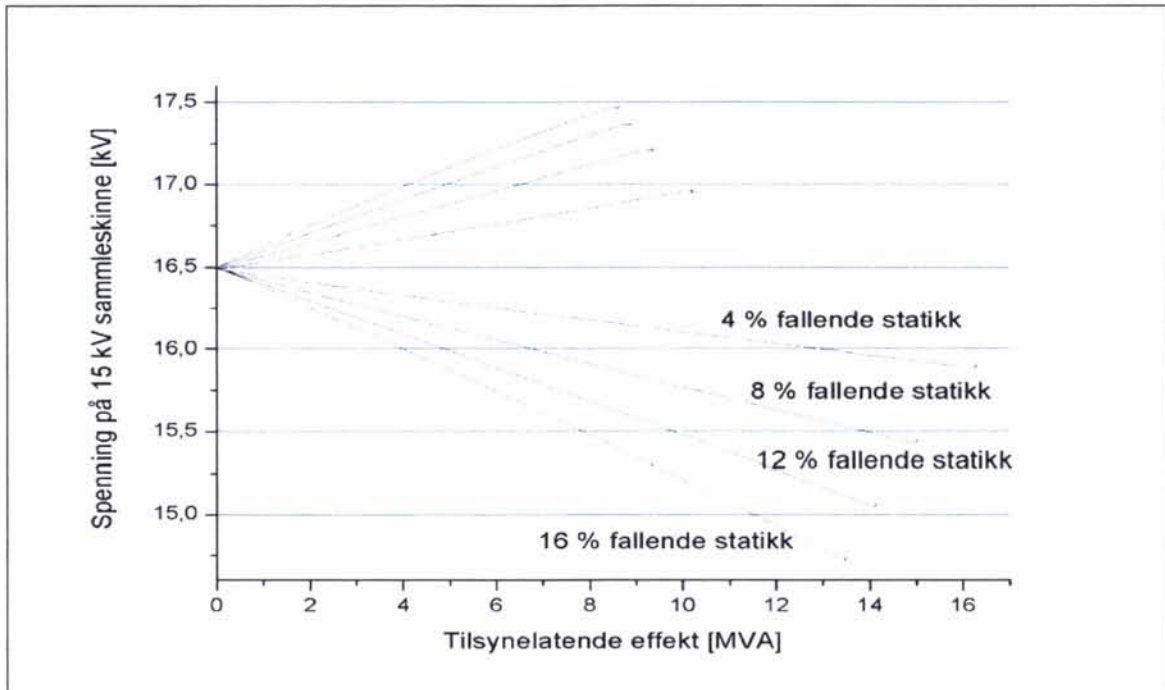
Figur 2-77 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 1 for aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



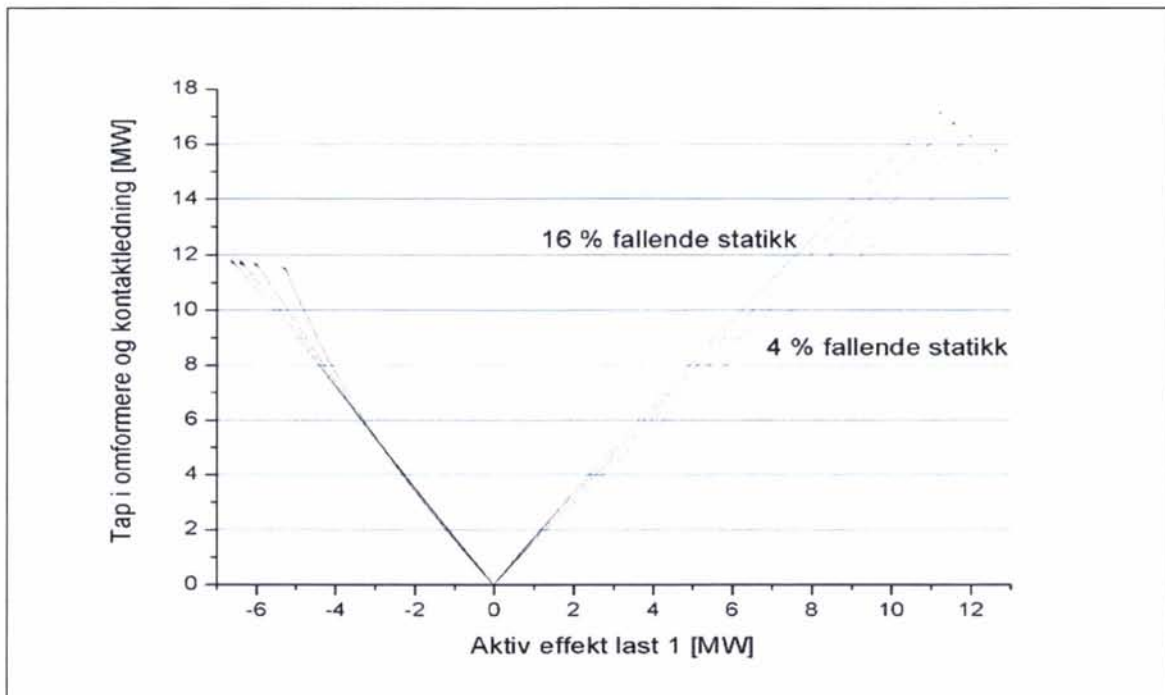
Figur 2-78 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-79 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-80 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

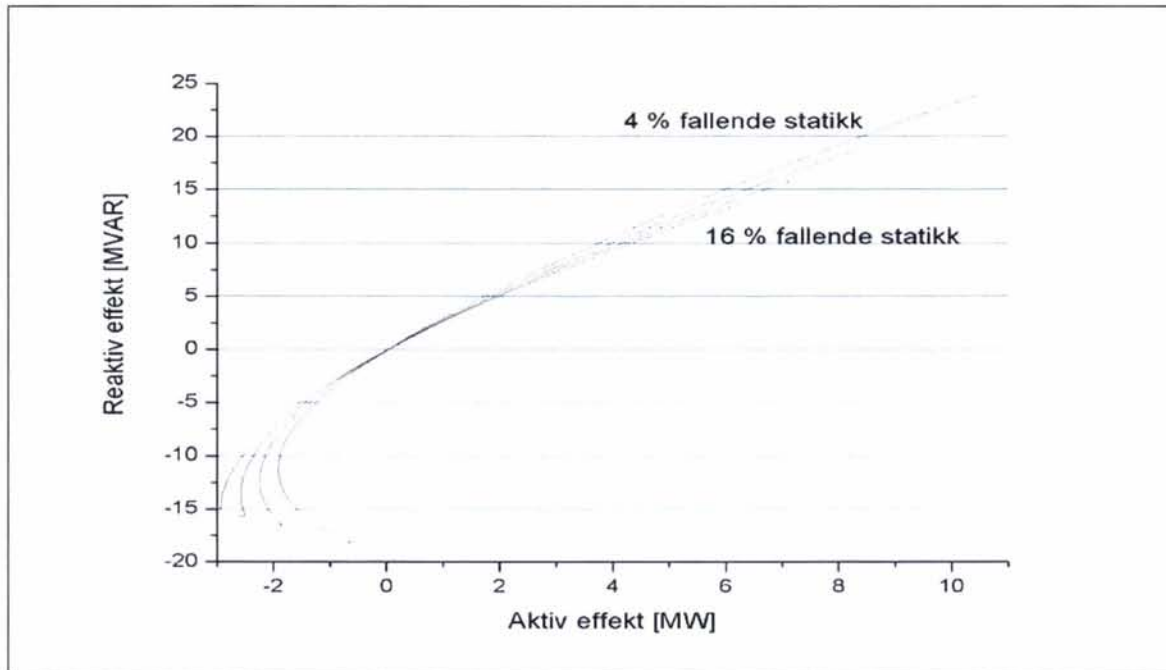


Figur 2-81 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til last 1. Tomgangstapene er ikke inkludert.

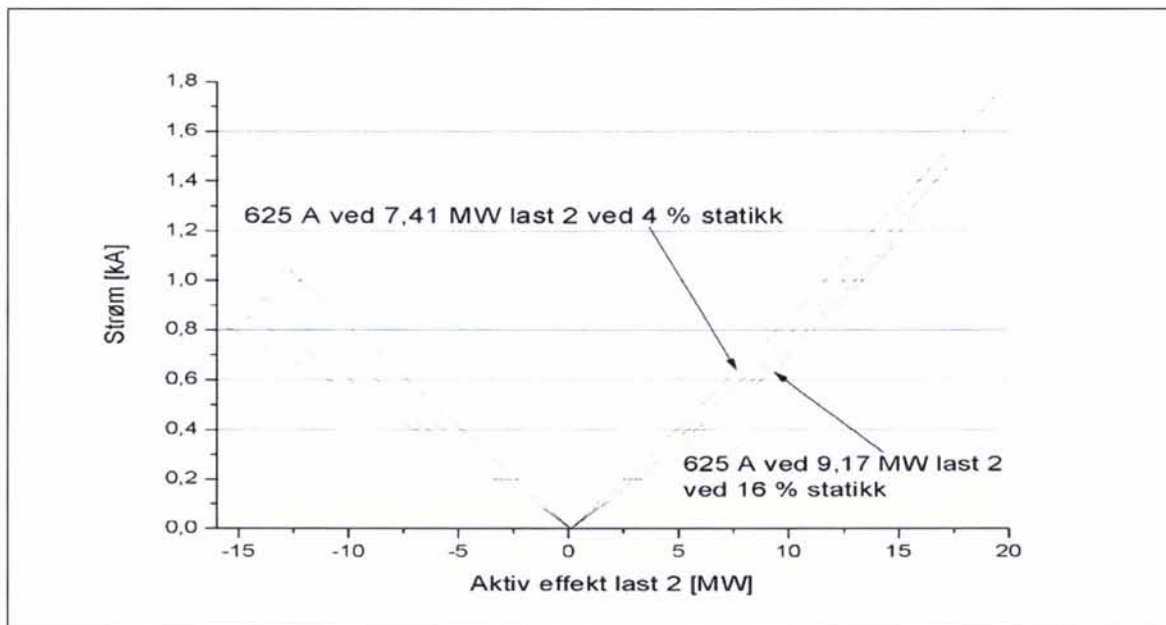
### 2.5.1.2 Last 2 - aktiv og reaktiv belastning

Nedenfor viser Figur 2-82 forholdet mellom reaktiv og aktiv effekt når omformerstasjonen belastes med lasten med  $\cos \varphi = 0,7$  rett utenfor. Med 12 % statikk ser det ut til at forholdet

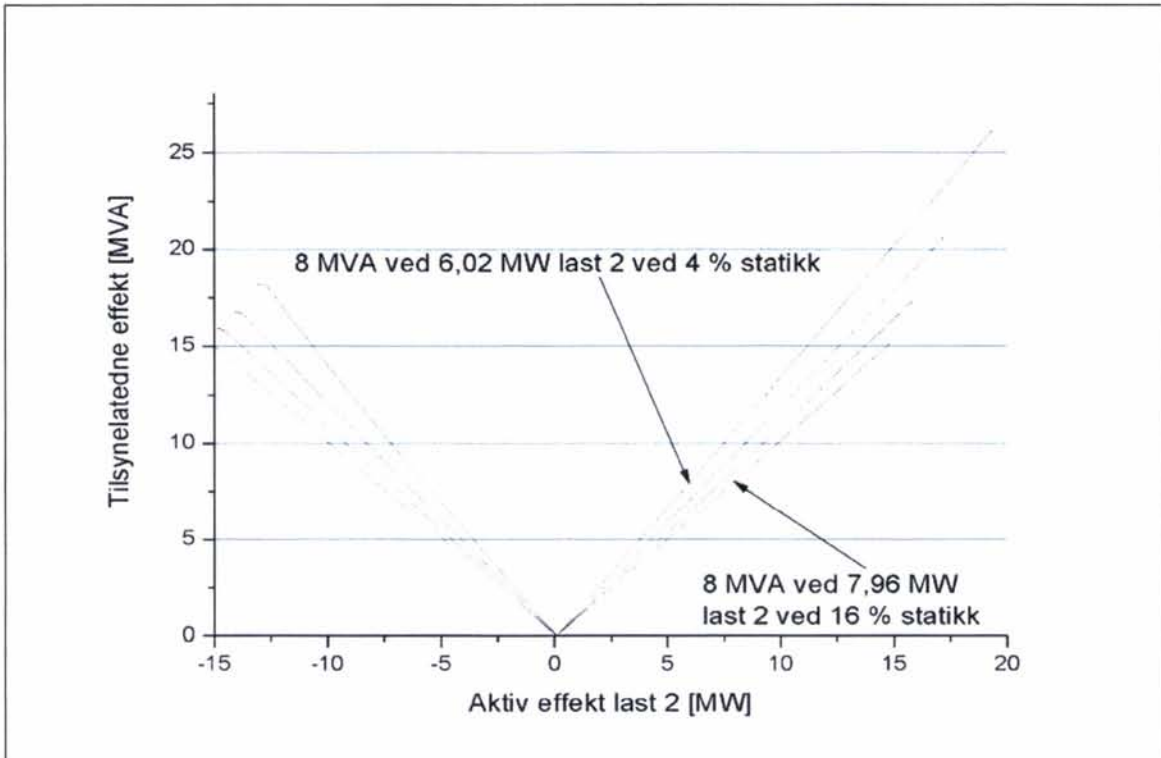
blir veldig likt tilfellet med 80 km mellom omformerstasjonene, se avsnitt 2.2.1.2. Videre viser Figur 2-83 og Figur 2-84 at den aktive effekten som lasten kan ta ut øker en hel del både for 2-sekunders og 6-minutters verdier når statikken velges stor. Forskjellen mellom 12 og 16 % ser allikevel ikke ut til å være stor. Spenningen ser, som en kan forvente, ut til å bli noe høyere nå enn i tilfellet med 80 km mellom stasjonene, se avsnitt 2.2.1.2. Tapene er vist i Figur 2-85 og ser ut til å være lite påvirket.



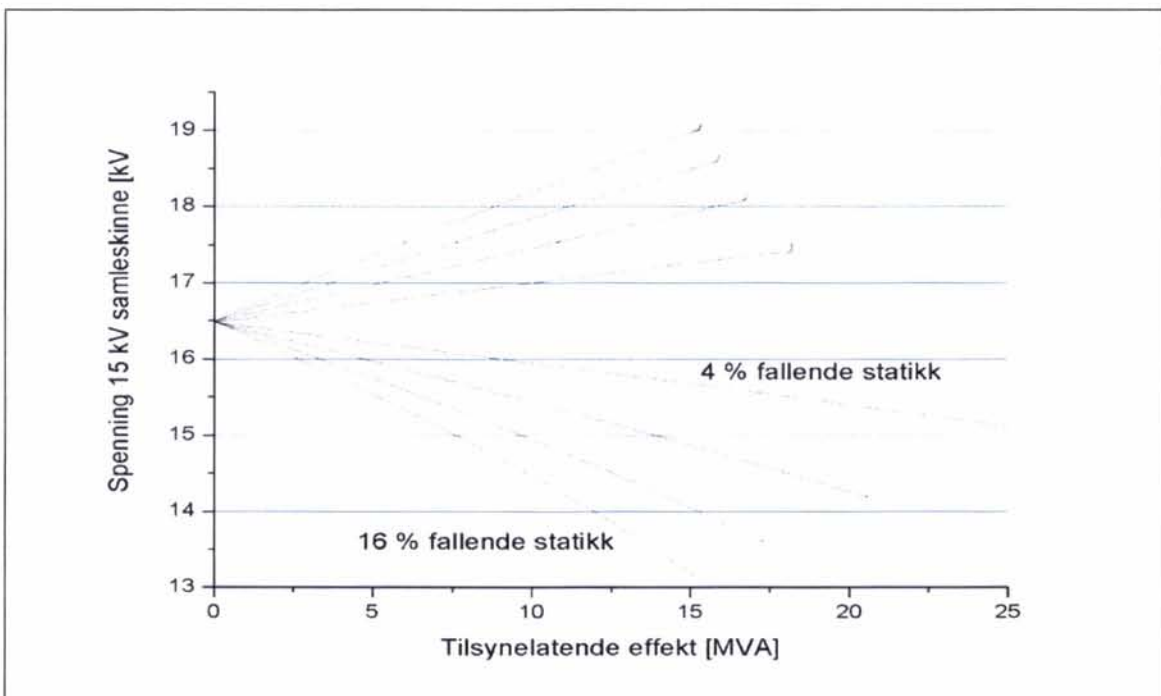
Figur 2-82 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 2 for aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



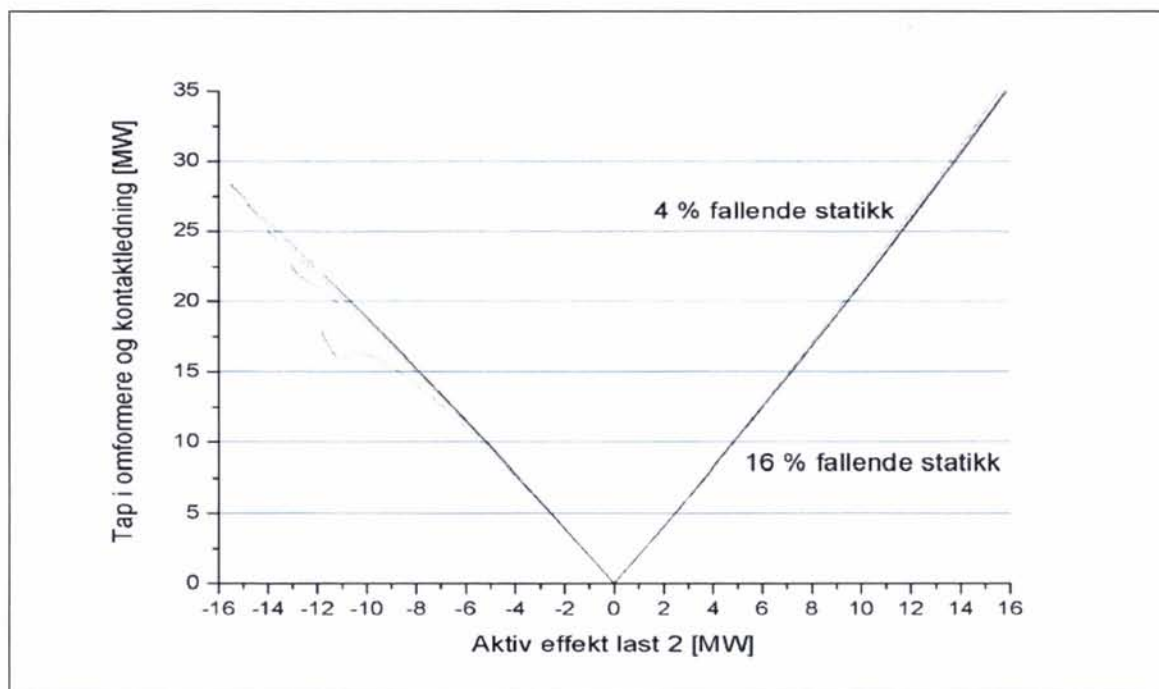
Figur 2-83 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-84 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-85 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-86 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til last 2. Tomgangstapene er ikke inkludert.

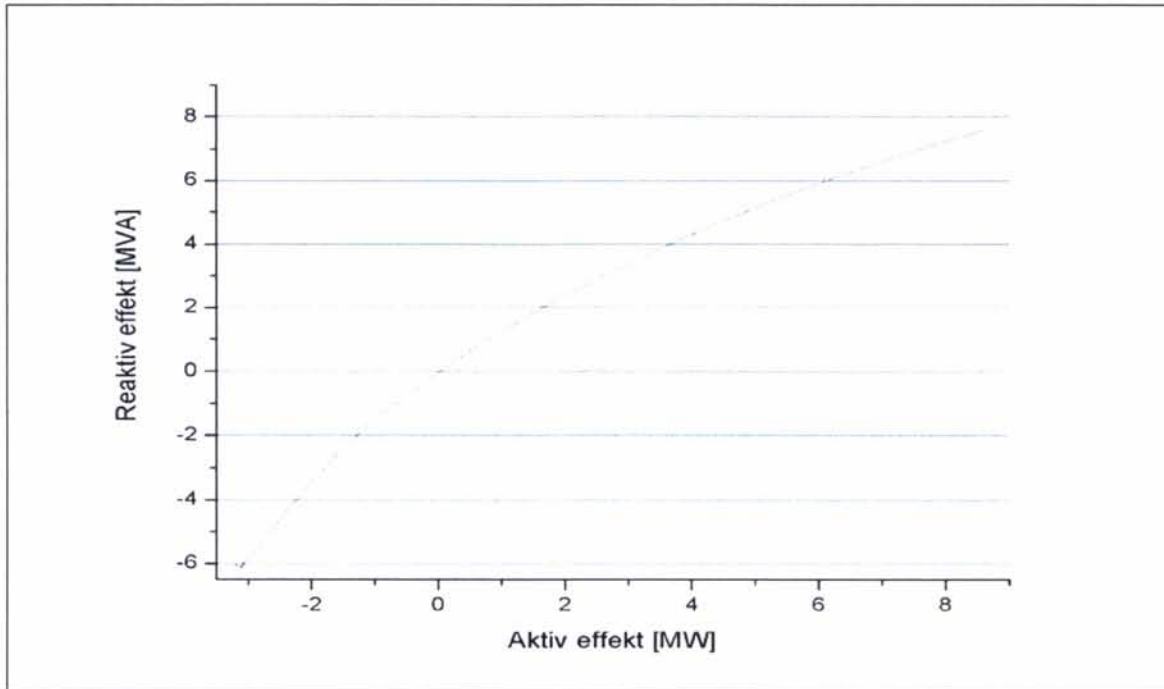
## 2.5.2 Undersøkelse av utfall av aggregat med lasten rett ved omformerstasjonen

Fra undersøkelsene med normal drift virket det som om 12 % fallende statikk ville være passende innstilling av spenningsregulatoren. Her gjøres det bare helt enkle undersøkelser med 12 % statikk i normaldrift og utfall for å bekrefte at dette er tilfredsstillende. Ved utfall av aggregat får stasjon B 24 % statikk, mens de øvrige har 12 %.

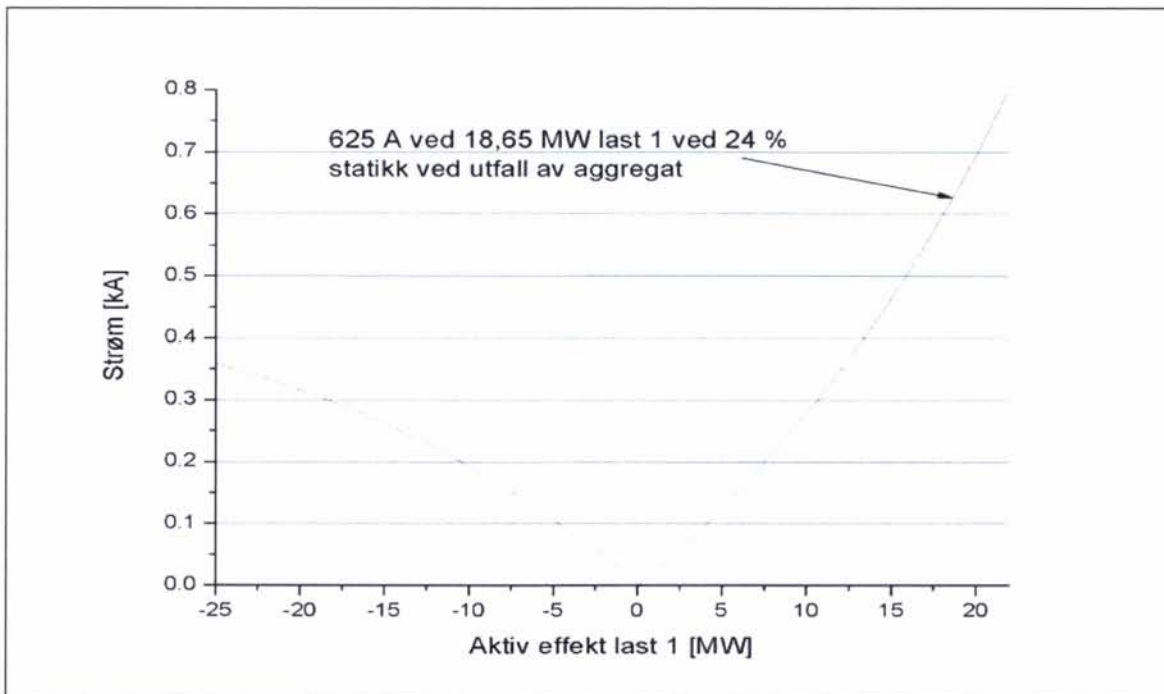
### 2.5.2.1 Last 1 - aktiv belastning

Figur 2-87 viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon B når lasten trekker kun aktiv effekt. Kurvens form er noe endret ved generering av effekt sammenlignet med tilfellet med 80 km mellom stasjonene, se Figur 2-22. Ellers er også her tendensen at det produseres noe mer reaktiv effekt og at denne utveksles mellom stasjonene. I Figur 2-88 og Figur 2-89 kan en se belastningen av stasjonen for henholdsvis 2-sekunders og 6-minutters verdi av strøm og effekt som lasten gir. Det er interessant å se at effekten som lasten kan trekke har økt en hel del sammenlignet med tilfellet med 80 km mellom stasjonene, se Figur 2-23 og Figur 2-24. Spenningen ved stasjonene er vist i Figur 2-90 og sammenlignes resultatet her med tilfellet med 80 km mellom stasjonene, se Figur 2-25, ser en at spenningen blir noe lavere. Ved for eksempel 10 MVA ble det tidligere en spenning på ca 14,0 kV mens den nå blir ca 13,75 kV. 12 % statikk (i normal drift) er passende, men sannsynligvis kunne også 16 % vært valgt. Spenningen vil neppe bli utilfredsstillende lav ute på matestrekningen med 16 % statikk.

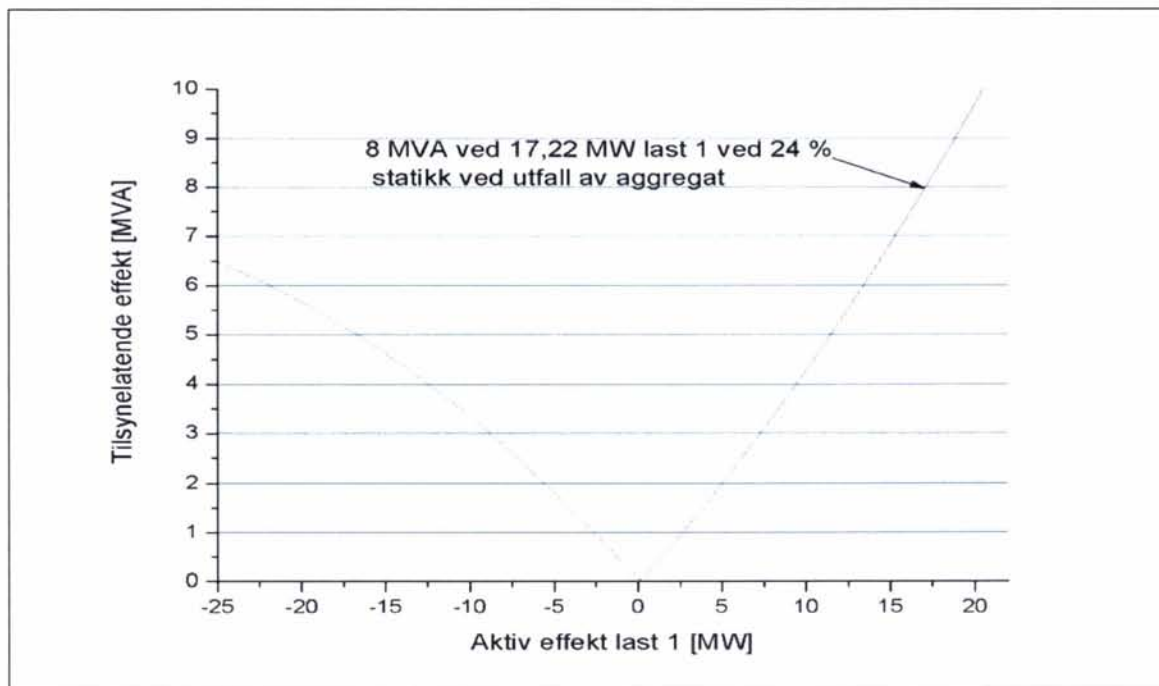




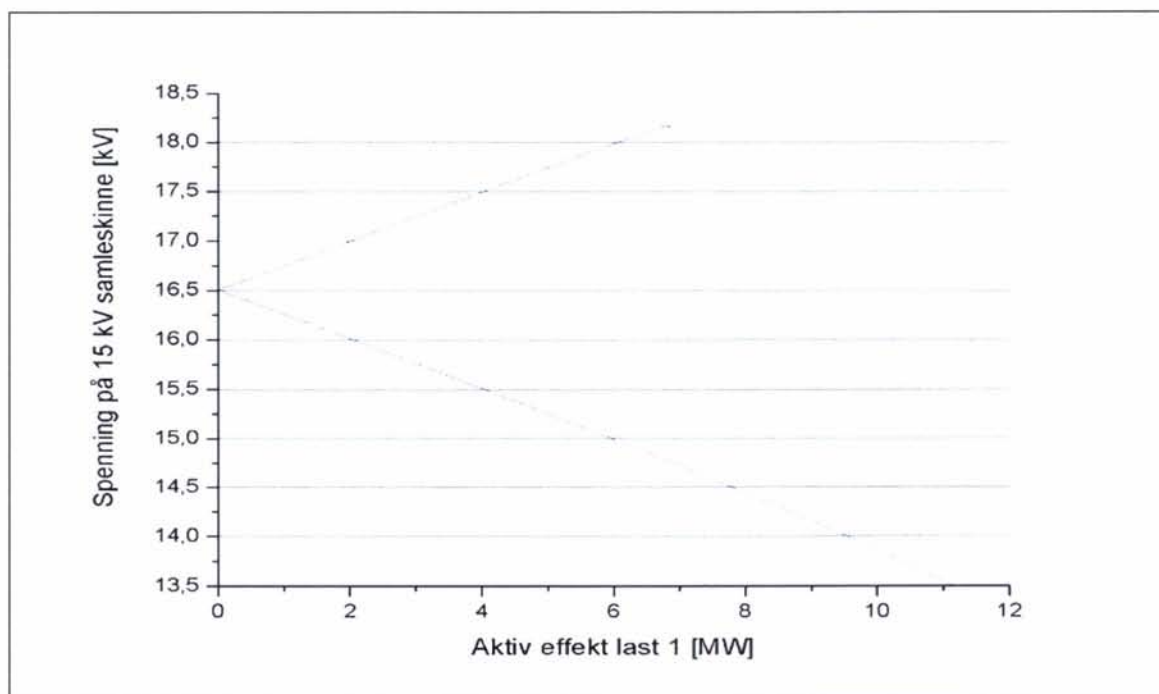
Figur 2-87 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 1 for aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-88 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-89 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

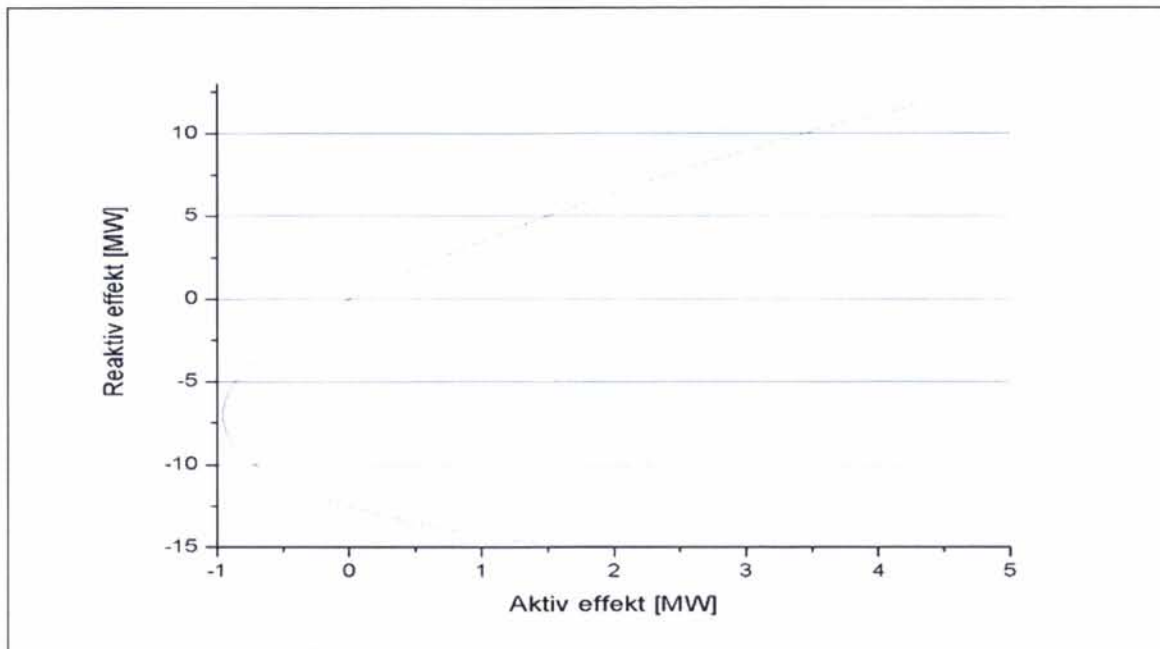


Figur 2-90 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

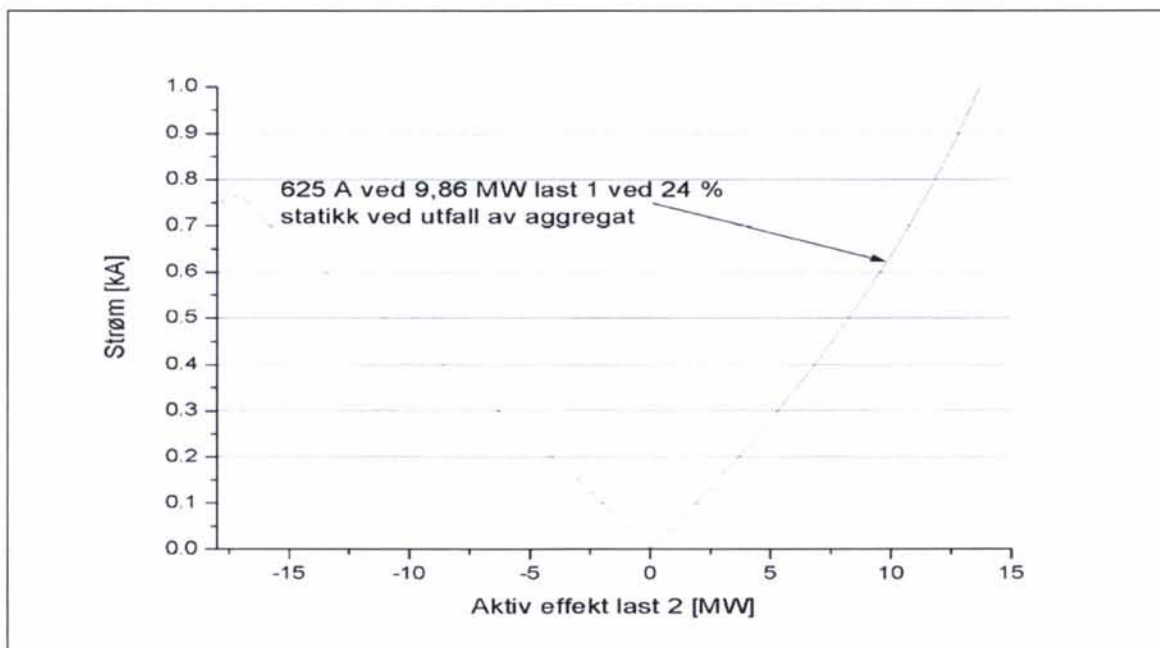
### 2.5.2.2 Last 2 - aktiv og reaktiv belastning

Nedenfor viser Figur 2-91 aktiv og reaktiv effekt med en last som trekker effekt ved  $\cos \varphi = 0,7$  når ett aggregat er falt ut og statikken er 24 %. Sammenlignes dette med resultatene med

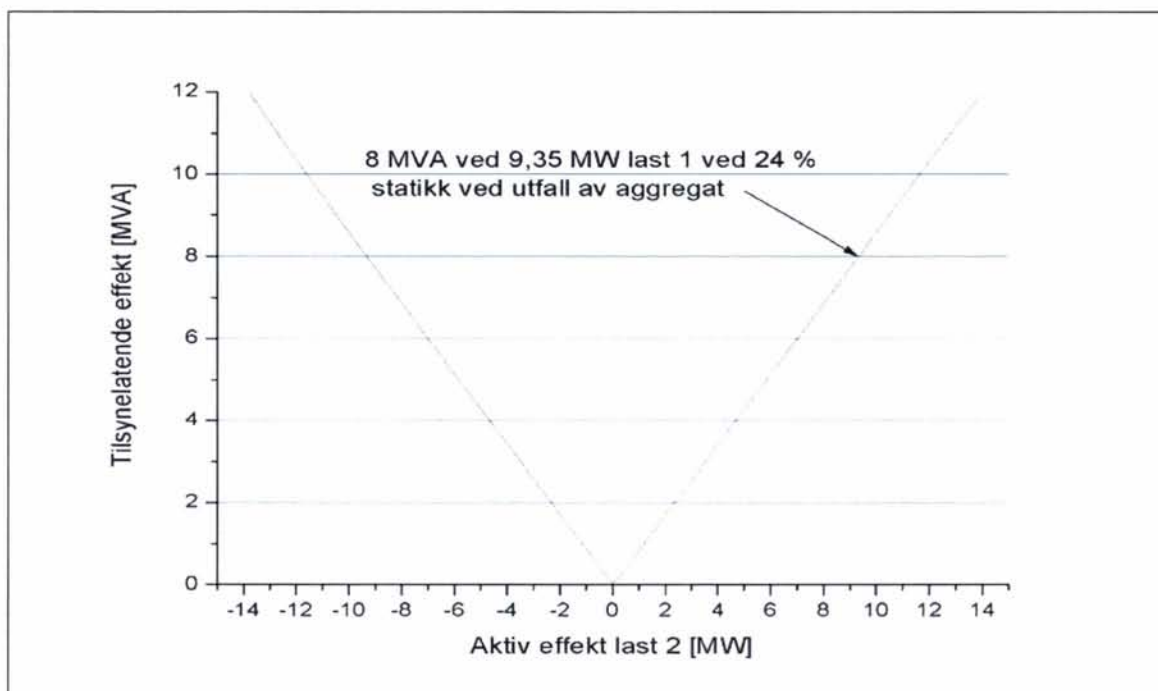
80 km mellom stasjonene, ser en at reaktiv produksjon er omtrent den samme. Se avsnitt 2.2.2.2 der det ved for eksempel 4 MW leveres ca 10 MVAR, mens det nå blir produsert ca 11 MVAR. For 2-sekunders og 6-minutters verdi ser en at det nå kan trekkes mye større last ved omformerstasjonen før den overbelastes, se Figur 2-92 og Figur 2-93 og sammenlign med Figur 2-27 og Figur 2-28 i avsnitt 2.2.3.2. Spenningen ved stasjonen som funksjon av produsert tilsynelatende effekt er vist i Figur 2-94.



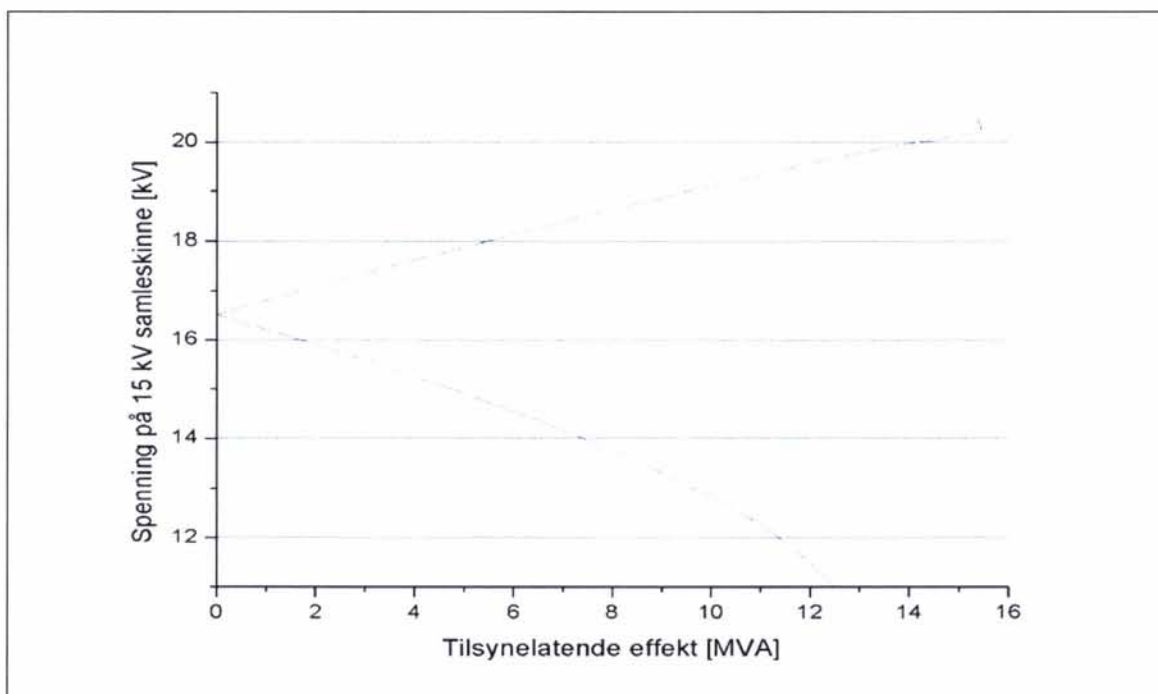
Figur 2-91 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 2 for aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-92 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-93 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-94 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

## **2.6 Liten omformerstasjon med normalt store nabostasjoner og 40 km lang matestrekning**

På strekningene Tangen - Rudshøgda - Fåberg og Fron - Otta - Dombås er det satt inn små omformere på 3,1 MVA. Det er interessant å se hvilken fordeling av lasten en kan få om disse små aggregatene får fallende statikk. En antar at disse tar på seg lite aktiv last og utveksler mye reaktiv effekt mellom naboene. For å undersøke dette anses det her som mest relevant å undersøke:

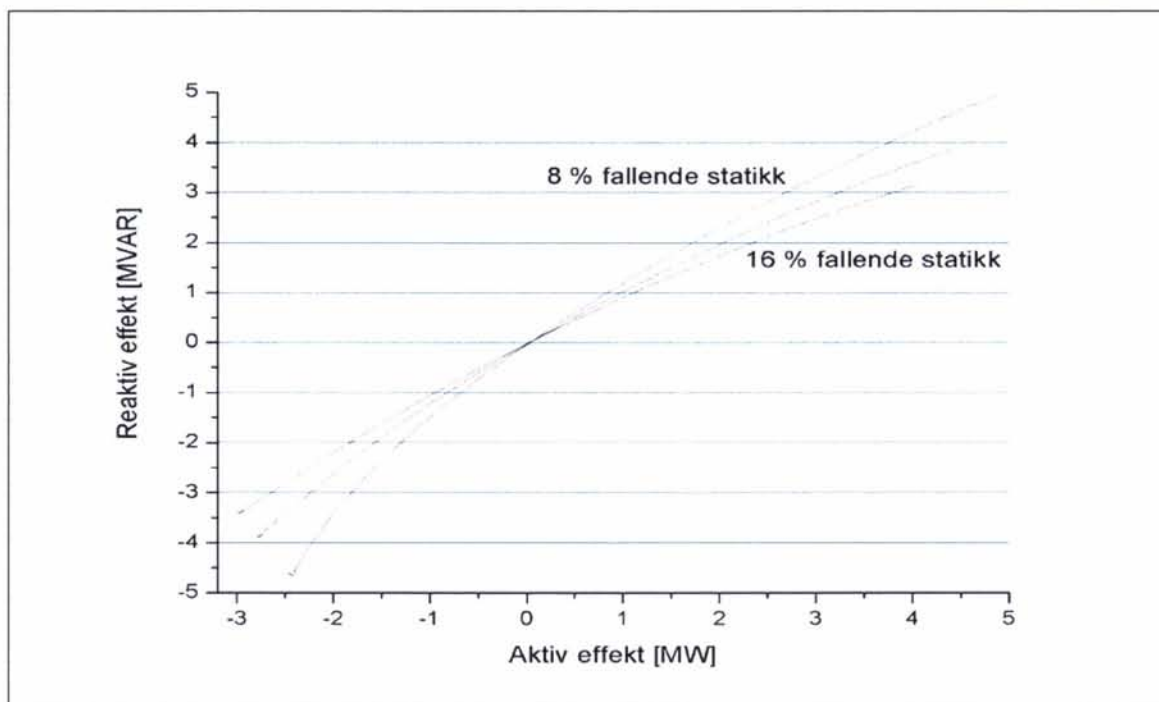
- Normal driftsituasjon og lasten rett ved omformerstasjonen.

Ved utfall av aggregatet vil spenningsforholdene bli de samme som for matestrekning med 80 km mellom stasjonene som er undersøkt i avsnitt 2.2. Derfor undersøkes ikke dette her.

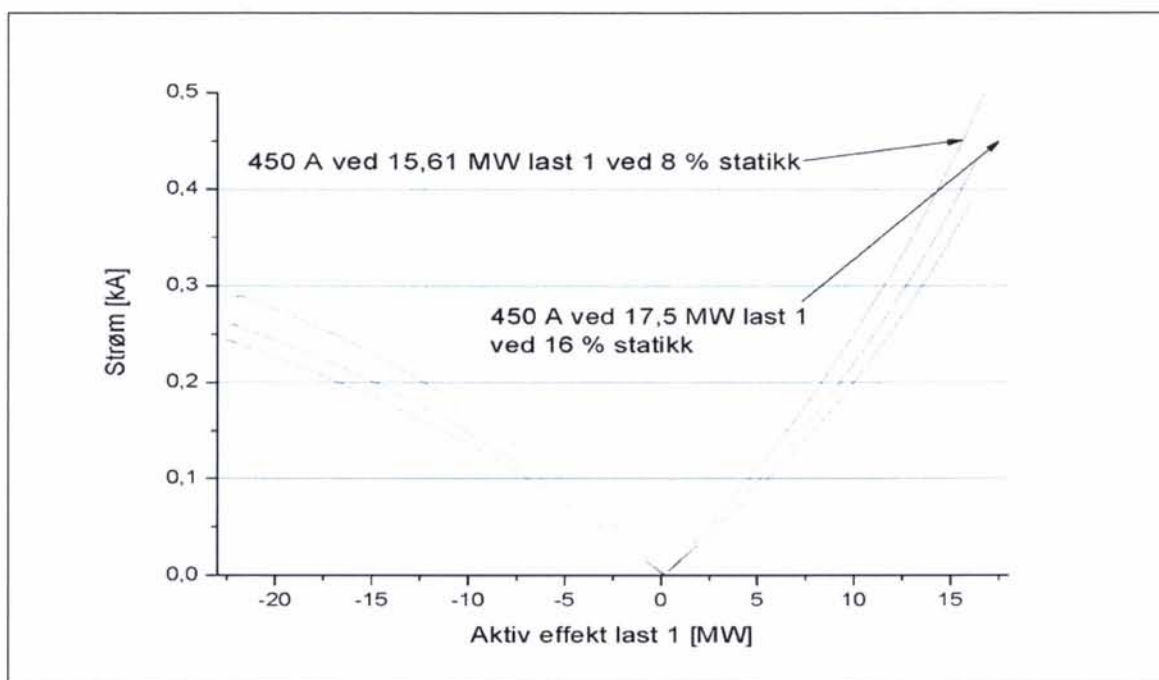
### **2.6.1 Undersøkelse av utfall av aggregat med lasten rett ved omformerstasjonen**

#### **2.6.1.1 Last 1 - aktiv belastning**

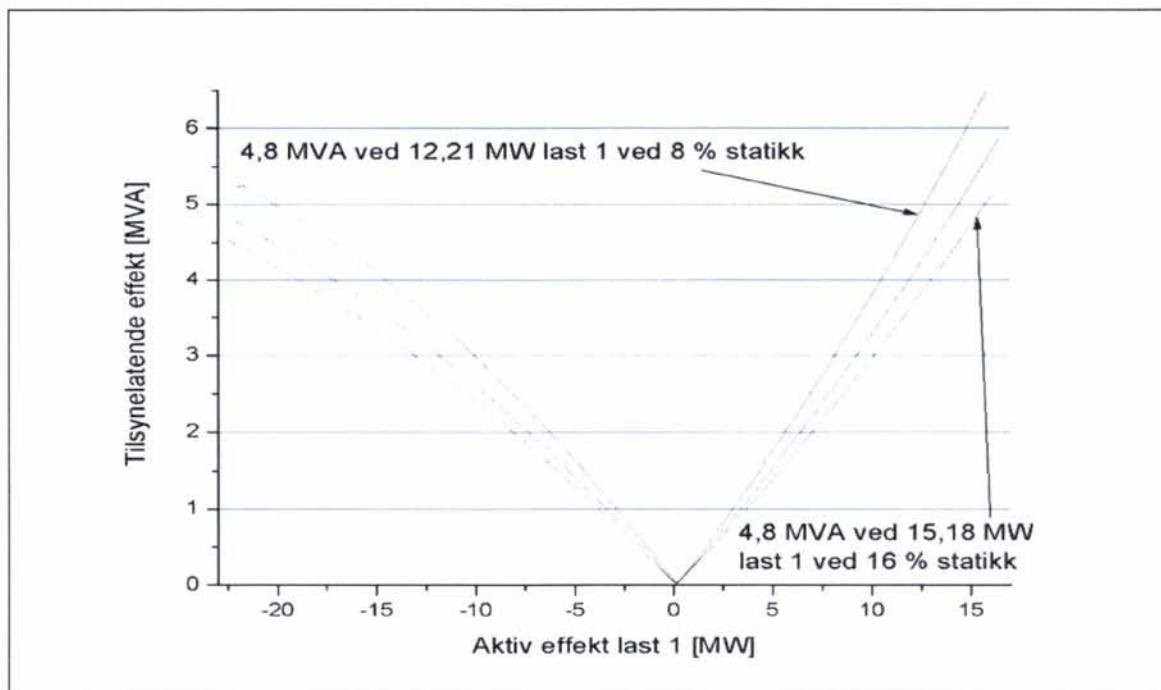
Nedenfor viser Figur 2-95 at med fallende statikk kan reaktiv effektproduksjon fra en stasjon med aggregat på 3,1 MVA begrenses en del. Sammenlignes resultatet her for 12 % fallende statikk med tilfellet med omformerstasjoner med 2 x 5,8 MVA og 40 km mellom, se avsnitt 2.5.1.1 og Figur 2-77, ser det ut til å være en viss forskjell. Når stasjonen her belastes med 3,1 MW (merkelast) produseres det ca 3,8 MVAR, mens for stasjonene med 2 x 5,8 MVA produseres ca 4,2 MVAR ved 5,8 MW (full belastning for stasjonen med 50 % som høyeste tillat belastning). Dette tyder på at en liten omformerstasjon med sterkere naboer har en tendens til å produsere mye reaktiv effekt. Figur 2-96 og Figur 2-97 viser at for 2-minutters og 6-minutters verdier kan tillat høyeste effektuttak ved stasjonen økes en hel del om statikken økes. I Figur 2-98 kan en se at selv med 16 % statikk vil ikke spenningen bli spesielt lav. Omformerstasjonen vil alltid ha en gunstig virkning for tog ute på matestrekningen og spenningen vil bli bedre enn i tilfellet med 80 km mellom omformerne, se Figur 2-34. Tapene er vist i Figur 2-99.



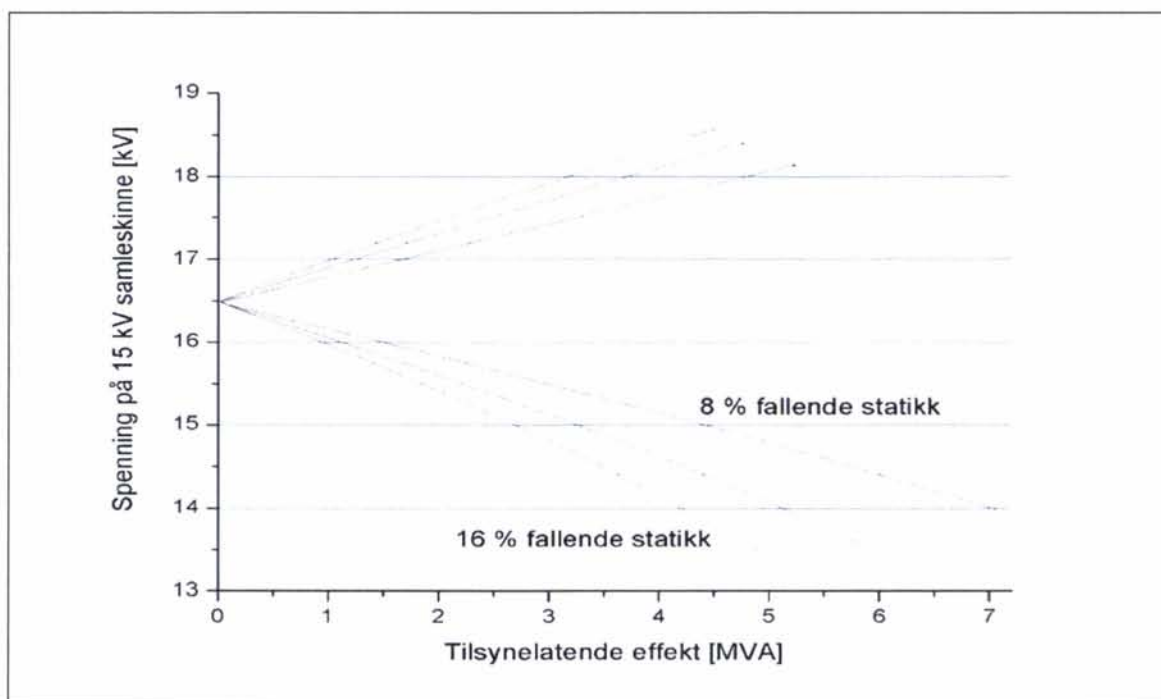
Figur 2-95 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 1 for aggregat på 3,1 MVA.



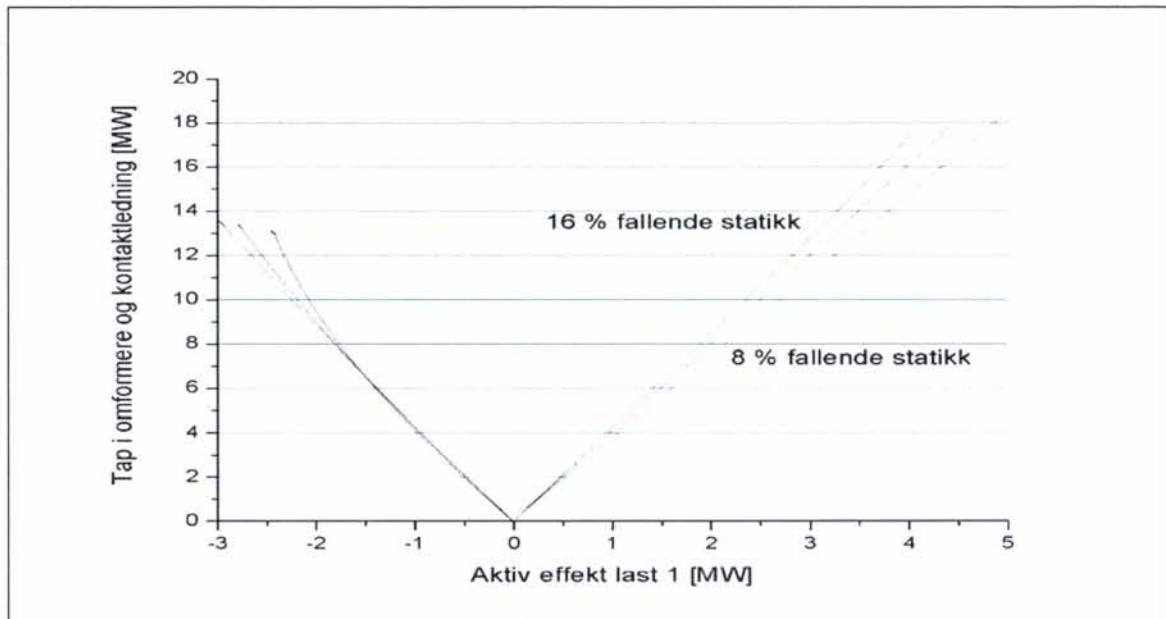
Figur 2-96 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning.



Figur 2-97 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning.



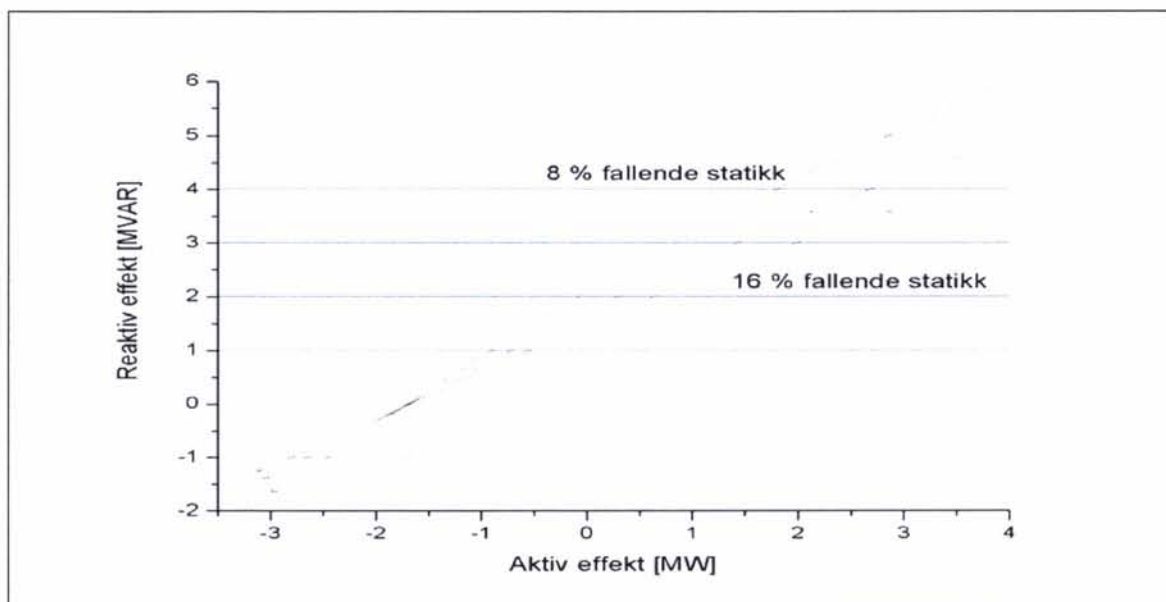
Figur 2-98 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-99 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til last 1. Tomgangstapene er ikke inkludert.

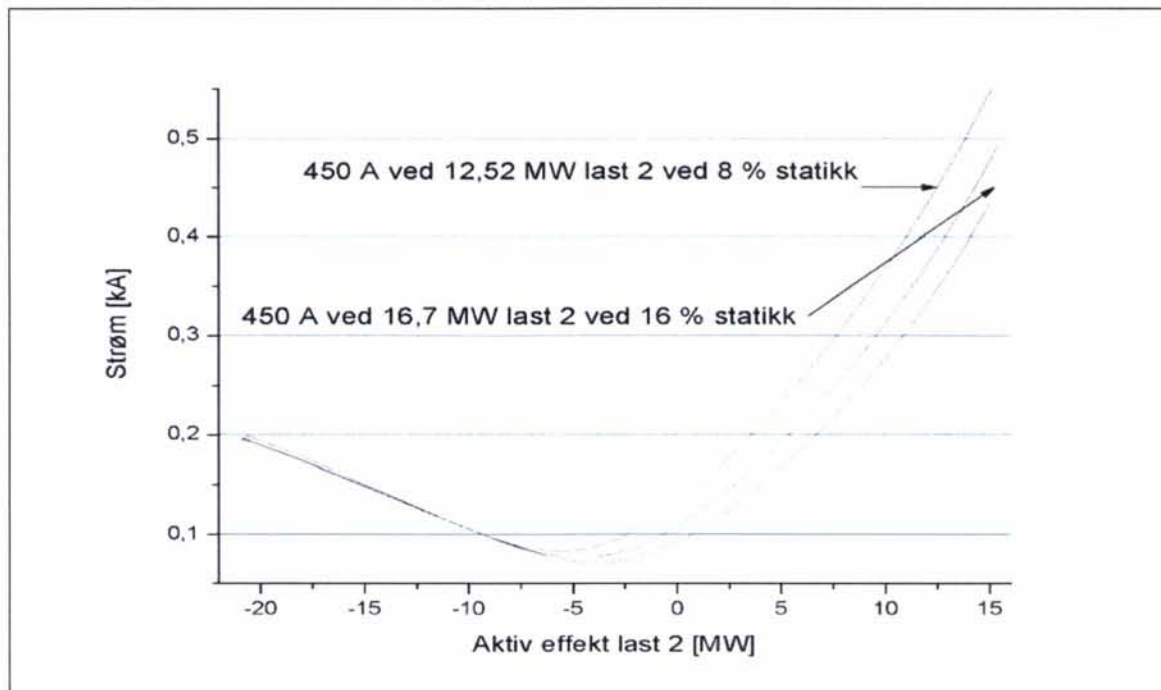
### 2.6.1.2 Last 2 - aktiv og reaktiv belastning

Med reaktiv belastning som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  ser en at forskjellige statikk får større betydning enn med kun aktiv belastning, se Figur 2-100. Videre viser Figur 2-101 og Figur 2-102 at lasten kan tillates å trekke betydelig mer aktiv effekt før stasjonen overbelastes om statikken økes. Statikk over 12 %, som for de øvrige, ser ut til å være spesielt gunstig for disse små omformerstasjonene. Figur 2-103 viser at det fremdeles er oppnådd akseptabel spenning ved omformerstasjonen selv med 16 % statikk.

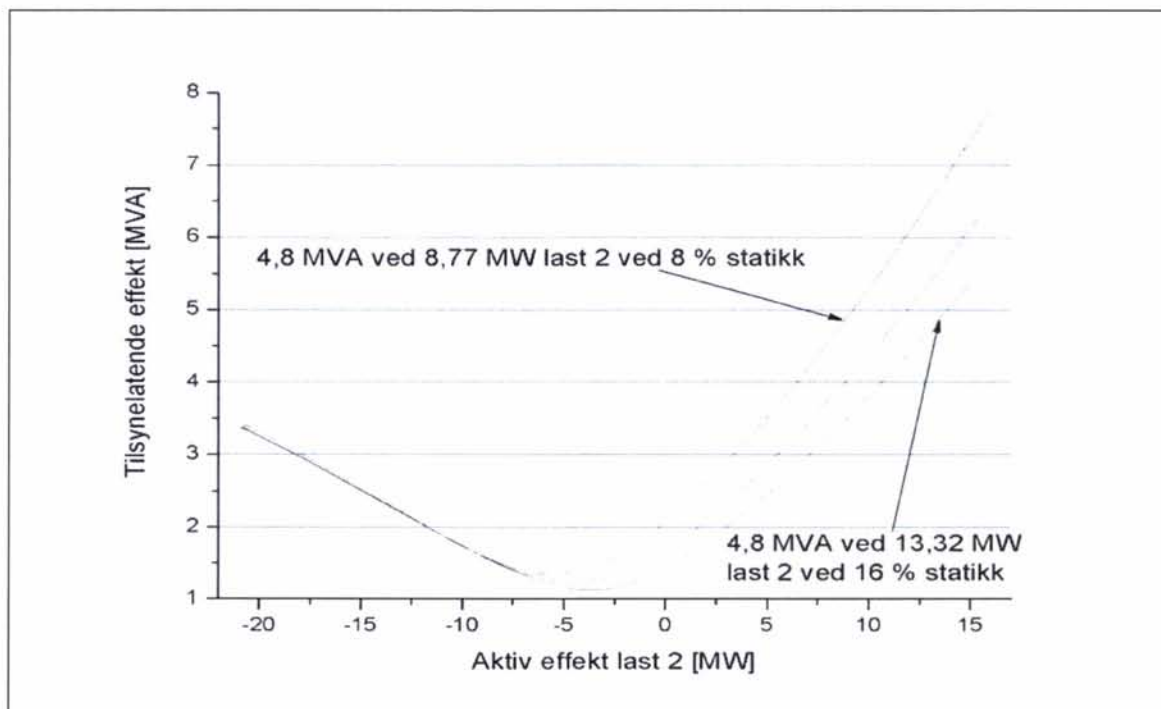


Figur 2-100 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 2.

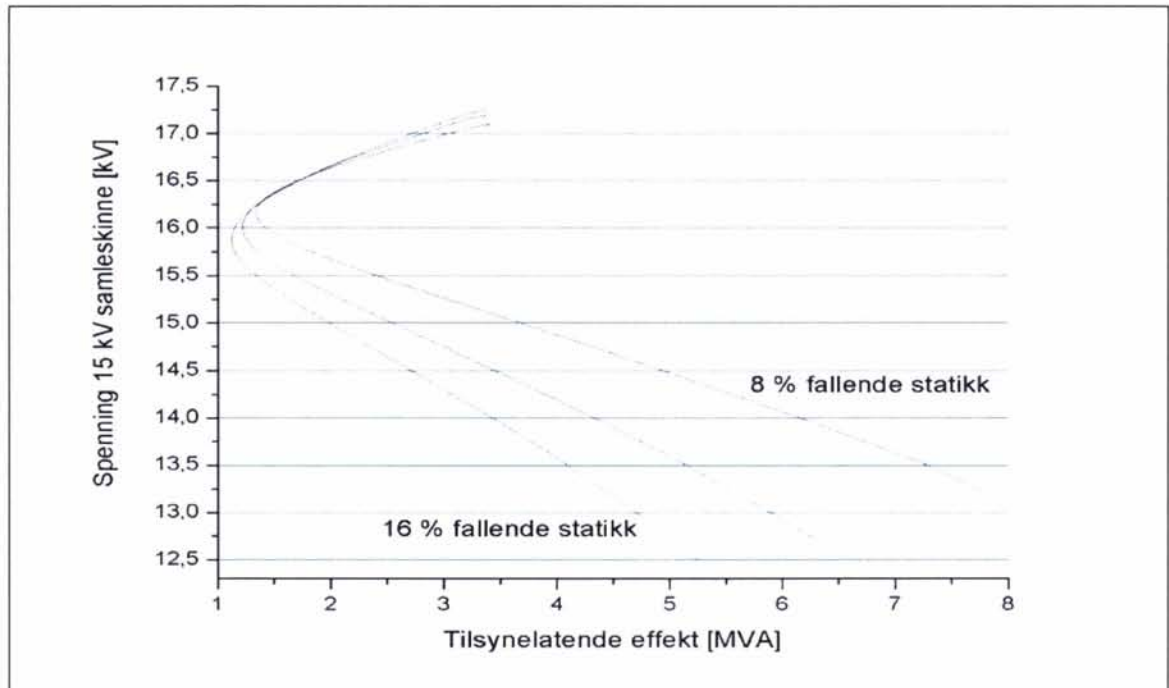




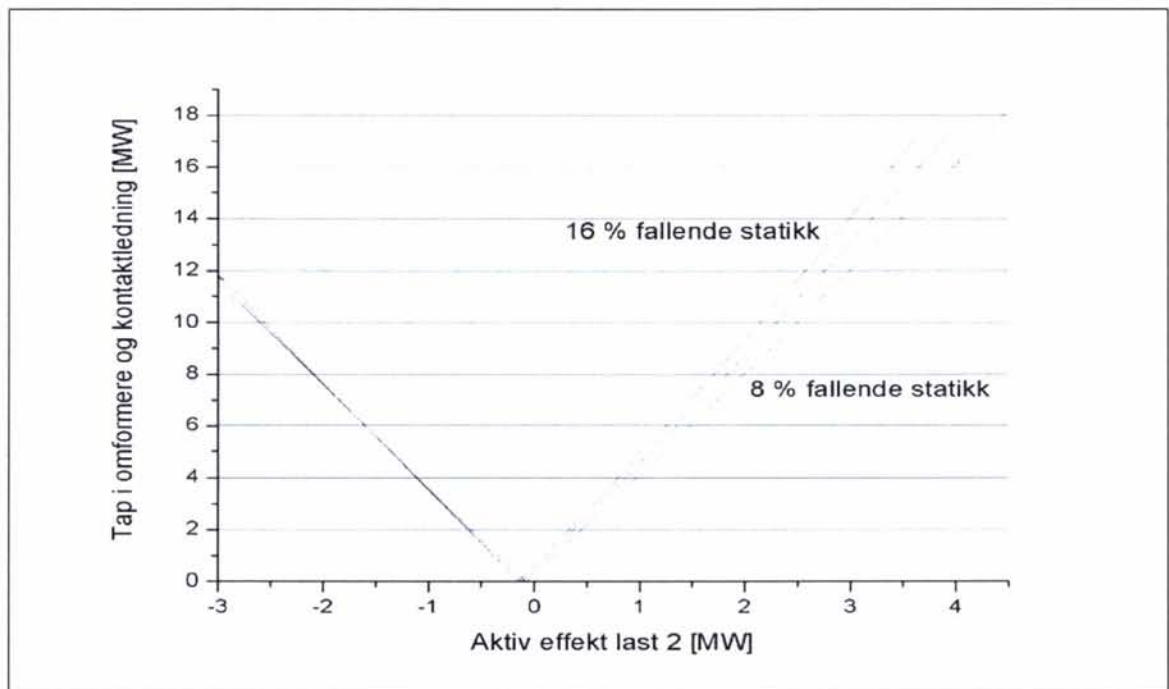
Figur 2-101 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning.



Figur 2-102 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning.



Figur 2-103 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 2 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-104 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til last 1. Tomgangstapene er ikke inkludert.

## 2.7 Oppsummering etter undersøkelser med 40 km lang matestrekning og stor og liten omformerstasjon med normalt store nabostasjoner

Etter å ha gjort undersøkelser med laster på en 40 km lang matestrekning har en kommet frem til følgene som raskt oppsummeres her:

- Undersøkelsene gjøres med 12 % statikk som utgangspunkt (samme som en fant som passende for normalt store omformerstasjoner og 80 km mellom stasjonene) og det forsøkes å endre denne 4 % opp eller ned.
- I normal drift med alle aggregater inne og lasten rett utenfor stasjonen. Normal store stasjoner
  - Med ren aktiv belastning har en sett at endringer over eller under en fallende statikk på 12 % får noe betydning. Det blir overført mer reaktiv effekt når det er 40 km mellom stasjonene enn med 80 km.
  - Med last som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  er det også en viss forskjell med noe større eller mindre fallende statikk enn 12 %.
  - For spenningen sin del er endringen liten i forhold til tilfellet med 80 km mellom stasjonene.
  - Det ser ikke ut til å være noen grunn til å velge annen statikk for stasjonene om det er 40 km mellom dem.
- I normal drift med alle aggregater inne og lasten rett utenfor stasjonen. Små stasjoner med normalt store naboer
  - Det er en tendens til at disse stasjonene leverer mye reaktiv effekt. En har dermed sett på om det vil være gunstig med en enda større statikk enn 12 % for disse stasjonene. Med en statikk på 16 % kan faren for overlast begrenses.
  - Med last som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  blir det enda mer gunstig med 16 % statikk.
  - Spenningen blir akseptabel både for aktiv og reaktiv belastning.
- Ved utfall av ett aggregat og belastningen rett utenfor omformerstasjonen. Normal store stasjoner
  - Med ren aktiv belastning og med last som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  får en tilfredsstillende forhold med en statikk på 12 %.

## 2.8 Like omformerstasjoner og AT-system med 120 km lang matestrekning

For banestrømforsyning med AT-system vil det være aktuelt med roterende omformere på 3 x 5,8 MVA aggregater. Her er det aktuelt å undersøke alle punktene som for konvensjonelt system, unntatt ensidig mating, driftssituasjon med utfall av aggregat i en stasjon og laster ute på linjen:

- Normal driftssituasjon og lasten rett ved omformerstasjonen
- Unormal driftssituasjon med utfall av ett aggregat i en stasjon og lasten rett utenfor
- Normal driftssituasjon med flere laster ute på linjen

Grunnen til at en ikke vil se på tilfellet med utfall av ett aggregat og last ute på linjen er at dette anses for å påvirke spenningen bare i liten grad. I undersøkelsene angående

konvensjonelt system så en at dette fikk mindre betydning og at forskjellen var liten, se avsnitt 2.2. Med AT-system og stasjoner med i utgangspunktet hele tre roterende aggregater anses det at dette får enda mindre betydning. En evaluering av dette kan gjøres etter at en har simulert med utfall av ett aggregat og last rett ved omformerstasjonen.

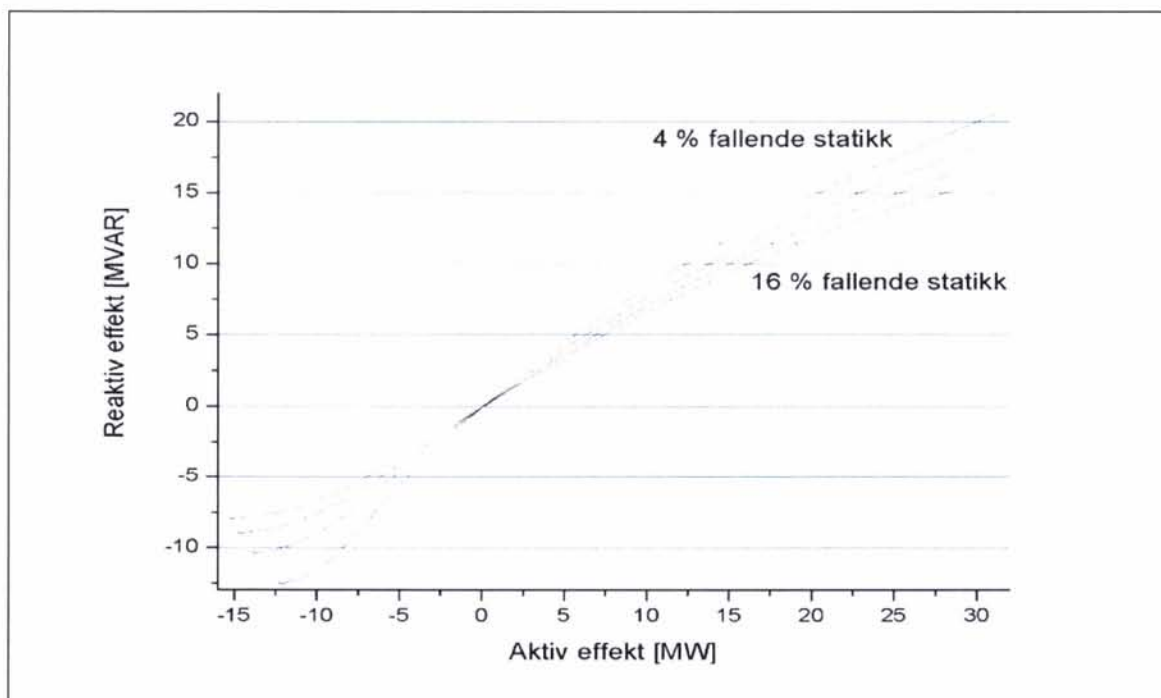
Det er benyttet laster utenfor omformerstasjonene og på matestrekningen med samme karakteristikk som forklart i innledningen til avsnitt 2.2 og som i Figur 2-10.

### 2.8.1 Undersøkelse av normal driftsituasjon med lasten rett ved omformerstasjonen

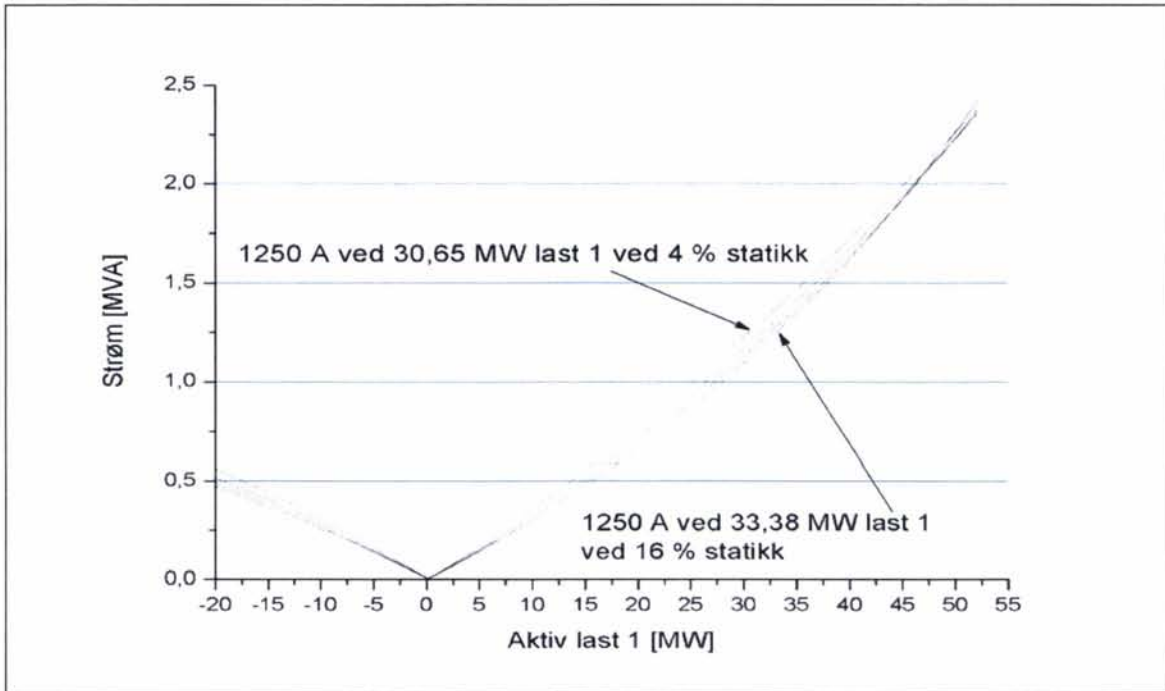
Undersøkelser er gjort av en belastning rett ved omformerstasjon B på akkurat samme måte som forklart i avsnitt 2.2 bare at matestrekningene nå er på 120 km og impedans som i AT-system.

#### 2.8.1.1 Last 1 - Aktiv belastning

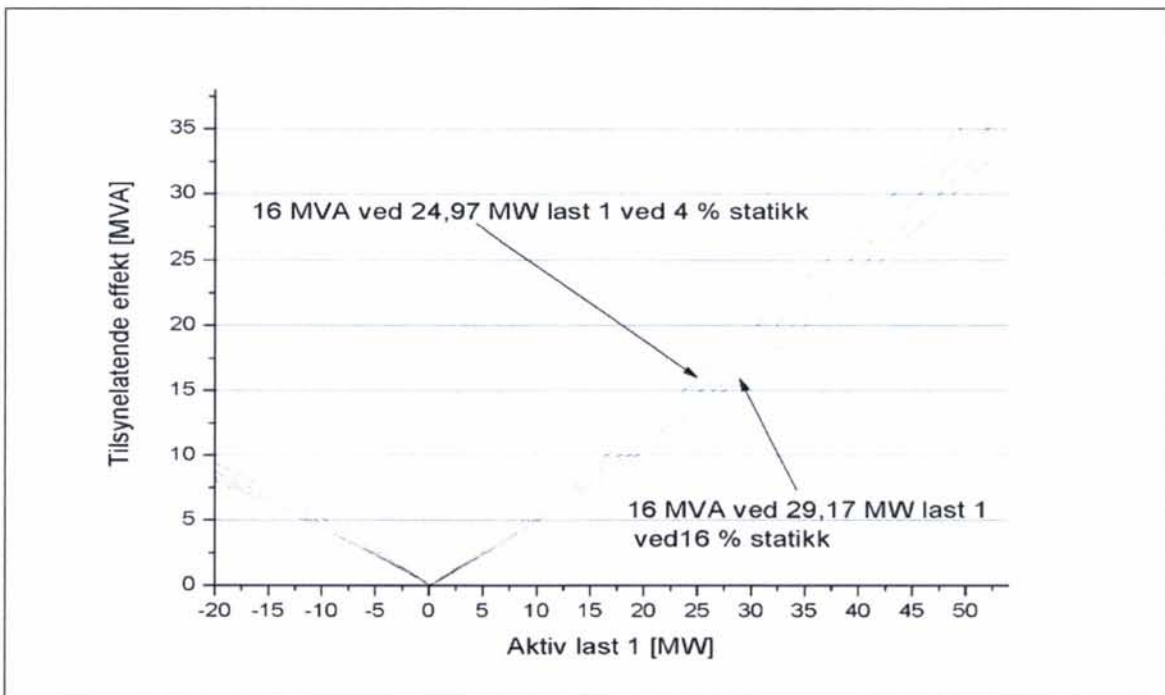
Med de forskjellige verdiene for statikken ser en av Figur 2-105 at mellom 4 % eller 16 % kan reaktiv effekt begrenses mye. Med et redundanskrav på i utgangspunktet 67 % (2/3 av stasjonenes ytelse) ser en at høyeste last ved stasjonen kan endres fra 30,65 til 33,38 MW, se Figur 2-106. Dette er en økning på nesten 9 % og også for 6-minutters verdi for tilsynelatende effekt ser en at økningen er stor, se Figur 2-107. Med et uttak på 16 MW ved stasjonen ser en av Figur 2-108 at selv med 16 % statikk er spenningen ikke lavere enn 15,0 kV. Når det gjelder tap er det imidlertid ugunstig med stor fallende statikk når lasten er rett ved omformerstasjonen, se Figur 2-109. Om det skal trekkes så mye effekt som 16 MW (fra flere tog) rett ved stasjon B vil tapene bli så mye som ca 25 MW med 16 % statikk.



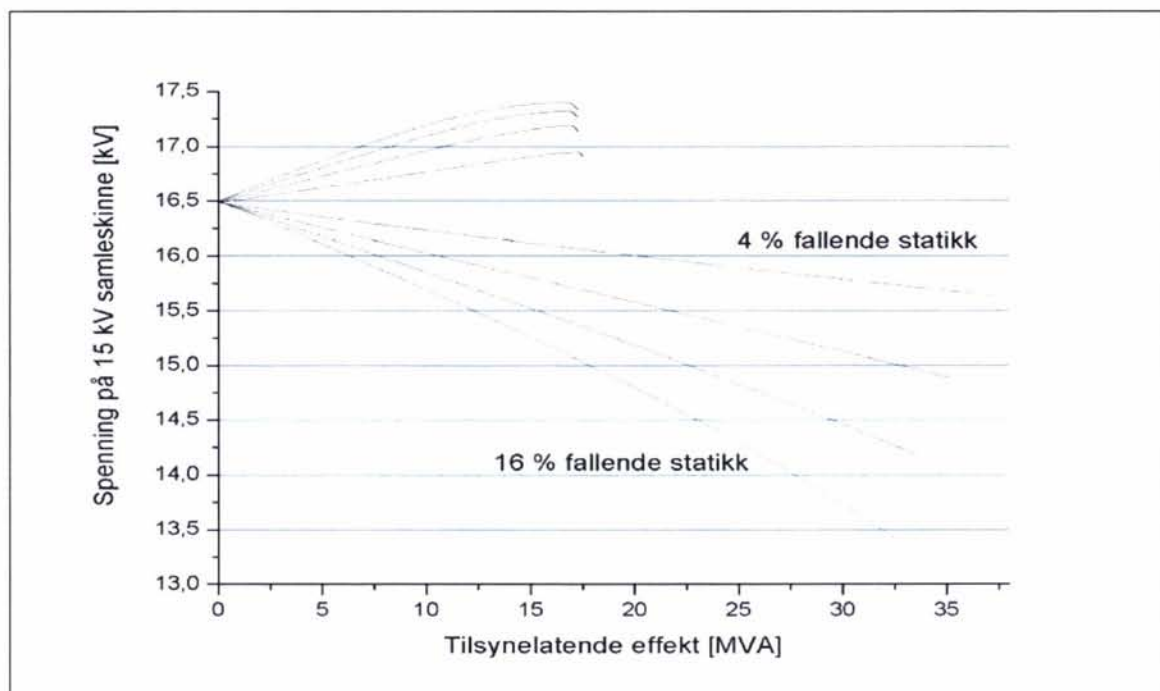
Figur 2-105 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 1 for aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



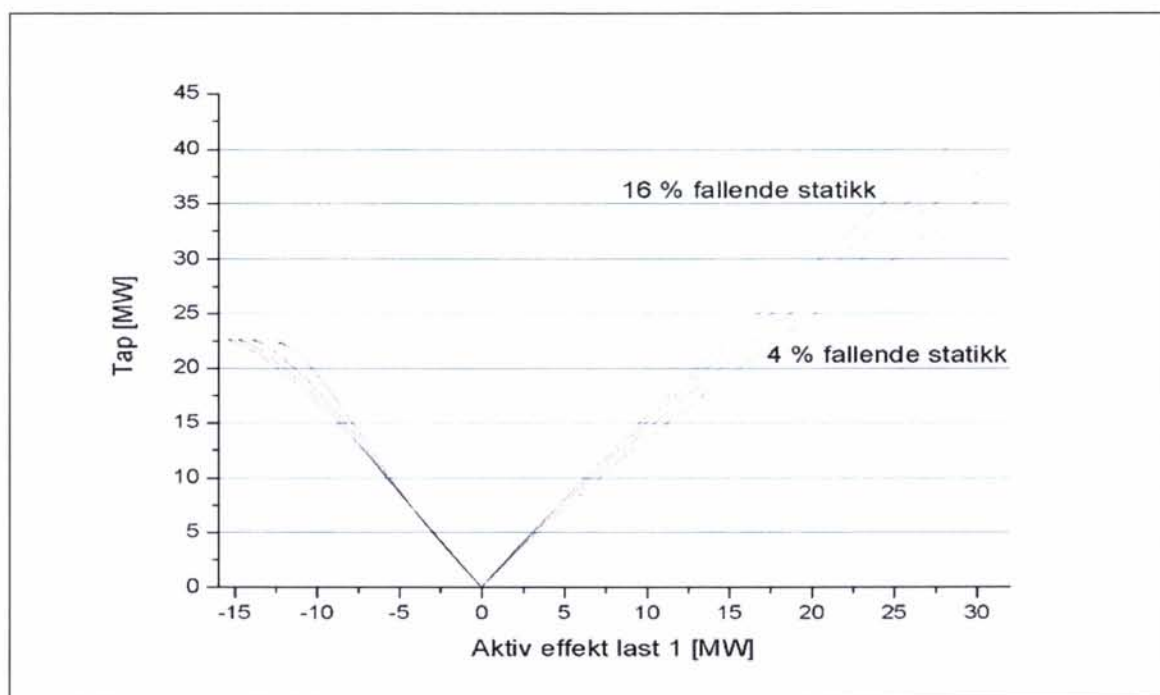
Figur 2-106 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-107 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-108 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

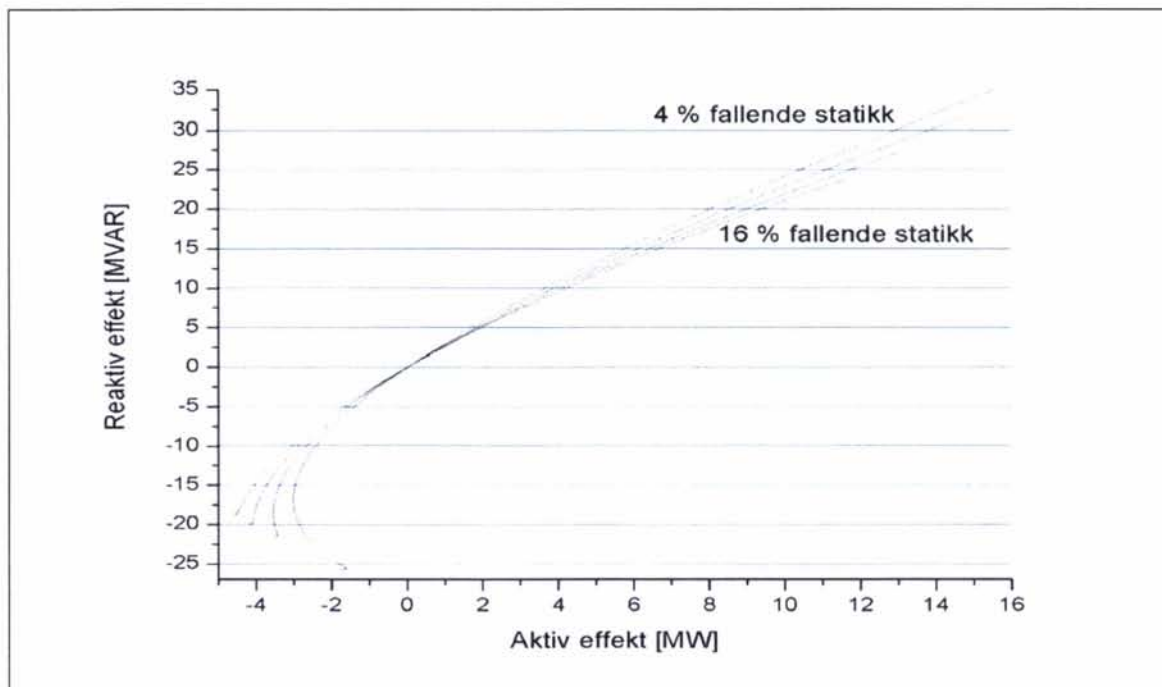


Figur 2-109 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til last 1. Tomgangstapene er ikke inkludert.

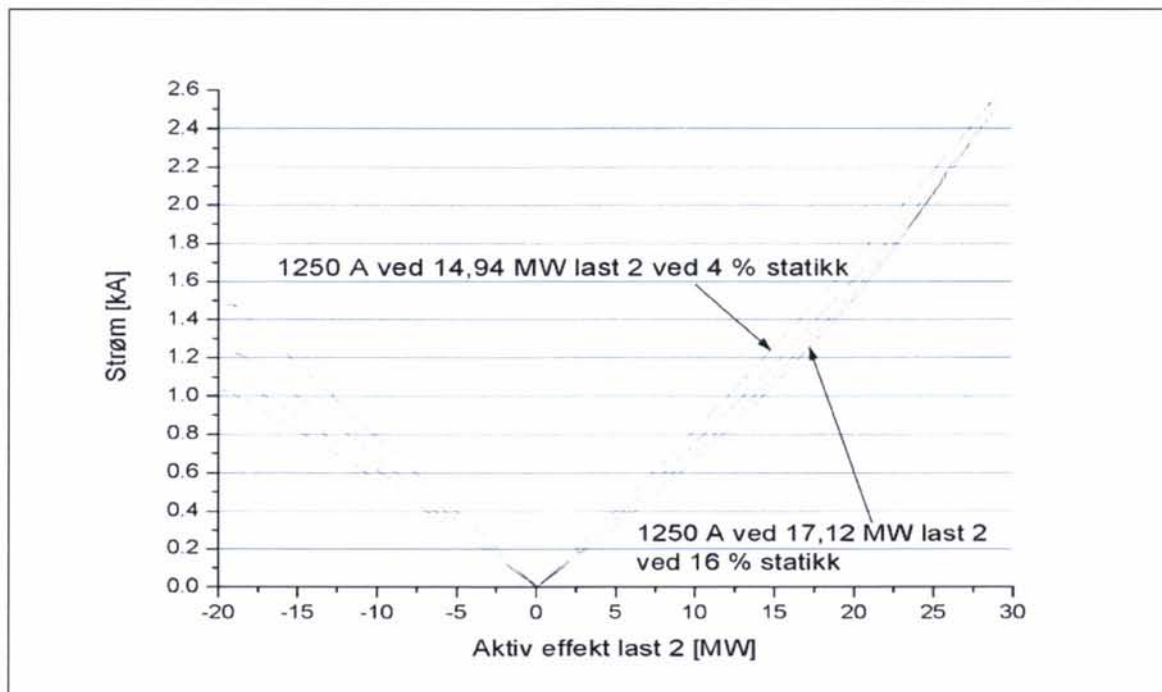
### 2.8.1.2 Last 2 - Aktiv og reaktiv belastning

Når lasten trekker aktiv effekt og har en  $\cos \varphi = 0,7$  ser en av Figur 2-110, Figur 2-111 og Figur 2-112 at en stor fallende statikk vil kunne redusere reaktiv effekt mye og tillate et større

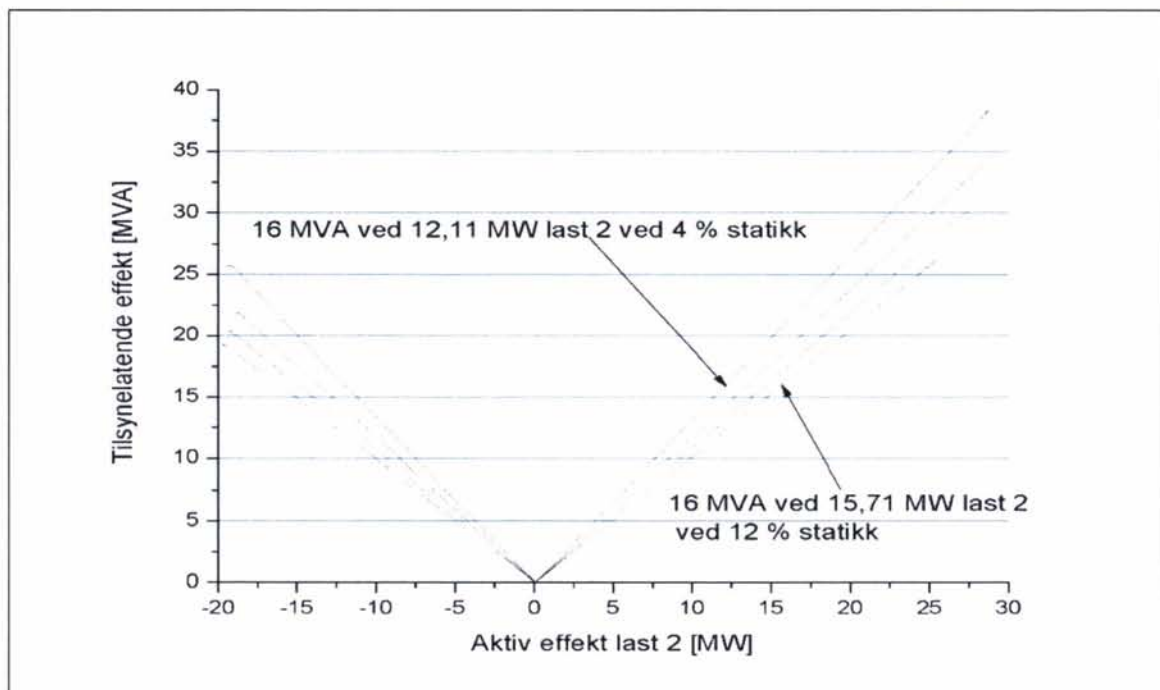
lasttrekk ved stasjonen uten å overbelaste den. Banestrømforsyningen er så sterk at selv med 2/3 belastning av stasjonens totale ytelse er spenningen over 14 kV, se Figur 2-113. Figur 2-114 viser at statikken får liten betydning for tapene når det trekkes reaktiv effekt.



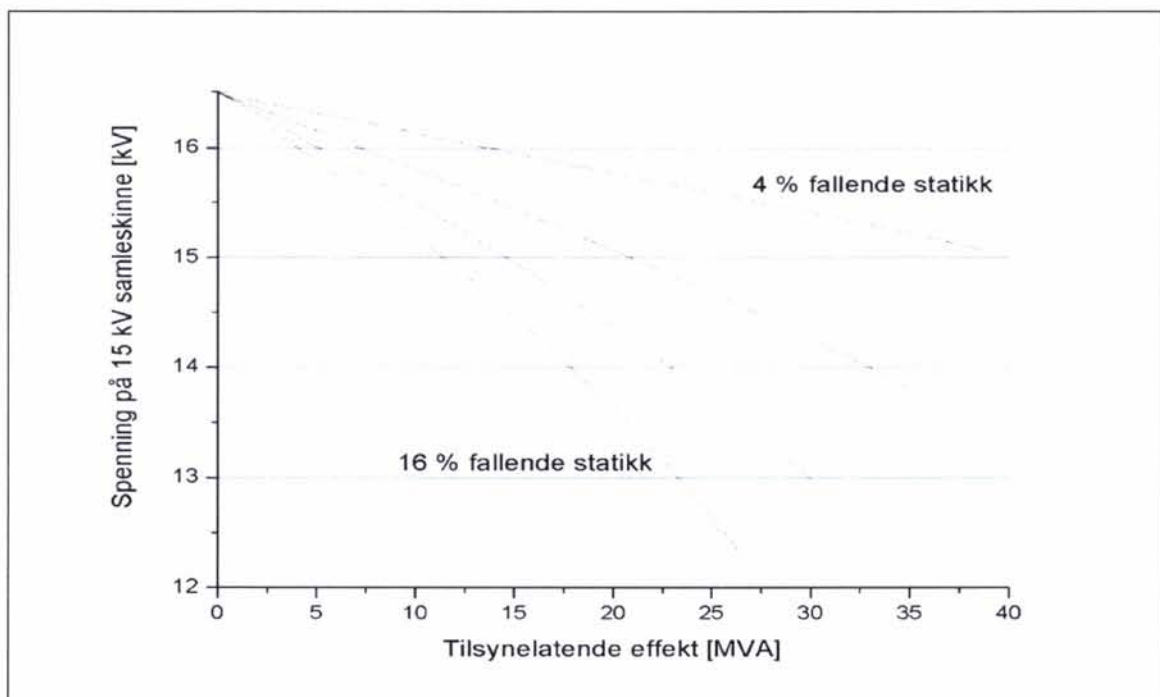
Figur 2-110 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 2 for aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-111 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

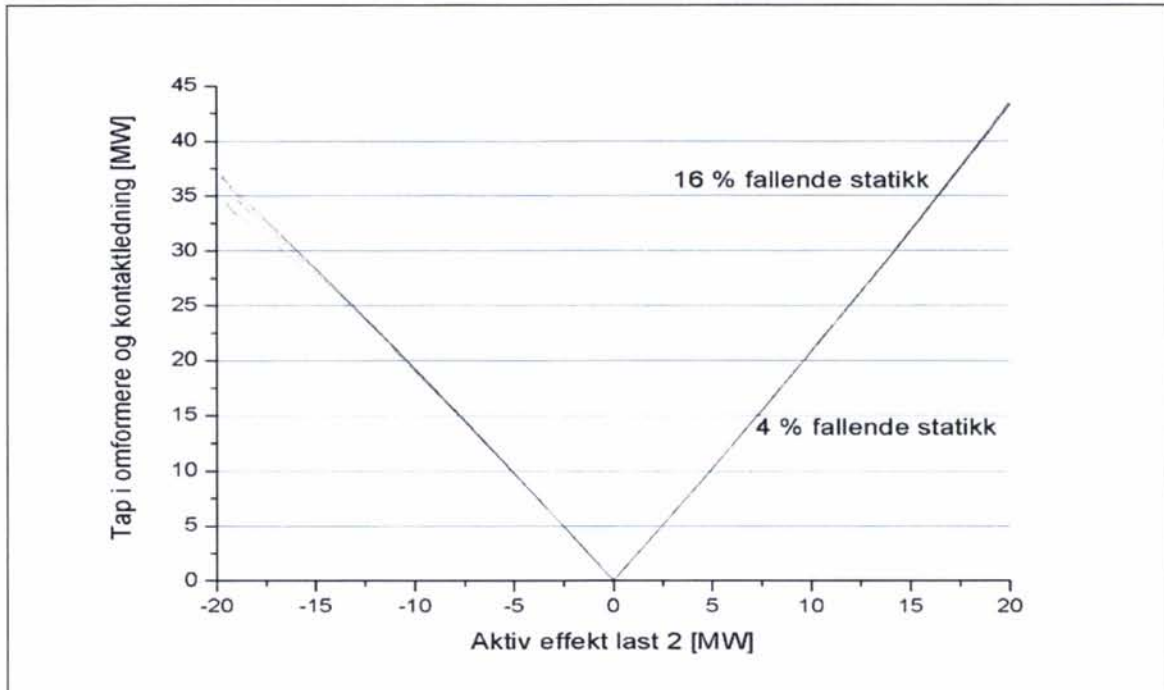


Figur 2-112 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-113 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.





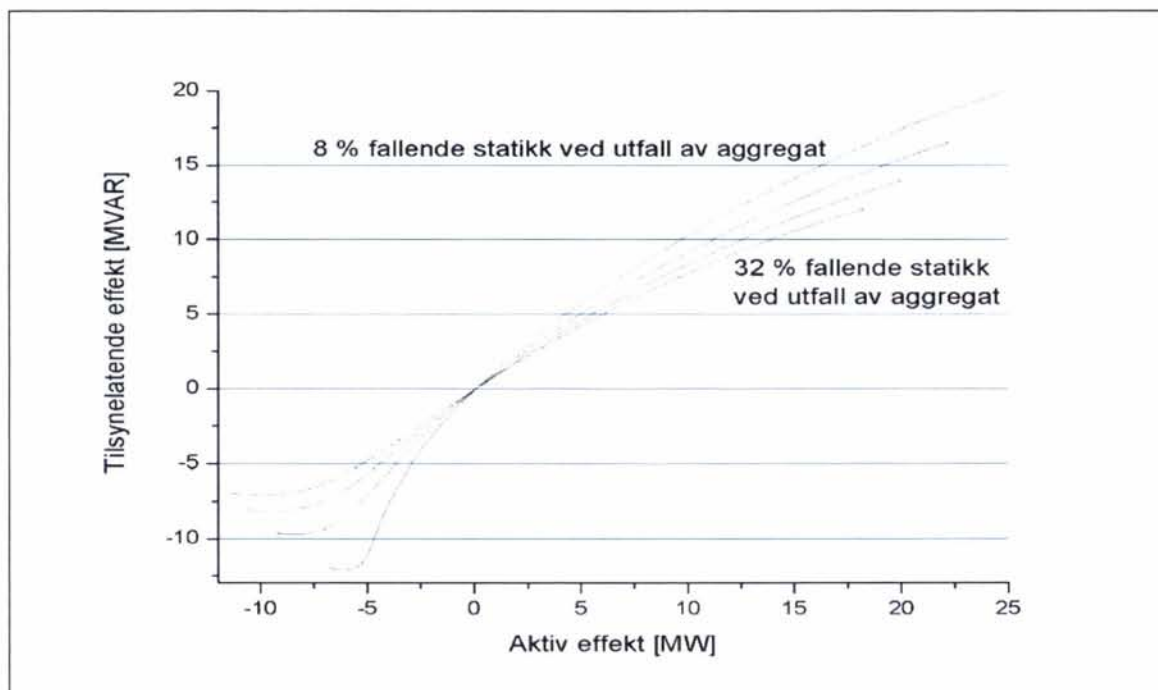
Figur 2-114 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til last 2. Tomgangstapene er ikke inkludert.

## 2.8.2 Undersøkelse av utfall av aggregat med lasten rett ved omformerstasjonen

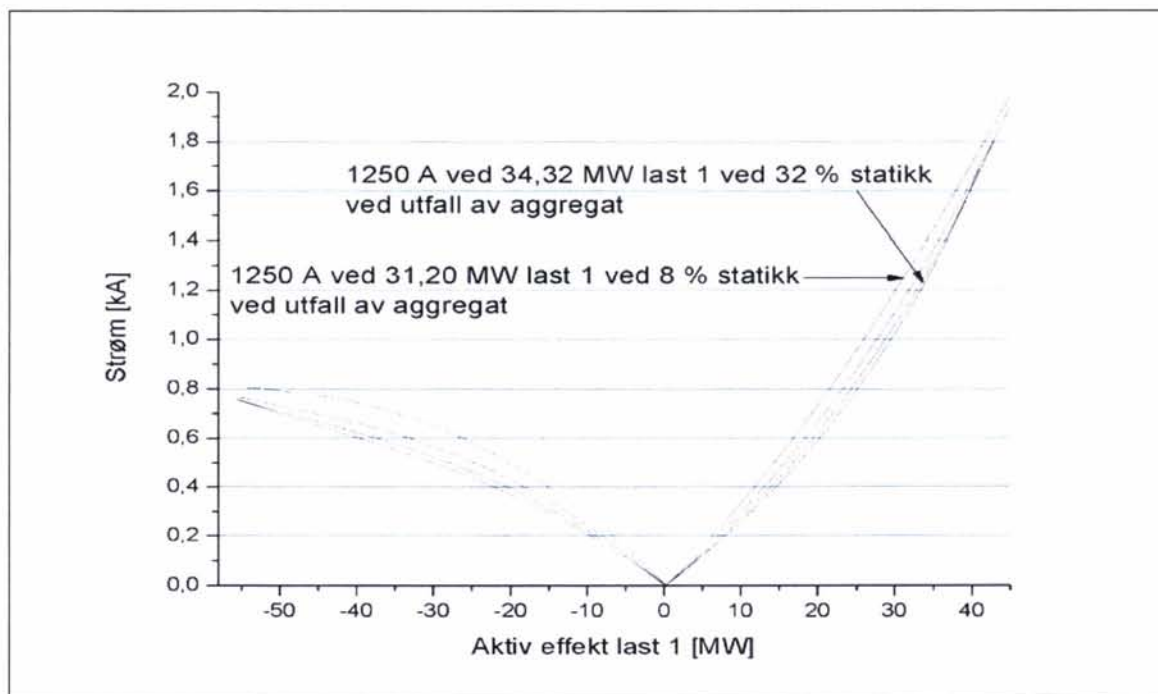
### 2.8.2.1 Last 1 - Aktiv belastning

Igen ser en at med stor fallende statikk får dette stor betydning for å redusere den reaktive effektproduksjonen og øke tillat last ved omformerstasjonen, se Figur 2-115, Figur 2-116 og Figur 2-117. Av Figur 2-118 ser en at spenningen selv med stor statikk påvirkes lite ved utfall. Med en produksjon på 16 MVA (100 % for gjenværende aggregaters 6-minuttersverdi) i stasjonen ser en at selv med 16 % (i normal drift) statikk er spenningen ikke lavere enn ca 14,1 kV. Dette er bare ca 900 V lavere enn i tilfellet med normal drift. Med en så liten endring av spenningen ved stasjonen vil neppe utfall få særlig betydning for spenningen ute på matestrekningen.

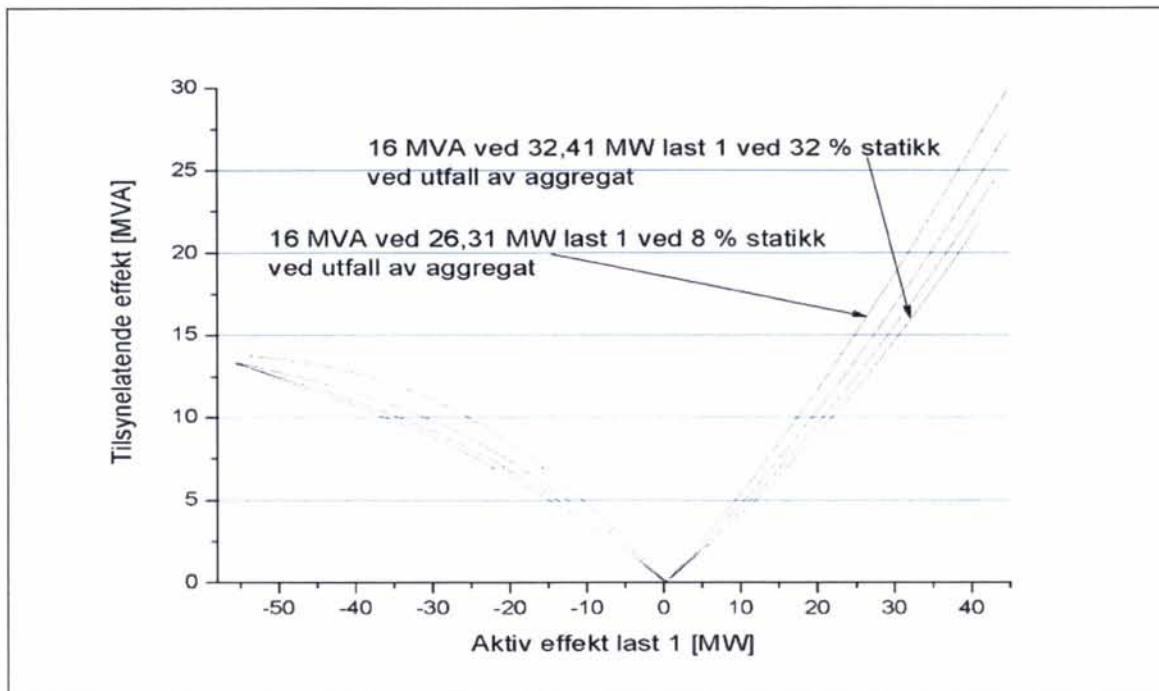
Tabell 2-5 og Tabell 2-6 viser høyeste prosentvise belastning av stasjonen før utfall med henholdsvis 2-sekunders strøm og 6-minutters effekt. Verdien av aktiv belastning som lasten trekker når høyeste akseptable verdi for 2-sekunders strøm og 6-minutters effekt som ett aggregat kan levere er funnet ved utfall i stasjon B. Strøm og effekt er deretter funnet ved tilsvarende aktiv last ved stasjonen i normal drift funnet og prosentverdien av stasjonens ytelse regnet ut. Som en ser er det en belastningsgrad noe over 66 % som kan tillates, endog helt opp mot 75 % for 6-minutters verdi av effekten ved 16 % statikk.



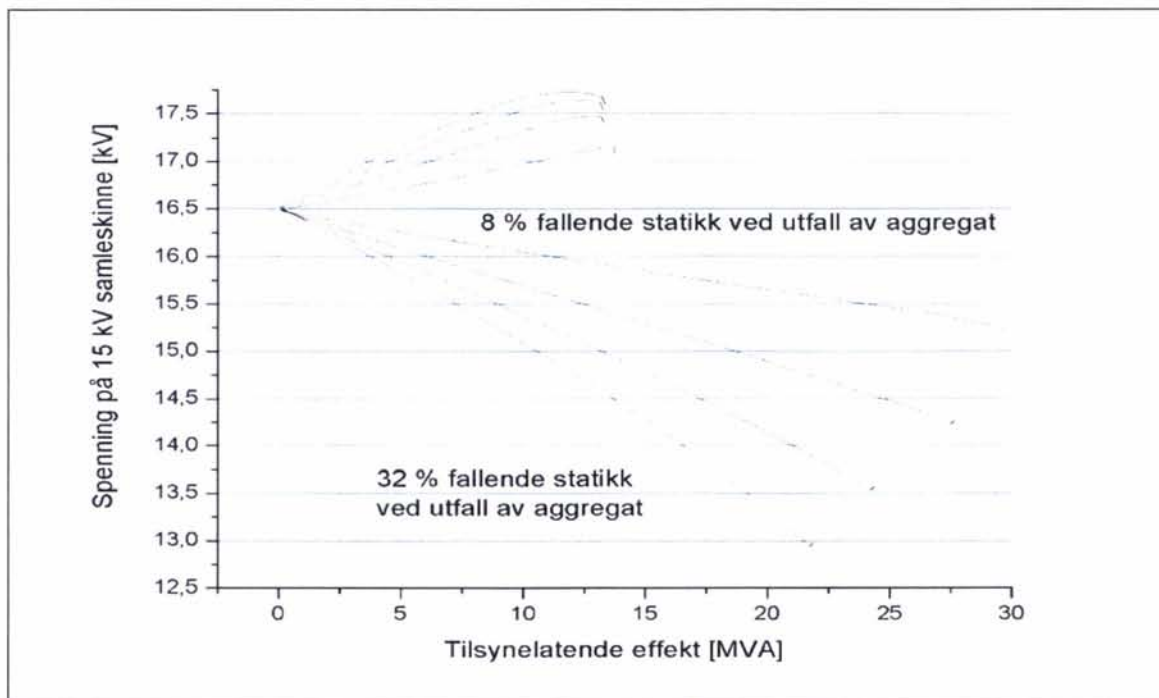
Figur 2-115 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 1 for aggregater på 3 x 7,0 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-116 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-117 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-118 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

**Tabell 2-5** Undersøkelse av høyeste mulig belastningsgrad av omformerstasjonen før utfall av aggregat. Skal redundans (n-1 kriterium) være oppfylt må belastningen ved utfall ikke være større en høyeste 2-sekunders verdi av strømmen til gjenværende aggregat. Undersøkelse med kun aktiv belastning ved stasjonen.

Statikk normal og utfall	Effekt til last 1 når 1250 A 2-sekunders verdi for strøm oppnås ved utfall [MW]	Tilsvarende belastning av stasjonen i normal drift med denne lasten ved stasjonen [A]	Belastning i forhold til stasjonsytelse 3 x 625 A [%]
4 og 8 %	31,20	1279	68
8 og 16 %	32,85	1293	69
12 og 24 %	33,73	1308	70
16 og 32 %	34,32	1310	70

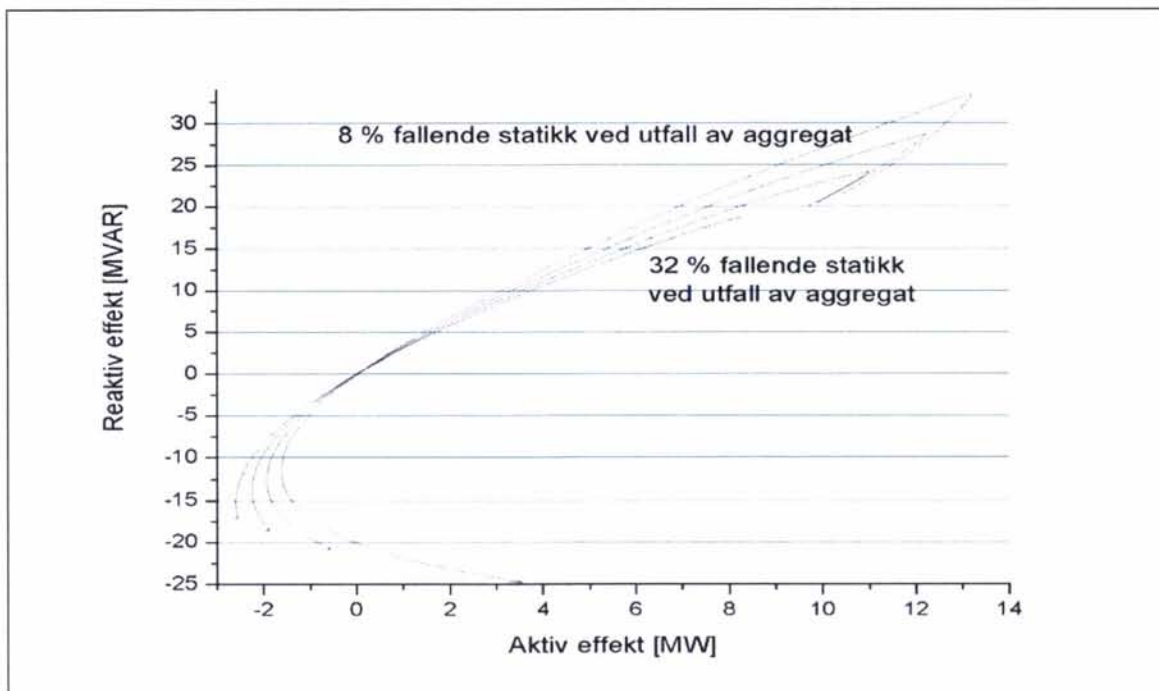
**Tabell 2-6** Undersøkelse av høyeste mulig belastningsgrad av omformerstasjonen før utfall av aggregat. Skal redundans (n-1 kriterium) være oppfylt må belastningen ved utfall ikke være større en høyeste 6-minutters verdi av effekten til gjenværende aggregat. Undersøkelse med kun aktiv belastning ved stasjonen.

Statikk Normal og utfall	Effekt til last 1 når 16 MVA 6-minutters verdi for effekt oppnås ved utfall [MW]	Tilsvarende belastning av stasjonen i normal drift med denne lasten [MVA]	Belastning i forhold til stasjonsytelse 3 x 8 MVA [%]
4 og 8 %	26,31	17,91	74
8 og 16 %	28,79	17,38	72
12 og 24 %	30,54	17,54	73
16 og 32 %	32,41	18,08	75

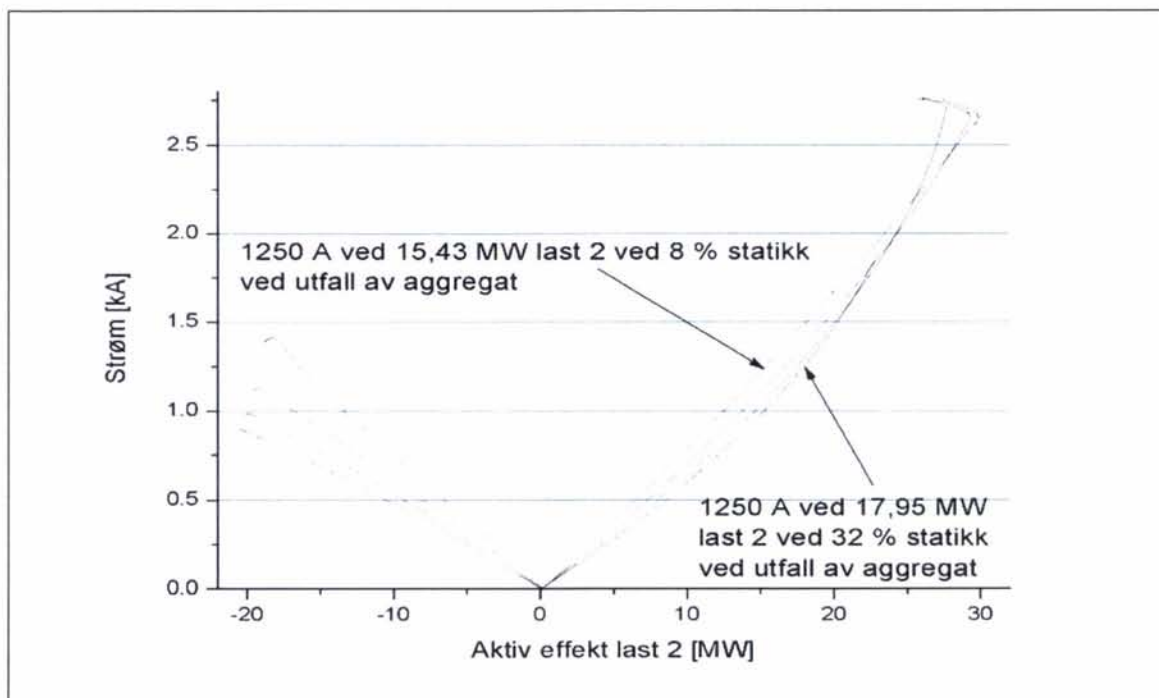
### 2.8.2.2 Last 2 - Aktiv og reaktiv belastning

Igen ser en at med stor fallende statikk får dette stor betydning for å redusere den reaktive effektproduksjonen og øke tillatt last ved omformerstasjonen, se Figur 2-119, Figur 2-120 og Figur 2-121. Med en fallende statikk på 16 % i normal drift blir spenningen ved stasjon B omentrent 13 kV ved en belastning der stasjonen belastes 2/3 av sin innsatte ytelse. Dette er ca 1 kV lavere enn ved normal drift.

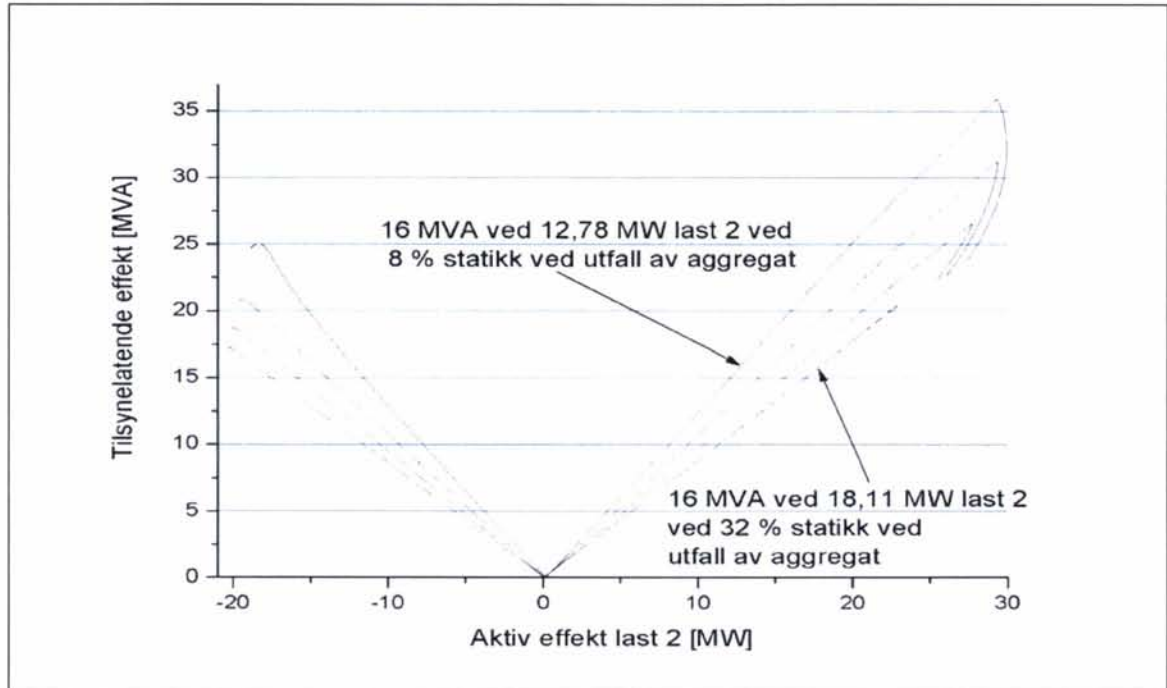
Tabell 2-7 og Tabell 2-8 viser høyeste prosentvise belastning av stasjonen før utfall med henholdsvis 2-sekunders strøm og 6-minutters effekt. Som for tilfellet med kun aktiv effekttopptak ser det ut til at en belastningsgrad over 66 % før utfall kan tåles, faktisk helt opp mot 77 %.



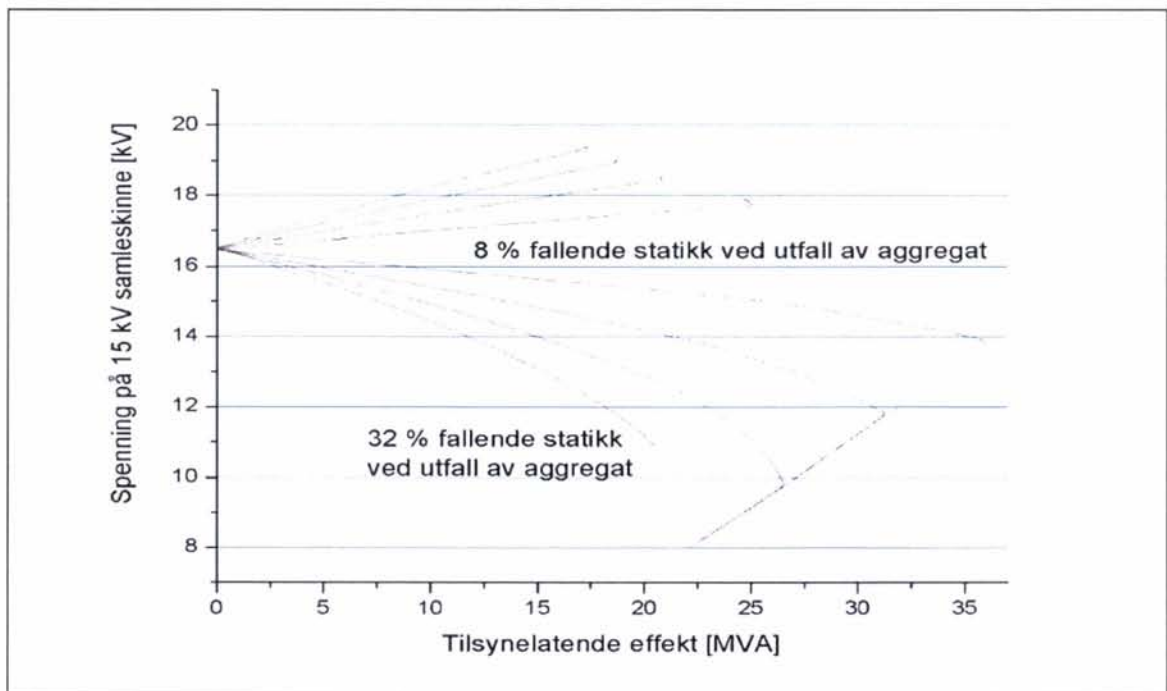
Figur 2-119 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon B ved økende aktiv belastning som for last 2 for aggregater på 3 x 7,0 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-120 Strøm levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-121 Effekt levert fra omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-122 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

**Tabell 2-7 Undersøkelse av høyeste mulig belastningsgrad av omformerstasjonen før utfall av aggregat. Skal redundans (n-1 kriterium) være oppfylt må belastningen ved utfall ikke være større en høyeste 2-sekunders verdi av strømmen til gjenværende aggregat. Undersøkelse med aktiv belastning og  $\cos \varphi = 0,7$  ved stasjonen.**

Statikk normal og utfall	Effekt til last 2 når 1250 A 2-sekunders verdi for strøm oppnåes ved utfall [MW]	Tilsvarende belastning av stasjonen i normal drift med denne lasten ved stasjonen [A]	Belastning i forhold til stasjonsytelse 3 x 625 A [%]
4 og 8 %	15,43	1328	71
8 og 16 %	16,65	1311	70
12 og 24 %	17,42	1315	70
16 og 32 %	17,95	1310	70

**Tabell 2-8 Undersøkelse av høyeste mulig belastningsgrad av omformerstasjonen før utfall av aggregat. Skal redundans (n-1 kriterium) være oppfylt må belastningen ved utfall ikke være større en høyeste 6-minutters verdi av effekten til gjenværende aggregat. Undersøkelse med aktiv belastning og  $\cos \varphi = 0,7$  ved stasjonen.**

Statikk Normal og utfall	Effekt til last 2 når 16 MVA 6-minutters verdi for effekt oppnåes ved utfall [MW]	Tilsvarende belastning av stasjonen i normal drift med denne lasten [MVA]	Belastning i forhold til stasjonsytelse 3 x 8 MVA [%]
4 og 8 %	12,78	16,96	71
8 og 16 %	14,93	17,70	74
12 og 24 %	16,66	18,17	76
16 og 32 %	18,11	18,48	77

### 2.8.3 Undersøkelse av normal driftsituasjon med lasten ute på matestrekingen

De samme forhold som er beskrevet i innledningen til avsnitt 2.2.3 skal undersøkes her. For modellen som er benyttet for AT-system med seksjonert kontaktledning er modellen ikke så avansert at spenningsfallet i kontaktledningen er inkludert. Som forklart i [6] og [7] kan spenningsfallet komme ned mot 700 V ekstra for et strømuttak på 1000 A. Altså kan en legge til en ekstra usikkerhet mellom 0 og 700 V alt etter hvor stor strøm togene trekker.

Undersøkelsene i appendiks A viser antallet tog og plassering som gir lavest spenning, dette er benyttet her.

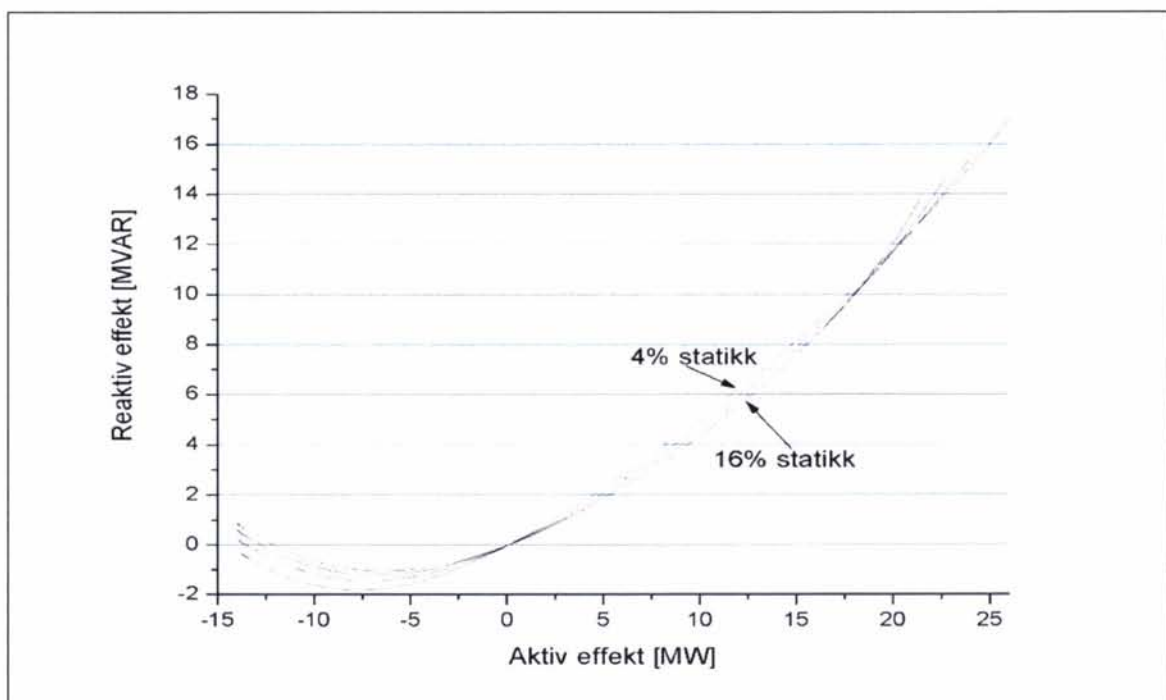
#### 2.8.3.1 Last 1 - Aktiv belastning

I denne simuleringen er det gjort undersøkelser med hele fem tog med 10 km mellom hvert av dem. Togene er plassert symmetrisk om midten av matestrekingen. Om togene kan tillates å trekke full effekt samtidig vil det i sum bli 62,5 MW. Nedenfor viser Figur 2-123 at statikken får en del å si for redusert effekttopptak i området 0 til ca 18 MW, og da spesielt i området 5 til 15 MW. Av Figur 2-124 og Figur 2-125 for henholdsvis strøm og effekt ser en at 2-sekunders og 6-minutters belastning kan økes med omentrent 2 til 3 MW om statikken velges til 16 % istedenfor 4 %.

Når det gjelder spenning viser Figur 2-126 en typisk nesekurve for kraftsystemets overføringsevne. Alt etter valg av statikk kan det maksimalt overføres mellom ca 43 og 53 MW, imidlertid vil så stort uttak føre til altfor lav spenning. Ifølge regelverkets krav (JD 546) ved prosjektering skal ikke den kortvarige spenningen bli lavere enn 13,0 kV. Med usikkerheten på opptil 700 V trukket fra, kan en ikke ta ut effekt slik at spenningen kommer under 14,3 kV. Med 16 % statikk kan en da ta ut 23,6 MW, med 12 % blir det 25,3, med 8 % 26,4 og med 4 % kan en ta ut 28,7 MW. Spennet kan altså bli ganske stort og lavest statikk gir hele 5 MW mer utagbar effekt, noe som ikke er uvesentlig. En legger også merke til at effekt på 28,7 eller rundt 30 MW kan trekkes ut uten at omformerstasjonene belastes for mye i forhold til et redundanskriterium på 66 %. Dette i motsetning til omformerstasjoner med 2 x 5,8 MW og konvensjonelt kl-system der overbelastning vil skje der kraftsystemets kapasitetsgrense overskrides.

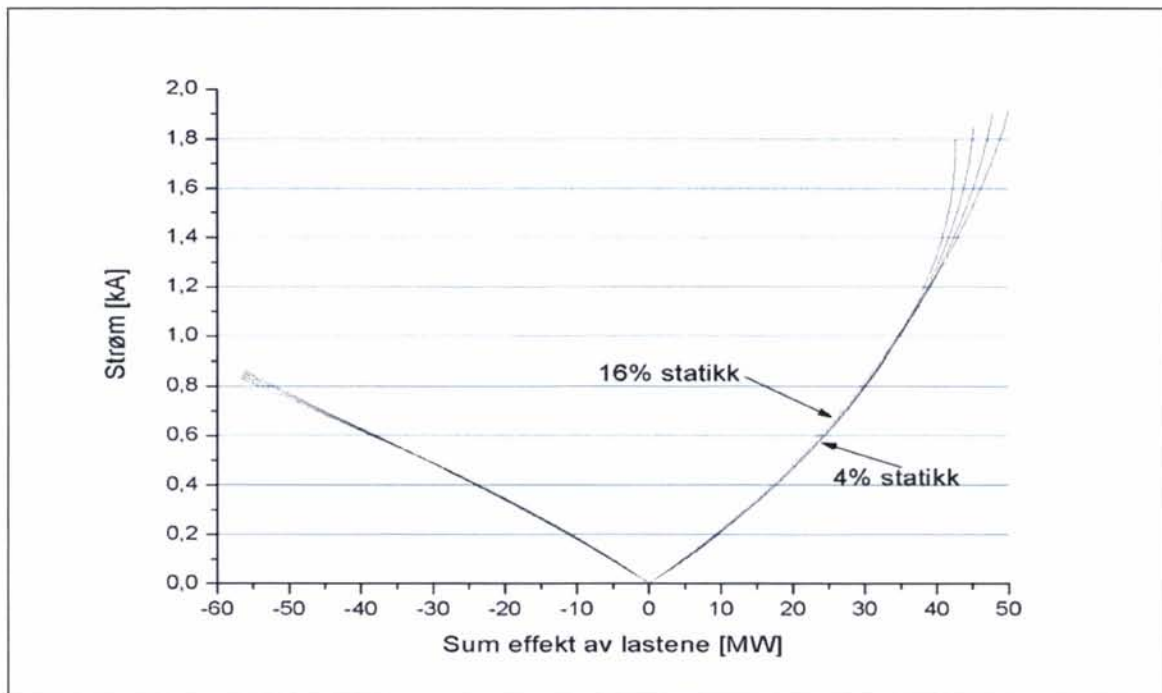
Det gunstige med en litt stor statikk kan være at en får harmonisert forholdet mellom kraftsystemets overføringsevne og overbelastningsgrensen for omformerstasjonen. Benyttes 66 % som redundanskrav kan det maksimalt trekkes ut omtrent 40 MW før 2-sekunders og 6-minutters grense overskrides. Når så stor effekt trekkes ut vil spenningen ute på matestrekningen bli omtrent 9,0 kV. Lenge før spenningen blir så lav vil effekten reduseres kraftig dermed unngår man overbelastning. Med 4 % statikk vil spenningen bare bli redusert ned til omtrent 13 kV (for toget med lavest spenning, i tillegg kommer kontaktledningens spenningsfall) og togene vil sannsynligvis ikke redusere effektopptaket så mye at det garantert ikke oppstår overbelastning. På den annen side gjelder dette kun med tog ute på linjen, når togene er nærmere omformerstasjonene kan overbelastning lett skje.

Figur 2-127 viser at tapene kan reduseres mye med stor fallende statikk når belastningen er over ca 30 MW. Med en belastning under 30 MW har statikken mindre betydning.

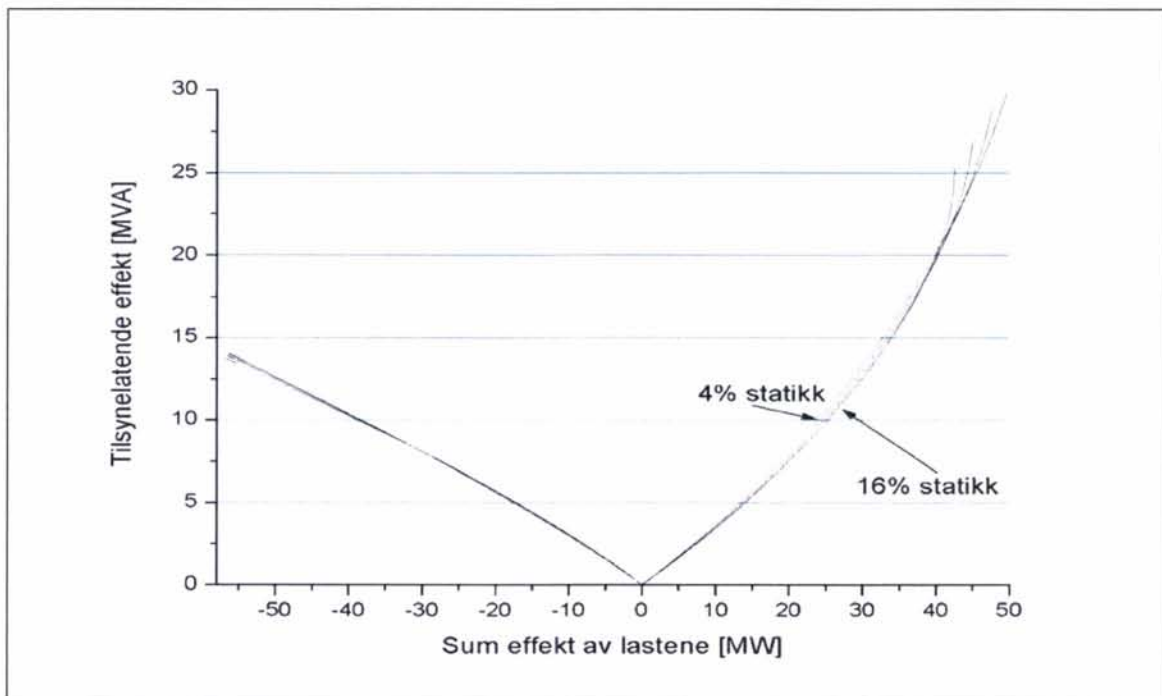


**Figur 2-123 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon A ved økende aktiv belastning som for last 1 for aggregater på 3 x 7,0 MVA i alle omformerstasjonene.**

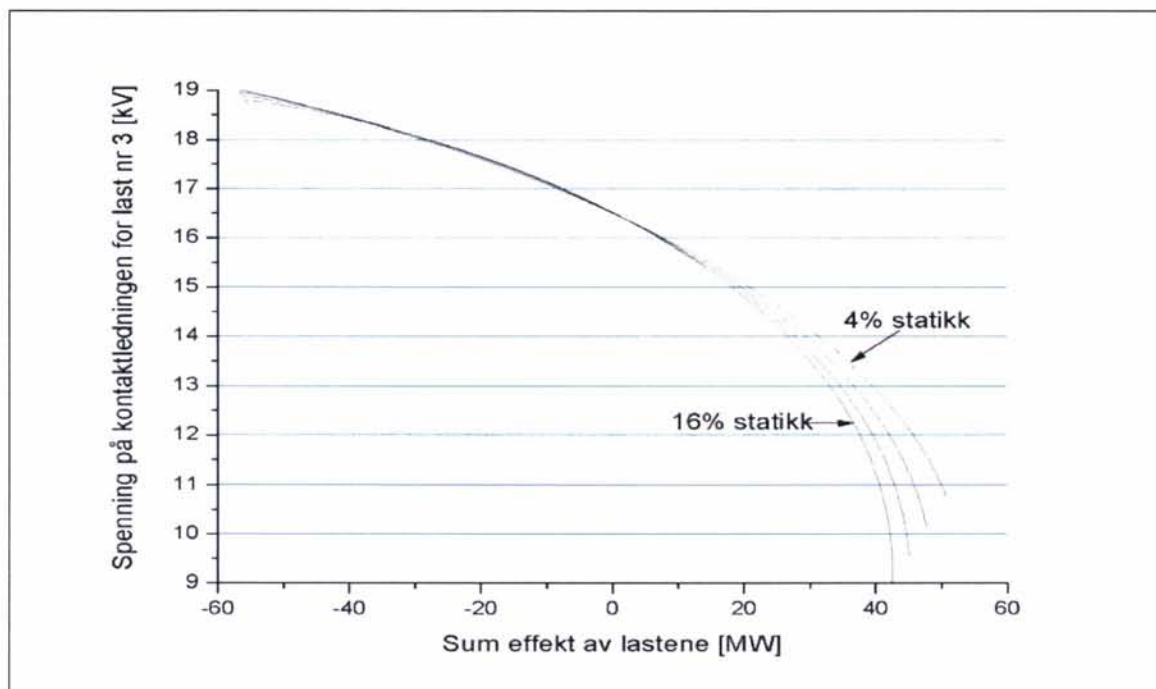




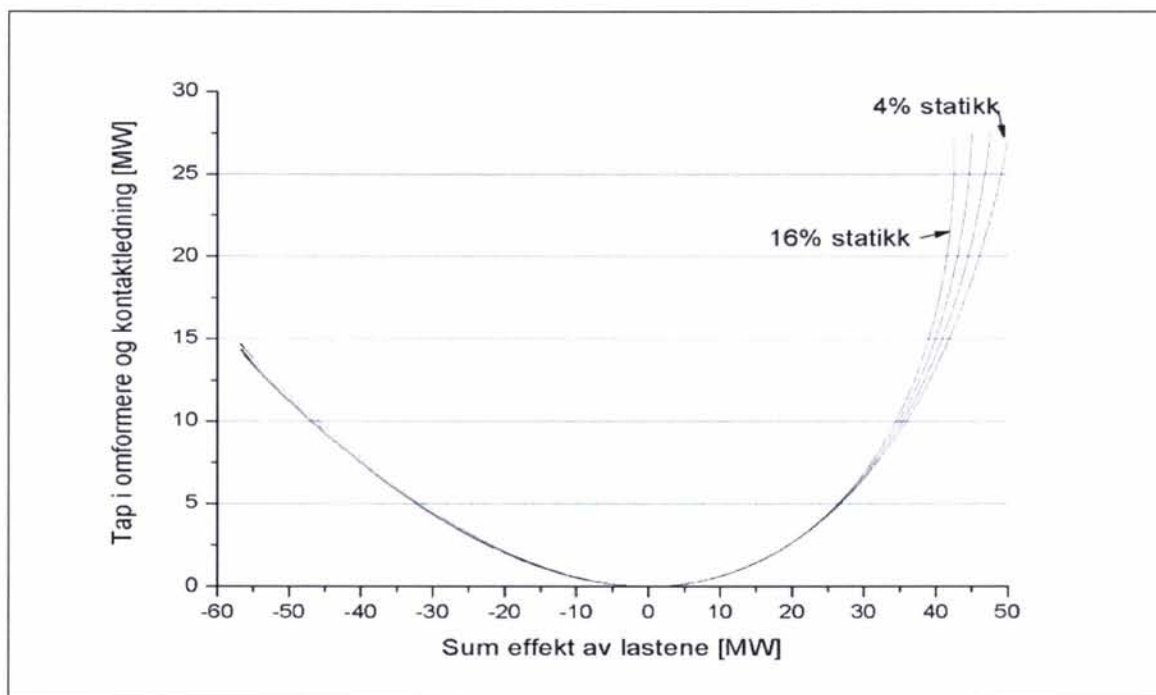
Figur 2-124 Strøm levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-125 Effekt levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-126 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 1 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.

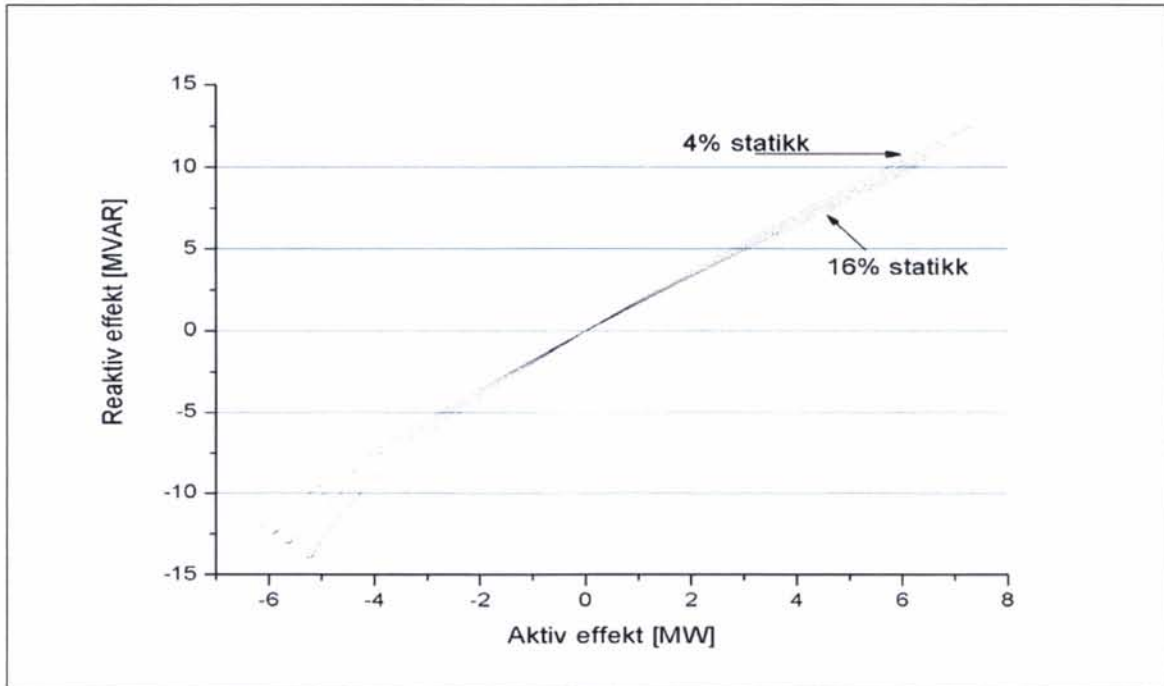


Figur 2-127 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til last 1. Tomgangstapene er ikke inkludert.

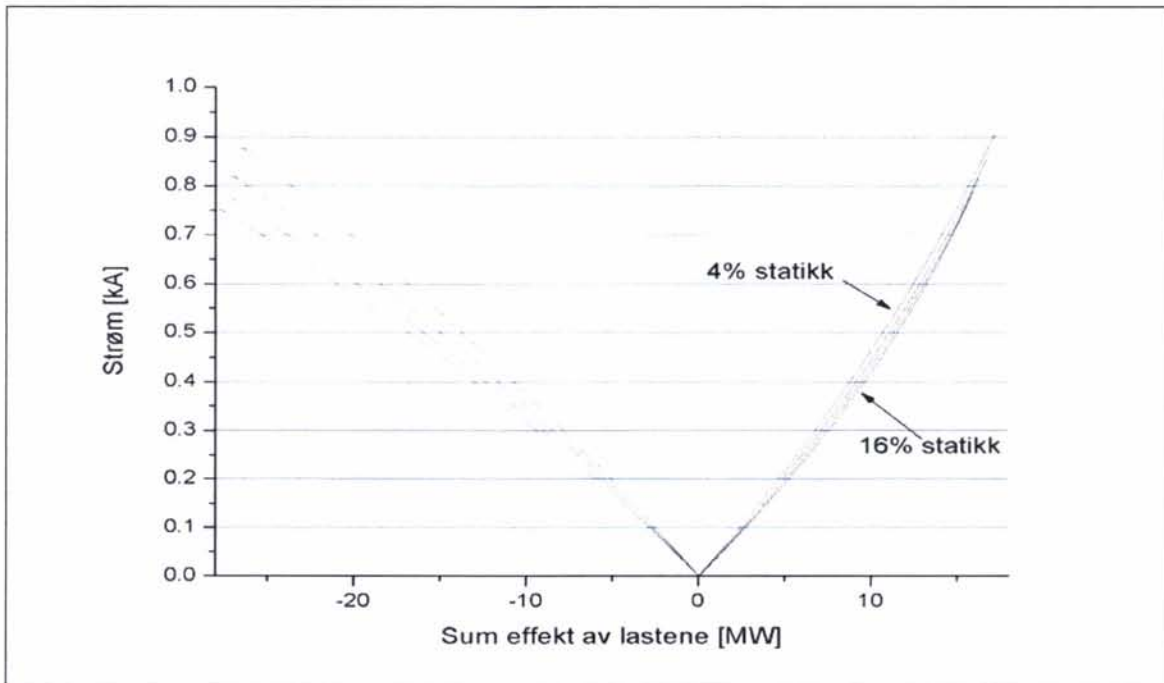
### 2.8.3.2 Last 2 - Aktiv og reaktiv belastning

Enda en gang ser en at med stor fallende statikk får dette stor betydning for å redusere den reaktive effektproduksjonen og øke tillat last ved omformerstasjonen, se Figur 2-128, Figur

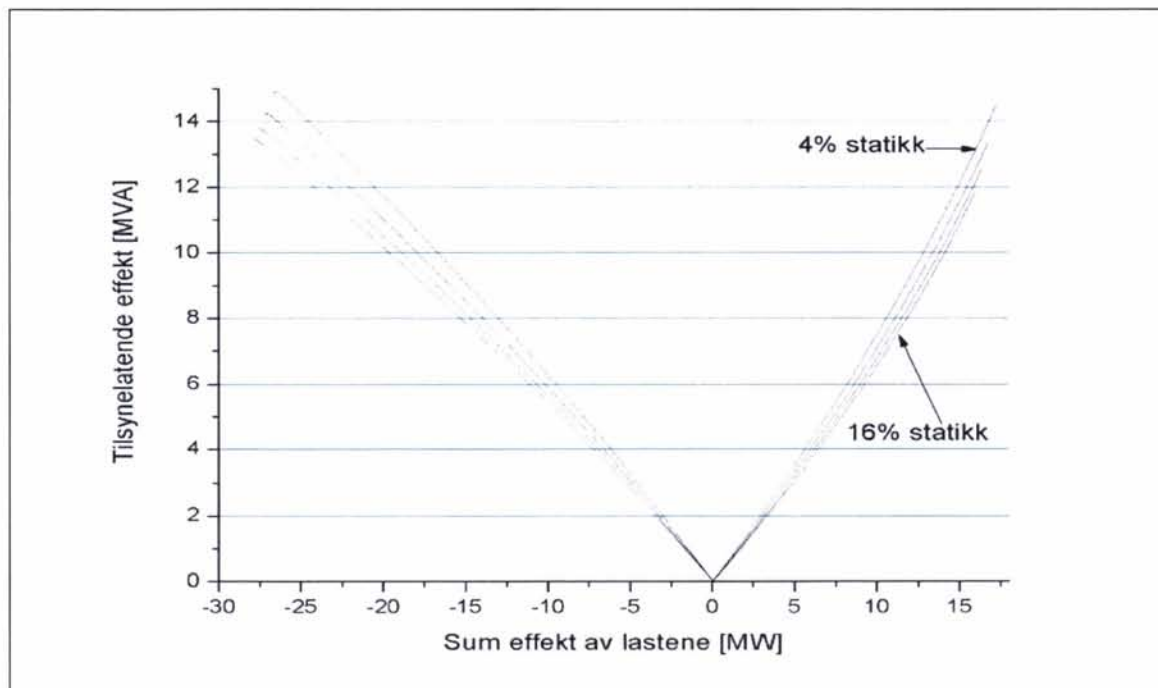
2-129 og Figur 2-130. Spenningen i Figur 2-131 viser at stor statikk får spenningen til å falle mye. Liten statikk ser ut til å være gunstigst. Figur 2-132 viser tapene, som reduseres ved stor statikk og økende last.



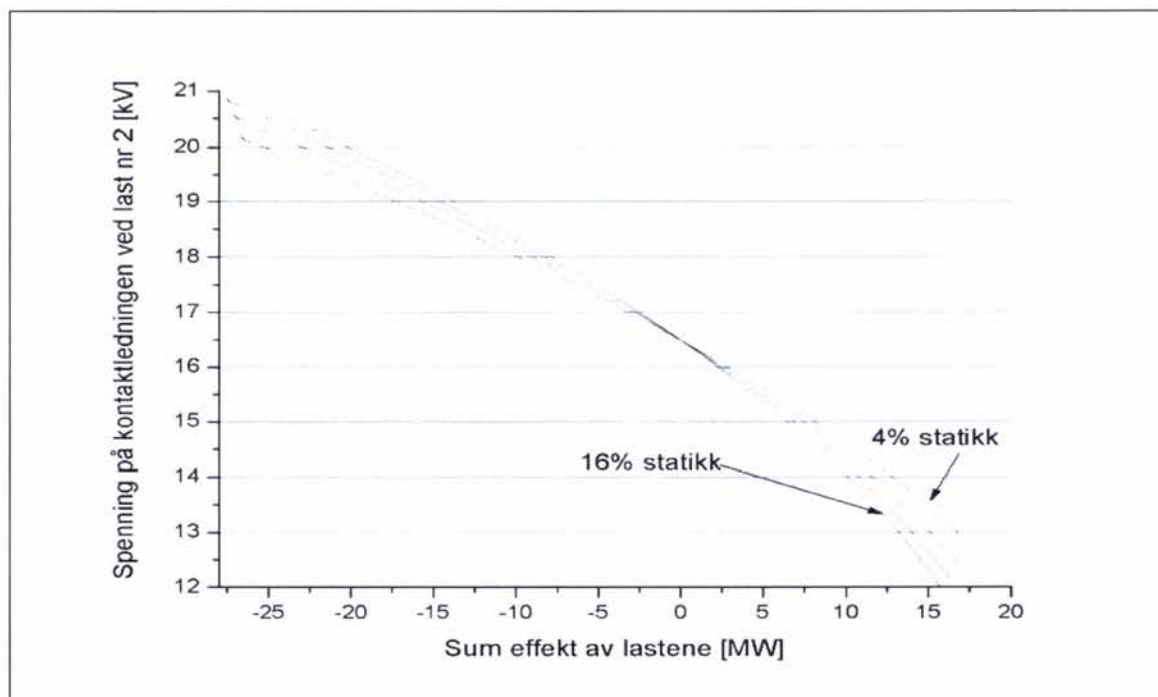
Figur 2-128 Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt ved omformerstasjon A ved økende aktiv belastning som for last 2 for aggregater på 3 x 7,0 MVA i alle omformerstasjonene.



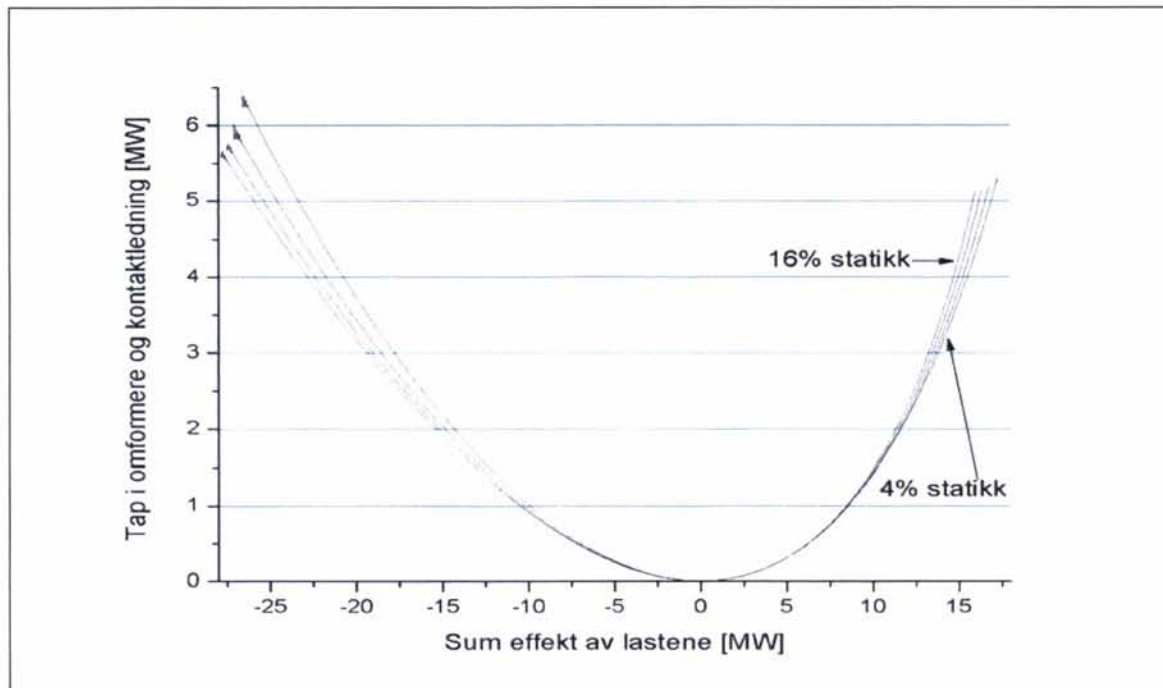
Figur 2-129 Strøm levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-130 Effekt levert fra omformerstasjon A som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-131 Spenningen ved omformerstasjon B som funksjon av effekt til last 2 ved økende aktiv belastning med aggregater på 3 x 5,8 MVA i alle omformerstasjonene.



Figur 2-132 Tapene i omformere og kontaktledning som funksjon av effekten til last 2. Tomgangstapene er ikke inkludert.

#### 2.8.4 Oppsummering etter undersøkelse med 120 km mellom omformerstasjonene og AT-system

Etter å ha gjort undersøkelser med laster som trekker effekt under forskjellige forhold har en kommet frem til følgene som raskt oppsummeres her:

- I normal drift med alle aggregater inne og lasten rett utenfor stasjonen
  - Med belastning rett utenfor stasjonen vil stor fallende statikk medføre at den reaktive effektflyten minsker og lasten ved stasjonen kan være meget stor uten at overbelastning skjer. En statikk på hele 16 % kan være gunstig for å unngå mye reaktiv belastning på omformerstasjonen. Riktignok blir spenningen noe lav, men selv for belastning opp til 2/3 av stasjonens ytelse blir ikke spenningen lavere enn 15,0 kV.
  - Lasten ved stasjonen kan være 30,65 MW ved 4 % statikk, og med 16 % statikk kan lasten økes til 33,38 MW. Dette med et redundanskrav på 67 %.
  - Med last som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  er det heller ikke noe problem med en statikk så lav som 16 %.
- Ved utfall av ett aggregat og belastningen rett utenfor omformerstasjonen
  - Med utfall av ett av tre aggregater går spenningen ikke mye ned når produksjonen kommer opp mot 100 % for gjenværende aggregater selv om statikken velges til 16 %. Spenningen blir i dette tilfellet 14,1 kV.
  - Med en last som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  blir spenningen heller ikke spesielt lav ved utfall og 16 % statikk.
  - For begge tilfeller gir stor fallende statikk fordelene med mindre reaktiv effektproduksjon og større mulighet for belastning med aktiv effekt for

stasjonene. Økningen er på 10 % for aktiv belastning og 16 % for effekt med  $\cos \varphi = 0,7$ .

- Det ser ut til at redundanskrevet på 66 % er konservativt og at dette kan justeres opp til et tall mellom 68 og 77 %.
- I normal drift med laster (tog) ute på matestrekningen
  - Med aktiv belastning fordelt på flere laster ute på matestrekningen kan en med 4 % statikk tillate en last på 28,7 MW og med 16 % en reduksjon til 23,6 MW. Dette med laveste tillatte spenning for prosjektering av nye anlegg som grense. Denne grensen er kortvarig 13,0 kV.
  - Ved belastninger som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  ser en igjen at liten statikk er gunstigst om en ønsker best mulig spenning ved stort effektuttak.
  - For begge belastningstilfeller ser en at lav statikk gir fordeler med redusert reaktiv effektproduksjon og større muligheter til å takle store belastninger ute på linjen.

Med en statikk på 4 % ser det ut til at en kan tillate omtrent samme belastning midt på matestrekningen som rett ved en omformerstasjon, altså ca 30 MW. Dette når en tar hensyn til laveste spenning (krav som ved prosjektering) og i tillegg belastningsgrad og redundanskrev. Det som gjør dette noe mer komplisert er at togene ved lav spenning reduserer effektopptaket en del og at spenningen derfor ikke blir så lav som undersøkelsene her viser. At togene reduserer effektopptaket får betydning for trekkraften, men undersøkelser har vist at dette ikke får særlig stor betydning for kjøretiden, se for eksempel [4].

Siden økning av belastningsgraden må tillegges større vekt for å unngå overbelastning av aggregatene vil det nok være bedre å velge en høy statikk og enn den lave som gir tilfredsstillende spenning. En statikk på enten 12 % eller 16 % anses som det beste for banestrømforsyning med AT-system.

### 3 TRAFIKKSIMULERING

For å undersøke om en endring av spenningsregulatorenes statikk vil ha den ønskede effekten i en reell trafikk situasjon er det her utført en trafikk simulering med dagens banestrømforsyning på Dovrebanen. Det er benyttet ruteplan R151.2, med alle tog som den gang kjørte. Inn og utkobling av aggregater skjer etter en timeplan og er fastsatt slik som Bane Energi kjørte aggregatene sine da denne ruteplanen var i bruk. For ytterligere detaljer henvises det til [2]. Simuleringen er gjort for et helt døgn og det er utført simuleringer både for 0 % statikk og 12 %. I evalueringer av resultatene legges regelverket JD 546 til grunn for spenninger og belastning av omformerne. Det inkluderes en margin på 5 % for overbelastning og 10 % for endringer som kan forventes å komme. Dermed skal ikke omformerstasjonene belastes mer enn 42,75 % når begge aggregatene er i drift. Uten marginer tillagt er grensen 50 %. For Rudshøgda og Otta med bare ett aggregat er grensen 85 %.

#### 3.1 Simuleringer med tog på Dovrebanen med EI14 og EI16 lokomotiver og normal driftsituasjon

I simuleringene med 0 % statikk har Rudshøgda og Otta konstant spenning på 16,2 kV. For tilfellet med 12 % statikk har en valgt å la Rudshøgda og Otta ha en fallende statikk på hele 16 % og spenning ved tomgang 16,5 kV også her.

##### 3.1.1 Omformerbelastning

Nedenfor viser Tabell 3-1 maksimalbelastningen på samtlige omformerstasjoner når statikken endres fra 0 til 12 %. Som en ser blir forskjellen for Rudshøgda og Otta omformerstasjoner dramatisk påvirket, mens endringene for de øvrige er mer beskjedne. Selv om Rudshøgda og Otta belastes mye mindre er ikke maksimalbelastningen på nabostasjonene økt nevneverdig, noe som tyder på at toppbelastningene ikke er sammenfallende. Størst endring for de andre stasjonene oppstår for Tangen og Lundamo med 4 prosentpoeng for 2-sekundersverdien av strømmen. For Lundamo tilsvarende dette 11 % mindre strøm og for Tangen 7 % mer. De øvrige stasjonene har en reduksjon av sin høyeste belastning på mellom ett og tre prosentpoeng.

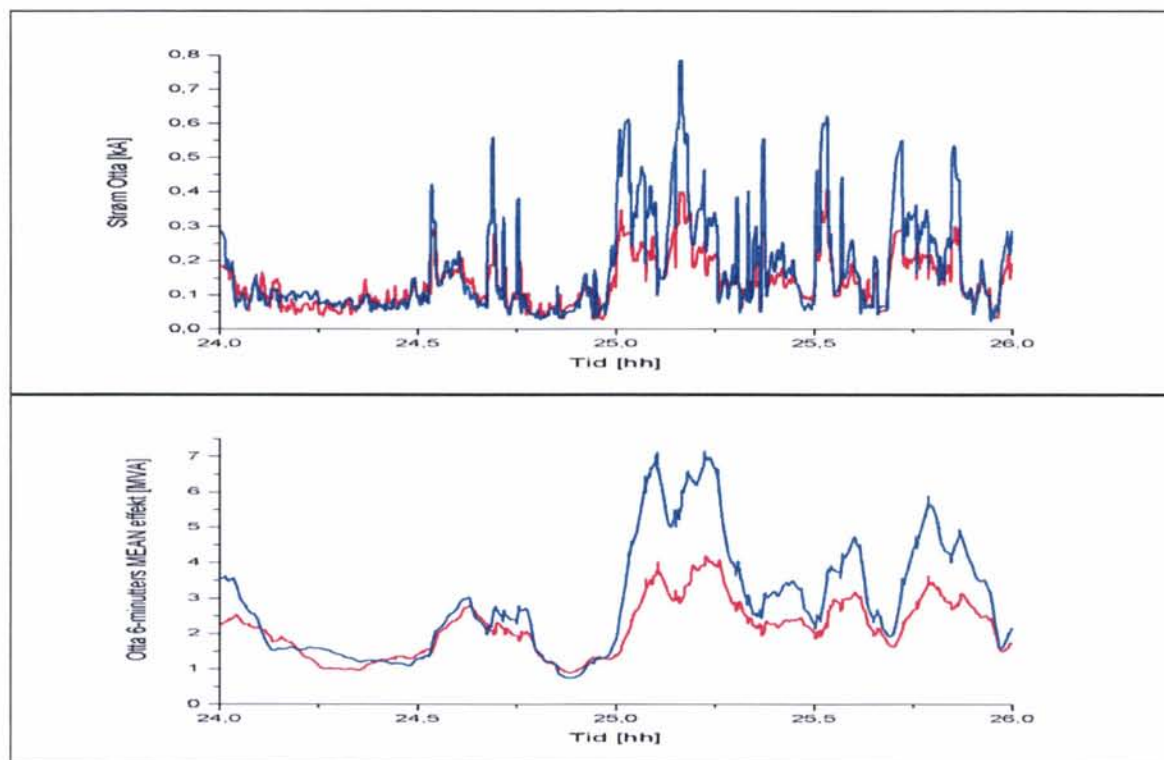
Som en ser er høyeste belastning over grensen på 42,75 % for veldig mange omformerstasjoner. Dette er en delvis klar over i dag, men på grunn av samfunnets store behov for trafikk samt tidligere underinvesteringer i infrastrukturen må en akseptere denne mangelen på marginer og redundans. Å skaffe de nødvendige omformeraggregatene vil være veldig vanskelig. Et annet moment er at moderne lokomotiver kan komme til å belaste omformerne mindre, se avsnitt 3.3.

Noen utvalgte omformerstasjoner er undersøkt spesielt og Figur 3-1 viser strømmen (øverst) og 6-minutters MEAN effekt (nederst) for Otta omformerstasjon mellom klokken 24:00 og 02:00 (26:00). Den blå kurven viser belastningen med 0 % statikk og rød med 16 % fallende statikk. Som en ser er forskjellen meget stor og det ser også ut til å være en klar tendens til at forskjellen er størst når belastningen også er størst. For Dombås og Oppdal ser det derimot ikke ut til å være store endringer, se Figur 3-2 og Figur 3-3.

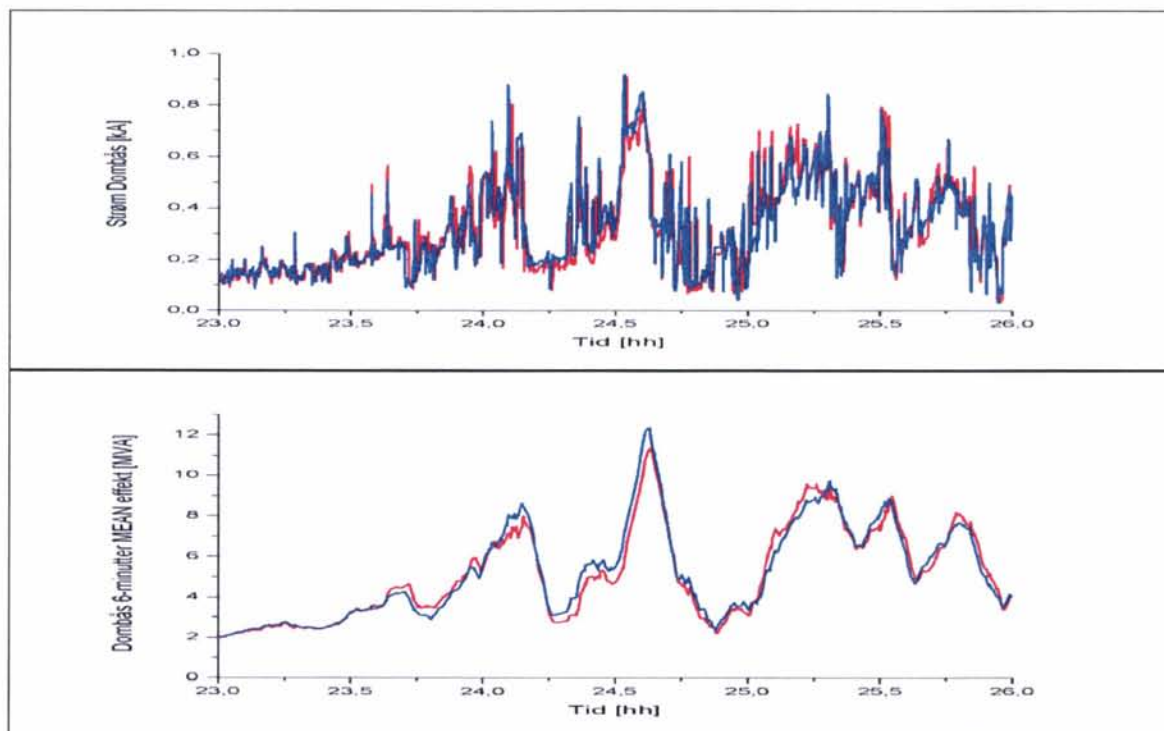
**Tabell 3-1** Maksimal belastning av omformerstasjonene med henholdsvis flat og fallende statikk. Uthevede tall betyr at belastningen sannsynligvis er for stor til å hindre utfall av det gjenværende aggregatet om ett faller ut. Rød betyr at overbelastning vil skje og svart at marginene er overskredet så mye at det er fare for tap av redundans. Simulering med E114 og EL16 lokomotiver for godstogene.

Omformer	Innsatt ytelse [MVA]	Statikk [%]	Strøm		Effekt			
			2 sek RMS		6 min MEAN		1 time MEAN	
			[kA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Tangen	2 x 7,0	0	0,885	54	7,747	35	5,364	38
		12	0,951	<b>58</b>	8,152	37	5,631	40
Rudshøgda	3,1	0	0,680	<b>151</b>	7,608	<b>159</b>	3,843	<b>124</b>
		16	0,421	93	4,225	88	2,693	87
Fåberg	2 x 5,8	0	0,671	53	6,736	42	4,096	35
		12	0,643	51	5,829	36	3,873	33
Fron	2 x 5,8	0	0,646	52	6,452	40	3,863	33
		12	0,624	50	5,707	36	3,847	33
Otta	3,1	0	0,785	<b>174</b>	7,148	<b>149</b>	4,285	<b>138</b>
		16	0,409	91	4,192	87	2,950	95
Dombås	2 x 7,0	0	0,920	<b>56</b>	12,351	<b>56</b>	7,388	53
		12	0,910	<b>55</b>	11,480	52	7,498	54
Oppdal	2 x 5,8	0	0,617	49	7,869	49	5,472	47
		12	0,570	46	7,206	45	5,199	44
Lundamo	2 x 7,0	0	0,586	36	5,388	24	3,770	27
		12	0,524	32	4,696	21	3,555	25
Stavne	7,5	0	0,511	-	4,587	-	2,375	-
		12	0,460	-	4,342	-	2,549	-

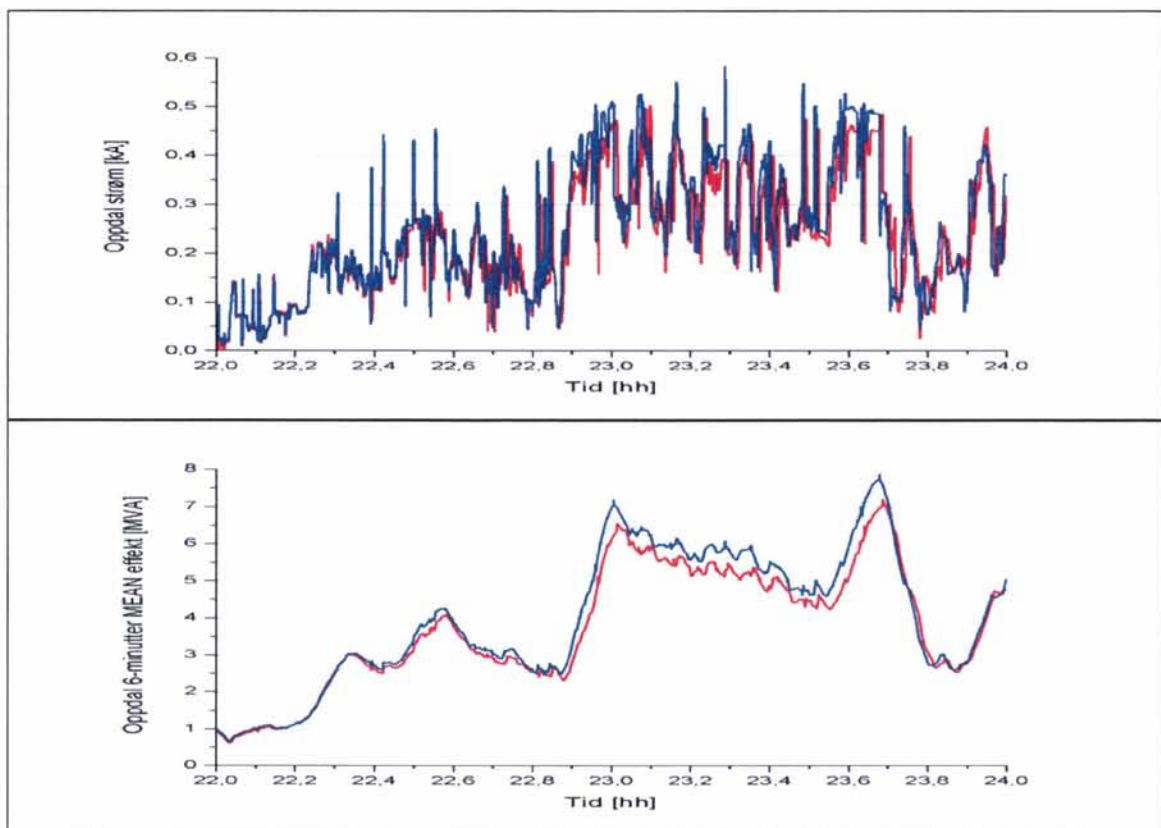




Figur 3-1 Belastning av Otta omformerstasjon med henholdsvis flat (blå kurve) og 16 % fallende statikk (rød kurve). 2-sekunders RMS verdi av strøm øverst og 6-minutters MEAN verdi av effekten nederst. Simulering med E114 og EL16 lokomotiver for godstogene.



Figur 3-2 Belastning av Dombås omformerstasjon med henholdsvis flat (blå kurve) og 12 % fallende statikk (rød kurve). 2-sekunders RMS verdi av strøm øverst og 6-minutters MEAN verdi av effekten nederst. Simulering med E114 og EL16 lokomotiver for godstogene.



**Figur 3-3** Belastning av Oppdal omformerstasjon med henholdsvis flat (blå kurve) og 12 % fallende statikk (rød kurve). 2-sekunders RMS verdi av strøm øverst og 6-minutters MEAN verdi av effekten nederst. Simulering med E114 og EL16 lokomotiver for godstogene.

### 3.1.2 Spenning for togene

Kun spenningen for godstogene er undersøkt da en regner det som sannsynlig at bare de tunge godstogene med kraftige lokomotiver blir mest berørt av eventuelt lavere spenning. I Tabell 3-2 kan en se at mange tog har lav spenning og at spenningen for samtlige tog blir enda noe lavere med fallende statikk. For noen tog er det snakk om ganske stort spenningsfall og for tog 5710, 5712 og 5724 er spenningen lavere enn 12,0 kV. Enda flere tog har spenninger som er lave i forhold til regelverket (JD546). En legger for øvrig merke til at de togene med veldig lav spenning alle går fra Trondheim til Oslo, og disse togene er undersøkt spesielt i Figur 3-4, - tog 5710, Figur 3-5 og Figur 3-6, - tog 5712 og Figur 3-7, - 5724. Det ser ut til at spenningen blir en del lavere med 12 % fallende statikk, men likevel ikke mer enn det som kan aksepteres, bortsett fra området ved Trondheim der spenningen blir lav. Dette er meget merkelig i og med at avstanden mellom de store omformerstasjonene Lundamo og Stavne er kort. At dette kortvarige spenningsfallet her er riktig, er vanskelig å tro<sup>4</sup>. For tog 5724 oppstår det for øvrig et tilfelle med noe lav spenning nær Eidsvoll som også virker merkelig og muligens ikke fysisk virkelig, men det kan skyldes randsonen og gyldigheten av modellen i dette området. Figur 3-8 viser tog 5705 og Figur 3-9 tog 5709 som får noe lav spenning i området ved Otta. Dette skyldes nok stort effektbehov ved at det er mange tog i området (krysningsbeltet) og at omformerer her begrenser den reaktive effekten mye og dermed greier den ikke å opprettholde spenningen.

<sup>4</sup> Utviklerne av TracFeed skal få anledning til å kommentere dette og undersøke hva denne lave spenningen kan skyldes.

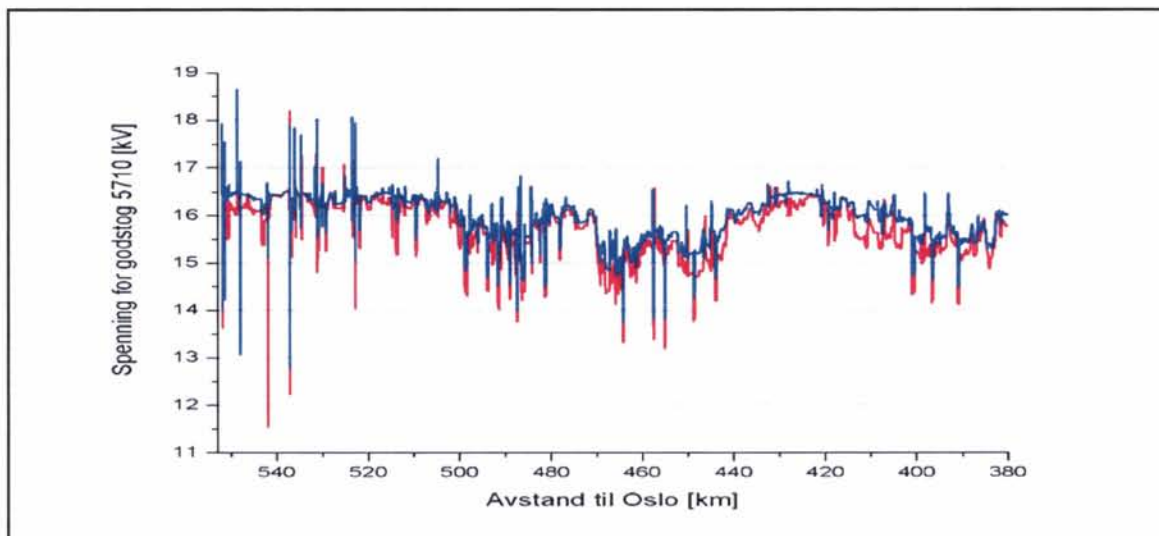
I det store og hele ser det ut til at spenningen gjennomgående blir noen hundre volt lavere, men stedvis over 1 kV lavere med den nye innstillingen av statikken. Likevel er spenningen gjennomgående over 13 kV for de undersøkte togene.

Det er rapportert om lave spenninger spesielt i Garli- og Hjerkin-området, se [4]. Det er snakk om spenninger under 13 kV langvarig og at dette fører til lav hastighet og forsinkelser. Spesielt er det ved flere tog inne på matestrekingen at dette kan skje. Simuleringene her viser ikke spesielt lave spenninger i disse områdene med dagens spenningsstatikk, se 2-minuttersverdiene av spenningen i Tabell 3-2 og spenningen for togene i Figur 3-4, Figur 3-5, Figur 3-8 og Figur 3-9. Derimot vises helt akseptable spenninger her selv om en er inne i krysningsbeltet. Det kan være at ruteplanen det er simulert med her ikke gir så hard belastning som andre ruteplaner eller avvikssituasjoner med tettere trafikk. Derimot ser en tydelig av figurene nevnt ovenfor at fallende statikk på 12 % gir redusert spenning, selv om dette likevel er innefor det akseptable. Om det oppstår kortere togfølgetid i andre ruteplaner, eller avvikssituasjoner, kan en frykte for langvarige lave spenninger med såpass stor fallende statikk. Mer om dette i avsnitt 4.2.2.

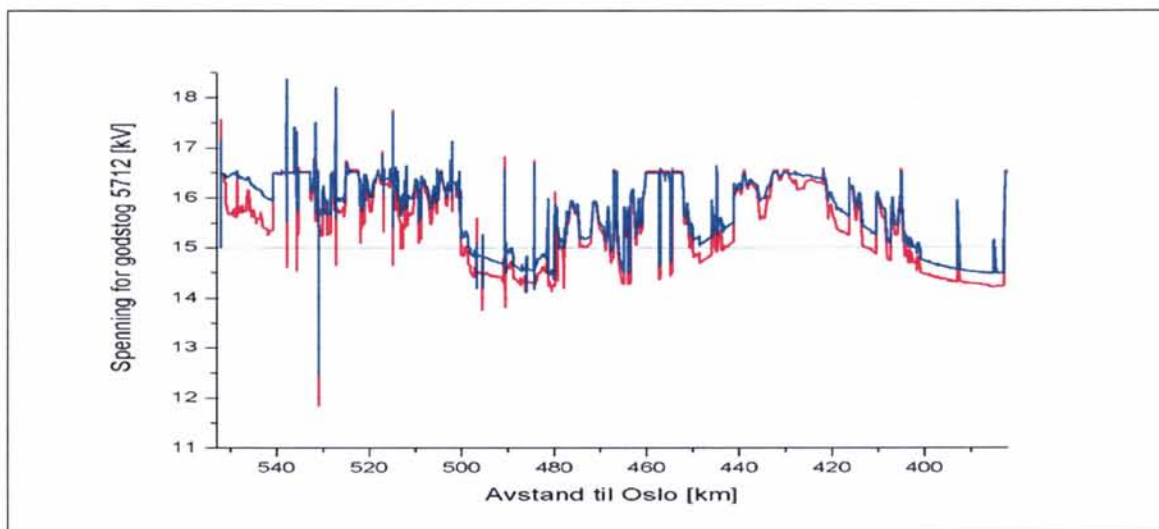
**Tabell 3-2 Minimal spenning for togene med henholdsvis flat og fallende statikk. Uthevede tall betyr at spenningen er for lav i "bør verdi" og rødt betyr den er lavere enn "skal verdi". Simulering med både EI14 og EI16 lokomotiver for godstogene og forskjellig lastvekt som vist i tabellen. Tog 5713 kjører med 300 tonn fra Dombås.**

Tog	Statikk [%]	Minimums spenning RMS [kV]	
		2 sekunder	2 minutter
5262	0	12,3	14,3
EI16_1000	12	12,1	<b>13,3</b>
5704	0	14,3	<b>13,1</b>
EI14_900	12	12,8	14,0
5708	0	12,5	14,5
EI14_900	12	12,1	<b>13,3</b>
5710	0	12,8	14,0
EI14_300	12	<b>11,5</b>	13,5
5712	0	12,5	13,8
EI14_900	12	<b>11,8</b>	<b>13,1</b>
5722	0	14,3	14,5
EI14_900	12	13,0	<b>13,2</b>
5724	0	12,4	<b>13,4</b>
EI14_900	12	<b>11,9</b>	<b>13,0</b>
5263	0	12,7	15,3
EI16_700	12	<b>12,3</b>	14,6
5701	0	13,4	14,3
EI14_900	12	12,7	13,7
5705	0	13,5	14,5
EI14_900	12	<b>12,4</b>	<b>13,1</b>
5709	0	13,0	14,0
EI14_900	12	<b>12,0</b>	<b>13,4</b>
5711	0	13,1	14,4
EI14_900	12	12,5	<b>13,2</b>

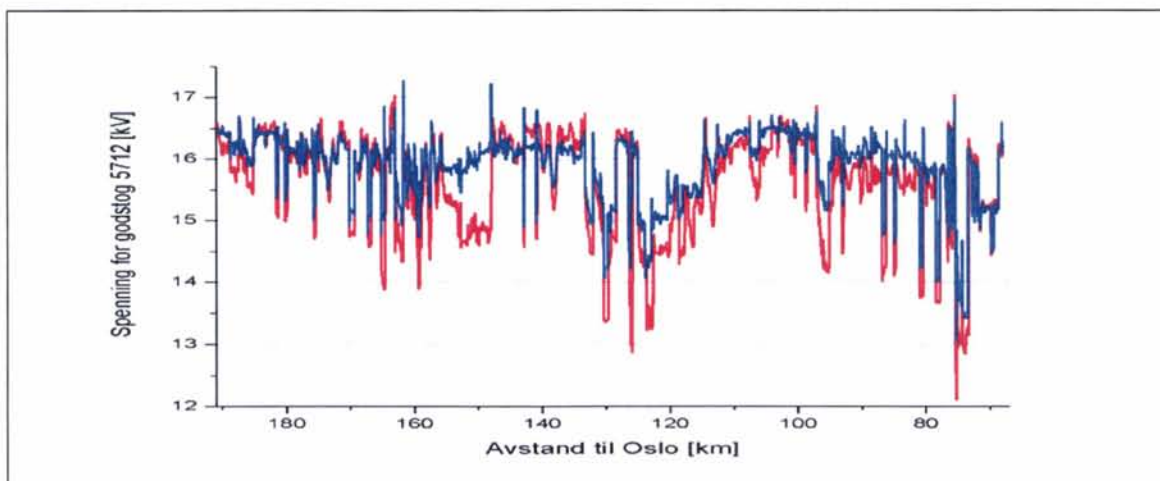
Tog	Statikk [%]	Minimums spenning RMS [kV]	
		2 sekunder	2 minutter
5713	0	14,2	12,9
EI14_900 / 300	12	12,5	13,5
5721	0	13,7	14,6
EI14_900	12	12,8	13,7
5723	0	14,5	13,4
EI14_900	12	12,7	13,3



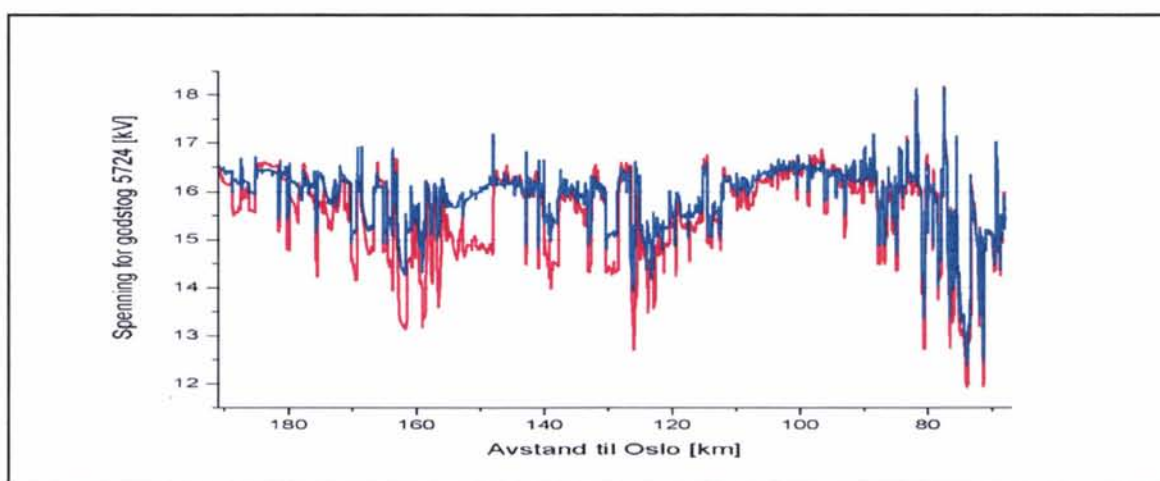
Figur 3-4 Spenning for tog 5710 mellom Trondheim og Hjerkinn med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med EI14 og EL16 lokomotiver for godstogene.



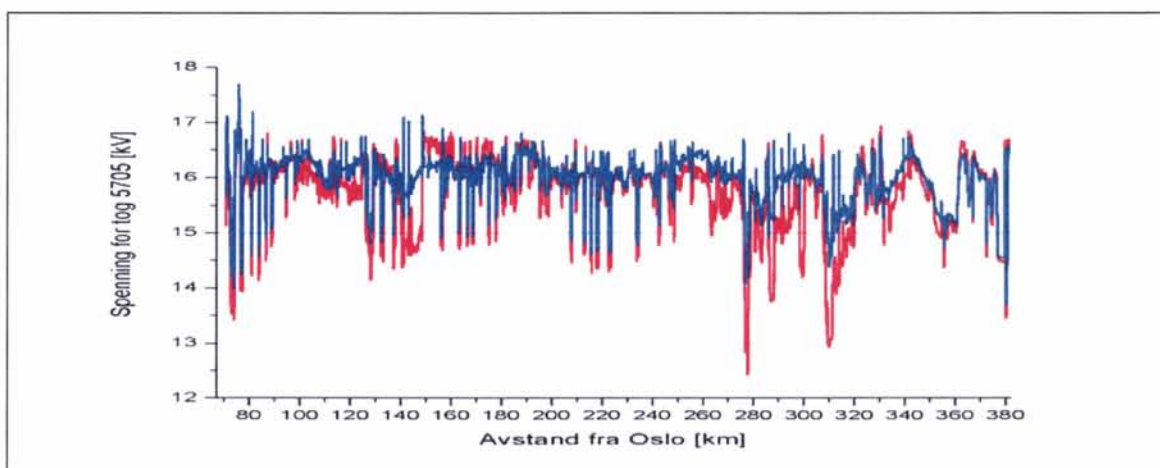
Figur 3-5 Spenning for tog 5712 mellom Trondheim og Oppdal med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med EI14 og EL16 lokomotiver for godstogene.



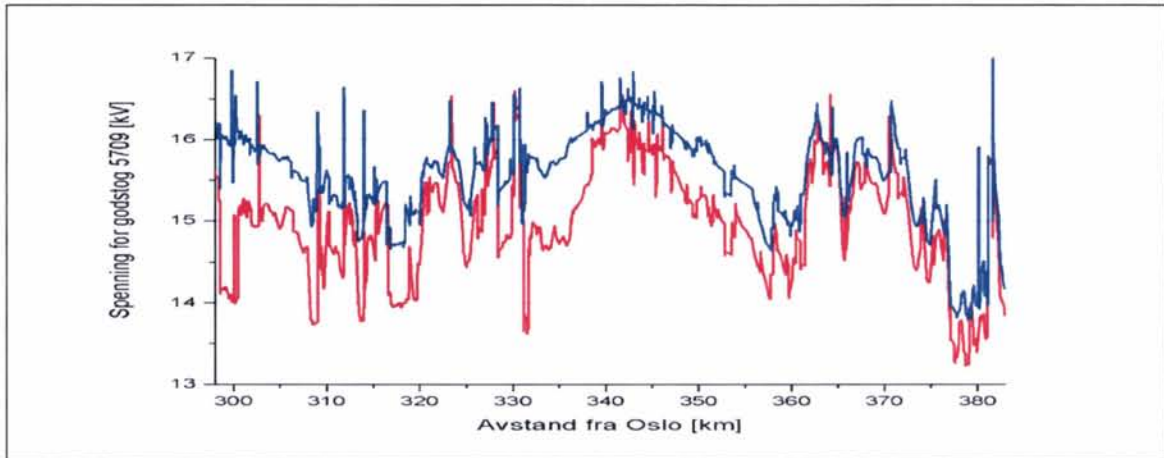
Figur 3-6 Spenning for tog 5712 mellom Fåberg og Eidsvoll med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med EI14 og EL16 lokomotiver for godstogene.



Figur 3-7 Spenning for tog 5724 mellom Fåberg og Eidsvoll med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med EI14 og EL16 lokomotiver for godstogene.



Figur 3-8 Spenning for tog 5705 mellom Eidsvoll og Hjerkinn med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med EI14 og EL16 lokomotiver for godstogene.



**Figur 3-9 Spennning for tog 5709 mellom Otta og Hjerkinn med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med E114 og EL16 lokomotiver for godstogene.**

### 3.1.3 Energiforbruk

Energiforbruket for samtlige omformerstasjoner er undersøkt time for time, se Tabell 3-3. Summen av energien fra alle omformerstasjonene matet inn i, og ut av kl-anlegget, er listet opp i tabellen og summen av dette viser det totale energiforbruket. En ser at ikke det er store forskjeller mellom energien matet inn og ut for de to tilfellene med henholdsvis 12 % og flat statikk. Summen av energien er dermed også nesten den samme, men noe mindre energiforbruk med 0 % statikk. En forventer ikke at tapene i kl-anlegget skal endre seg mye når energiforbruket er så lite endret. En forventer heller ikke at tapene i omformerstasjonene skal ha endret seg mye på grunn av dette.

**Tabell 3-3 Energiforbruk for transportarbeidet og tap i kl-anlegget time for time med henholdsvis 0 og 12 % fallende statikk. Simulering med E114 og EL16 lokomotiver for godstogene. Alle enheter i MWh.**

Periode	Med 12 % statikk			Med 0 % statikk		
	Inn	Ut	Sum	Inn	Ut	Sum
KI 00-01	17,79	-0,04	17,75	17,813	-0,062	17,75
KI 01-02	17,69	-0,06	17,63	17,572	-0,122	17,45
KI 02-03	16,28	-0,06	16,22	16,292	-0,087	16,21
KI 03-04	13,19	-0,06	13,12	13,121	-0,084	13,04
KI 04-05	9,32	-0,12	9,19	9,2121	-0,144	9,068
KI 05-06	6,12	-0,25	5,87	6,222	-0,343	5,879
KI 06-07	6,77	-0,19	6,59	6,886	-0,221	6,664
KI 07-08	6,69	-0,05	6,64	6,837	-0,068	6,769
KI 08-09	10,19	-0,11	10,07	10,348	-0,126	10,22
KI 09-10	10,42	-0,14	10,28	10,529	-0,163	10,37
KI 10-11	11,82	-0,13	11,69	12,007	-0,146	11,86
KI 11-12	12,22	-0,14	12,08	12,229	-0,2	12,03
KI 12-13	10,85	-0,10	10,76	10,864	-0,114	10,75
KI 13-14	13,09	-0,08	13,01	13,053	-0,086	12,97
KI 14-15	12,48	-0,17	12,31	12,445	-0,171	12,27
KI 15-16	12,06	-0,12	11,94	12,004	-0,15	11,85
KI 16-17	11,57	-0,12	11,45	11,627	-0,143	11,48
KI 17-18	9,15	-0,18	8,97	9,244	-0,183	9,061
KI 18-19	9,05	-0,14	8,91	9,146	-0,16	8,986
KI 19-20	6,56	-0,28	6,27	6,628	-0,288	6,34
KI 20-21	7,18	-0,33	6,85	7,308	-0,349	6,956
KI 21-22	9,66	-0,20	9,46	9,739	-0,232	9,507
KI 22-23	16,51	-0,01	16,50	16,579	-0,019	16,56
KI 23-24	22,04	-0,01	22,03	22,133	-0,015	22,12
<b>Sum</b>	<b>278,69</b>	<b>-3,10</b>	<b>275,60</b>	<b>279,8334</b>	<b>-3,676</b>	<b>276,2</b>

## 3.2 Simuleringer med tog på Dovrebanen med EI14 og EI16 lokomotiver og utfall av ett aggregat på Dombås

Fra simuleringene i avsnitt 3.1 ble Dombås omformerstasjon høyt belastet både med 0 og 12 % statikk. I denne simuleringen faller det ene aggregatet i denne stasjonen ut og det vil da være interessant å se om det gjenværende aggregatet belastes mer enn sin grense.

### 3.2.1 Omformerbelastning

Nedenfor viser Tabell 3-4 maksimal belastning av Dombås omformerstasjon ved utfall av ett aggregat og nabostasjonenes reaksjon på denne tilstanden ved henholdsvis 0 og 12 % statikk. Ved utfall av ett aggregat vil Dombås øke statikken fra henholdsvis 0 til 5 % og fra 12 til 24 %. Som en ser er denne endringen akkurat det som skal til for å forhindre at også det gjenværende aggregatet faller ut for overbelastning når maksimalbelastningen opptrer. Imidlertid er belastningen for 1-times MEAN verdien så høy at bare tilfeldigheter når det gjelder kjøring og konstellasjon av togene kan få den til å falle ut.

Av tabellen ser en også at maksimalbelastningen av Otta blir meget høy og høyere enn ved normal drift. Det er nå overhengende fare for at Otta vil falle for overlast og den meget uheldige konsekvensen av dette er at Dombås blir ytterligere høyt belastet. Dermed kan Dombås omformerstasjon stå i fare for å miste sitt gjenværende aggregat selv om statikken her er så mye som 24 %. Her er det tilfeldighetens spill som avgjør, men også beskjed til lokomotivførerne om forsiktig kjøring kan redde situasjonen.

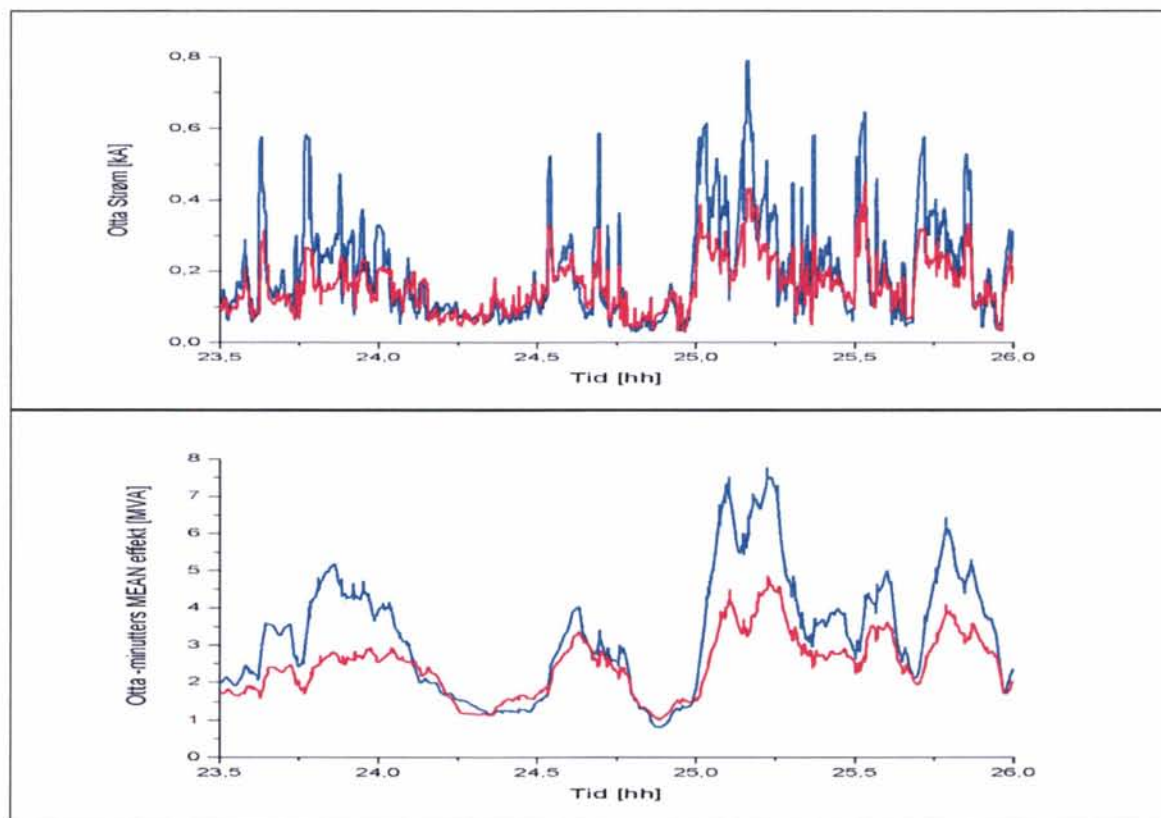
Om en ser på belastningen av Dombås omformer før og etter utfall ser en tydelig at med flat statikk vil det ikke være mulig å tillate at høyeste belastning kan være så mye som 56 %. Dette underbygger at redundanskriteriet ikke kan benyttes slik som tidligere. En kan med andre ord ikke tillate at belastningen kan være opp mot 60 % før utfall, uten å verifisere dette med simuleringer der en virkelig har et utfall av ett aggregat. Riktignok ser det ut til å gå godt når det innføres enn statikk på 12 %, men det kan også være tilfeldigheter. En endring av ruten eller noe tyngre tog vil kunne endre på dette, - som er grunnen til at det skal legges til marginer.

Når det gjelder belastningen som funksjon av tiden viser Figur 3-10, Figur 3-11 og Figur 3-12 belastningen for henholdsvis Otta, Dombås og Oppdal. En ser tydelig hvorledes 24 % statikk ved utfall får høyeste belastningsstrøm til å reduseres med ca 100 A. Dette skjer omtrent ved tidspunktet 24:30. Stor endring ser en også for effekten der belastningen har blitt redusert med ca 3 MVA. Når det gjelder høyeste belastning av Otta er det overraskende å se at denne inntreer når Dombås ikke er mest belastet, men har en belastningstopp noe lavere. Når Dombås er belastet mest er Otta bare moderat belastet. Oppdal omformerstasjon ser ut til å være minimalt påvirket av at Dombås kjører med ett aggregat, men så er jo denne stasjonen mye lengre borte fra Dombås enn hva Otta er.

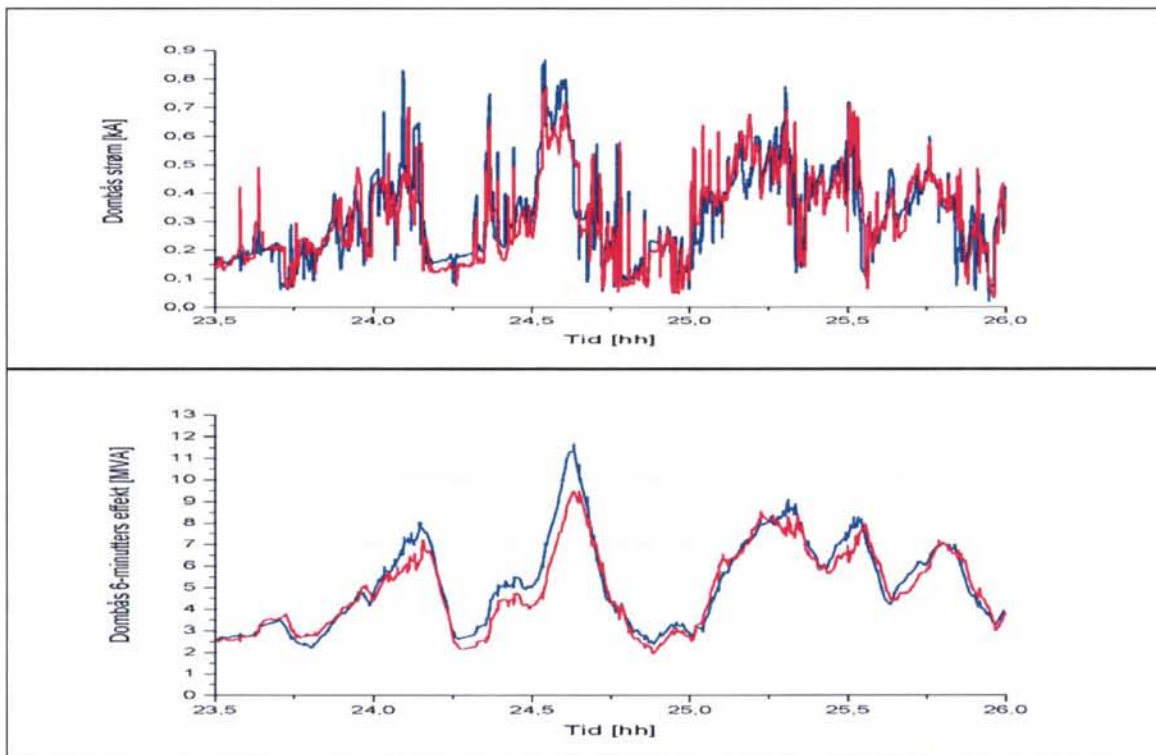


**Tabell 3-4 Maksimal belastning av omformerstasjonene med henholdsvis flat og fallende statikk. Uthevede tall betyr at belastningen sannsynligvis er for stor til å hindre utfall av det gjenværende aggregatet om ett faller ut. Rød betyr at overbelastning vil skje og svart at marginene er overskredet så mye at det er fare for tap av redundans. Simulering med E114 og EL16 lokomotiver for godstogene og utfall av ett aggregat i Dombås.**

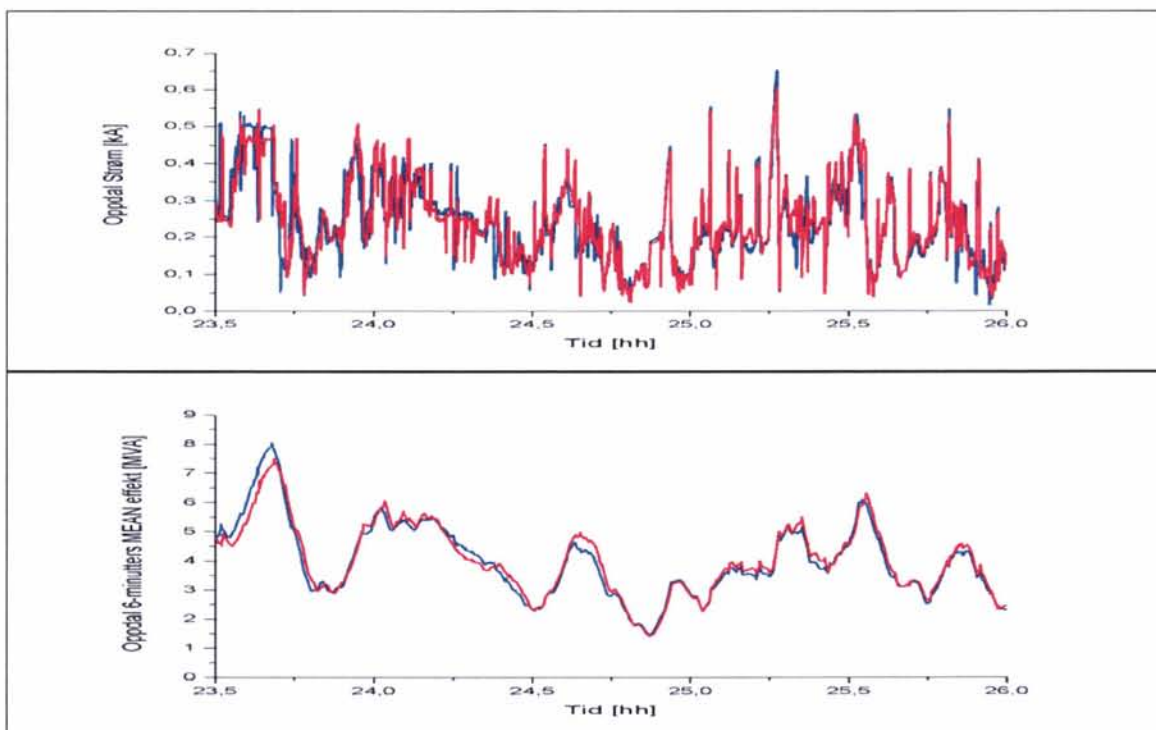
Omformer	Innsatt ytelse [MVA]	Statikk [%]	Strøm		Effekt			
			2 sek RMS		6 min MEAN		1 time MEAN	
			[kA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Fron	2 x 5,8	0	0,652	52	6,412	40	4,004	35
		12	0,638	51	6,151	38	4,164	36
Otta	3,1	0	0,791	<b>176</b>	7,761	<b>161</b>	4,738	<b>153</b>
		16	0,448	<b>99,5</b>	4,860	<b>101</b>	3,445	<b>111</b>
Dombås	7,0	5	0,867	<b>105</b>	11,682	<b>106</b>	6,855	<b>98</b>
		24	0,774	94	9,522	87	6,825	<b>98</b>
Oppdal	2 x 5,8	0	0,653	52	8,056	50	5,560	48
		12	0,607	48	7,513	47	5,395	47
Lundamo	2 x 7,0	0	0,585	35	5,398	24	3,956	28
		12	0,524	32	4,692	21	3,457	25



**Figur 3-10 Belastning av Otta omformerstasjon med henholdsvis flat (blå kurve) og 16 % fallende statikk (rød kurve). 2-sekunders RMS verdi av strøm øverst og 6-minutters MEAN verdi av effekten nederst. Simulering med utfall av ett aggregat i Dombås.**



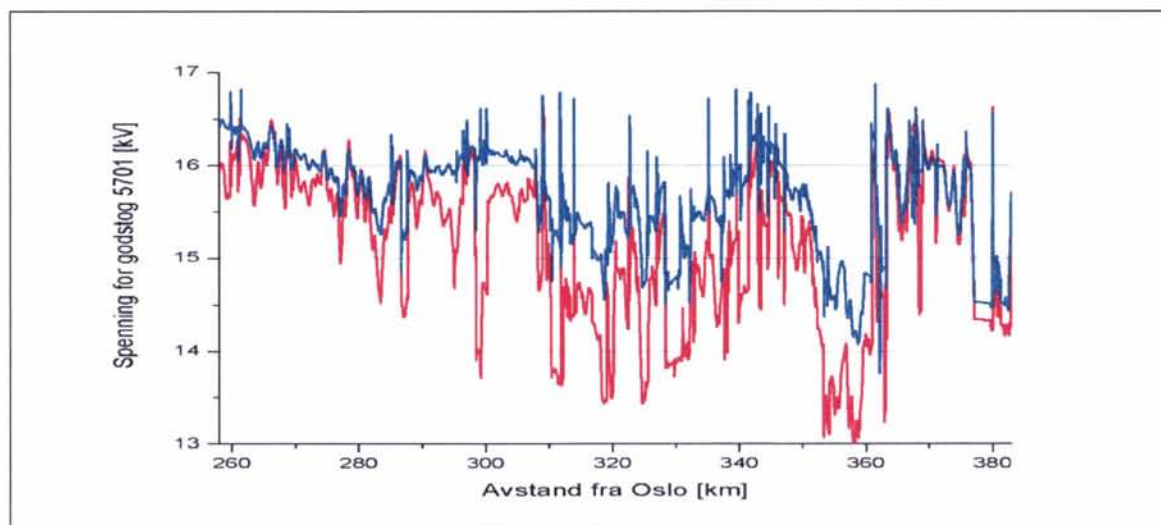
Figur 3-11 Belastning av Dombås omformerstasjon med henholdsvis flat (blå kurve) og 16 % fallende statikk (rød kurve). 2-sekunders RMS verdi av strøm øverst og 6-minutters MEAN verdi av effekten nederst. Simulering med utfall av ett aggregat i Dombås.



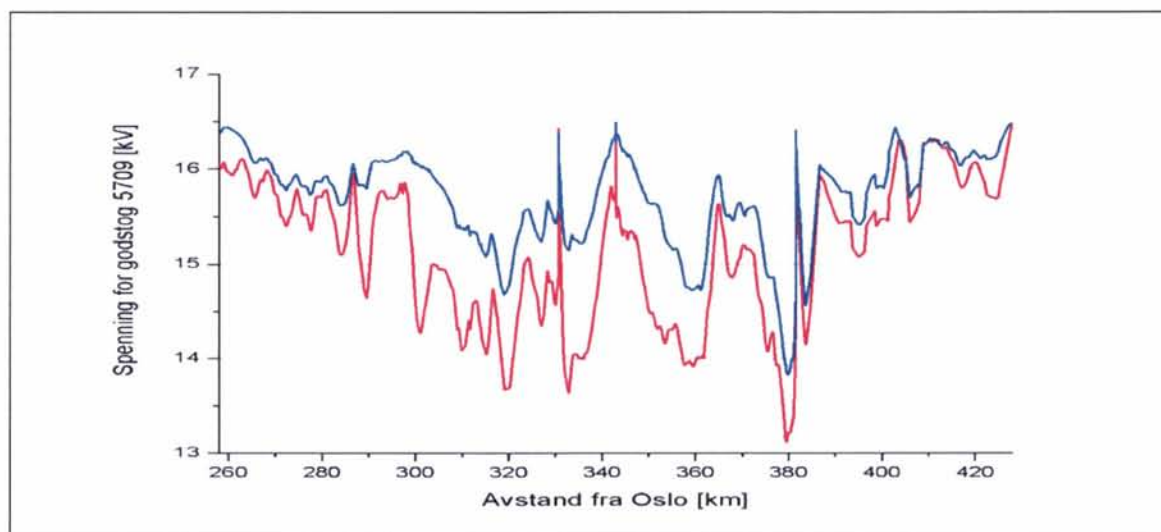
Figur 3-12 Belastning av Oppdal omformerstasjon med henholdsvis flat (blå kurve) og 16 % fallende statikk (rød kurve). 2-sekunders RMS verdi av strøm øverst og 6-minutters MEAN verdi av effekten nederst. Simulering med utfall av ett aggregat i Dombås.

### 3.2.2 Spenning for togene

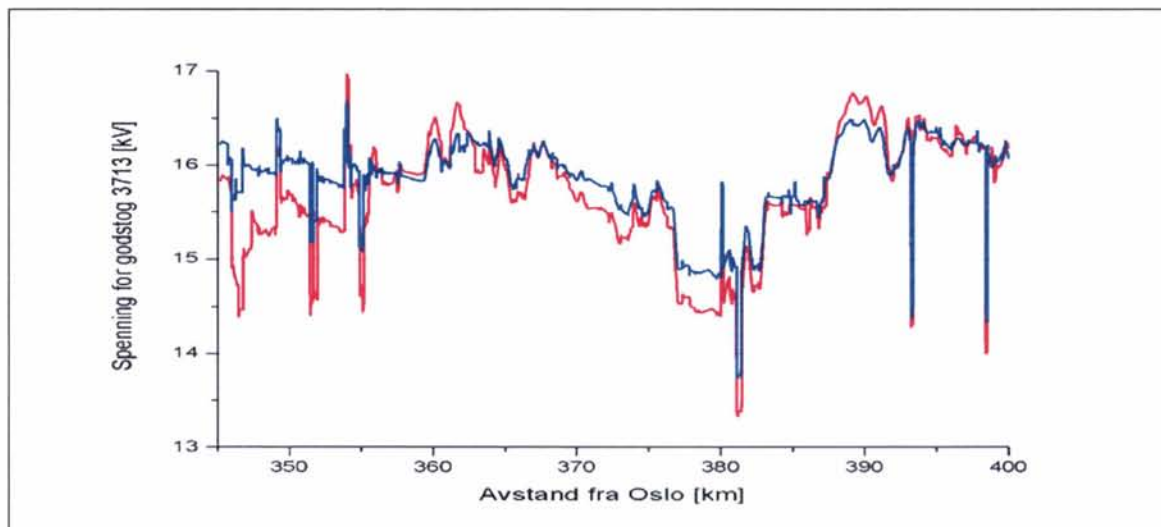
Spenningen for de godstogene som passerer Dombås omformerstasjon rundt klokken 24:00 på veg opp stigningene nordover mot Hjerkins er undersøkt i Figur 3-13, Figur 3-14, Figur 3-15 og Figur 3-16 for henholdsvis tog 5701, 5709, 5713 og 5723. Spenningen fra Fron til høyeste punkt ved Hjerkins er undersøkt, unntatt for tog 5713 som bare kjører mellom Dombås og Drivstua. Spenningen for togene er mye påvirket av den store fallende statikken på 24 % som er oppstått ved Dombås, men likevel er det bare tog 5723 som får spenning ned mot 12,0 kV. Denne lave spenningen oppstår mellom Otta og Dombås, og ser ut til å oppstå når tog 5722 akselererer ut fra Dombås og tog 5708 samtidig er på strekningen. Det kan altså være flere samtidige hendelser som får tog 5723 til å få omtrent 3 kV lavere spenning. De andre togene har god avstand til andre godstog, og det kan være årsaken til at disse får akseptable spenninger selv om togene kjører i relativt stor stigning nordover fra Dombås.



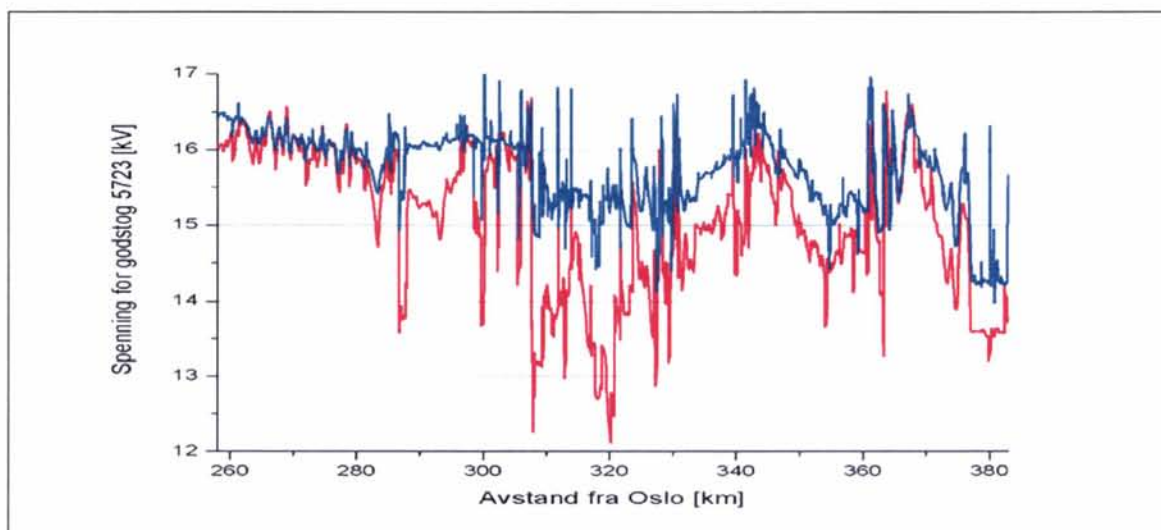
Figur 3-13 Spenning for tog 5701 mellom Fron og Hjerkins med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med utfall av ett aggregat i Dombås.



Figur 3-14 Spenning for tog 5709 mellom Fron og Oppdal med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med utfall av ett aggregat i Dombås.



Figur 3-15 Spenning for tog 5713 mellom Dombås og Oppdal med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med utfall av ett aggregat i Dombås.



Figur 3-16 Spenning for tog 5723 mellom Fron og Hjerkinn med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med utfall av ett aggregat i Dombås.

### 3.3 Simuleringer med tog på Dovrebanen med moderne CE119 lokomotiver

Det er utført to simuleringer med alle togene som i avsnitt 3.1, men med den endringen at godstogene trekkes av CE119 lokomotiver. Med disse lokomotivene forventes det at omformerstasjonene belastes mindre siden lokomotivene ikke trekker reaktiv effekt.

#### 3.3.1 Omformerbelastning

Den maksimale belastningen av omformerstasjonene er vist i Tabell 3-5. Sammenlignet med resultatene med E114 og E116 lokomotiver, se Tabell 3-1, er belastningen for flere av stasjonene betydelig lavere. En kan blant annet se at 6-minuttereffekten for Dombås nå er nesten halvert. For Rudshøgda og Otta omformerstasjoner er det også nå oppstått en betydelig

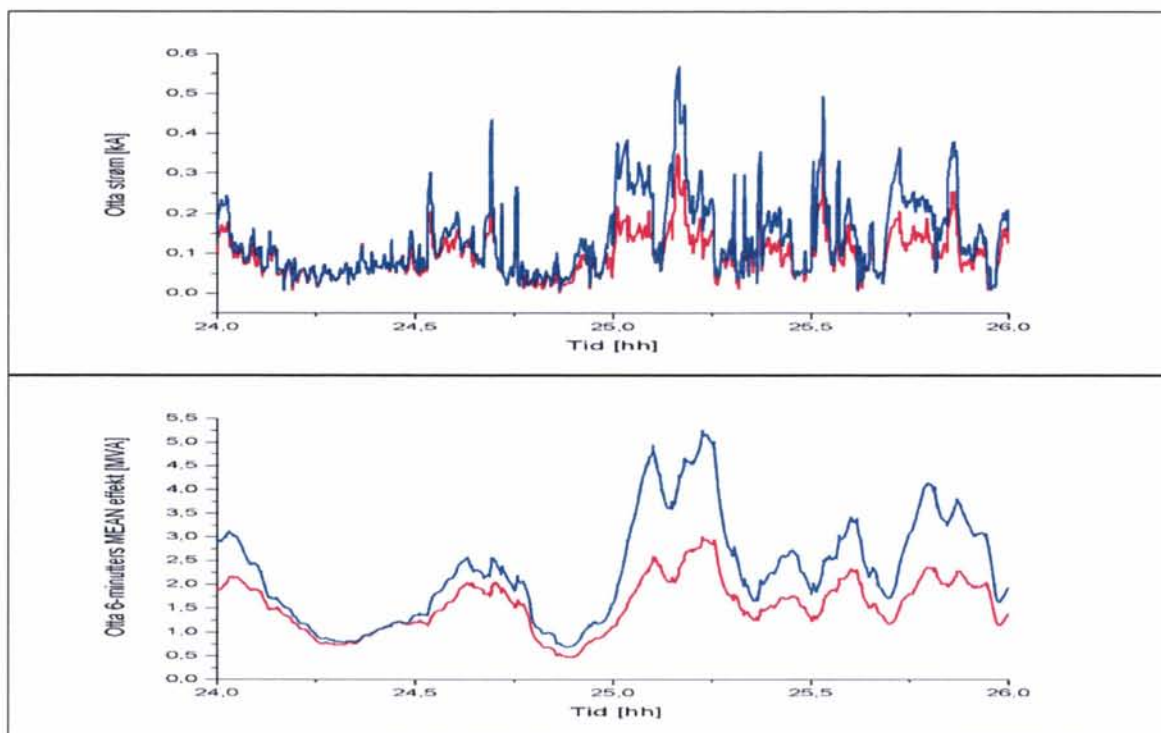
reduksjon av maksimalbelastningen. For de øvrige stasjonene er endringene små og for Fåberg, Fron og Dombås har belastningen økt noe med fallende statikk på 12 %. Lundamo har størst reduksjon av effektopptak, med fem prosentpoeng eller 17 %.

Nedenfor viser Figur 3-17, Figur 3-18 og Figur 3-19 hvordan strøm og effekt for henholdsvis Otta, Dombås og Oppdal omformerstasjoner påvirkes av den nye fallende statikken. Otta er mye påvirket med sin nye 16 % fallende statikk, mens for Dombås og Oppdal er endringene veldig små.

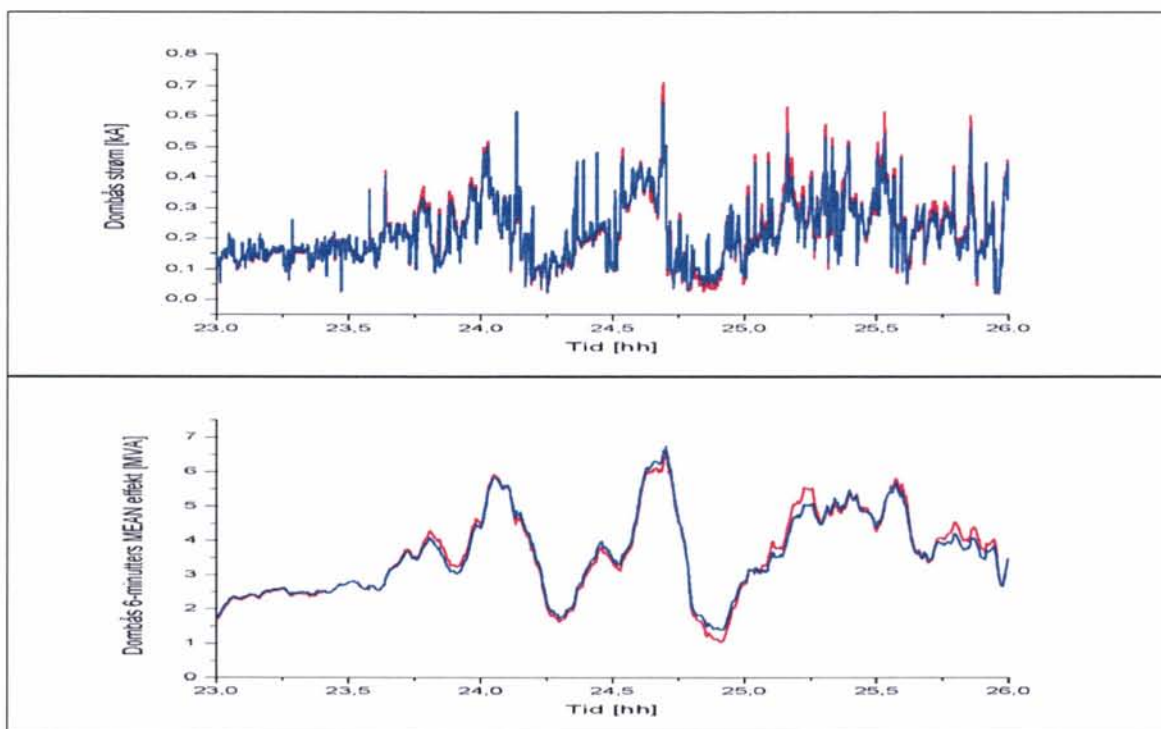
Rudshøgda og Otta omformerstasjoner har i dag en spenning som er stilt lavere enn nabostasjonene. Dette fører til effektflyt mellom stasjonene i tomgang. Dessuten oppstår det rett som det er overbelastning av disse stasjonene slik at de kobles ut. Det ser ut til at en fallende statikk på 16 % i disse stasjonene, samt 16,5 kV i ubelastet tilstand, vil kunne gi både beskyttelse mot overbelastning og forhindre effektflytt i tomgang.

**Tabell 3-5 Maksimal belastning av omformerstasjonene med henholdsvis flat og fallende statikk. Uthevede tall betyr at belastningen sannsynligvis er for stor til å hindre utfall av det gjenværende aggregatet om ett faller ut. Rød betyr at overbelastning vil skje. Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene.**

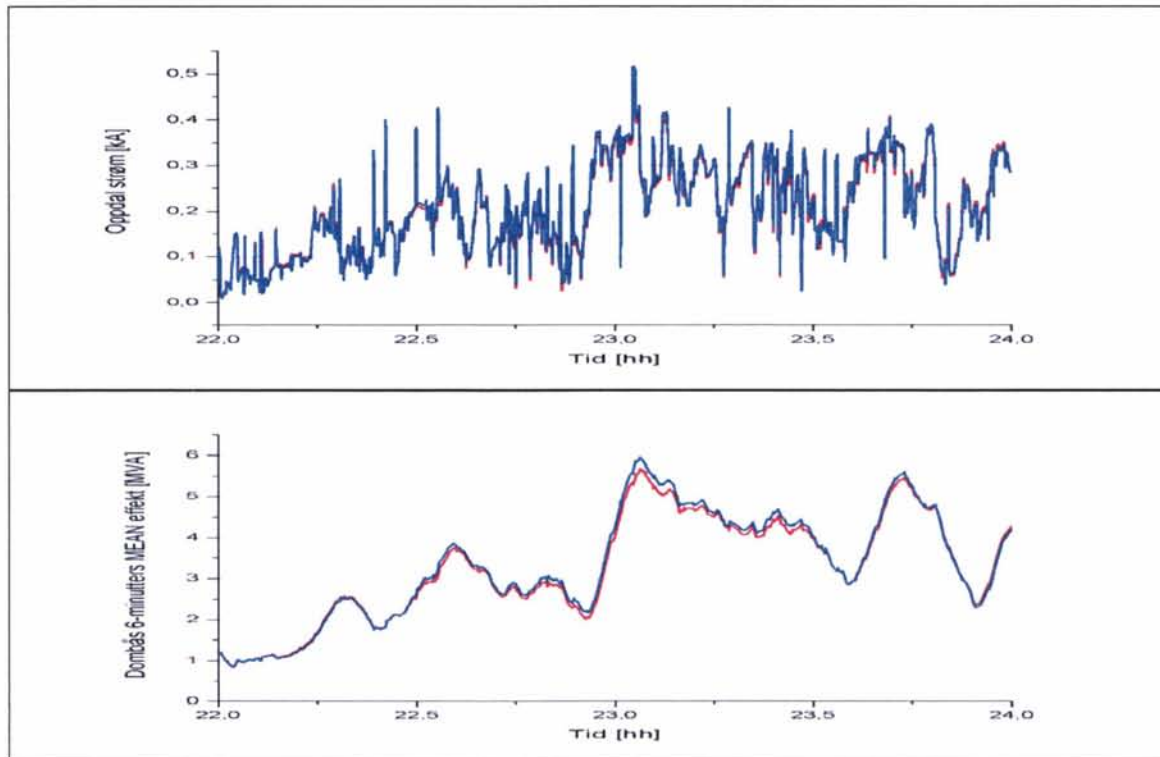
Omformer	Innsatt ytelse [MVA]	Statikk [%]	Strøm		Effekt			
			2 sek RMS verdi		6 min MEAN		1 time MEAN	
			[kA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Tangen	2 x 7,0	0	0,980	59	6,776	31	4,646	33
		12	0,954	58	6,838	31	4,745	34
Rudshøgda	3,1	0	0,642	143	5,658	118	3,298	106
		16	0,424	94	3,408	71	2,111	68
Fåberg	2 x 5,8	0	0,570	46	4,615	29	3,152	27
		12	0,619	50	4,791	30	3,368	29
Fron	2 x 5,8	0	0,510	41	4,456	28	3,174	27
		12	0,548	44	4,740	30	3,224	28
Otta	3,1	0	0,569	126	5,259	110	3,160	102
		16	0,349	78	3,007	63	2,032	66
Dombås	2 x 7,0	0	0,645	39	6,742	31	4,738	34
		12	0,712	43	6,921	31	4,892	35
Oppdal	2 x 5,8	0	0,516	41	5,967	37	4,390	38
		12	0,485	39	5,690	36	4,343	37
Lundamo	2 x 7,0	0	0,474	29	3,733	17	2,749	20
		12	0,386	23	3,092	14	2,460	18
Stavne	7,5	0	0,342	-	3,347	-	2,198	-
		12	0,320	-	3,361	-	2,281	-



Figur 3-17 Belastning av Otta omformerstasjon med henholdsvis flat (blå kurve) og 16 % fallende statikk (rød kurve). 2-sekunders RMS verdi av strøm øverst og 6-minutters MEAN verdi av effekten nederst. Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene.



Figur 3-18 Belastning av Dombås omformerstasjon med henholdsvis flat (blå kurve) og 12 % fallende statikk (rød kurve). 2-sekunders RMS verdi av strøm øverst og 6-minutters MEAN verdi av effekten nederst. Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene.



Figur 3-19 Belastning av Oppdal omformerstasjon med henholdsvis flat (blå kurve) og 12 % fallende statikk (rød kurve). 2-sekunders RMS verdi av strøm øverst og 6-minutters MEAN verdi av effekten nederst. Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene.

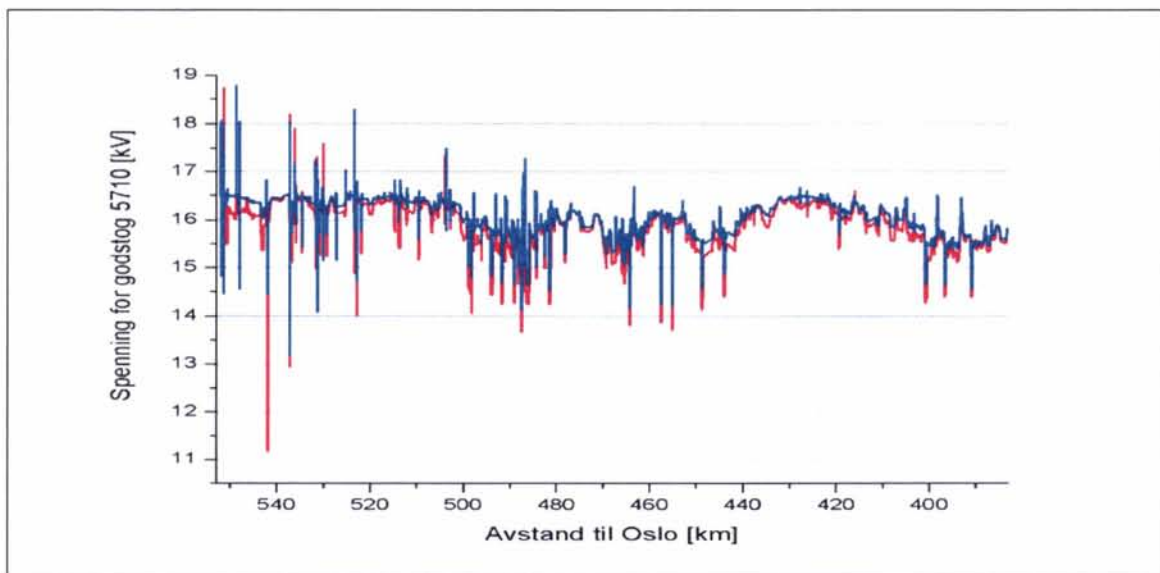
### 3.3.2 Spenning for togene

I Tabell 3-6 nedenfor ser en at minimumsspenningen for de fleste tog ikke er særlig lav, bortsett fra for tog 5710, 5713 og 5721 der spenningen er under kravet på 12,0 kV. Disse tre togene er undersøkt spesielt i henholdsvis Figur 3-20, Figur 3-21 og Figur 3-22. For alle disse togene oppstår den lave spenningen mellom Lundamo og Stavne omformerstasjoner, altså samme merkelige tilfeller som i simuleringene med E114 og E116 lokomotiver. Disse små og kortvarige spenningsfallene kan ikke tillegges stor vekt og konklusjonen er at spenningen for togene endrer seg lite med 12 % fallende statikk for spenningsregulatorene.

Tabell 3-6 Minimal spenning for togene med henholdsvis flat og fallende statikk. Uthevede tall betyr at spenningen er for lav i ”bør verdi” og rødt betyr den er lavere enn ”skal verdi”. Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene og samme lastvekt som i simuleringen med E114 og E116 lokomotiver.

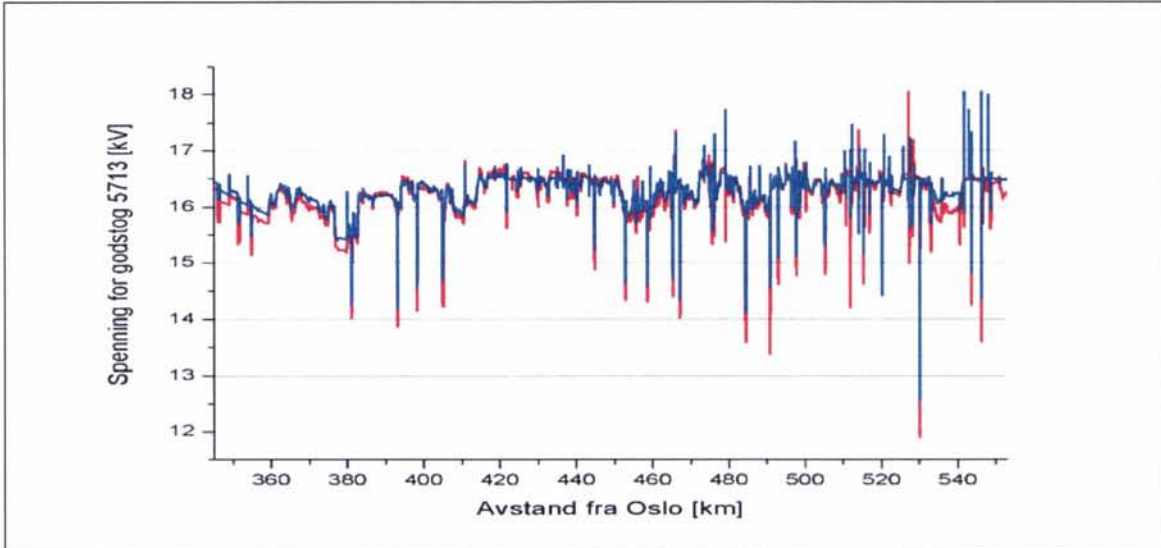
Tog	Statikk [%]	Minimums spenning RMS [kV]	
		2 sekunder	2 minutter
5262	0	13,9	15,3
	12	13,9	15,0
5704	0	14,2	15,0
	12	14,3	14,8
5708	0	14,0	15,2
	12	13,4	14,7
5710	0	13,2	15,4

Tog	Statikk [%]	Minimums spenning RMS [kV]	
		2 sekunder	2 minutter
	12	<b>11,2</b>	15,2
5712	0	13,6	14,8
	12	13,6	14,6
5722	0	14,6	15,8
	12	14,1	14,7
5724	0	12,8	14,5
	12	<b>12,4</b>	14,3
5263	0	14,7	15,8
	12	14,3	15,4
5701	0	13,1	16,1
	12	13,3	14,9
5705	0	14,5	15,2
	12	13,6	14,6
5709	0	13,4	15,1
	12	13,1	14,8
5711	0	14,4	15,2
	12	13,7	14,8
5713	0	12,6	15,4
	12	<b>11,9</b>	14,6
5721	0	15,3	12,0
	12	<b>11,5</b>	15,1
5723	0	14,1	15,2
	12	12,8	14,7

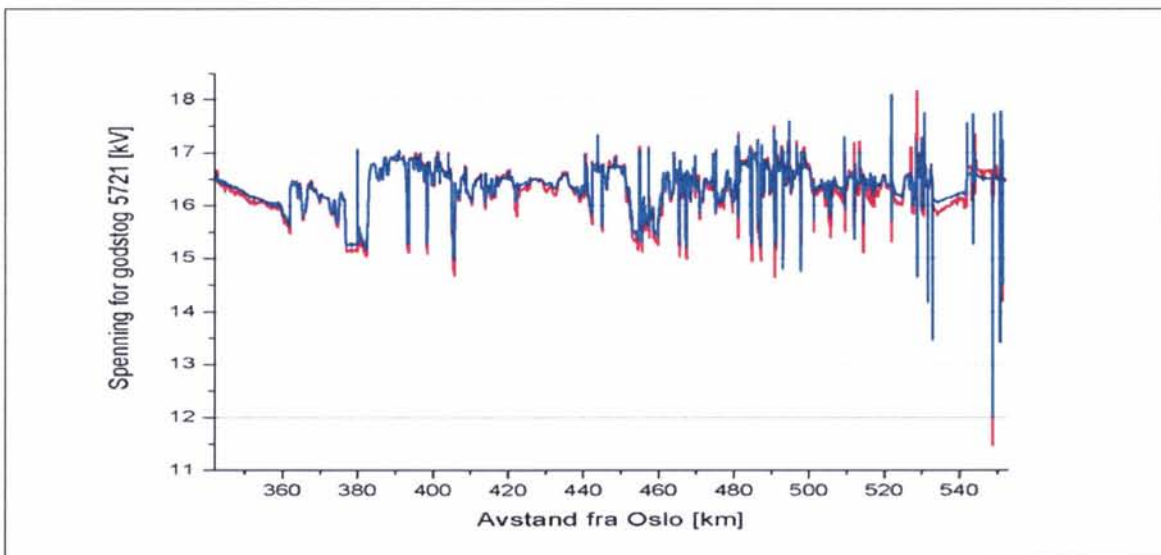


Figur 3-20 Spenning for tog 5710 mellom Trondheim og Hjerkind med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene.





Figur 3-21 Spenning for tog 5713 mellom Dombås og Trondheim med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene.



Figur 3-22 Spenning for tog 5713 mellom Dombås og Trondheim med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene.

### 3.3.3 Energiforbruk

Tabell 3-7 nedenfor viser energiforbruk time for time og summen for et helt døgn med togtrafikk med de to innstillingene av spenningsregulatorer. Det ser ut til å være ca 0,83 MWh lavere energiforbruk med fallende statikk. Dette utgjør en besparelse på 0,3 % som må kunne sies å være marginalt.

**Tabell 3-7 Energiforbruk for transportarbeidet og tap i kl-anlegget time for time med fallende statikk på henholdsvis 0 og 12 %. Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene. Alle enheter i MWh.**

Periode	Med 12 % statikk			Med 0 % statikk		
	Inn	Ut	Sum	Inn	Ut	Sum
KI 00-01	16,423	-0,099	16,324	16,4601	-0,105	16,36
KI 01-02	15,109	-0,115	14,995	15,1894	-0,142	15,05
KI 02-03	14,351	-0,359	13,992	14,4273	-0,371	14,06
KI 03-04	11,132	-0,446	10,686	11,1697	-0,459	10,71
KI 04-05	8,2983	-0,348	7,95	8,3019	-0,356	7,946
KI 05-06	5,9991	-0,444	5,5547	5,9943	-0,449	5,545
KI 06-07	6,478	-0,307	6,1715	6,485	-0,309	6,176
KI 07-08	6,6266	-0,156	6,4704	6,6325	-0,167	6,465
KI 08-09	9,3223	-0,172	9,1501	9,3267	-0,174	9,153
KI 09-10	10,619	-1,117	9,5013	10,3172	-0,193	10,12
KI 10-11	10,734	-0,291	10,444	10,7595	-0,302	10,46
KI 11-12	11,974	-0,217	11,757	11,9872	-0,225	11,76
KI 12-13	10,139	-0,385	9,7541	10,1487	-0,386	9,763
KI 13-14	12,072	-0,241	11,83	12,0456	-0,231	11,81
KI 14-15	11,82	-0,244	11,576	11,8224	-0,239	11,58
KI 15-16	11,619	-0,151	11,468	11,6302	-0,147	11,48
KI 16-17	10,808	-0,22	10,588	10,7905	-0,213	10,58
KI 17-18	8,4106	-0,446	7,965	8,4381	-0,46	7,978
KI 18-19	8,4083	-0,356	8,052	8,4384	-0,364	8,075
KI 19-20	6,4815	-0,461	6,0205	6,4787	-0,445	6,034
KI 20-21	7,2091	-0,396	6,8128	7,1624	-0,389	6,774
KI 21-22	8,9346	-0,331	8,6032	8,9415	-0,343	8,599
KI 22-23	15,382	-0,063	15,319	15,3926	-0,07	15,32
KI 23-24	21,706	-0,022	21,684	21,7611	-0,032	21,73
<b>Sum</b>	<b>260,060</b>	<b>-7,387</b>	<b>252,670</b>	<b>260,101</b>	<b>-6,571</b>	<b>253,500</b>

### 3.4 Simuleringer med tog på Dovrebanen med moderne CE119 lokomotiver og utfall av ett aggregat på Fåberg

Med simulering med CE119 lokomotiver ble spenningen for togene mye bedre og belastningen på omformerstasjonene mye mindre, se avsnitt 3.3. Fallende statikk hadde stor betydning for belastningen av Rudshøgda og Otta, men for de øvrige stasjonene lite eller motstridende resultater. Fåberg ble mye belastet og med 12 % statikk økte faktisk belastningen for denne. Derfor er det i denne simuleringen Fåberg som mister ett aggregat.

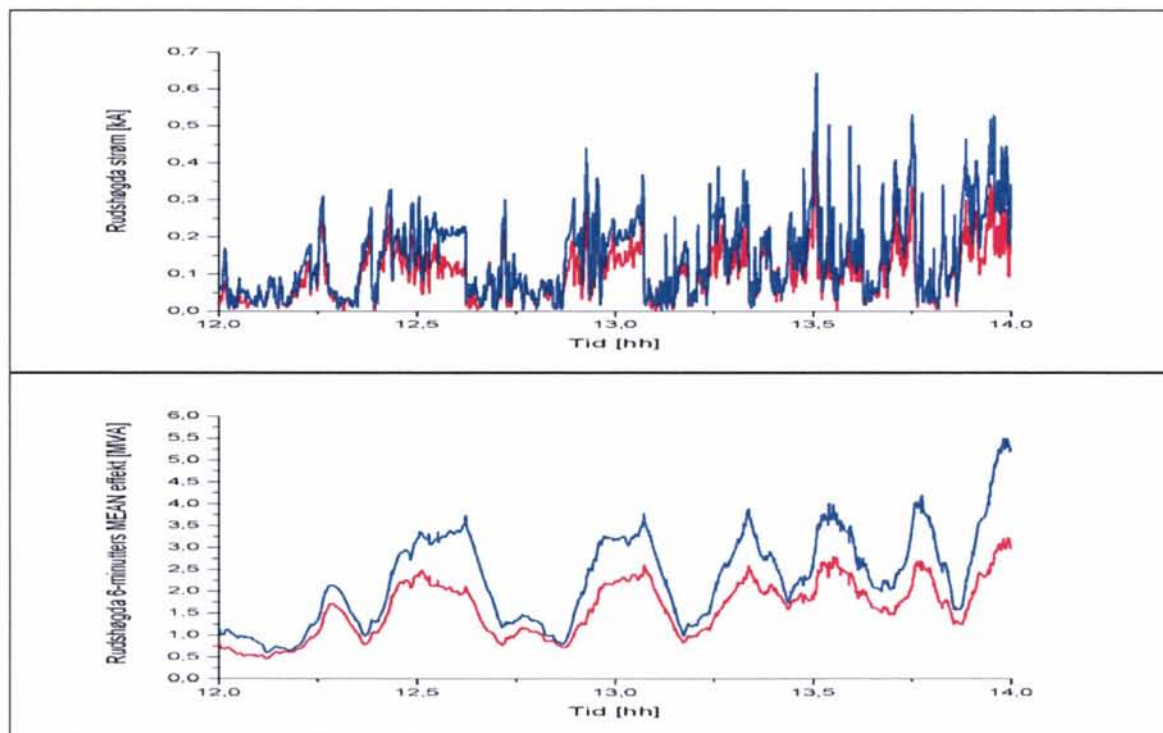
### 3.4.1 Omformerbelastning

Tabell 3-8 viser høyeste belastning for omformerstasjonene nært Fåberg når ett av aggregatene er utkoblet her. Igjen ser en resultatet at stor fallende statikk får liten betydning for stasjonene, både de som har normal driftsituasjon og for den med utfall. Bare for Rudshøgda og Otta har den store fallende statikken på 16 % stor betydning og er avgjørende for å forhindre overbelastning.

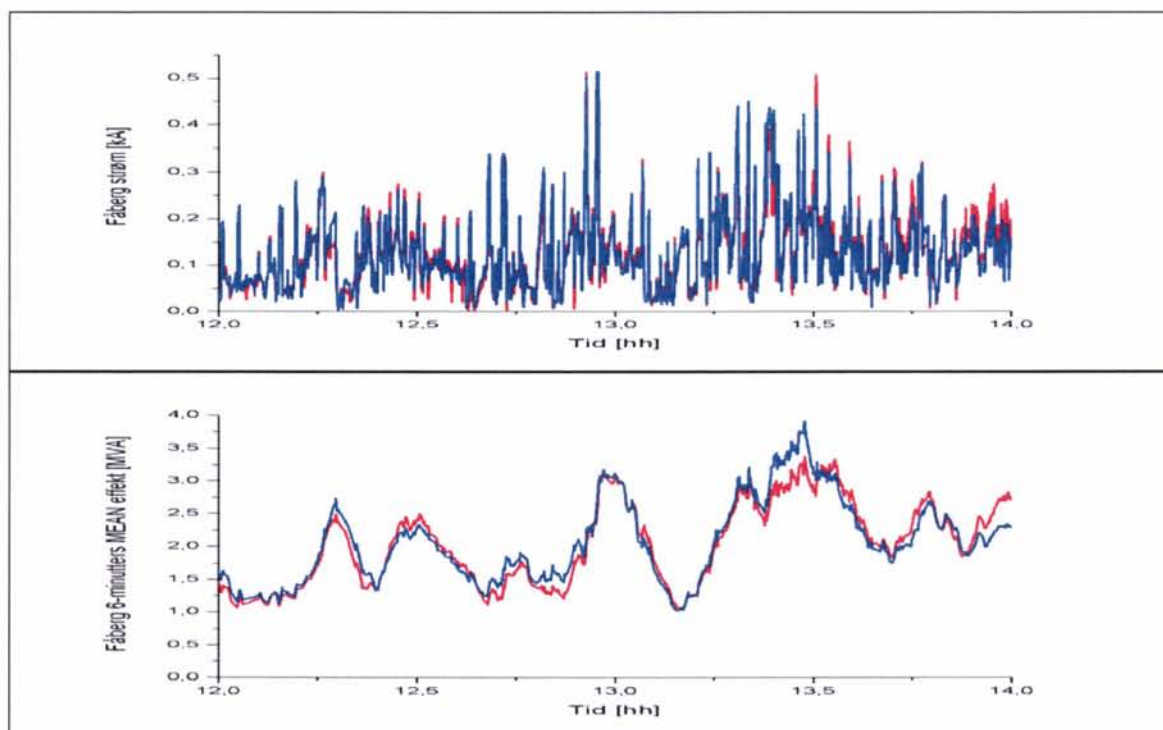
Undersøkelsene av belastningsutviklingen over tid viser det samme, se Figur 3-23, Figur 3-24 og Figur 3-25 som viser belastningen for henholdsvis Rudshøgda, Fåberg og Fron. Kun små endringer kan sees for belastningen av Fåberg, men så var ikke belastningen i normal drift særlig stor heller. En klar endring ser en for 6-minutters MEAN verdi av effekten omentrent mellom klokken 13:20 og 13:30. Her gir statikken på 24 % en reduksjon på ca 0,5 MVA. I andre perioder øker derimot effektproduksjonen! Også for Fron sin del kan en se at med økt statikk oppstår både en tidvis økning og reduksjon.

**Tabell 3-8 Maksimal belastning av omformerstasjonene med henholdsvis flat og fallende statikk. Utthevede tall betyr at belastningen sannsynligvis er for stor til å hindre utfall av det gjenværende aggregatet om ett faller ut. Rød betyr at overbelastning vil skje og svart at marginene er overskredet så mye at det er fare for tap av redundans. Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene og utfall av ett aggregat i Fåberg.**

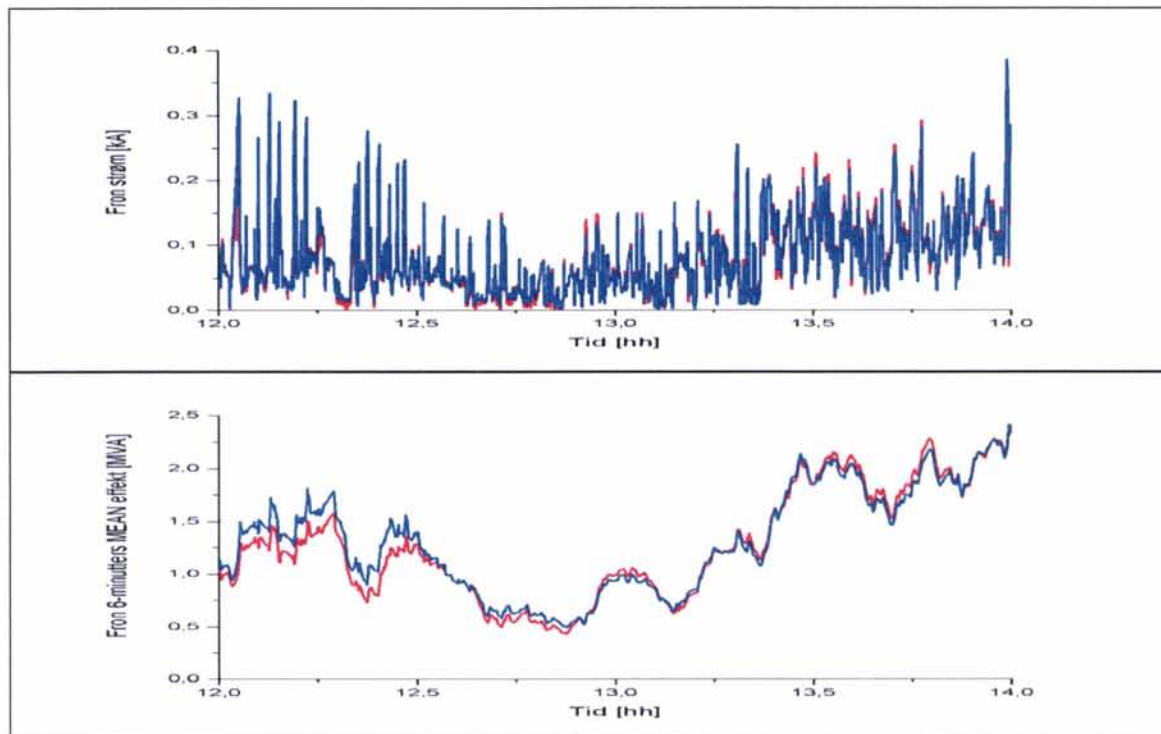
Omformer	Innsatt ytelse [MVA]	Statikk [%]	Strøm		Effekt			
			2 sek RMS verdi		6 min MEAN		1 time MEAN	
			[kA]	[%]	[MVA]	[%]	[MVA]	[%]
Tangen	2 x 7,0	0	0,975	59	6,760	31	4,839	35
		12	0,942	57	6,953	32	5,063	36
Rudshøgda	3,1	0	0,643	143	5,546	116	3,308	106
		16	0,467	103	3,335	69	2,225	72
Fåberg	5,8	5	0,515	82	4,288	54	2,689	46
		24	0,513	82	3,712	46	2,553	44
Fron	2 x 5,8	0	0,533	43	4,420	28	3,102	27
		12	0,551	44	4,885	31	3,484	30
Otta	3,1	0	0,568	126	5,224	109	3,140	101
		12	0,351	78	3,036	63	2,069	67



Figur 3-23 Belastning av Rudshøgda omformerstasjon med henholdsvis flat (blå kurve) og 16 % fallende statikk (rød kurve). 2-sekunders RMS verdi av strøm øverst og 6-minutters MEAN verdi av effekten nederst. Simulering med utfall av ett aggregat i Fåberg.



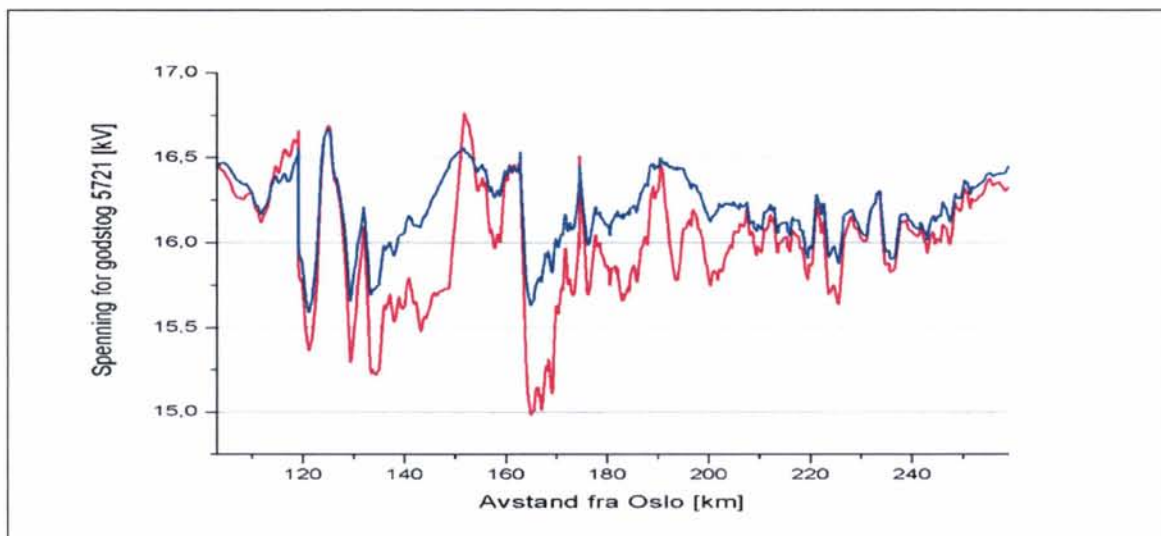
Figur 3-24 Belastning av Fåberg omformerstasjon med henholdsvis flat (blå kurve) og 16 % fallende statikk (rød kurve). 2-sekunders RMS verdi av strøm øverst og 6-minutters MEAN verdi av effekten nederst. Simulering med utfall av ett aggregat i Fåberg.



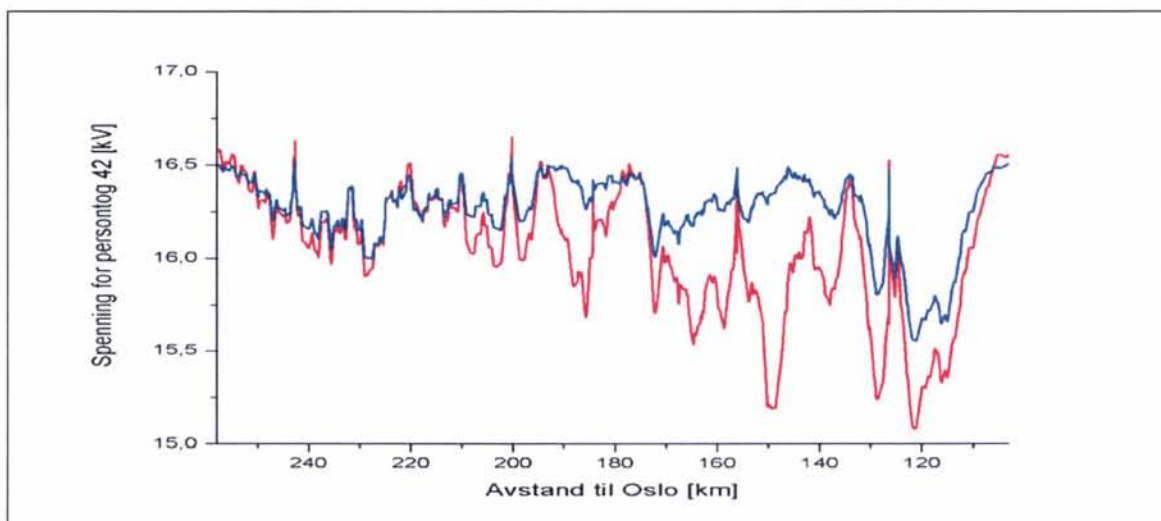
Figur 3-25 Belastning av Fron omformerstasjon med henholdsvis flat (blå kurve) og 16 % fallende statikk (rød kurve). 2-sekunders RMS verdi av strøm øverst og 6-minutters MEAN verdi av effekten nederst. Simulering med utfall av ett aggregat i Fåberg.

### 3.4.2 Spenning for togene

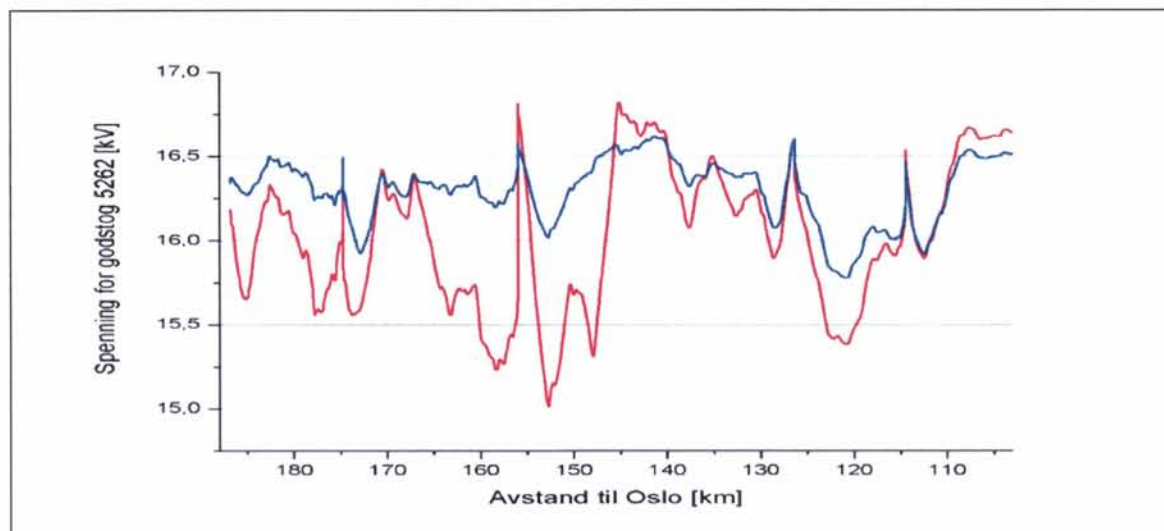
En skulle ha forventet at med så marginale endringer av effektproduksjonen oppstår minimale endringer av spenningene. Av undersøkelsene i Figur 3-26, Figur 3-27, Figur 3-28 og Figur 3-29 for henholdsvis tog 5721, 42, 5262 og 5724, kan en likevel se at det oppstår til dels store endringer. Alle togene er undersøkt mellom Tangen og Fron, unntatt tog 5262 som starter på Hove og går sørover. Selv om påvirkningene av fallende statikk er store relativt sett, er spenningene fremdeles meget gode med verdier stort sett over 15 kV. Legg imidlertid merke til at selve utfallet av ett aggregat i Fåberg (omentrent ved km 191) ser ut til å være uten betydning, - spenningen i dette området er ikke påfallende lav. Flere tog og større belastning kan gjerne komme til å få større betydning.



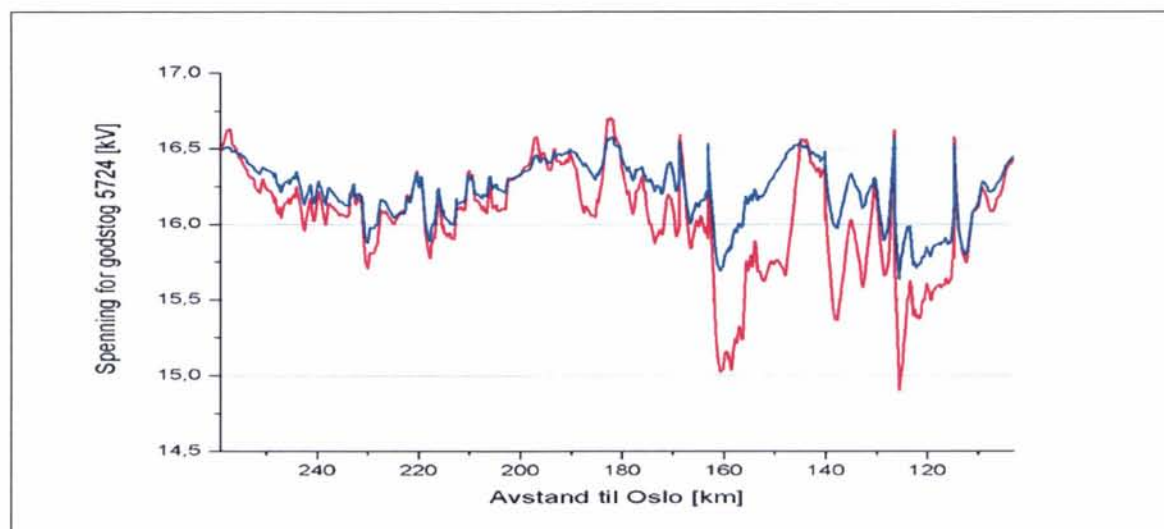
**Figur 3-26** Spenning for tog 5721 mellom Tangen og Fron med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene.



**Figur 3-27** Spenning for ekspresstog 42 med E118 mellom Fron og Tangen med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene.



Figur 3-28 Spenning for tog 5262 mellom Hove og Tangen med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene.



Figur 3-29 Spenning for tog 5724 med E118 mellom Fron og Tangen med flat statikk (blå kurve) og fallende statikk (rød kurve). Simulering med CE119 lokomotiver for godstogene.

## 4 OPPSUMMERING, DISKUSJON OG ANBEFALINGER

### 4.1 Oppsummering av resultatene

#### 4.1.1 Oppsummering av resultater for konvensjonell banestrømforsyning

De stiliserte undersøkelser som er gjort for å undersøke innvirkningen av fallende statikk ved økende reaktiv belastning har vist følgende:

- Grunnleggende problemstilling:
  - I et banestrømforsyningssystem er det alltid en forholdsvis stor reaktiv effektutveksling mellom omformerstasjonene. De relative fasevinklene mellom stasjonene er avgjørende.
  - Dette fenomenet er unikt for jernbanens anlegg bestående av roterende omformere og kl-anlegg, og skyldes at forholdet mellom resistans og reaktans er nesten like stor. I konvensjonell energiforsyning er dette forholdet helt annerledes ved at resistansen er liten og reaktansen typisk 10 ganger større.
- For normal drift med alle aggregatene inne:
  - Fallende statikk reduserer omformerstasjonenes reaktive effektproduksjon og dermed faren for overbelastning.
  - Med 12 % fallende statikk og togene rett utenfor stasjonen kan det tillates med et økt effektuttak på 1 - 2 MW til togene. Omformerstasjonen er da på grensen til å overbelastes, men en større del av effekten hentes fra nabostasjonene enn med lav eller ingen statikk.
  - Med tog ute på strekningen og 12 % fallende statikk reduseres tillatt effekt som kan trekkes med 2 MW i forhold til flat statikk. Dette om en skal forhindre spenningen fra å komme under 12,0 kV. Imidlertid kan det uansett trekkes større effekt midt ute på matestrekningen enn rett ved en omformerstasjon.
  - En innstilling på 12 % er et kompromiss for å tillate høyest mulig belastning rett ved omformerstasjonen uten å få overbelastning av den. Samtidig som spenningen ute på matestrekningen ikke skal bli uakseptabel lav.
  - For tog som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  oppnår en de samme egenskapene som forklart ovenfor, men i noe mindre grad.
- For normal drift og utfall av ett av to aggregater:
  - Med en fallende statikk med 12 % i normal drift forutsettes det at med utfall vil en få en statikk på 24 %. Dette gjør at om det er tog rett ved omformerstasjonen kan belastningen ved stasjonen være hele 1,45 MW større enn med flat statikk uten at overbelastning av det gjenværende aggregatet oppstår. Forskjellen er på 11 %.
  - Selv med en fallende statikk på 12 % kan ikke belastningen på stasjonen tillates å være noe høyere enn 50 % før utfall av aggregat. Dette gjelder med last som trekker kun aktiv effekt. Spenningen ved stasjonen blir lav med så stor statikk.
  - Dette tyder på at redundanskriteriet ikke kan økes fra dagens 50 - 60 % til høyere verdier. En bør heller innskjerpe kravet og si at belastning over 50 % ikke tillates.
  - Ute på matestrekningen blir spenningen akseptabel selv med en fallende statikk på 24 % ved utfall av ett aggregat i en stasjon.



- Med en last som trekker effekt med  $\cos \varphi = 0,7$  gjelder omtrent det samme.
- For nabostasjoner med forskjellige aggregatstørrelser ser det ikke ut til å være behov for å velge annen statikk enn 12 %.
- Også for 40 km lange matestrekninger med like store omformerstasjoner er en statikk på 12 % passende.
- For små nabostasjoner som Rudshøgda og Otta med kun ett 3,1 MVA aggregat, vil en statikk på 16 % kunne være til god hjelp for å unngå overbelastning.
- Redundanskriteriet ser ut til å måtte settes til 50 % med de vurderingene som er gjort her. Altså kan en ikke ha en tommelfingerregel om at belastningen kan være 50 - 60 % før utfall slik en inntil nå har hatt. En legger imidlertid merke til at belastningen på stasjonen totalt sett kan økes en del med denne undersøkte økte statikken. Dette er i seg selv en meget gunstig tendens.
- Simuleringer med togtrafikk i 24 timer på Dovrebanen har vist at:
  - I normal drift med 12 % fallende statikk for alle aggregater, unntatt Rudshøgda og Otta med 16 %, blir belastningen av aggregatene redusert med mellom ett og fire prosentpoeng (referert installert ytelse). Dette gjelder med E114 og E116 lokomotiver for godstogene.
  - Med samme statikk og trafikksimulering der alle godstogene trekkes med CE119 lokomotiver reduseres belastningen betydelig, men resultatet av 12 % og 16 % statikk er ikke entydig. Det oppstår relativt små endringer og for noen omformere øker belastningen noe. For Rudshøgda og Otta derimot er den endrede statikken meget gunstig for å unngå overbelastning.
  - Spenningen for togene blir påvirket spesielt ved Otta omformerstasjon i krysningsbeltet. Spenningen er vurdert til ikke å bli lavere enn det som kan aksepteres.
  - Energiforbruket blir så lite påvirket av valg av statikk at det kan neglisjeres.
- Simulering med togtrafikk, E114 og E116 lokomotiver og utfall av ett aggregat i Dombås viste at:
  - Med en fallende statikk på bare 5 % ved utfall av ett aggregat ble belastningen over 100 % for Dombås, men med 24 % kom belastningen så vidt under 100 %.
  - Otta omformer må ta over en del av effektproduksjonen og dermed står den i fare for å falle ut også. Dermed vil Dombås sitt gjenværende aggregat sannsynligvis også falle ut.
  - Spenningen for togene som er undersøkt ble påvirket, men bare ett tog fikk spenning helt ned mot 12 kV. For de andre togene ble laveste spenning ikke under 13 kV.
  - Hadde det vært flere tog inne samtidig i dette området kunne en ha forventet enda lavere spenning.
- Simulering med togtrafikk, CE119 lokomotiver og utfall av ett aggregat i Fåberg viste at:
  - Belastning av omformerstasjonene ble kun marginalt endret.

- Spenningene for togene viste relativt store endringer, mellom 0,5 og 1,0 kV for de togene som er undersøkt. Imidlertid fikk alle togene spenninger stort sett over 15,0 kV.
- Også for denne simuleringen er valg av statikk av liten betydning for energiforbruket.

#### 4.1.2 Oppsummering av resultater for banestrømforsyning med AT-system

- Undersøkelser vedrørende fallende statikk for AT-system med 120 km mellom omformerstasjonene og 3 x 5,8 MVA aggregater viser følgende:
  - I normal drift og alle aggregater inne kan tog rett utenfor stasjonen trekke så mye som 33,4 MW ved 16 % statikk uten at aggregatene belastes mer enn 2/3. Dette er en økning på ca 3 MW i forhold til 4 % statikk.
  - Med tog ute på strekningen kan ikke mer enn ca 24 MW trekkes uten at spenningen blir for lav med denne statikken.
  - Ved utfall av ett av tre aggregater kan tillatt last fra tog rett ved stasjonen tillates å økes med over 10 % om statikken økes fra 0 til 16 % fallende statikk.
- Med 3 x 5,8 MVA aggregater kan ikke større belastning enn 70 % tillates etter det som er undersøkt her. Altså tommelfingerregelen kalt redundanskriteriet blir 70 % og ikke 66 til 76 %.

## 4.2 Diskusjon

### 4.2.1 Dagens innstilling av spenningsregulatorene

I dag er de fleste av Bane Energi sine omformere innstilt på ca 16,2 kV bortsett fra Rudshøgda og Otta (begge med ett aggregat på 3,1 MVA) som har en enda lavere innstilling. Dette er i strid med regelverket, som sier 16,5 kV. Selv om omformerstasjonene er ment å ha flat statikk er det likevel tilfelle at noen stasjoner har stigende statikk. Stigende statikk var gunstig i tidligere tider da det ikke var samkjøring mellom stasjonene og gir fordelene av at spenningen ute på linjen bestrebes å holdes konstant når effektforbruket øker. Det er i dette arbeidet ikke utført simuleringer for å undersøke hvordan dette spiller inn på spenning og reaktiv effektproduksjon. Antagelig vil dette gi mye reaktiv effektflyt som er ugunstig med tanke på faren for overbelastning. Selv om for eksempel Hønefoss har stigende statikk er det rapportert om lave spenninger i område ved Gulsvik. At flat eller fallende statikk kan avhjelpe dette er vel mer tvilsomt all den tid den aktuelle mestrekningen mellom Hønefoss og Nesbyen er ca 92 km lang.

Rudshøgda og Otta er rapportert antas å falle ofte ut på grunn av høy belastning. Dessuten gjør valget av lavere tomgangsspenning enn nabostasjonene at det utveksles effekt mellom dem. Sterkt fallende statikk på 16 %, som anbefalt her, vil kunne bøte på dette.

### 4.2.2 Gevinsten med fallende statikk for omformerstasjonene

De stiliserte simuleringene viste en klar fordel med 12 % fallende spenning ved økende reaktiv belastning, men de samme entydige resultatene så en ikke i trafikksimuleringene. Den stiliserte simuleringen viste en klar tendens mot større belastbarhet for omformerstasjonene, men med togtrafikk vise det seg at dette kun hadde en entydig virkning med E114 og E116 lokomotiver. Med moderne CE119 lokomotiver ble det større maksimalbelastning for noen stasjoner og mindre for andre stasjoner. På den annen side fikk dette ikke særlig stor

betydning for spenningen for togene. Spesielt med CE119 lokomotiver var endringen av spenningen liten. Det som virkelig fikk stor betydning var å gi 16 % fallende statikk for de små stasjonene på 3,1 MVA på Rudshøgda og Otta. I dag faller disse stasjonene ofte ut og fallende statikk ser ut til å kunne avhjelpe dette. Her vil denne statikken være til hjelp uansett type tog.

Ved trafikksimulering med E114 og E116 lokomotiver og utfall av ett aggregat i Dombås så en at fallende statikk kan være til stor hjelp for å unngå utfall av det gjenværende aggregatet. Tilfeldigheter når det gjelder antall tog i området samtidig, lastvekten av togene og kjørestillen til lokomotivførerne kan imidlertid få både Otta og det gjenværende aggregatet på Dombås til å falle ut. Lokomotivførerne bør alltid redusere pådraget når de merker at spenningen er lavere enn normalt, som regel under 13 kV, dermed reduseres effektopptaket og risikoen for utfall av aggregater. Ved utfall av aggregater bør det gis beskjed til lokomotivførerne umiddelbart slik at disse kan redusere pådraget.

I mange tilfeller vil nok spenningen bli "mistenkelig" lav ved utfall av ett aggregat og så stor fallende statikk som det er foreslått her. Altså at lokomotivføreren får en fornemmelse av at spenningen er lavere enn vanlig. Dermed kan han både komme til å redusere pådraget og si fra til togleder og andre lokomotivførere. Sammenlignes spenningene i figurene i avsnitt 3.1.2 med normal drift og 3.2.2 med utfall ser det ut til å være en tendens mot lavere spenninger ved utfall og fallende statikk. Om det hadde vært simulert med en ruteplan med mindre togfølgetid anses det som meget sannsynlig at denne forskjellen hadde vært større. Altså større forskjell mellom spenningen ved flat statikk og fallende statikk når en har fått utfall av ett aggregat. Ved flat statikk vil spenningen i slike situasjoner neppe være påvirket av utfallet og lokomotivføreren merker ikke at noe er galt. Dermed gir han pådrag som normalt og blir årsak til at det gjenværende aggregatet faller ut.

I simuleringene med CE119 lokomotiver så en derimot ikke at fallende statikk hadde den samme gunstige effekten. Riktignok fikk Rudshøgda og Otta mye lavere belastning, men resultatene for de andre stasjonene viste små endringer. Dette kan ha sin årsak i at Fåberg omformer som ble simulert med utfall av ett aggregat hadde en helt moderat belastning i normal drift. Dermed var det synd at en ikke fikk utført en simulering der en omformerstasjon som i normal drift er hardt belastet mister ett aggregat. Ser en på de stiliserte simuleringene i avsnitt 2.2.4.1 ser en at en skal kunne forvente lavere belastning av en omformerstasjon om bare behovet fra togene ute på banen er stor nok. Med bare ett tog av gangen opp stigningene fra Dombås får man ikke større effekttrekk fra toget en ca 7,8 MW. Med en slik belastning blir det ikke særlig stor forskjell mellom de forskjellige gradene av fallende statikk. Hadde det derimot vært to tog med kort avstand mellom på denne strekningen ville nok forskjellen blitt mye større, både for belastningsgraden og for spenningen. Ut fra denne analytiske vurderingen anses det som formålstjenelig med fallende statikk også om togene kun trekkes med CE119 lokomotiver.

#### **4.2.3 Belastningsprosent før utfall av ett omformeraggregat - redundanskriteriet**

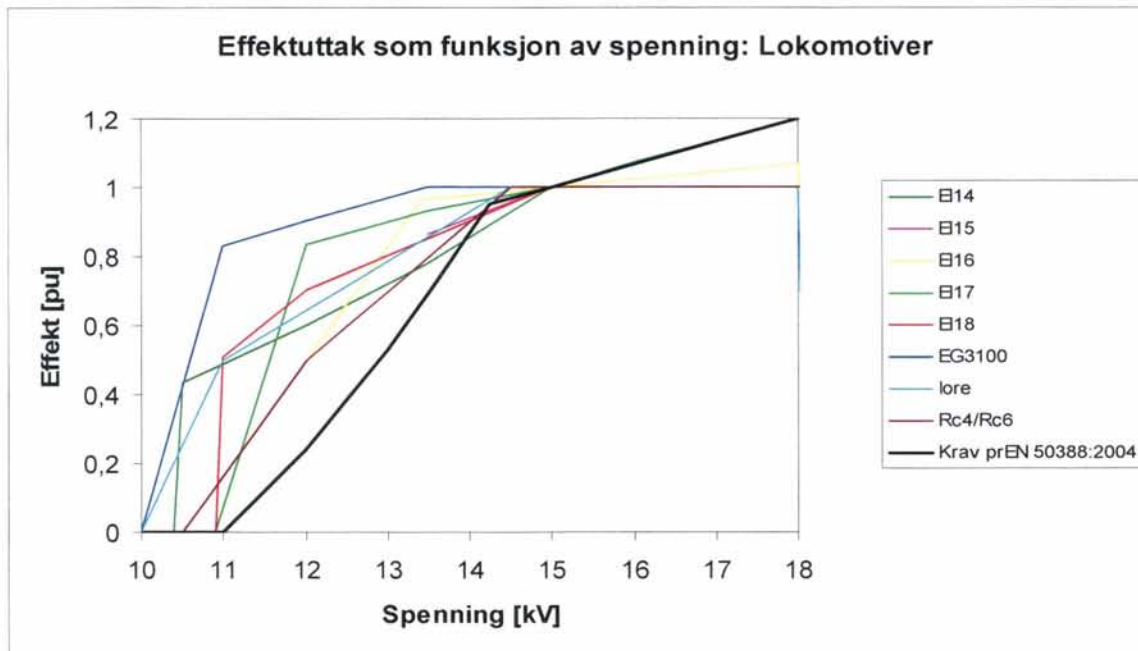
I avsnitt 2.2.2 så en at belastningen før utfall av ett aggregat (i en stasjon med to aggregater) kan ikke være større enn ca 50 %, i alle fall for 2-sekunders verdi av strømmen. For 6-minutters verdi av effekten kunne belastningen være opp mot 56 %. Dette gjelder imidlertid med en viktig forutsetning, og det er at lastenes effektopptak ikke påvirkes av lavere spenning. I dette arbeidet har en sett at en ønsker å gi omformerstasjonene fallende spenning

ved økende reaktiv effektproduksjon. Nettopp dette vil skje ved utfall av ett aggregat og de fleste tog har en automatisk funksjon for reduksjon av effektopptaket ved lav spenning. I tillegg vil gjerne lokomotivføreren selv redusere pådraget ytterligere.

Nedenfor viser Figur 4-1 hvordan lokomotivene skal redusere pådraget sitt ved redusert spenning i henhold til normen EN 50388. Som en ser er reduksjonen stor når spenningen faller, noe som vil føre til at tog ved omformerstasjonen eller ute på matestrekningen vil redusere effektopptaket slik at en kan unngå overbelastning av gjenværende aggregat. Ved en fallende statikk på 24 % ved utfall vil spenningen falle til omtrent 14,5 kV ved 8 MVA belastning når toget trekker effekt ved  $\cos \varphi = 1,0$ . Ved last med  $\cos \varphi = 0,7$  vil spenningen bli ca 13,8 kV når belastningen er 8 MVA. Dette er avlest av kurvene for spenning og effekt i avsnitt 2.2.2. Av figuren for redusert effekt etter normen EN 50388 ser en at effekten skal bli redusert med 0,95 pu og 0,8 pu for henholdsvis aktiv belastning med  $\cos \varphi = 1,0$  og med  $\cos \varphi = 0,7$ . Altså kan en forvente en reduksjon av effektopptaket på 5 % for moderne asynkronlokomotiver. Dette kan tyde på at belastningen kunne ha vært 55 % før utfall om en regner at fordelingen av effekt mellom omformerstasjonene påvirkes i liten grad. Med tyristorlokomotiver blir tilsvarende reduksjon 20 % og belastningen kunne vært 70 % før utfall. Nå viser imidlertid den gule kurven for E116 lokomotivet en mindre reduksjon enn dette ved såpass lav spenning.

Når det gjelder undersøkelsene for AT-system har en sett at med tre aggregater (hvert på 5,8 MVA) i hver omformerstasjon kan en belastning på mellom 68 og 77 % før utfall kunne aksepteres. I utgangspunktet vil denne prosentatsen være 67 % (2/3 av samlet ytelse). Det ligger en viktig forutsetning til grunn i undersøkelsene som nok kan endre denne belastningsgraden før utfall, det er at det ikke er noen andre tog tilstede enn de som er rett ved stasjonen. En annen forutsetning er at alle nabostasjoner har alle sine tre aggregater i drift. At alle tre aggregater er i drift vil bare forekomme ved stor belastning og at det skal være slik samtidig for en banestrekning på 480 km (ca hele Bergensbanen) kan synes usannsynlig. Færre aggregater i drift i nabostasjonene og andre tog i trafikk vil føre til mindre mulighet for overføring av effekt til andre omformerstasjoner. Dermed bør en nok gå inn for å beholde tallet på 67 % som maksimal belastning for stasjonen med alle tre aggregater i drift. Selv om det ikke er undersøkt, kan det også antas at med to aggregater er høyeste belastningsgrad 50 % og med fire aggregater 75 %.

Med så enkle betraktninger som dette ser det ut til at selv om spenningen reduseres en del med stor fallende statikk for omformerstasjonene, er det ikke nok til å kunne øke belastningen før utfall. Skal en være på den trygge siden bør belastningen ikke være over 50 %, altså det samme som en fant i avsnitt 2.2.2. Egne trafikksimuleringer må gjøres om en ønsker å få bekreftet at større belastning enn 50 % kan tillates, men også da vil en ikke være sikker fordi forskjellige ruteplaner kan gi forskjellige belastningsfordeling mellom stasjonene.



Figur 4-1 Forholdet mellom effektuttak og spenning for noen aktuelle lokomotivtyper og kravet i henhold til EN 50388.

#### 4.2.4 Fallende statikk for aktiv effektproduksjon kunne også vært fordelaktig

Mulig en da kan velge innstilling slik at overbelastning aldri skjer fordi togene selv begrenser effektopptaket nært omformerne og nesekurvns begrensnng kommer ute på linjen. Noe slikt kunne vært interessant å undersøke og spesielt kunne en unngått overbelastning ved utfall av aggregater. Spesielt om dette er noe som kan være til nytte med fremtidig AT-system bør det vurderes.

#### 4.2.5 Fordelaktig med enda større redusert spenning ved utfall av aggregater

Med redusert spenning ved utfall av aggregater vil togenes automatiske effektreduksjon ved lav spenning sørge for lavere belastning for hele banestrømforsyningen, se Figur 4-1. Dermed vil ikke bare stor fallende statikk gjøre at omformerstasjonen som mister ett av sine aggregater få redusert sin reaktive effektproduksjon, men behovet for effekt reduseres også. Riktignok fører dette igjen til at togene kjører saktere, men det er tross alt bedre enn at det gjenværende aggregatet faller ut, - med enda lavere spenning som resultat. Spesielt ettersom det innføres flere lokomotiver med spenningsreduksjon etter normen EN 50388 vil denne mekanismen gjøre seg gjeldende i enda større grad.

#### 4.2.6 Overveielse mellom redusert spenning ved normal drift og fordelene av å unngå overbelastning ved utfall

Lokomotivførere forteller om langvarige lave spenninger på Dovrebanen i stigningene i området rundt Garli ved kjøring sørover og ved Hjerkinns på veg nordover, se [4]. Det er ikke gjort noen målinger eller undersøkelser vedrørende omstendighetene rundt dette, men sannsynligheten taler for at dette skjer ved flere tog inne på de aktuelle matestrekningene. Simuleringene her antyder ikke spesielt lave spenninger og følgetidene for togene i rute R151.2 ser ut til å være lange. Nå er det ikke tillatt å kjøre tog med E116 med mindre

togfølgetid enn to timer, men ett E116 sammen med en E114 eller E118 kan skje. Når dette skjer skal det visstnok oppstå spenninger ned mot 12 kV langvarig og lengre kjøretid slik at togene blir flere minutter etter ruteplanen. Spørsmålet er da om fallende statikk for reaktiv effekt kan forverre forholdene.

At spenningen på samleskinne i omformerstasjonene heves fra 16,2 til 16,5 kV kan muligens forbedre spenningen noe, men neppe mye. Når E116 lokomotiver kjører med en slik hastighet at effektfaktoren er spesielt ugunstig og det er andre tunge tog i samme område kan en nok kunne forvente lavere spenning enn i dag. I vurderingen av dette må en ta i betraktning at fallende statikk også gir fordelene av økt sannsynlighet for å unngå utfall av det gjenværende aggregatet når det ene er falt ut. Det er fare for lavere spenning enn i dagens situasjon bare når det er flere tog på en matestrekning og når det trekkes mye reaktiv effekt.

I avsnitt 4.2.2 ble det drøftet fordeler med fallende statikk, men det kan være forhold rundt praktiske forhold ved togfremføring som er vanskelige å forutsette. Om ny innstilling og justering av regulatorene er arbeidskrevende vil det være forsmedelig om en foretar en landsomfattende endring som i ettertid viser seg ugunstig og som må gjøres om. I så fall bør en gjøre dette først på kun én banestrekning og så evaluere resultatet av dette. Dovrebanen anbefales som teststrekning spesielt fordi en raskt vil kunne se om Rudshøgda og Otta faller ut mindre hyppig. En annen grunn er at Dombås omformerstasjon er hardt belastet. Etter nye innstillinger kan en gjøre målinger for å undersøke om spissbelastningen blir redusert.

#### **4.2.7 Fallende statikk i omformerstasjoner i fremtidig AT-system**

Kun stiliserte simuleringer ble gjort med AT-system og fallende statikk i omformerstasjonene. Disse undersøkelsene viste gunstige resultater og det er naturlig at dette følges opp med trafikksimuleringer. Dette bør absolutt gjøres i fremtidige simuleringer for Dovrebanen og Bergensbanen.

## 5 KONKLUSJON OG ANBEFALINGER

Undersøkelsene som er gjort her viser at det kan gi fordeler om Jernbaneverkets omformerstasjoner gis en fallende statikk på 12 %. Det vil si at når belastningen øker fra tomgang til fullast skal den falle fra 16,5 kV til 14,52 kV forutsatt at belastningen er rent reaktiv. For Rudshøgda og Otta med bare ett aggregat på 3,1 MVA er det funnet at 16 % fallende statikk vil være gunstig. Disse anbefalingene er fremkommet ved stiliserte simuleringer, og trafikksimuleringene som er gjennomført underbygger at disse innstillingene vil gi de fordelene som er funnet. Disse er:

- Mindre reaktiv effektproduksjon som minsker faren for overbelastning.
- Den fallende statikken vil fordobles ved utfall av ett av aggregatene i stasjoner med to, dermed vil stasjonen redusere sin reaktive effektproduksjon vesentlig. Risikoen for overbelastning reduseres.
- Sterkt redusert reaktiv effektproduksjon ved utfall fører til redusert spenning, og dette vil få togene til å redusere sitt effektopptak automatisk. Lokomotivførerne vil også se at spenningen blir lavere enn normalt og kunne reagere med å redusere pådraget ytterligere.

Riktignok er nok ruteplanen som har vært brukt i trafikksimuleringen her ikke en som belaster banestrømforsyningen så mye som andre kan gjøre. Dermed kan det forventes lavere spenninger i normal drift og med E116 lokomotiver enn det som er funnet her. Dette kan tenkes å være problematisk ved intensiv trafikk om det innføres 12 % fallende statikk. Ruteplanen var heller ikke intensiv nok til å vise fordelene av 12 % fallende statikk med moderne lokomotiver som type CE119. Vurderinger av de stiliserte simuleringene tyder imidlertid på at de samme fordelene skal kunne oppstå også når alle lokomotiver for godstogene er av denne typen.

På grunnlag av usikkerhet angående lave spenninger med fallende statikk, intensiv trafikk og bruk av E116 anbefales det at en ikke innfører 12 % fallende statikk for alle omformerstasjoner, men at en tester dette ut først på Dovrebanen.

## 6 APPENDIKS A - TRAFIKKSIMULERINGER FOR Å BESTEMME STED FOR LAVESTE SPENNING OG ANTALL TOG

For å finne optimal spenningsregulatorinnstilling med tog ute på en matestrekningen må en kjenne til antallet og posisjonen som gir lavest spenning. Det blir ikke riktig om en lar en eneste last trekke effekt som tilsvarer effekten fra flere tog samtidig. Da kan en etterpå benytte statiske laster som øker sitt effektopptak. Spenningen må ikke stilles så lavt at togene får for lav spenning.

Det er gjort egne undersøkelser i [3] som ser på laster som flyttes langs en matestrekning og resulterende spenning og effektflyt, se figur 34 og 35 på side 40 og 41 i den rapporten. Belastningen ble flyttet langs en 80 km lang strekning med intervaller på 13,33 km og i det første tilfellet med ren aktiv effekt og i det siste med  $\cos \varphi = 0,7$ . Av dette kunne en se at:

- Lav spenning og størst reaktiv effektutveksling med en ren aktiv belastningen skjer ikke samtidig.
  - Det oppstår minst utveksling av reaktiv effekt mellom omformerne når belastningen er midt mellom omformerne. Det er ingen faseforskyvning mellom de to stasjonene og all reaktiv effekt skyldes kontaktledningens reaktans.
  - Det oppstår størst reaktiv effektutveksling mellom omformerne når belastningen er rett ved en omformerstasjon. Reaktiv effektflyt skyldes både reaktansen til kontaktledningen og stor faseforskyvning mellom omformerstasjonene.
- For tilfellet med både aktiv og reaktiv belastning oppstår lavest spenning og stor reaktiv effektutveksling når belastningen er midt på matestrekningen. Her er det forutsatt  $\cos \varphi = 0,7$ . Justering av stasjonenes statikk kan her bli kritisk for laveste spenning som oppstår.
  - Det oppstår stor utveksling av reaktiv effekt mellom omformerne når belastningen er midt mellom omformerne. Reaktiv effekt fra stasjonene skyldes både kontaktledningens reaktans og lastens behov.
  - Størst reaktiv effekt fra omformerstasjonene oppstår når belastningen er rett ved disse.
  - Lavest spenning oppstår når lasten er midt på matestrekningen.

En ønsker å oppnå at togene trekker opp mot 700 A, med plassering slik at spenningen blir lavest mulig. Samtidig skal ikke omformerstasjonen som belastes mest bli for mye belastet, anslagsvis 50 - 70 %. Det er ca 10 km mellom hver last, noe som tilsvarer 8 minutter togfølgetid om togene holder 80 km/t. Dette skal altså tilsvare belastningen fra tog med moderne lokomotiver med styring av reaktiv effekt. Det er flat statikk i begge tilfellene og lastene trekker eksakt samme effekt. Med belastning som fra E116 lokomotiver kan banestrømforsyningen alene tillate at opptil tre tog kjører med 8 minutters togfølgetid i stigninger, se [4]. I den samme utredningen står det imidlertid at kortere togfølgetid enn 30 minutter ikke kan tillates på grunn av problemer med sporfelte og signalanlegg. Det kan da maksimalt være to tog inne på en matestrekning og med en middelhastighet på 80 km/t blir det 40 km mellom togene.

Det gjøres her en enkel trafikksimulering der tog kjøres på en strekning med fire omformerstasjoner med 80 km mellom og med en passende stigning for å få stort



effekttopptak. Omformerstasjonene kalles AX, A, B og BX og forholdene er ellers som i de øvrige undersøkelsene i dette arbeidet. For tog med moderne lokomotiver og et strømtrekk opp mot 700 A benyttes det godstog trukket med doble CE119 lokomotiver med 1200 tonn lastvekt. Stigningen settes til 20 ‰ og hastighet settes til 80 km/t. Togene kjøres ut i kolonner for tog med doble CE119 slik:

- Et tog
- To tog med togfølgetid 30 minutter (Tilsvarende 40 km avstand)
- To tog med togfølgetid 8 minutter (Tilsvarende ca 10 km avstand)
- Tre tog med togfølgetid 8 minutter
- Fire tog med togfølgetid 8 minutter

Togene kjøres ut i kolonner for tog med E116 og 800 tonnlastvekt slik at effekt faktoren skal bli nærmest mulig 0,7. Dette gjøres ved å sette hastigheten til 50 km/t og da oppnåes  $\cos \varphi = 0,7$ . For å få avstanden som 30 minutters følgetid og gjennomsnittlig hastighet på 80 km/t tilsvarende, reduseres følgetiden. Stigningen er da på 25 ‰. Togene kjøres ut i kolonne slik:

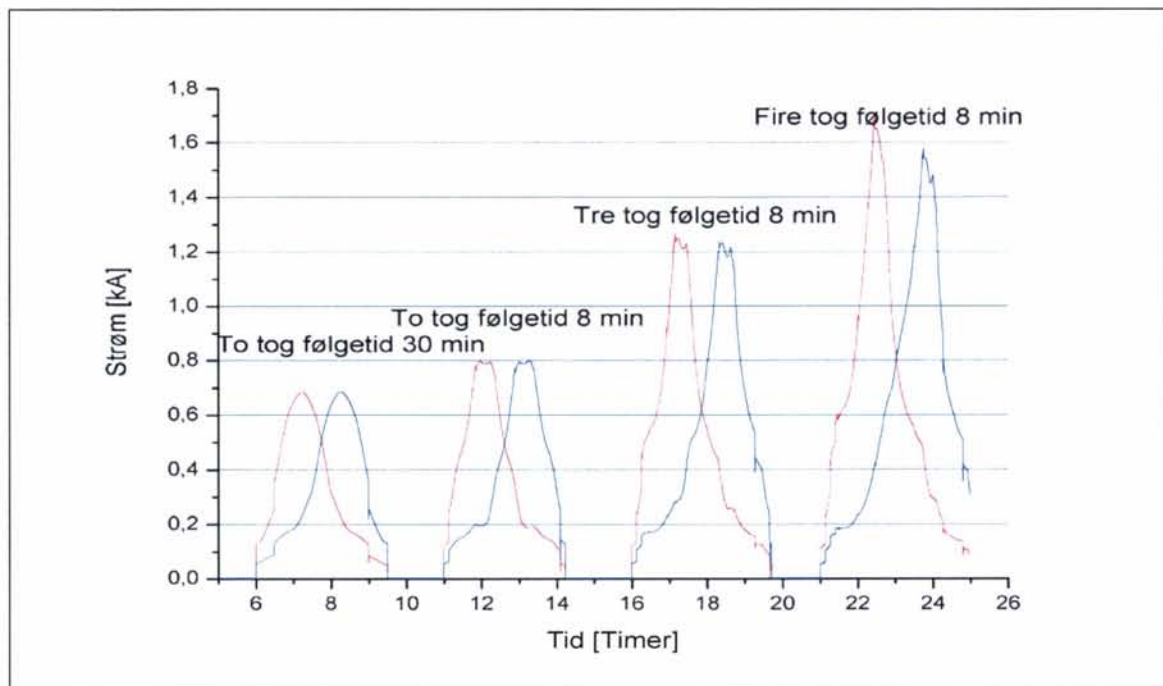
- Et tog
- To tog med togfølgetid 48 minutter (Tilsvarende 40 km avstand)
- To tog med togfølgetid 13 minutter (Tilsvarende ca 10 km avstand)
- Tre tog med togfølgetid 13 minutter

## **6.1 Laveste spenning for tilfelle med like omformere på 2 x 5,8 MVA og 80 km mellom dem**

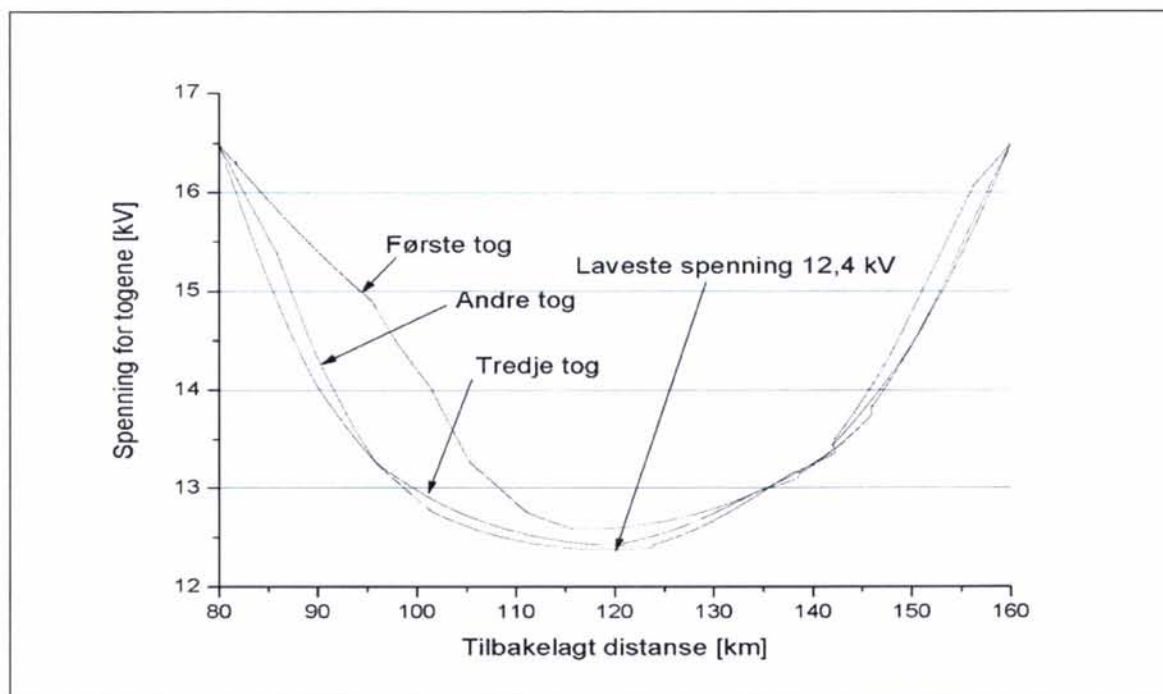
### **6.1.1 Tilfelle med normal drift**

Med normal driftsituasjon og godstog med CE119 lokomotiver viser Figur 6-1 strømbelastningen på omformerstasjon A (rød strek) og B (blå strek) når kolonnene med tog trafikkerer den totalt 240 km lange strekningen. Høyest effekt oppstår når togene trekker effekt like utenfor omformerstasjonen og der effekten er lik er togene slik plassert på matestrekningen at effekten deles likt. Toget med doble CE119 lokomotiver trekker 8,4 MW eller 528 A. Strøm og effekt fra nabostasjonene AX og BX er ikke undersøkt, men denne vil være stor når så mye effekt trekkes av togene. Maksimalt tillatt strøm fra en stasjon med aggregater på 2 x 5,8 MVA er 625 A om redundanskriteriet benyttes strengt. Her ser det ut til at en belastning på tre tog med følgetid 8 minutter omtrent oppfyller dette når togene er midt på matestrekningen mellom stasjon A og B. Tre slike tog er svært mye og må kunne forutsettes å være absolutt alle høyeste effekt som kan tenkes. Av Figur 6-2 ser en at spenningen er lavest når det andre toget er midt på og det er ca 10 km fram til det eneste toget og 10 km bak til det tredje.

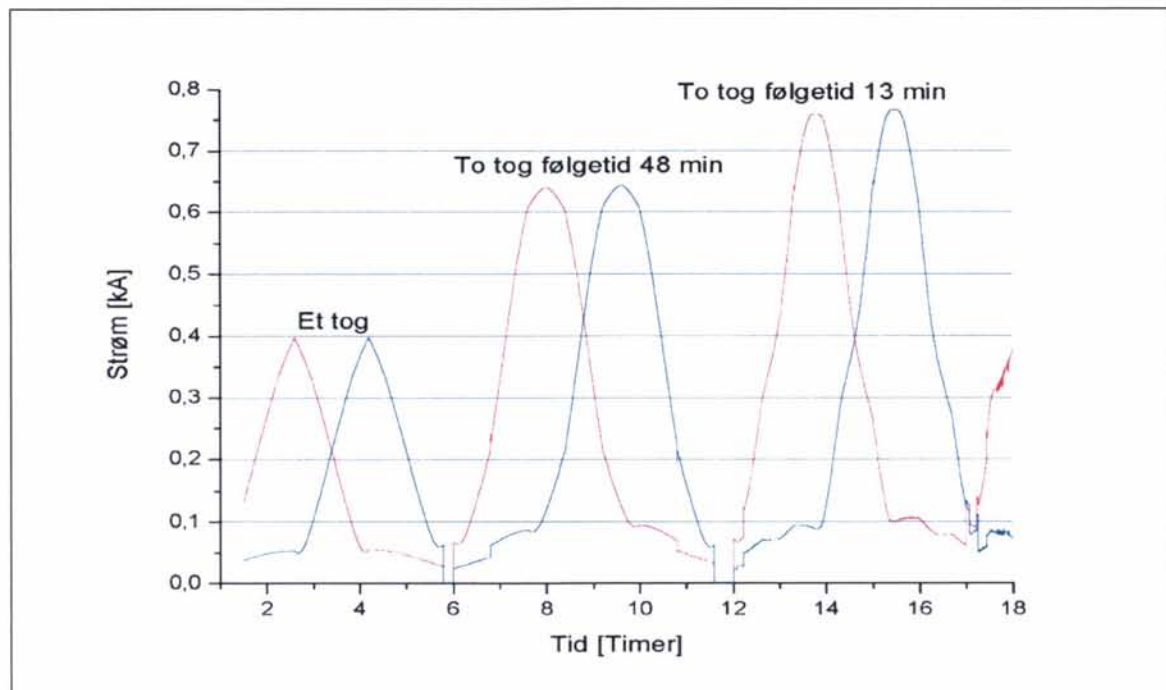
For tilfellet med E116 lokomotiver ser en at med to tog med 48 minutter eller 40 km mellom trekkes det en moderat strøm fra omformerstasjonene, se Figur 6-3. Av Figur 6-4 ser en at lavest spenning oppstår for det første toget ved km 130, da er det andre toget ved km 90. Lavest spenning for det andre toget oppstår ved km 110 og da er det første toget ved km 150 km. Dette er ikke det samme som tidspunktene som gir høyest strøm eller effekt fra omformerne.



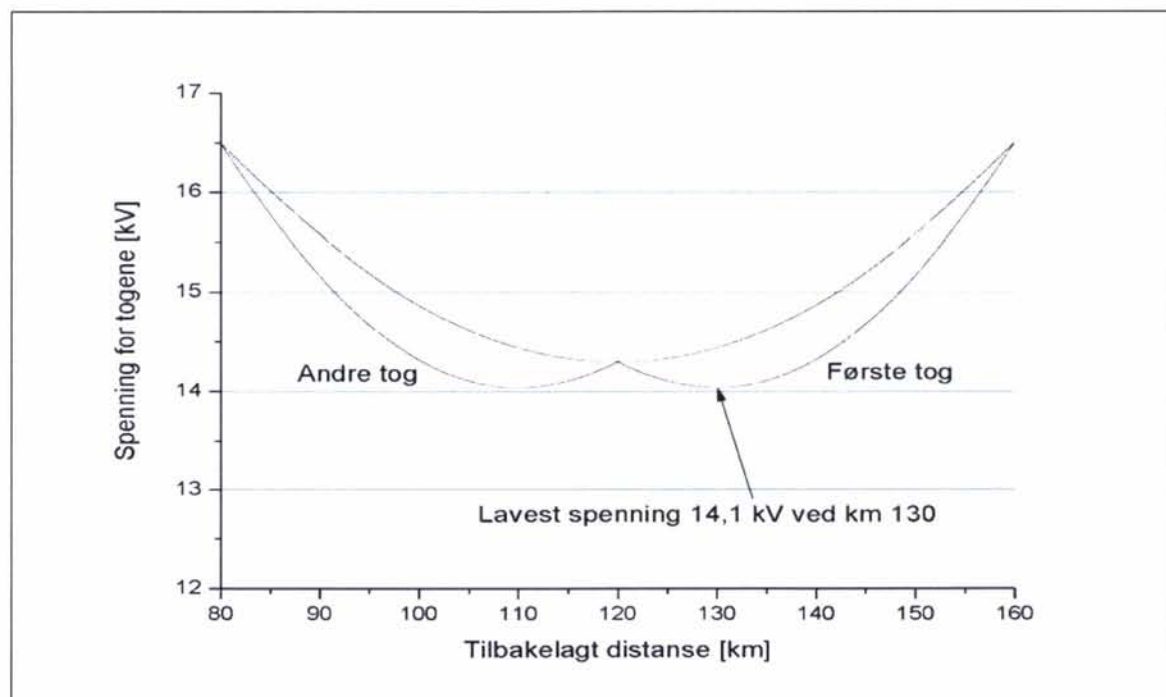
Figur 6-1 Strøm fra omformerstasjonen når kolonner med godstog med doble CE119 lokomotiver og forskjellig antall og togfølgetid trafikkerer en tenkt matestrekningen.



Figur 6-2 Spenningen som oppstår for det maksimale antallet tog som kan trafikkere strekningen uten overbelastning. CE119 lokomotiver for godstogene.



Figur 6-3 Strøm fra omformerstasjonen når kolonner med godstog med E116 lokomotiver og forskjellig antall og togfølgetid trafikkerer en tenkt matestreknigen.



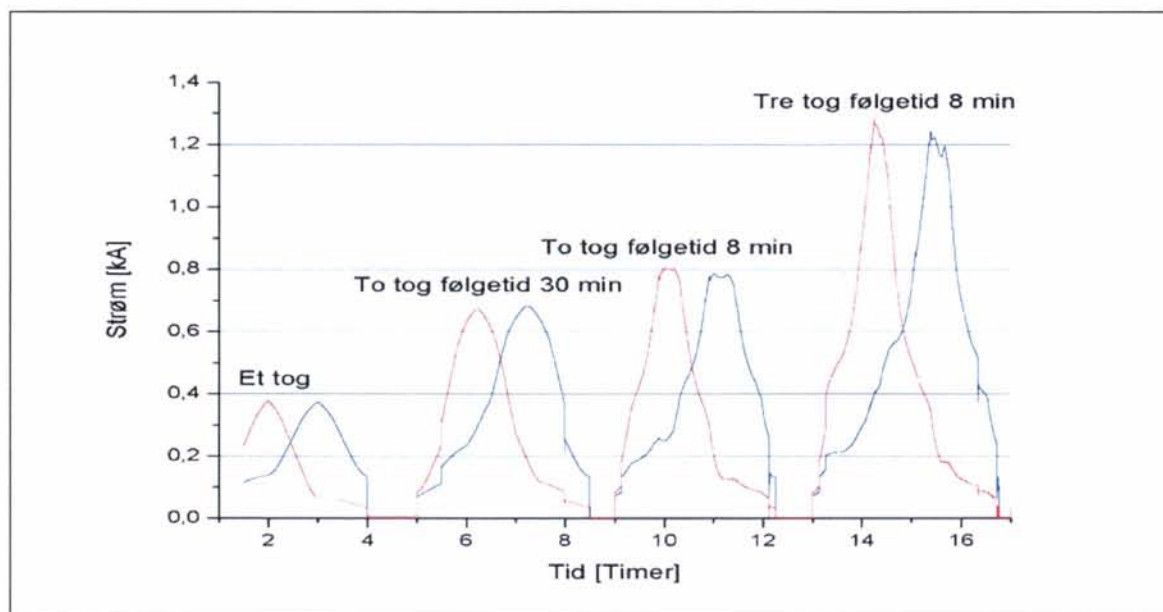
Figur 6-4 Spenningen som oppstår for det maksimale antallet tog som kan trafikkere strekningen uten overbelastning. E116 lokomotiver for godstogene.

### 6.1.2 Tilfelle med utfall av et aggregat

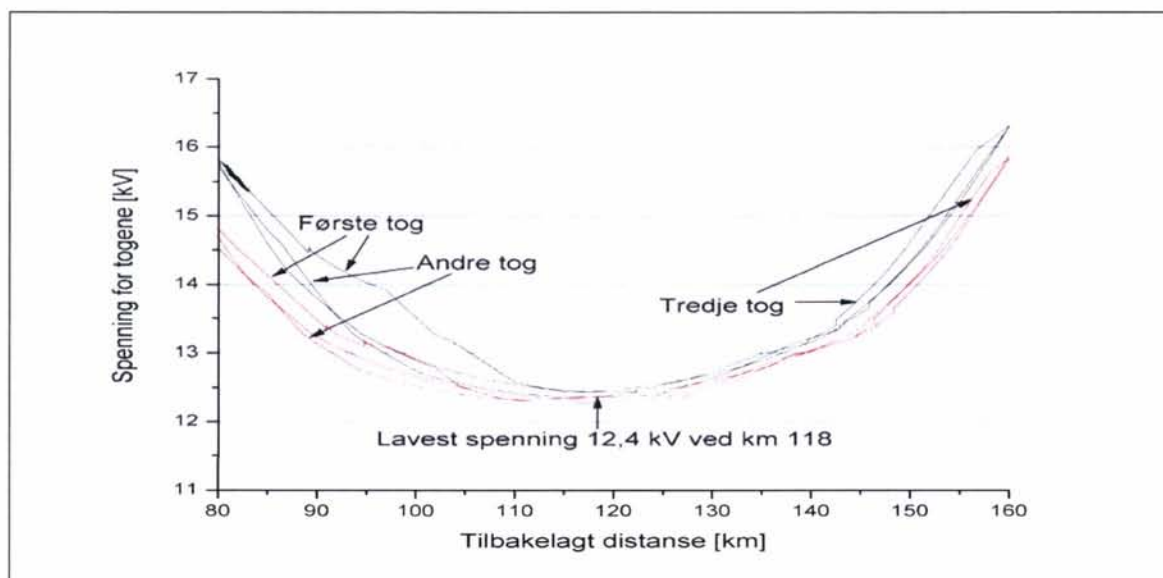
Ved utfall av ett aggregat i stasjon A og kjøring med godstog med CE119 lokomotiver må spenningen ikke komme under 12,0 kV (JD 546) og det gjenværende aggregatet må ikke

overbelastes. Av Figur 6-5 ser en at med tre tog ute på matestrekningen blir belastningen i området 600 til 1000 A når togene er midt på, dette tilfellet undersøkes. I Figur 6-6 vises det at laveste spenning på 12,4 kV oppstår for det andre togsettet ved km 118. Det første toget er da ved km 128 og det tredje ved km 108.

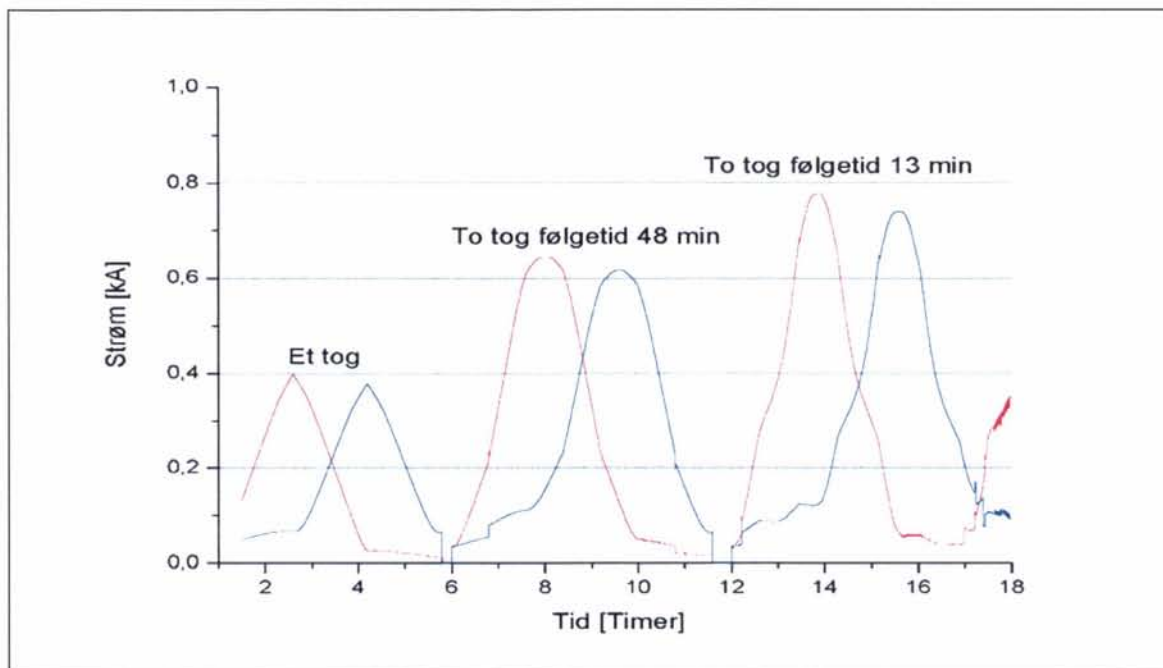
For trafikksimulering med utfall og kjøring med godstog med E116 viser Figur 6-7 at to tog med 40 km avstand på matestrekningen belaster omformerstasjonene moderat. Videre ser en at for dette tilfellet blir spenningen lavest for det andre toget og at 13,8 kV oppstår ved km 129. Da er det andre toget ved km 89.



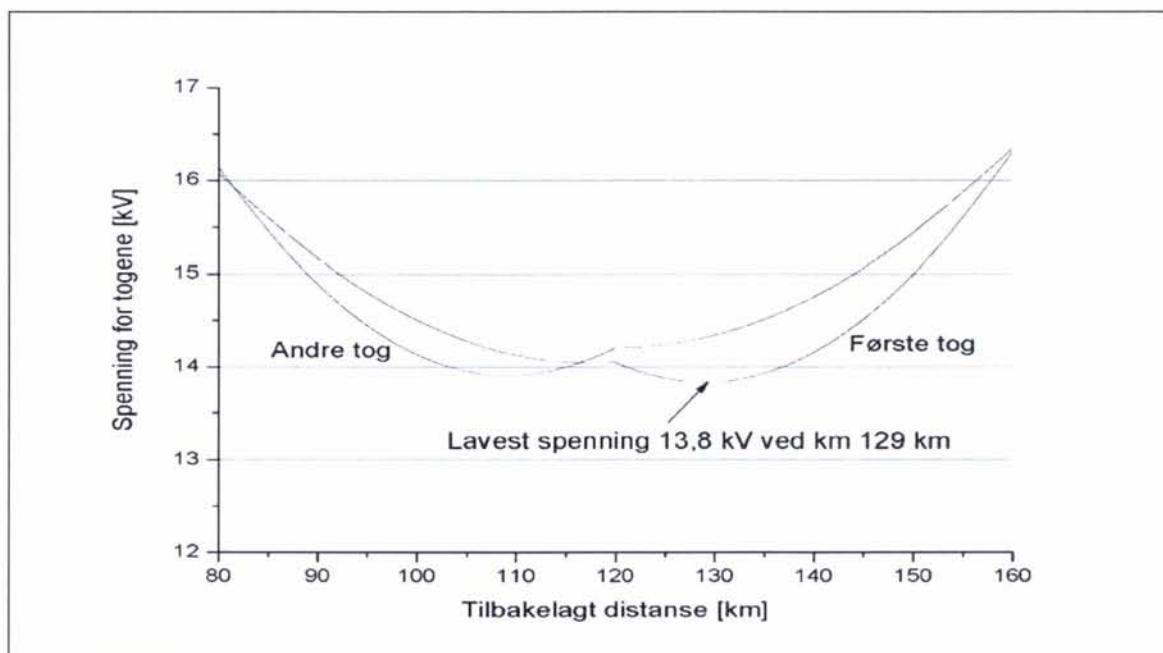
Figur 6-5 Strøm fra omformerstasjonen når kolonner med godstog med doble CE119 lokomotiver og forskjellig antall og togfølgetid trafikkerer en tenkt matestrekning.



Figur 6-6 Spenningen som oppstår for det maksimale antallet tog som kan trafikkere strekningen uten overbelastning. CE119 lokomotiver for godstogene.



Figur 6-7 Strøm fra omformerstasjonen når kolonner med godstog med E116 lokomotiver og forskjellig antall og togfølgetid trafikkerer en tenkt matestrekning.



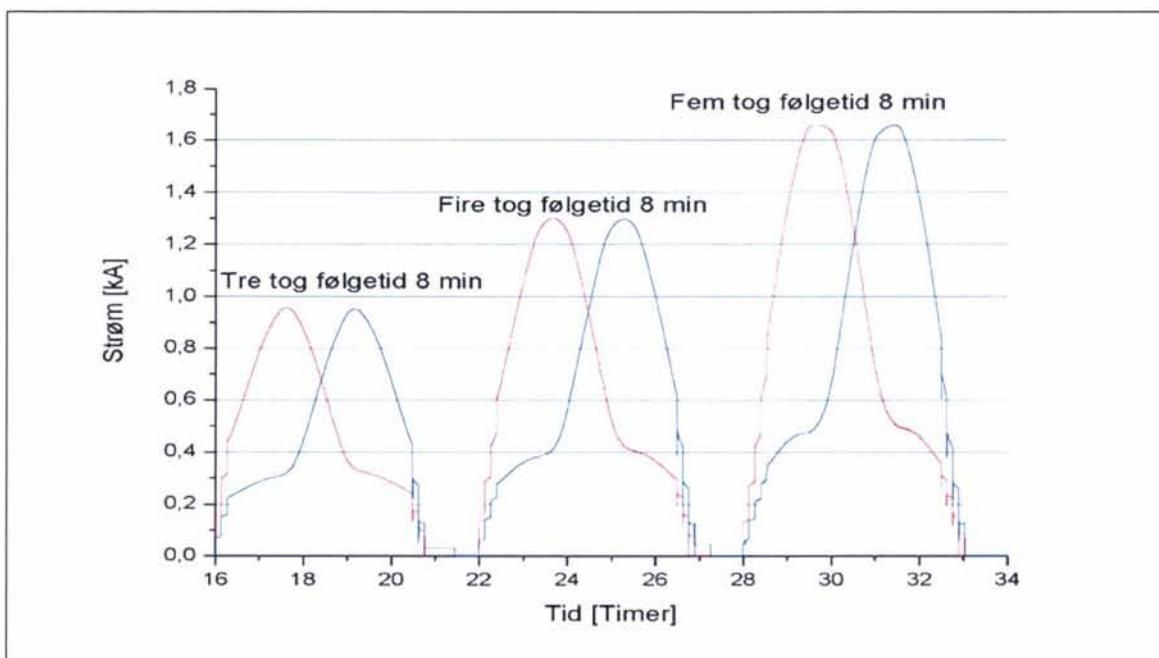
Figur 6-8 Spenningen som oppstår for det maksimale antallet tog som kan trafikkere strekningen uten overbelastning. E116 lokomotiver for godstogene.

## 6.2 Laveste spenning for tilfele med like omformere på 3 x 5,8 MVA og 120 km mellom dem og AT-system

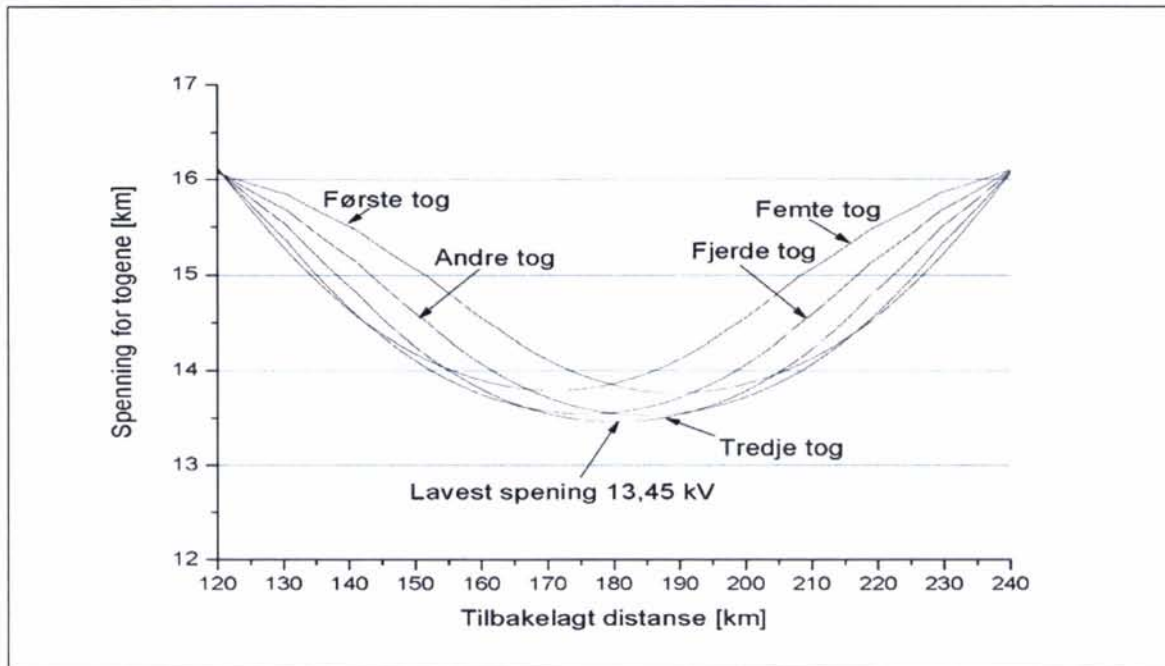
### 6.2.1 Tilfelle med normal drift

Med 3 x 5,8 MVA roterende omformere er høyeste tillatte belastning 66,67 % ved konservativ bruk av redundanskriteriet og ingen marginer tillagt. Med AT-system forventes stor kapasitet og et femte tog legges inn i ruteplanen, slik at det nå på det meste blir hele fem tog med 1200 tonn lastvekt og multiple CE119 lokomotiver med 8 minutters følgetid. Ellers er alle forhold som i forrige avsnitt, 6.1. Strømmen som belaster omformerstasjonene er vist i Figur 6-9 for stasjon A med rød og B med blått. Høyeste tillat strøm er 1250 A og det ser en vil oppstå med fem tog der det kurvene krysser ved ca 1250 A. I Figur 6-10 ser en at spenningen for de fem togene er meget god i forhold til den meget store belastningen. Laveste spenning får det tredje toget med 13,5 kV når det er midt på strekningen, men på grunn av ytterligere spenningsfall på seksjonert kontaktledning kan spenningen forventes å kunne bli opptil 700 V lavere, se [6]. Dermed er en på grensen til hva som kan tillates av antall tog i henhold til JD 546.

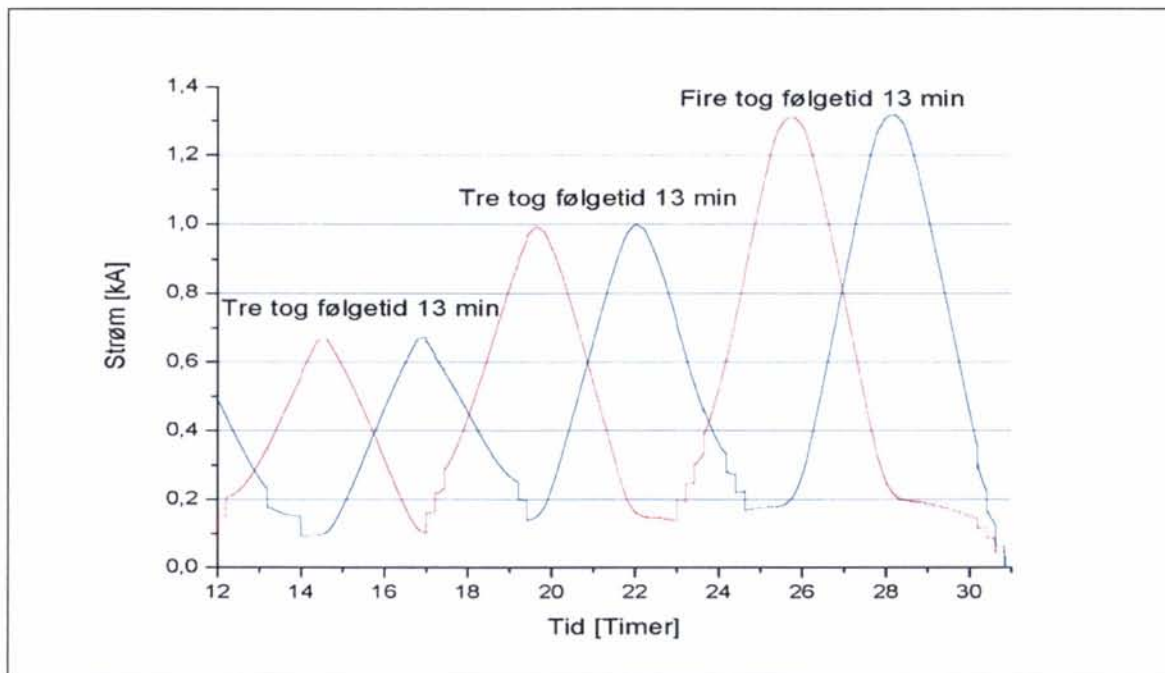
I Figur 6-11 kan en se belastningen med E116 lokomotiver og fire tog med følgetid 13 minutter kan tillates uten at belastningen blir større enn ca 830 A. Flere tog kan tillates, men spenningen blir her 13,7 kV og med risiko for ytterligere 700 V lavere spenning kan den komme under prosjekteringskravet på 13,0 kV, se JD 546. Laveste spenning oppstår når det andre (eller tredje toget er på km 180), da er det første toget ved km 170, det tredje ved km 190 og det fjerde ved km 200.



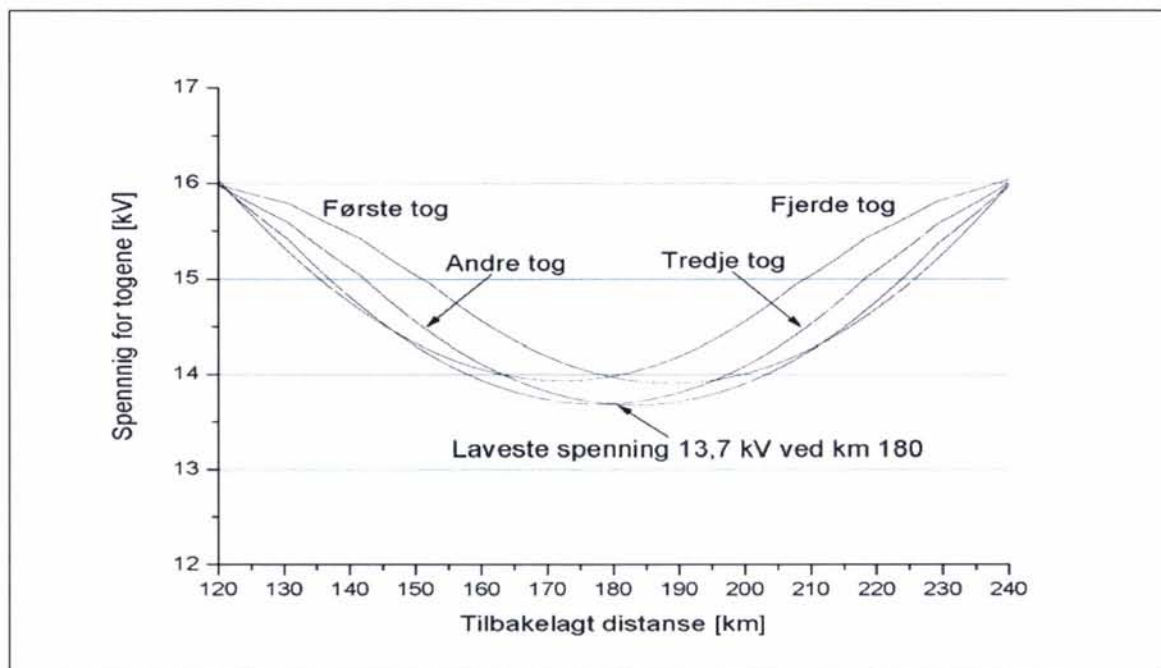
Figur 6-9 Strøm fra omformerstasjonen når kolonner med godstog med doble CE119 lokomotiver og forskjellig antall og togfølgetid trafikkerer en tenkt matestrekning. Simulering med AT-system.



Figur 6-10 Spenningen som oppstår for det maksimale antallet tog som kan trafikere strekningen uten overbelastning. CE119 lokomotiver for godstogene.



Figur 6-11 Strøm fra omformerstasjonen når kolonner med godstog med E116 lokomotiver og forskjellig antall og togfølgetid trafikkerer en tenkt matestrekning. Simulering med AT-system.



Figur 6-12 Spenningen som oppstår for det maksimale antallet tog som kan trafikere strekningen uten overbelastning. EI16 lokomotiver for godstogene.

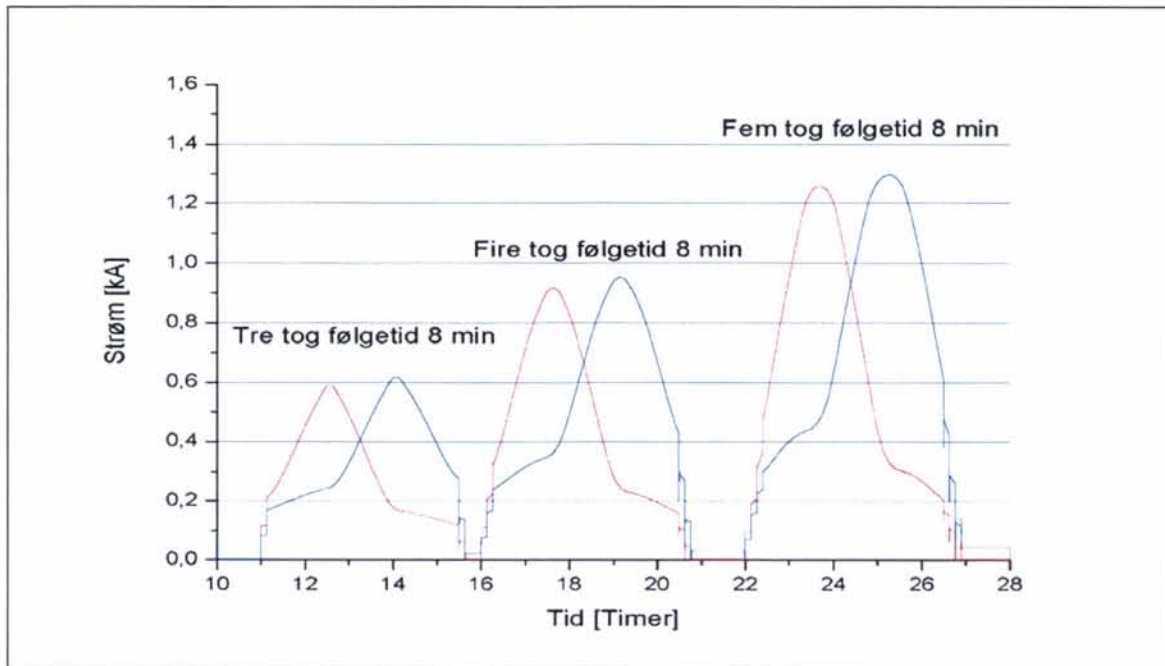
### 6.2.2 Tilfelle med utfall av ett aggregat

Ved utfall av ett av tre aggregater i stasjon A tillattes det en belastning opp til 100 % av gjenværende ytelse (om marginer ikke legges til) dette tilsvarer en strøm på 1250 A og Figur 6-13 viser resultatet med opptil fem tog. Som en ser blir belastningen noe over grensen når togene er nærmest omformerer, men på tidspunktet der lasten er fordelt jevnt mellom stasjonene er ikke belastningen større enn ca 950 A. Dette med så mye som fem godstog med multiple CE119 lokomotiver.

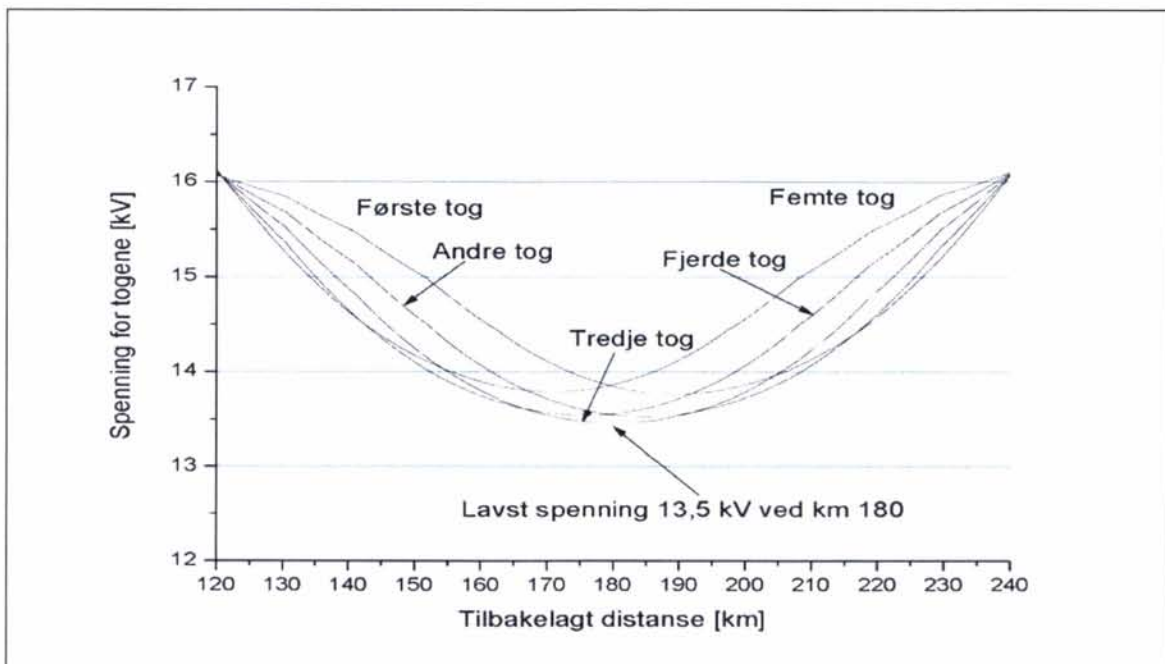
Noe større belastning enn dette på en og samme matestrekning ansees ikke som sannsynlig og det er ikke forsøkt å belaste systemet ytterligere. Legg forøvrig merke til at fire tog ved omformerstasjonene A og B ikke fører til overbelastning og at selv fem tog er på nippet til å gå bra. Legg også merke til at lastfordelingen er veldig jevn, selv om altså ett aggregat er falt ut i stasjon A.

Når det gjelder spenningen for togene er det sett på tilfellet med fem tog i Figur 6-14. Som en ser blir spenningen helt utmerket og knapt noe lavere enn ved normal drift. Det er altså godt over regelverkets krav om en spenning over 12,0 kV ved avvikssituasjon.

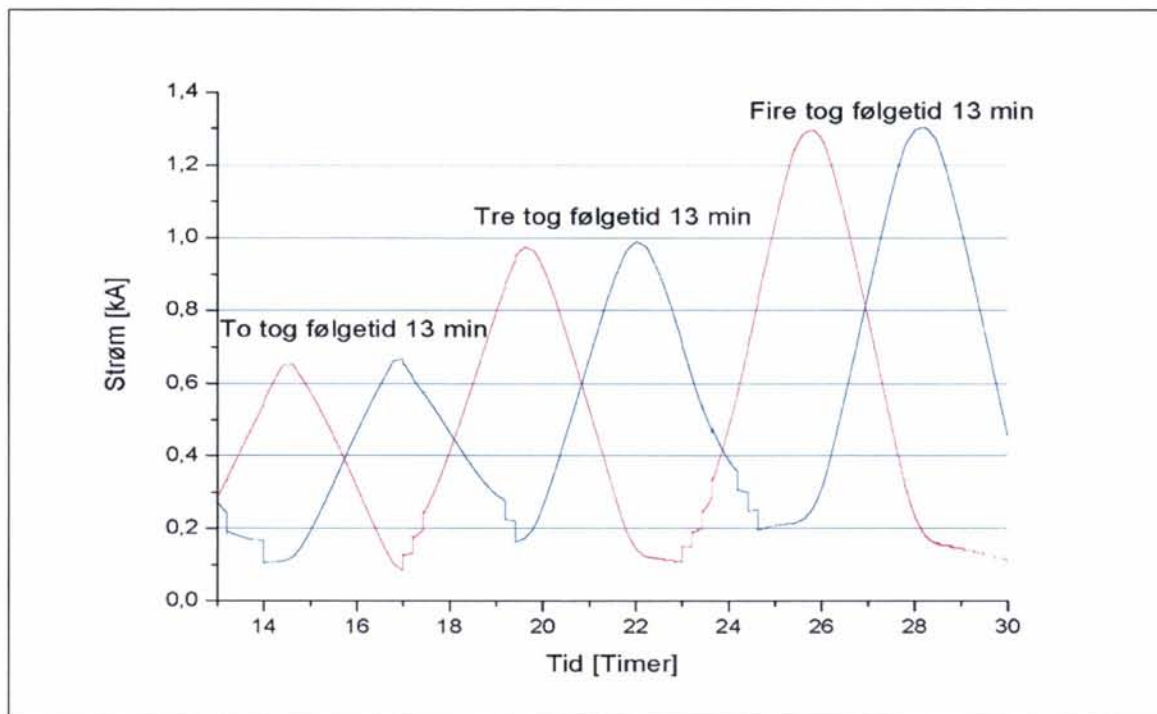




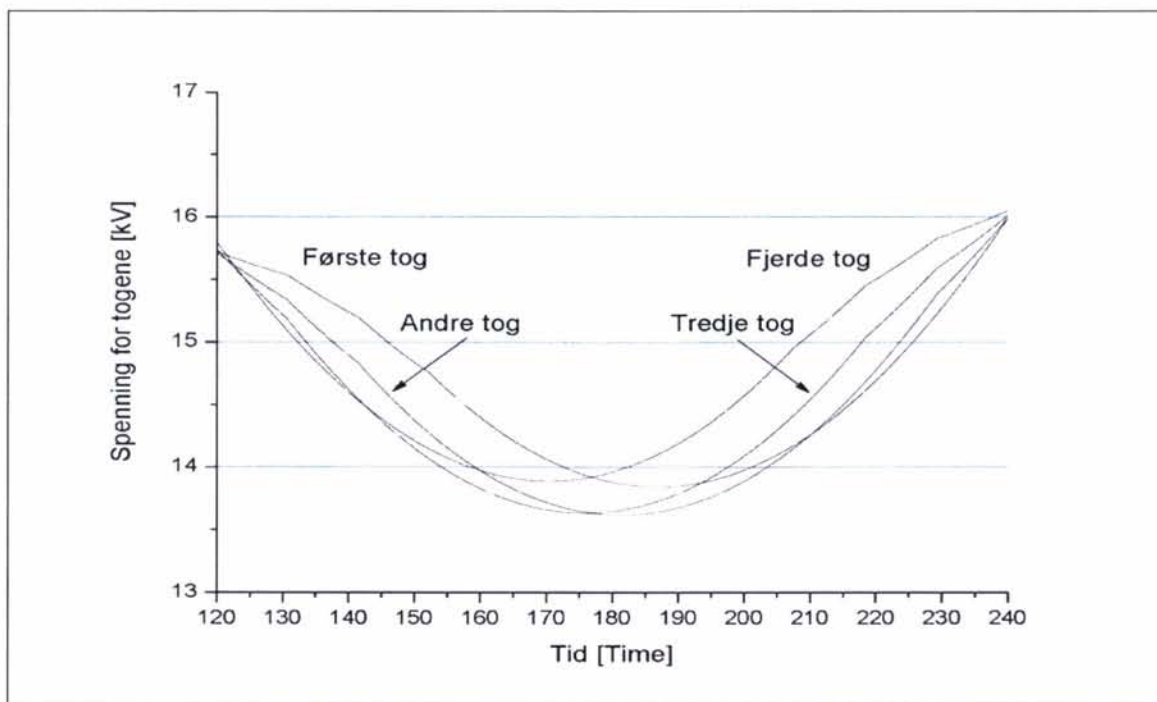
Figur 6-13 Strøm fra omformerstasjonen når kolonner med godstog med doble CE119 lokomotiver og forskjellig antall og togfølgetid trafikkerer en tenkt matestrekning. Simulering med AT-system.



Figur 6-14 Spenningen som oppstår for det maksimale antallet tog som kan trafikere strekningen uten overbelastning. CE119 lokomotiver for godstogene.



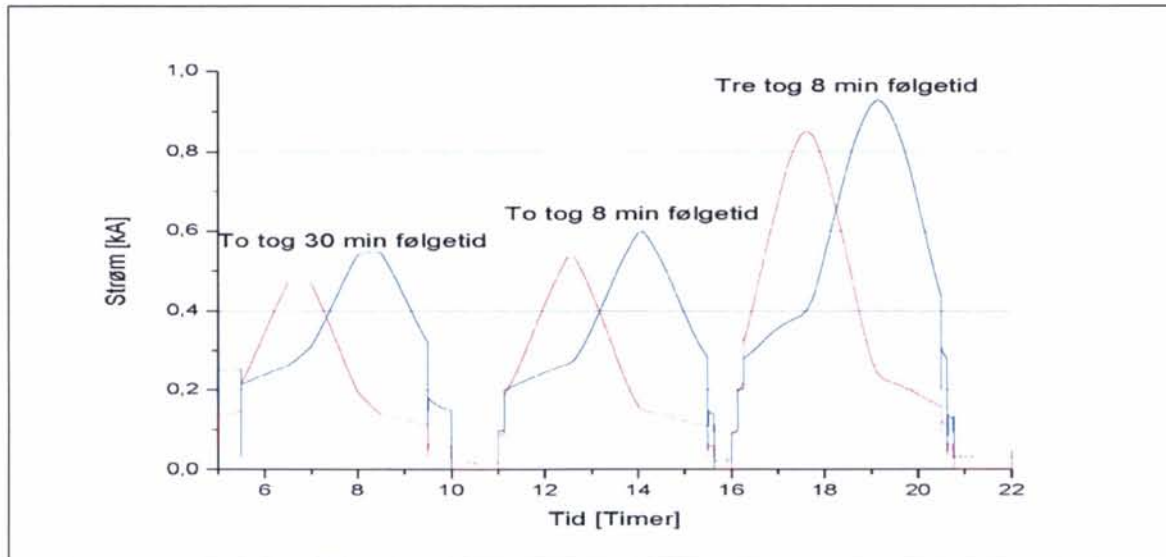
Figur 6-15 Strøm fra omformerstasjonen når kolonner med godstog med E116 lokomotiver og forskjellig antall og togfølgetid trafikkerer en tenkt matestrekning. Simulering med AT-system.



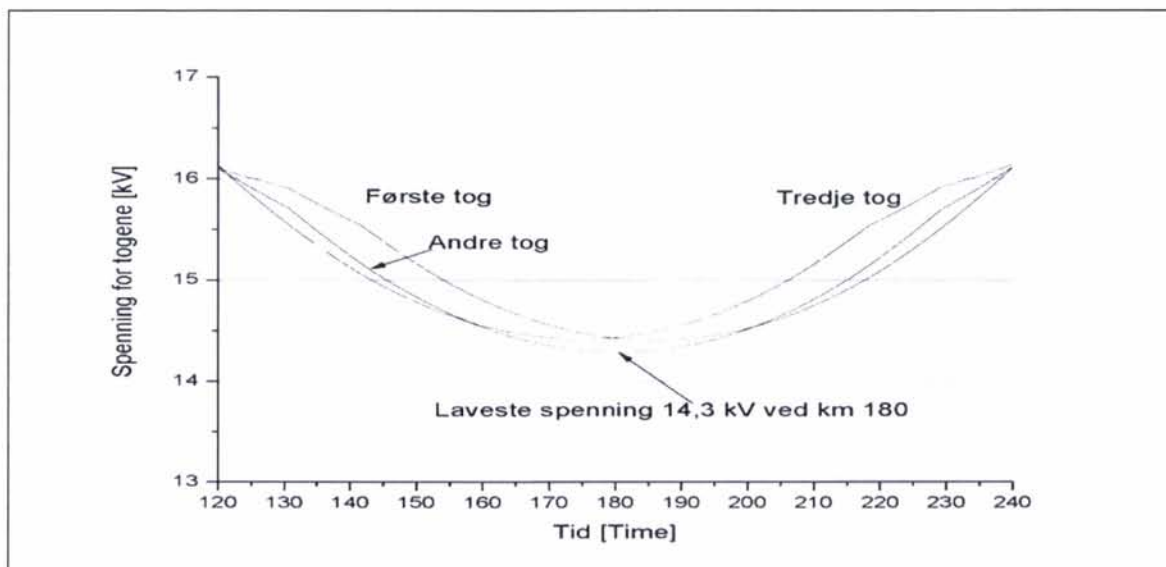
Figur 6-16 Spenningen som oppstår for det maksimale antallet tog som kan trafikkere strekningen uten overbelastning. E116 lokomotiver for godstogene.

### 6.2.3 Tilfelle med to aggregater i drift og utfall av ett

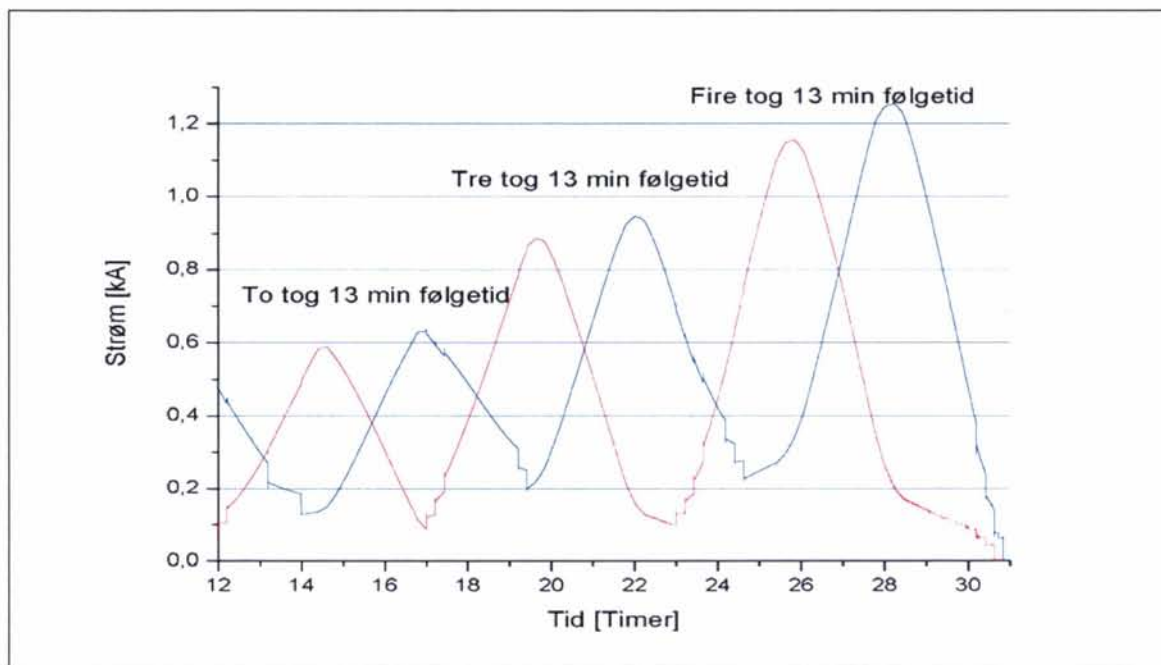
Nedenfor er det i Figur 6-17 og Figur 6-18 undersøkt samme tilfellet som i avsnitt 6.2.2, men denne gangen med to aggregater i drift som normalt tilstand. Med utfall av ett aggregat i stasjon A tillates bare en belastning på 1/3 av dens installerte ytelse, eller altså full belastning av det siste gjenværende aggregatet. En strømbelastning på 650 A uten marginer tillagt ser en oppstår om det kommer mer enn to tog med følgetid 8 minutter. Allikevel er spenningen for tilfellet med tre tog helt akseptable. Det samme ser en for tilfellet med E116 lokomotiver, at belastningen fra mer enn to tog med følgetid på 13 minutter ikke kan tillates, men at spenningen er helt akseptabel med tre tog. Se Figur 6-19 og Figur 6-20.



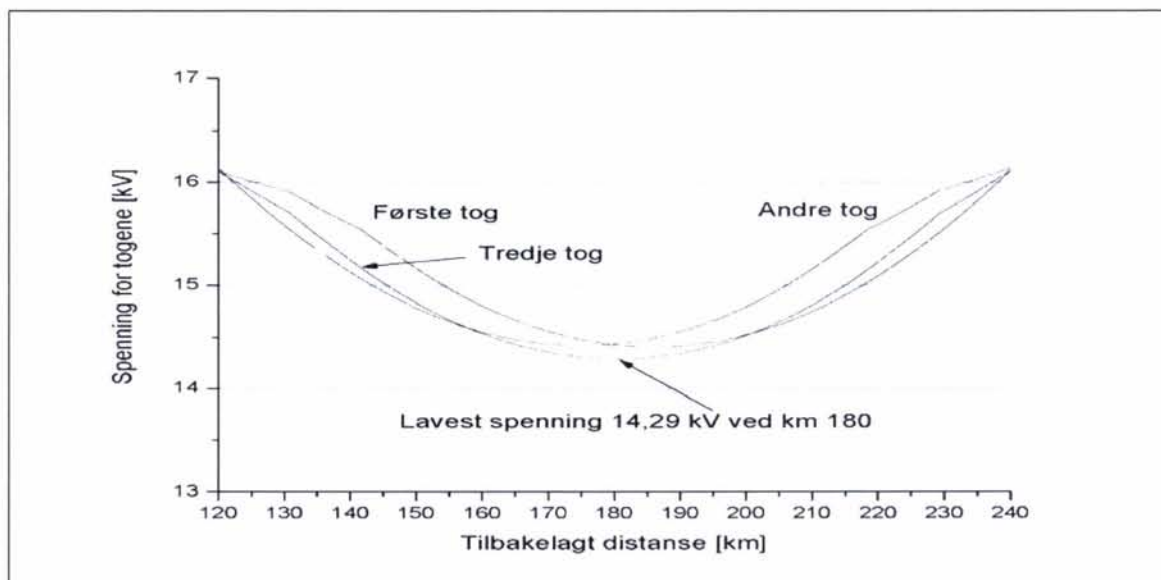
Figur 6-17 Strøm fra omformerstasjonen når kolonner med godstog med doble CE119 lokomotiver og forskjellig antall og togfølgetid trafikkerer en tenkt matestrekning. Simulering med AT-system.



Figur 6-18 Spenningen som oppstår for det maksimale antallet tog som kan trafikkere strekningen uten overbelastning. Doble CE119 lokomotiver for godstogene.



Figur 6-19 Strøm fra omformerstasjonen når kolonner med godstog med doble EL16 lokomotiver og forskjellig antall og togfølgetid trafikkerer en tenkt matestrekning. Simulering med AT-system.



Figur 6-20 Spenningen som oppstår for det maksimale antallet tog som kan trafikkere strekningen uten overbelastning. E116 lokomotiver for godstogene.

## 7 APPENDIKS B - SPENNINGSREGULATORENS MODELL I SIMPOW

Det skal her belyses et fenomen vedrørende spenningsregulatorens innstilling som ser ut til å være utilsiktet. I OPTPOW er følgende data lagt inn som vedrører en typisk omformerstasjon med to aggregater på 5,8 MVA:

Base for tilsynelatende effekt i pu-systemet

```
GENERAL  
SN=40  
END
```

Transformatorer:

```
OMFB-3-66 OMFBM1 SN=4.4 UN1=66 UN2=6.3 ER12=0.0054 EX12=0.079  
OMFAG1 OMFB-1-G1 SN=4.0 UN1=4.0 UN2=16.6 ER12=0.01 EX12=0.033  
OMFB-3-66 OMFBM2 SN=4.4 UN1=66 UN2=6.3 ER12=0.0054 EX12=0.079  
OMFBG2 OMFB-1-G2 SN=4.0 UN1=4.0 UN2=16.6 ER12=0.01 EX12=0.033
```

Omformer:

```
OMFB_G1 OMFBG1 SN=4 UN=4 XD=0.94 XQ=0.47 RA=0.0175 POLES=2  
CTETA=0 MOTOR=OMFB_M1  
OMFB_M1 OMFBM1  
SN=4.4 UN=6.3 XD=0.9 XQ=0.4 RA=0.0048 POLES=6  
  
OMFB_G2 OMFBG2 SN=4 UN=4 XD=0.94 XQ=0.47 RA=0.0175 POLES=2  
CTETA=0 MOTOR=OMFB_M2  
OMFB_M2 OMFBM2  
SN=4.4 UN=6.3 XD=0.9 XQ=0.4 RA=0.0048 POLES=6
```

Last for test av riktig innstilling av spenningsregulatoren:

```
!!!! Laster for lastflyt i Optpow NO=1  
OMFAX-1-15 P=2.9 COSFI=0.7 NO=1  
OMFA-1-15 P=2.9 COSFI=0.7 NO=1  
OMFB-1-15 P=2.9 COSFI=0.7 NO=1  
OMFC-1-15 P=2.9 COSFI=0.7 NO=1  
OMFCX-1-15 P=2.9 COSFI=0.7 NO=1
```

```
!!!! Last for innstilling av spenningsregulator NO=2  
OMFAX-1-15 P=0.0001 Q=0.116 NO=2 NCON=1  
OMFA-1-15 P=0.0001 Q=0.116 NO=2 NCON=1  
OMFB-1-15 P=0.0001 Q=0.116 NO=2 NCON=1  
OMFC-1-15 P=0.0001 Q=0.116 NO=2 NCON=1  
OMFCX-1-15 P=0.0001 Q=0.116 NO=2 NCON=1
```

```
!!!! Last for innstilling av spenningsregulator NO=3  
OMFAX-1-15 P=0.0001 Q=0.116 NO=3 NCON=1  
OMFA-1-15 P=0.0001 Q=0.116 NO=3 NCON=1  
OMFB-1-15 P=0.0001 Q=0.116 NO=3 NCON=1  
OMFC-1-15 P=0.0001 Q=0.116 NO=3 NCON=1  
OMFCX-1-15 P=0.0001 Q=0.116 NO=3 NCON=1
```

```
!!!!Test last
BEL1 P=11.6 Q=0 NO=1 NCON=1
BEL1 P=11.6 COSFI=0.7 NO=2 NCON=1
```

Omformernes lastflytparametere:

```
OMFB_G1 TYPE=ROTA RTYP=U CNODE=OMFB-1-G1 U=16.5
OMFB_M1 TYPE=ROTA RTYP=Q Q=0

OMFB_G2 TYPE=ROTA RTYP=U CNODE=OMFB-1-G2 U=16.5
OMFB_M2 TYPE=ROTA RTYP=Q Q=0
```

I DYNPOW er følgende data lagt inn:

Instruksjoner for endring av spenningsregulatorens statikk (stabilisering) og utskrift av lastflyt ved noen spesielt interessante tidspunkter:

```
COMMANDS
HALT
AT 00100
```

!!!! Spenningsregulatorinstilliner:

```
!!!! Aggregat Tomgang Fullast
!!!! Roterende 16,5 kV 15,84 kV 4 % fall
```

```
a SS OMFAX_G1 7700 30 % XSPU=0.120
a SS OMFAX_G2 7700 30 % XSPU=0.120
a SS OMFA_G1 7000 31 % XSPU=0.120
a SS OMFA_G2 7000 31 % XSPU=0.120
a SS OMFB_G1 8000 32 % XSPU=0.120
a SS OMFB_G2 8000 32 % XSPU=0.120
a SS OMFC_G1 9000 33 % XSPU=0.120
a SS OMFC_G2 9000 33 % XSPU=0.120
a SS OMFCX_G1 9900 34 % XSPU=0.120
a SS OMFCX_G2 9900 34 % XSPU=0.120
```

```
AT 199
POUT UNODE *-1-15
```

```
AT 299
POUT UNODE *-1-15
POUT SYNC *_G*
```

```
AT 499
POUT UNODE *-1-15
```

```
AT 599
POUT UNODE *-1-15
POUT SYNC *_G*
```

```
RUN
END
```

Parametere for omformerens dynamiske egenskaper:

```
OMFB_M1 OMFBM1 TYPE=2A
SN=4.4 UN=6.3 XD=0.9 XQ=0.4 RA=0.0048
XA=0.11 XDP=0.27 XDB=0.26 XQB=0.3
```

OMFAX-1-15 ( 1):1 1.00005 P.U. 16.5007 KV 0.444768E-04 DEGREES  
 OMFA-1-15 ( 1):1 1.00005 P.U. 16.5007 KV 0.255842E-03 DEGREES  
 OMFB-1-15 ( 1):1 1.00005 P.U. 16.5007 KV 0.685267E-03 DEGREES  
 OMFC-1-15 ( 1):1 1.00005 P.U. 16.5007 KV 0.133457E-02 DEGREES  
 OMFCX-1-15 ( 1):1 1.00005 P.U. 16.5007 KV 0.336221E-02 DEGREES

\*\*\*\* Positive Sequence at Time= 299.000 \*\*\*\*

OMFAX-1-15 ( 1):1 0.960072 P.U. 15.8412 KV 0.830384 DEGREES  
 OMFA-1-15 ( 1):1 0.960072 P.U. 15.8412 KV 0.830595 DEGREES  
 OMFB-1-15 ( 1):1 0.960072 P.U. 15.8412 KV 0.831025 DEGREES  
 OMFC-1-15 ( 1):1 0.960072 P.U. 15.8412 KV 0.831674 DEGREES  
 OMFCX-1-15 ( 1):1 0.960072 P.U. 15.8412 KV 0.833315 DEGREES

\*\*\*\* Positive Sequence at Time= 299.384 \*\*\*\*

	MW	MVAR	MVA	
SYNC OMFAX_G1		0.976178E-01	6.10502	6.10580
SYNC OMFAX_G2		0.976178E-01	6.10502	6.10580
SYNC OMFA_G1		0.976178E-01	6.10502	6.10580
SYNC OMFA_G2		0.976178E-01	6.10502	6.10580
SYNC OMFB_G1		0.976178E-01	6.10502	6.10580
SYNC OMFB_G2		0.976178E-01	6.10502	6.10580
SYNC OMFC_G1		0.976178E-01	6.10502	6.10580
SYNC OMFC_G2		0.976178E-01	6.10502	6.10580
SYNC OMFCX_G1		0.976616E-01	6.10502	6.10580
SYNC OMFCX_G2		0.975741E-01	6.10502	6.10580

\*\*\*\* Positive Sequence at Time= 499.000 \*\*\*\*

OMFAX-1-15 ( 1):1 1.00028 P.U. 16.5046 KV 0.196922E-02 DEGREES  
 OMFA-1-15 ( 1):1 1.00028 P.U. 16.5046 KV 0.218044E-02 DEGREES  
 OMFB-1-15 ( 1):1 1.00028 P.U. 16.5046 KV 0.260745E-02 DEGREES  
 OMFC-1-15 ( 1):1 1.00028 P.U. 16.5046 KV 0.325880E-02 DEGREES  
 OMFCX-1-15 ( 1):1 1.00028 P.U. 16.5046 KV 0.184064E-02 DEGREES

\*\*\*\* Positive Sequence at Time= 599.000 \*\*\*\*

OMFAX-1-15 ( 1):1 0.960312 P.U. 15.8452 KV 0.831624 DEGREES  
 OMFA-1-15 ( 1):1 0.960312 P.U. 15.8452 KV 0.831835 DEGREES  
 OMFB-1-15 ( 1):1 0.872737 P.U. 14.4002 KV -0.550572 DEGREES \*\* LOW \*\*  
 OMFC-1-15 ( 1):1 0.960312 P.U. 15.8451 KV 0.832914 DEGREES  
 OMFCX-1-15 ( 1):1 0.960312 P.U. 15.8451 KV 0.831429 DEGREES

\*\*\*\* Positive Sequence at Time= 599.826 \*\*\*\*

	MW	MVAR	MVA	
SYNC OMFAX_G1		0.975712E-01	6.10487	6.10565
SYNC OMFAX_G2		0.975712E-01	6.10487	6.10565
SYNC OMFA_G1		0.975712E-01	6.10487	6.10565
SYNC OMFA_G2		0.975712E-01	6.10487	6.10565
SYNC OMFB_G1		0.457668	13.0758	13.0838
SYNC OMFB_G2		0.00000	0.00000	0.00000
SYNC OMFC_G1		0.975712E-01	6.10487	6.10565

SYNC OMFC_G2	0.975712E-01	6.10487	6.10565
SYNC OMFCX_G1	0.976666E-01	6.10487	6.10565
SYNC OMFCX_G2	0.974758E-01	6.10487	6.10565

Her forventer en at når den store lasten på 11,6 MVAR belaster omformerstasjonene fullt ut skal spenningen falle med 4 %. Altså skal spenningen ved tomgang være 16,5 kV og ved fulllast 15,85 kV. Når ett aggregat faller ut som i stasjon B skal spenningen synke dobbelt så mye, altså 8 % som gir spenningen 15,18 kV. I stedet for har spenningen blitt så lav som 14,4 kV. Dermed ser det ut til å være noe helt feil med måten spenningsregulatorene har blitt innstilt på. I stedet for å bruke kompenseringen for å få fallende statikk ved utfall benyttes stabiliseringen.

I DYNPOW er følgende deklarasjon gjort, bare endringene er illustrert her:

For deklarasjon av endring av spenningsregulator:

```
a SS OMFA_X_G1 7700 30 % XCPU=0.265
a SS OMFA_X_G2 7700 30 % XCPU=0.265
a SS OMFA_G1 7000 31 % XCPU=0.265
a SS OMFA_G2 7000 31 % XCPU=0.265
a SS OMFB_G1 8000 32 % XCPU=0.265
a SS OMFB_G2 8000 32 % XCPU=0.265
a SS OMFC_G1 9000 33 % XCPU=0.265
a SS OMFC_G2 9000 33 % XCPU=0.265
a SS OMFCX_G1 9900 34 % XCPU=0.265
a SS OMFCX_G2 9900 34 % XCPU=0.265
```

Og for regulatorene:

```
!!!!Regulator OMFB
8000 TYPE=1 RC=0 XC=0 TR=10000 TC=0 TB=0.03 TA=0.03
KA=180 UEMAX=6 UEMIN=-6 TE=0.3 KF=0.1 TF=2
NSWS=1 SWS=32

32 TYPE=DSL/VRRC/ SNG=4.0 UNG=4
ER12=0.01 EX12=0.033 SNT=4 UNIT=4 UN2T=16.6
SNS=8 USB=16.5 XC=0.0 XS=0.0
PREG=OMFB-1-15 OMFB-1-G
```

Det som da kommer ut som resultat i dynflow.xxxx:

```
**** Positive Sequence at Time= 599.000 ****

OMFAX-1-15 ( 1):1 0.960481 P.U. 15.8479 KV 0.835905 DEGREES
OMFA-1-15 ( 1):1 0.960481 P.U. 15.8479 KV 0.831214 DEGREES
OMFB-1-15 ( 1):1 0.916956 P.U. 15.1298 KV -0.382500 DEGREES ** LOW **
OMFC-1-15 ( 1):1 0.960481 P.U. 15.8479 KV 0.832204 DEGREES
OMFCX-1-15 ( 1):1 0.960481 P.U. 15.8479 KV 0.835267 DEGREES
-----
```

\*\*\*\* Positive Sequence at Time= 599.781 \*\*\*\*

	MW	MVAR	MVA	
SYNC OMFA_X_G1		0.975387E-01	6.10476	6.10554
SYNC OMFA_X_G2		0.975387E-01	6.10476	6.10554
SYNC OMFA_G1		0.975387E-01	6.10476	6.10554
SYNC OMFA_G2		0.975387E-01	6.10476	6.10554



---

SYNC OMFB_G1	0.415538	12.9369	12.9436
SYNC OMFB_G2	0.00000	0.00000	0.00000
SYNC OMFC_G1	0.975387E-01	6.10476	6.10554
SYNC OMFC_G2	0.975387E-01	6.10476	6.10554
SYNC OMFCX_G1	0.974633E-01	6.10476	6.10554
SYNC OMFCX_G2	0.976140E-01	6.10476	6.10554

Dette resultatet ble ikke helt som ønsket, men 15,1298 kV er nært til 15,18 kV. I praksis kan Bane Energi ønske at spenningsregulatorene kun har tilsatsen for stabilisering. En eventuell bakdel er at om en ønsker at spenningsfallet ikke skal bli dobbelt så stort ved utfall av ett av to aggregater er dette ikke mulig å realisere.

Hva som skyldes at spenningsregulatorene ikke ser ut til å virke som tiltenkt er ikke studert. I simuleringene i dette arbeidet har en ønsket dobbelt spenningsfall ved utfall av ett av to aggregater og dermed har en sett til at det har blitt slik.

## 8 REFERANSER

1. Hovedoppgave; "Spenningsregulator med statorstrøm- og feltstrømbegrensning for jernbanens roterende omformere". NTNU, Steinar Danielsen, 11. juni 2002.
2. Rapport; "Utredning av kontaktledningstap", Jernbaneverket Utbygging Prosjekttjenester, april 2004.
3. Simuleringsrapport; "Lastflyt og fasevinkler mellom omformerstasjoner". Jernbaneverket BTPE, juni 2008.
4. Utredning; "Kapasitetsparametere for banestrømforsyningen". Jernbaneverket BTPE april 2009.
5. Lærebok; "Power System Voltage Stability". Mc Graw Hill 1994, Carson W. Taylor.
6. Simuleringsrapport; "Strekkningsvise utbyggingsplaner - Sørlandsbanen - Banestrømforsyning med AT-system". Jernbaneverket BTPE september 2007.
7. Rapport; "Further investigation of AT-system for the Norwegian Railway, Part 2 - EMC study for ATPLNL system in Norway", Györgo Varju, Budapest 2005.
8. Notat; "Redundanskriteriet". Jernbaneverket BTPE, oktober 2009. Frank Martinsen.

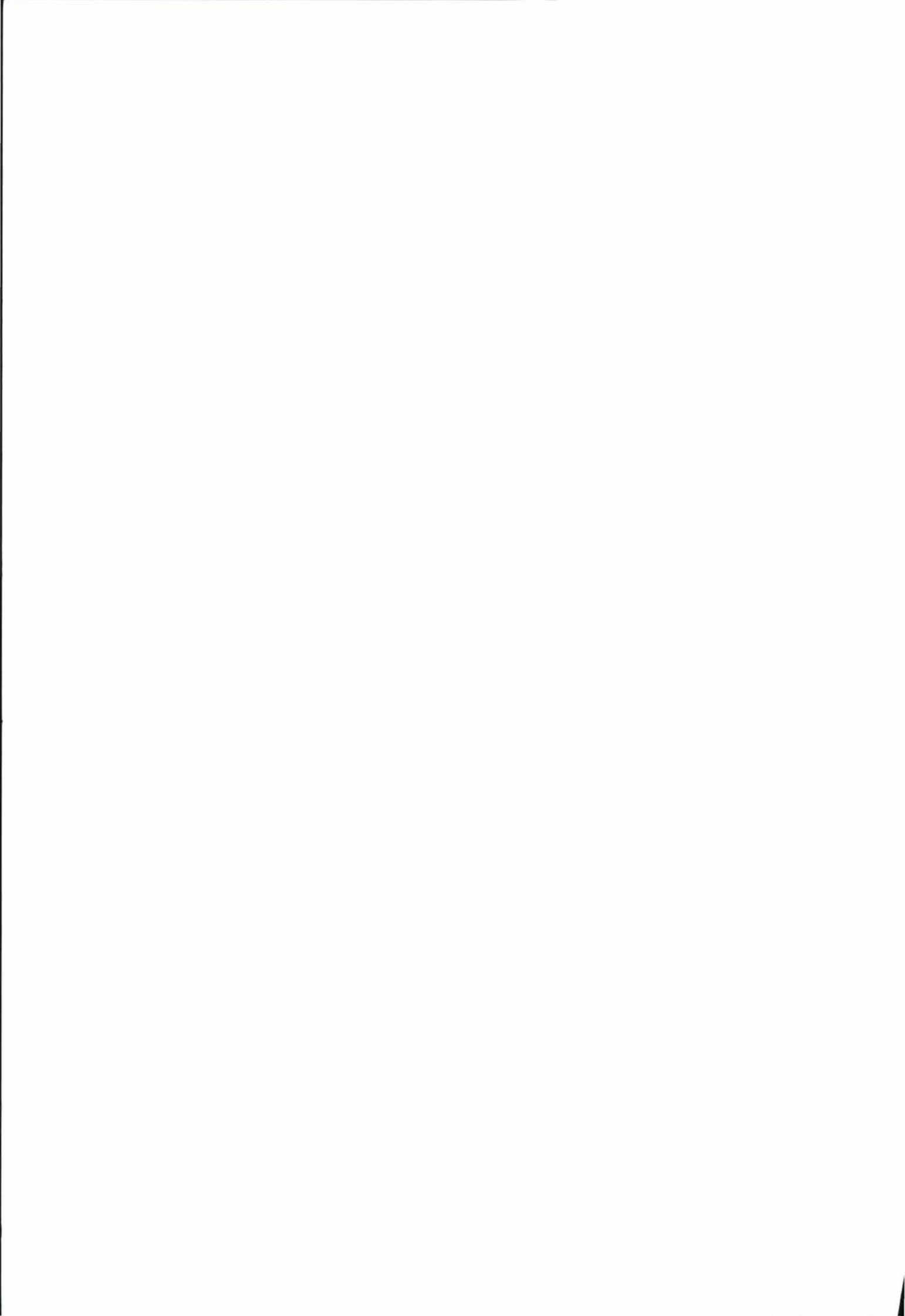
## **9 VEDLEGG 1 PARAMETERE FOR OMFORMERE**



<b>Forslag til standardverdier</b>						
Verdi	Enhet	Q24	Q38	Q48	N7	N10
<b>Trefasetransformator</b>						
SN	MVA		4,4	10,7	7,5	
UN1	kV					
UN2	kV		6,3	6,3	6,3	
ER12	pu		0,0054	0,0054	0,0054	
EX12	pu		0,079	0,079	0,079	
<b>Motor</b>						
SN	MVA	3,2	4,4	10,7	10,7	
UN	kV	6,3	6,3	6,3	6,3	
XD	pu	1,05	0,9	1,02	0,85	1,13
XQ	pu	0,47	0,4	0,49	0,55	
RA	pu	0,0089	0,0048	0,0085	0,0042	
POLES		6	6	6	6	6
<b>TYPE</b>						
SN	MVA	3,2	4,4	10,7	7	0
UN	kV	6,3	6,3	6,3	6,3	0
RA	pu	0,0089	0,0048	0,0085	0,0042	0
XA	pu	0,082	0,11	0,15	0,11	
XD	pu	1,05	0,9	1,02	0,85	1,13
XDP	pu	0,18	0,27	0,3	0,29	
TD0P	s	5	5	8	7	
XDB	pu	0,165	0,26	0,21	0,21	
TD0B	s	0,1	0,1	0,1	0,1	
XQ	pu	0,47	0,4	0,49	0,55	0
XQB	pu	0,165	0,3	0,2	0,23	
TQ0B	s	0,1	0,1	0,1	0,1	
D		0	0	0	0	
H	MWs/MVA	1,6	1,6	1,625	1,6	
<b>Motorens spenningsregulator</b>						
TYPE		1	1	1	1	1
RC	pu	0	0	0	0	0
XC	pu	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
TR	s	0	0	0	0	0
TC	s	0	0	0	0	0
TB	s	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
TA	s	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
KA		180	180	180	180	180
UEMAX	pu	6	6	6	6	6
UEMIN	pu	-6	-6	-6	-6	-6
TE	s	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
KE		1	1	1	1	1
TF	s	2	2	2	2	2
KF		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
NSWS		0	0	0	0	0
<b>Generator</b>						

<b>Forslag til standardverdier</b>						
<b>Verdi</b>	<b>Enhet</b>	<b>Q24</b>	<b>Q38</b>	<b>Q48</b>	<b>N7</b>	<b>N10</b>
SN	MVA	2,4	4	10	7	10
UN	kV	3	4	5,2	4,5	5,2
XD	pu	0,943	0,94	1,347	1,375	0,978
XQ	pu	0,37	0,47	0,53	0,88	
RA	pu	0,023	0,0175	0,0176	0,0054	
POLES		2	2	2	2	2
<b>TYPE</b>						
		2A	2A	2A	2A	2A
SN	MVA	2,4	4	10	7	10
UN	kV	3	4	5,2	4,5	5,2
RA	pu	0,023	0,0175	0,0176	0,0054	0
XA	pu	0,09	0,096	0,11	0,11	
XD	pu	0,943	0,94	1,347	1,375	0,978
XDP	pu	0,129	0,132	0,219	0,23	0,304
TD0P	s	9,14	8,9	13,98	5	5,15
XDB	pu	0,094	0,097	0,14	0,17	0,259
TD0B	s	0,12	0,12	0,4	0,1	0,11
XQ	pu	0,37	0,47	0,53	0,88	0
XQB	pu	0,29	0,29	0,19	0,259	
TQ0B	s	0,1	0,3	0,1	0,3	
D		0	0	0	0	0
H	MWs/MVA	1,8	1,8	1,625	1,8	
<b>Generatorens spenningsregulator</b>						
TYPE		1	1	1	1	1
RC	pu	0	0	0	0	0
XC	pu	0	0	0	0	0
TR	s	10000	10000	10000	10000	10000
TC	s	0	0	0	0	0
TB	s	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
TA	s	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
KA		180	180	180	180	180
UEMAX	pu	6	6	6	6	6
UEMIN	pu	-6	-6	-6	-6	-6
TE	s	0,03	0,3	0,3	0,3	0,3
TF	s	2	2	2	2	2
KF		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
NSWS		1	1	1	1	1
<b>VRRC</b>						
SNG	MVA	2,4	4	10	7	10
UNG	kV	3	4	5,2	4,5	5,2
ER12	pu	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01
EX12	pu	0,047	0,033	0,042	0,033	0,042
SNT	MVA	2,4	4	10	7	10
UN1T	kV	3	4	5,2	4,5	5,2
UN2T	kV	16	16,6	17	17	17
SNS	MVA					
USB	kV	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
XC	pu	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

<b>Forslag til standardverdier</b>						
Verdi	Enhet	Q24	Q38	Q48	N7	N10
XS	pu	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
<b>Enfasetransformator</b>						
SN	MVA	2,4	4	10	7	10
UN1	kV	3	4	5,2	4,5	5,2
UN2	kV	16	16,6	17	17	17
ER12	pu	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01
EX12	pu	0,047	0,033	0,042	0,033	0,042
SD						
28.10.04						







Jernbaneverket  
Biblioteket



09TU11587

101883