

TU - rapporter 1992

Banestrømforsyning

1. 25 kV, 50 Hz matesystem ved Norges Statsbaner

Grov plan

2. Simulering av kraftbehov for elektriske baner

Simulering av banestrømforsyningen på strekningen Kristiansand - Stavanger

3. Forsterkning av banestrømforsyning med høgspent mateledning.



TU - rapport

25 kV, 50 Hz

MATESYSTEM

VED

NORGES STATSBANER

GROV PLAN

JANUAR 1993

NSB Divisjonsstab Bane - Teknisk kontor



SAMMENDRAG

Rapporten er en grov plan for overgang fra dagens matesystem for elektrisk banedrift med 15 kV, 16 2/3 Hz til 25 kV, 50 Hz.

NSBs nåværende situasjon er beskrevet, og alternative fremtidige løsninger for mating er diskutert.

Man kan oppnå vesentlige besparelser i matestasjonene ved en overgang, både når det gjelder kapital-, drifts- og vedlikeholdsomkostninger. En overgang vil imidlertid medføre tekniske problemer og omkostninger på andre områder. Besparelsene i matestasjonene er imidlertid så store at arbeidet med en eventuell overgang bør fortsette.

Det foreslåes at NSB engasjerer en ekstern konsulent for å vurdere og kostnadsberegne en overgang. Konsulentens rapport bør foreligge etter ca. 3 måneder slik at det kan taes en avgjørelse før prosjektering av Gardermobanen er kommet for langt.



INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
1. Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 NSBs situasjon	1
1.3 Alternative fremtidige matesystemer	1
2. Oppgaver og problemer ved overgang til 25 kV, 50 Hz matesystem Tekniske og økonomiske konsekvenser	2
2.1 Kraft-leveranse fra den alminnelige kraftforsyningen	2
2.2 Matestasjoner	2
2.3 Kontaktledningsanlegget	3
2.4 Rullende materiell	3
2.5 Signalanlegg og teleanlegg	4
2.6 Overgangsfasen fra nåværende system (gjelder alle fagområder).	6
2.6.1 Rullende materiell	6
2.6.2 Strømforsyning	6
2.6.3 Signalanlegg og teleanlegg	6
2.6.4 Trafikk-avviklingen	6
3. Fornyelse av matestasjonene, alternativer	7
3.1 Skifte ut nåværende anlegg med utstyr med nåværende teknikk (roterende omformere).	7
3.2 Skifte ut nåværende anlegg med utstyr med ny teknikk (statiske omformere).	7
3.3 Gå over til nytt matesystem med 25 kV, 50 Hz.	7
4. Diskusjon	7
5. Konklusjon	8
6. Forslag til videre arbeid	8

1. INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

NSB har idag et system for elektrisk banedrift som leverer 15 kV, 16 2/3 Hz til trekkaggregatene. Dette systemet ble valgt ca. 1920 ut fra den teknikk som da var tilgjengelig.

Jernbaner som har begynt elektifisering etter ca. 1950 har valgt et system for 25 kV eller 50 kV, 50 Hz.

1.2 NSBs situasjon

Elektrifisert spor er idag 2422 km.

Til strømforsyningen har NSB:
27 omformerstasjoner med ialt 57 omformeraggregater
4 transformatorstasjoner
1 kraftverk

Anlegg bygget før krigen er enten modernisert eller bygget helt om. Nåværende anlegg er bygget fra 1950 til 1980.

Teknisk/økonomisk levealder er beregnet å være 40 år. De eldste anleggene har alt passert denne grensen. Det haster derfor å legge en plan for den fremtidige strømforsyning av elektrifiserte baner.

1.3 Alternative fremtidige matesystemer

- A. Skifte ut nåværende anlegg med nytt utstyr med nåværende teknikk (roterende omformere).
- B. Skifte ut nåværende anlegg med utstyr med ny teknikk, det vil si statiske omformere.
- C. Gå over til helt nytt matesystem, med 25 kV, 50 Hz.

Denne grov-planen vurderer overgang til nytt system etter alternativ C. En sammenligning av de tre alternativene er foretatt i avsnitt 3, Fornøyelse av matestasjonene.

2. OPPGAVER OG PROBLEMER VED 25 kV, 50 Hz MATESYSTEM Tekniske og økonomiske konsekvenser

2.1 Kraft-leveranse fra den alminnelige elektrisitetsforsyningen

Det største problemet med mating fra det alminnelige kraftnettet til togdriften er den ubalanse som oppstår når et trefase-nett blir belastet med en fase.

Det er tre faktorer som er avgjørende ved tilknytning til trefase-nettet:

Effektutak til togdriften

Kortslutningseffekt på nærmeste trefase samleskinne før matestasjonen

Type transformator i matestasjonen

I Frankrike har man for 45-60 MVA effekt valgt tilknytning til 225 kV trefase-nett, og for 30 MVA 150 kV tilknytning.

I Danmark er matestasjonene utført i to størrelser, for 46 MVA eller 25 MVA, og koblet til 132 kV nettet.

I Norge vil også 132 kV være den gunstigste trefase-spenningen. NSB må, i samarbeide netteiere, måtte bygge kraftlinjer frem til matestasjonene.

2.2 Matestasjoner

Antall, plassering og konstruksjon er avhengig av en rekke forskjellige faktorer, som:

Ruteplan

Togslag

Hastighet

Lok/materielltype

Tracéen

Kontaktledningens konstruksjon

Plassering av dødseksjoner i kontaktledningen

Matestasjonens belastning på trefase-nettet.

Tilkobling elektrisk til høy- og lavspenning.

Tilknytning til vei, vann og kloakk.

Matestasjonene bør plasseres og konstrueres for hver enkelt bane i den rekkefølge de er tenkt ombygget.

2.3 Kontaktledningsanlegget.

Anlegget må etterhvert tilpasses den høyere spenningen, det vil si at isolasjonsnivået må heves. Normal isolasjonsavstand må økes fra 250 til 270 mm.

Det vil ikke bli behov for å øke kontaktråd høyden, den er idag normalt 5600 mm. Til sammenligning kan nevnes at DSB ved elektrifisering med 25 kV, 50 Hz, har normal kontaktråd høyde på 5500 mm.

Togvarmeanlegg og reservekraft-uttak til signalanlegg som idag er koblet til kontaktledningsanlegget, må bygges om.

2.4 Rullende materiell.

Lokomotiver og motorvogner bygget for 25kV, 50 Hz vil falle noe rimligere enn for 15 kV, 16 2/3 Hz. Siden frekvensen er 3 ganger større, vil hovedtransformatorens kjerne ha kun 1/3 mengde jern i forhold til ved 16 2/3 Hz.

Under overgangsperioden fra det ene til det andre matesystemet må man ha trekkaggregater for begge systemer. På Kontinentet er det idag vanlig med lok for 2, 3 eller 4 matesystemer. En leverandør opplyser at prisen for et lok for de 2 systemene 25 kV, 50 Hz og 15 kV, 16 2/3 Hz vil være ca. 2,5% høyere enn et lok for kun 16 2/3 Hz.

2.5 Signalanlegg og teleanlegg.

For teleanlegg antas konsekvensene å bli små. Etablerte standarder for krav til støy m.v. må følges.

Ved skifte av strømforsyningssystem finnes det to ulike alternativer når det gjelder konsekvenser for signalanlegg :

Alternativ A: Dagens signalanlegg beholdes og tilpasses.

Alternativ B: Det bygges signalanlegg etter nye prinsipper optimalt tilpasset det nye strømforsyningssystemet.

Det diskuteres for tiden hvorvidt signalanleggene bør endres uansett for å bedre tilgjengeligheten. Det vil da være svært interessant å se en slik endring i sammenheng med en eventuell endring av strømforsyningssystemet. Det er også interessant å sammenligne tilpasningskostnadene ved alternativ A med utbyggingskostnadene ved alternativ B.

Det tekniske grensesnittet mellom signalanleggene og kontaktledningsanleggene kan i dag sies å bestå av følgende komponenter:

- Sporfeltkrets med sporfeltrelé

- Overdragstransformatorer

Brukes for å føre et sporfelt forbi et skille i kontaktledning/returstrømskretsen og ved såkalte "sugefelt", dvs. korte felt som benyttes for oppføring til sugetransformator

- Impedansforbindelser

Brukes for å føre returstrømskretsen forbi isolerte skjøter som skiller to nabosporfelt fra hverandre.

- Isolerte skjøter

Alternativ A:

Dagens sporfeltsystem hos NSB består av 105Hz eller 95Hz dobbeltisolerte sporfelt med maks 30V spenning mellom skinnestrengene. Frekvensene 105Hz og 95Hz er valgt for å få avstand til kjørestrømmens 5., 6. og 7. harmoniske.

Ved overgang til 50Hz strømforsyning vil en sannsynligvis ut fra signalanleggets krav kunne fortsette med de valgte frekvenser, forutsetningen for dette er at kjørestrømmens 2. harmoniske oppfyller de krav som er satt til støystrøm i dette området. Etter det en kjenner til er ikke like harmoniske noe problem vedr. thyristorstyrt materiell, og problemet med støy fra statiske omformere vil jo bli eliminert. For å sikre seg ytterligere mot 100Hz støy kan frekvensene justeres til f.eks. 110Hz henholdsvis 90Hz.

Eksisterende impedanser skulle også kunne benyttes sett fra et signalteknisk ståsted, men de induktive tapene (jernetap) i impedansene vil bli større på grunn av høyere frekvens. På den annen side vil returstrømmene bli mindre på grunn av høyere spenning, noe som vil føre til mindre induktivt tap. En kan imidlertid ikke samkjøre transformatorstasjonene med 50Hz-systemet, så dette problemet henger også sammen med hvordan nettet blir dimensjonert og hvor lang avstand det blir mellom matepunktene. Dette er altså et meget sammensatt problem hvor det må gjøres grundigere analyser før en kan trekke konklusjoner.

Alternativ B:

Ved DSB er det ved elektrifiseringen (25kV 50 Hz) etablert et system med enkeltisolerte likestrømssporfelt og egen skinne for returstrøm samt returleder. Ved hver sporfeltskjøt byttes den isolerte skinnen og returstrømskinnen om, dette for at en kortslutning av den isolerte skjøten skal kunne oppdages av sporfeltet.

Et alternativ til å benytte likestrømssporfelt er prinsippet med skjøtløse sporfelt.

Hvilke av de to alternativer som er det mest hensiktsmessige må vurderes ut fra bl.a. krav til skinnebruddsdeteksjon samt en analyse av tilgjengelighet ved de ulike løsninger.

Kostnader:

Dersom en bygger om hele sporfeltsystemet kan en anslå totale reinvesteringkostnader (meget grovt) for NSB's nett ved å ta utgangspunkt i ca. pris for de sporfelt vi har i dag. Med en pris på ca. 35.000,- pr. sporfelt og ca. 5.000 sporfelt får vi en total reinvesteringkostnad på ca. 175 mill. kr.

I tillegg kommer eventuelle kostnader ved ombygging av statiske omformere/reservestrømforsyning til signalanlegg og sporfelt. Disse kan i dag ta primærstrøm både fra 16 $\frac{2}{3}$ Hz-nettet eller 50Hz-nettet.

Ved nyinvesteringer kan en regne at kostnadene for signalanlegg ikke blir vesentlig endret i noen retning i forhold til dagens kostnader.

2.6 Overgangsfasen fra nåværende system (gjelder alle fagområder).

Det må utarbeides en plan for gradvis overgang til det nye matesystemet. Planen kan legges opp slik at strekningene blir bygget om stort sett etter matestasjonenes alder. Dette vil innebære denne rekkefølgen:

Sørlandsbanen
Bergensbanen
Dovrebanen
Østlandsområdet

Nye baner, som Gardermobanen og Ringeriksbanen, bør bygges for 25 kV , 50 Hz system.

2.6.1 Rullende materiell

Ved en gradvis overgang til nytt matesystem, må NSB ha to- system lokomotiver. El 18, som nå er under planlegning, må bygges for begge systemer, og i første omgang trafikere Sørlandsbanen.

Motorvognsettene type BM 69, som idag trafikerer strekningen Stavanger-Egersund, må enten bygges om eller skiftes ut før denne delen av Sørlandsbanen kan gå over til nytt system.

Likeledes må det øvrige rullende materiellet enten være ombygget eller utskiftet før en strekning kan legges om til nytt system.

2.6.2 Strømforsyning

Strømforsyning omfatter matestasjoner og kontaktledningsanlegg.

Det må legges opp en detaljert plan for ombygging av kontaktledningsanlegget, og en tilsvarende plan for ombygging og nybygging av matestasjoner.

2.6.3 Signalanlegg og teleanlegg

Signalanleggene kan tilpasses evt. bygges om etter hvert som ombygging av strømforsyning/kontaktledning bygges om. Spesielle tiltak må vurderes ved grensene mellom nytt og gammelt system.

2.6.4 Trafikk-avviklingen

Overgangsfasen vil uten tvil skape problemer for trafikken idet man må operere med trekkraftmateriell dels for ett og dels for to systemer. Overgang til nytt system må derfor ikke finne sted før det rullende materiellet er vel utprøvet og ruteopplegget er helt klart.

3. FORNYELSE AV MATESTASJONENE, ALTERNATIVER

I avsnitt 1.3 er listet opp 3 alternativer for fremtidig strømforsyning til elektrifiserte baner.

3.1 Skifte ut nåværende anlegg med utstyr med nåværende teknikk (roterende omformere).

Totalt reinvesteingsbehov etter dagens prisnivå ville være ca. 2.500 mill. kr. Forsterkninger frem til og med 1997 på grunn av øket trafikk, vil beløpe seg til ca. 840 mill.kr.

3.2 Skifite ut nåværende anlegg med utstyr med ny teknikk (statiske omformere).

Totalt reinvesteringsbehov etter dagens prisnivå vil være ca. 2.000 mill.kr. Forsterkninger frem til og med 1997 vil beløpe seg til ca. 700 mill. kr.

3.3 Gå over til nytt matesystem med 25 kV, 50 Hz.

Totalt reinvesteringsbehov etter dagens prisnivå vil være ca.700 mill kr. Forsterkninger frem til og med 1997 vil beløpe seg til ca.200 mill.kr.

4. DISKUSJON

Alternativ 3.1 med bibehold av roterende omformere er det minst gunstige:

Kapitalomkostningene er høye.

Omformingstapene vil forbli høye, de vil være 20-25% .

Drifts- og vedlikeholdsomkostningene vil forbli høye.

Alternativ 3.2 med overgang til statiske omformere er noe bedre:

Kapitalomkostningene er noe redusert, men fortsatt høye.

Omformingstapene vil bli redusert.

Drifts- og vedlikeholdsomkostningene vil bli noe redusert.

Alternativ 3.3 med overgang til 25 kV, 50 Hz vil medføre:

Kapitalomkostningene for matestasjonene vil kunne reduseres med ca. 2/3. Omformingstapene vil bli betydelig redusert, til kun transformator tap, det vil si til ca. 5%.

Drifts- og vedlikeholdskostningene vil også bli betydelig redusert.

Ny-elektrifisering av dieseldrevne eller nye baner vil bli rimligere.

(DSB beregnet før start av sitt elektrifiseringsprogram at det totalt ville bli ca. 15% dyrere å elektrifisere med 15 kV, 16 2/3 Hz enn med 25 kV, 50 Hz).

Dette alternativet vil imidlertid ha tekniske og økonomiske konsekvenser for flere andre fagområder.

Gardermobanen

Banen kan betraktes som en helt separat bane. Etter DSBs beregninger vil elektrifisering med 25 kV, 50 Hz da falle ca. 15% rimeligere enn med 15 kV, 16 2/3 Hz.

Siden banen skal integreres i NSBs nett, må imidlertid det rullende materiell bygges for to systemer, siden en overgang til nytt matesystem ikke vil være fullført før åpning av Gardermobanen.

5. KONKLUSJON

I denne grove planen er angitt de store besparelser NSB kan oppnå ved at matestasjonene bygges for et 25 kV, 50 Hz matesystem. Besparelsene er vesentlige både når det gjelder kapital-, drifts- og vedlikeholdskostninger. Det er videre pekt på de tekniske problemer en overgang til et nytt matesystem vil medføre, og de omkostninger som er forbundet med en overgang.

Besparelsene i matestasjonene er imidlertid så store at arbeidet med å utrede en overgang til det nye systemet bør fortsette.

6. FORSLAG TIL VIDERE ARBEID

For å fremskaffe et mer detaljert beslutningsunderlag, foreslåes at NSB engasjerer en ekstern konsulent for å vurdere og kostnadsberegne en overgang til 25 kV, 50 Hz. Konsulentens rapport bør foreligge etter ca. 3 måneder slik at det kan taes en avgjørelse før prosjektering av Gardermobanen er kommet for langt.

TU - rapport

Simulering av kraftbehov for elektriske baner

**Simulering av banestrømforsyningen på
strekningen Kristiansand - Stavanger**

SAMMENDRAG

Denne rapporten består av resultater fra simuleringer av banestrømforsyningen på Sørlandsbanen, strekningen Kristiansand - Stavanger. Denne strekningen er i dag forsynt via omformerstasjoner med 101 og 113 km innbyrdes avstand.

Utgangspunktet for simuleringene er grafiske togruter for ekspresstogene i år 2008 og dagens rutemønster forøvrig.

Simuleringene viser at når gamle og små lokomotiver blir utrangert og erstattet med nye og større lokomotiver som er bygd for framtidens hastigheter, vil det oppstå problemer med for lav spenning i perioder med tett togtrafikk. Dette er ikke holdbart med de krav til regularitet som vil bli stilt i framtida.

Simuleringene viser også at et utfall av en omformerstasjon vil få store konsekvenser, da det med slike feil ikke er mulig å opprettholde ordinær togtrafikk i tett trafikkerte perioder.

Konklusjonen er at anleggene for banestrømforsyning bør forsterkes, enten med å bygge 2 nye omformerstasjoner mellom dagens stasjoner, eller å bygge en høgspennet mateledning med transformatorstasjoner. Hvis prinsippet med mateledning velges, bør systemet med 130 kV spenningsnivå velges.

INNHOLDSFORTEGNELSE

	side
1 Innledning	1
2 Teori	2
2.1 Beskrivelse av NSBs nett	2
2.2 Modeller i simuleringsprogrammet	3
2.2.1 Matestasjonsmodell	4
2.2.2 Kontaktledningsanlegg	4
2.2.3 Seriekondensatorbatterier	5
2.2.4 Mateledning	5
2.2.5 Transformatorer	5
2.2.6 Trekkraftmateriell	6
2.3 Data for simuleringen	6
3 Resultater av simuleringene	7
3.1 Innledning	7
3.2 Tidspunkt 18.45	8
3.3 Tidspunkt 19.30	12
3.4 Tidspunkt 20.45	16
3.5 Tidspunkt 21.00	16
3.6 Simulering med utfall av Sira omformerstasjon	20
3.7 Tap i overføringsanlegg	23
3.8 Kostnadsoverslag	25
4 Diskusjon	26
5 Konklusjon	29
6 Forslag til videre arbeid	30

1. INNLEDNING

I forbindelse med Norsk Jernbaneplan 1994-97 er det utgitt en rapport fra Servicedivisjonen; Materiellstrategi [1]. I denne rapporten står det i klartekst at innen 1998 skal alle lokomotiver av type EI 11 og EI 13 være utrangert, og 45 nye universallok av type EI 18 skal være idriftsatt.

I fremtiden vil fjerntog og godstog bli trukket av lokomotiver av typene: EI 14, EI 16, EI 17 og EI 18. Det nye lokomotivet EI 18 vil ha asynkronmotor, og en maksimal effekt på ca 5 MW.

Fra Servicedivisjonen er det også utarbeidet rutemodeller for 1997 og 2008 [2]. Disse modellene inkluderer kun ekspressstog for Sørlandsbanen.

Denne rapporten skal se på behovet for forsterkning av banestrømforsyningen på Sørlandsbanen mellom Kristiansand og Stavanger.

Et lastflytanalyseprogram ACCAN, blir brukt til å simulere effektbehovet ved enkelte tidspunkt som blir valgt ut fra grafisk togrute. Ved de forskjellige tidspunktene blir effektuttaket i de forskjellige togene variert for å se virkningen av dette. De hardest belastede tilfellene er så blitt simulert med forskjellig type forsterkning av banestrømforsyningen;

1. 2 nye omformerstasjoner plassert midt i mellom dagens omformerstasjoner
2. 130 kV mateledning med transformatorstasjoner plassert midt i mellom dagens omformerstasjoner.
3. 55 kV mateledning med transformatorstasjoner plassert midt i mellom dagens omformerstasjoner.

2. TEORI

2.1 Beskrivelse av NSBs nett

I dag er NSB's nett på Sørlandsbanen mellom Kristiansand og Stavanger som vist på figur 2.1. Kontaktledningsanlegget bli forsynt med 16 2/3 Hz kraft gjennom 3 omformerstasjoner. Omformerstasjonene ligger tilknyttet det landsdekkende kraftforsyningsnettet på 66 eller 50kV spenningsnivå. Avstandene mellom disse omformerstasjonene er 101 og 113 km.

Mellom omformerstasjonene er det to seriekondensatorbatterier som begge ligger plassert ca 1/4 av full mateavstand fra hver omformerstasjon. Disse kondensatorbatteriene har til hensikt å heve kontaktledningsspenningen ved å kompensere for kontaktledningsanleggets reaktans, og også kompensere for enkelte typer trekkraftmateriell's reaktive effektuttak.

Nominell spenning på kontaktledningsanlegget er 15 kV, med spenningsvariasjoner tillatt innenfor området +10%, -20%, det vil si, akseptert spenning ligger mellom 16,5 og 12,0 kV.

Kontaktledningsanlegget kjøres i normal drift samkjørt, slik at alle omformerstasjonene er elektrisk sammenkoblet.

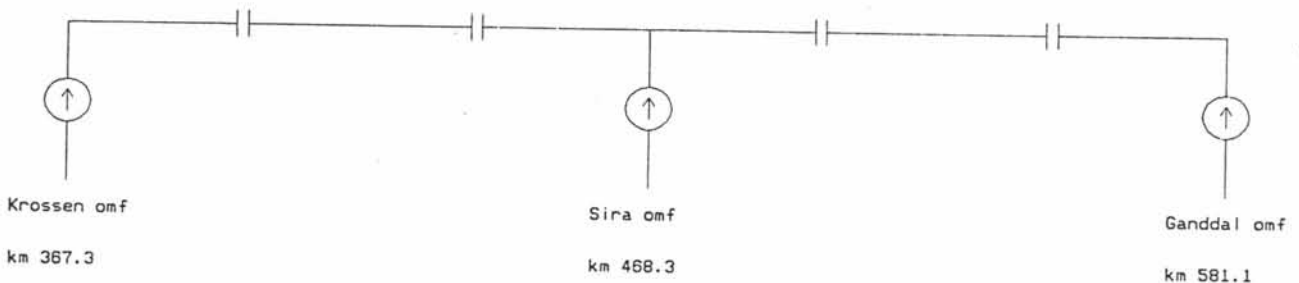


Fig. 2.1 Dagens nett

Hvis kraftforsyningsanleggene forsterkes med å bygge en høgspent mateledning, vil nettet se ut som på figur 2.2.

Her er kontaktledningsanlegget matet fra samme omformere som tidligere, og kompensert med samme seriekondensatorbatterier som tidligere. I tillegg er det plassert en transformator i hver omformerstasjon for å transformere spenningen opp til mateledningens spenningsnivå. Mateledningen overfører kraften med lave tap til transformatorstasjonene som er plassert omtrent midt mellom omformerstasjonene. Dette gir et nytt innmatingspunkt på det stedet som i dag er det svakeste elektrisk sett, og gir tilnærmet samme virkning som en ny omformerstasjon på samme sted ville ha gitt. Spenningen heves opp til et akseptabelt nivå, og kraft til togframføring blir matet ut på kontaktledningen delvis fra omformerstasjonene, og delvis fra transformatorstasjonene.

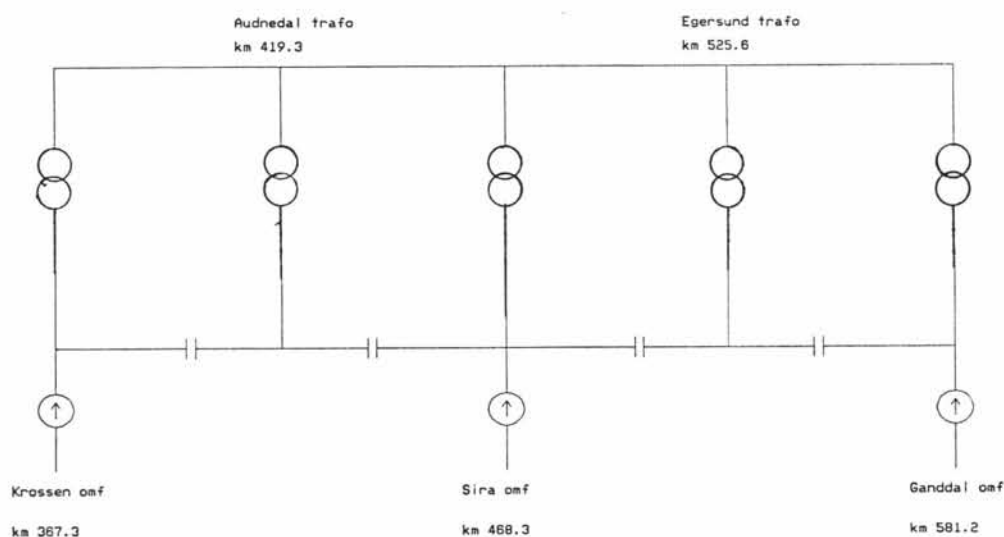


Fig 2.2 Nett med mateledning og transformatorstasjoner

I de simuleringene som er foretatt med mateledning er transformatorstasjonene plassert så godt som identisk midt mellom de to nærliggende omformerstasjonene. (se figur 2.2)

I simuleringene som er foretatt med nye omformerstasjoner mellom dagens omformerstasjoner, er de nye omformerne plassert på samme sted som transformatorstasjonene, det vil si midt mellom to "gamle" omformerstasjoner, se figur 2.3.

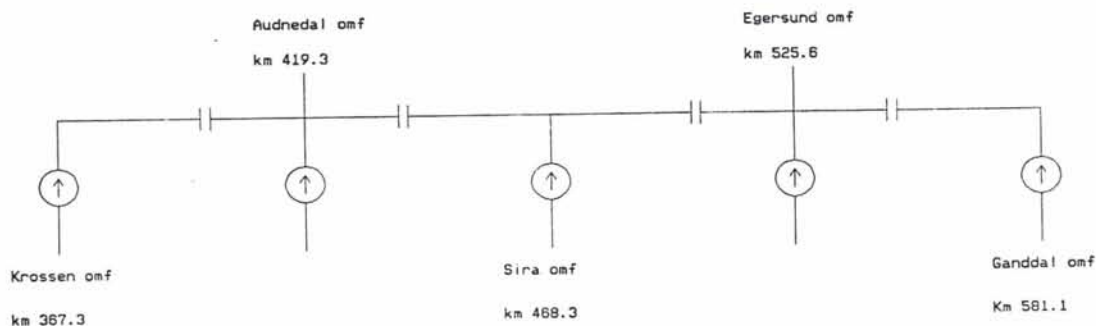


Fig. 2.3 Nett med 2 nye omformerstasjoner

2.2 Modeller i simuleringsprogrammet

Simuleringer ble foretatt med programmet ACCAN, som er et lastflytanalyseprogram for vekselstrømkretser. Programmet foretar statiske analyser, og kan ikke se på forløp over en viss tid der forholdene forandrer seg. Ved bruk av programmet må en modellere kontaktledningsanlegget, seriekondensatorbatterier, transformatorer, mateledninger, matestasjoner og trekraftmateriell.

Alle disse komponentene bortsett fra matestasjonsmodellen og trekkraftmateriellet modelleres som impedanser. I alle beregningseksemplene er alle impedanser og spenningskilder referert 16 kV spenningsnivå.

2.2.1 Matestasjonsmodell

Matestasjonsmodellen i ACCAN er som vist på figur 2.4



Figur 2.4 Matestasjonsmodell i ACCAN

Spesifisert spenning U i knutepunkt X er spenningen på 16 kV samleskinne i omformerstasjonene. Spenningen er gitt lik $U=U_0+\text{coeff.}\cdot|I|$ der $|I|$ er strømmens absoluttverdi.

Oppgitte verdier er minste spenning U_0 , maksimal spenning U_{lim} og coeff. som er valgt slik at spenningen U stiger fra 16200 - 16500 V fra tomgang til merkelast.

I tillegg til spenningsstigning som funksjon av lastuttak, inneholder modellen også omformeraggregatenes karakteristik for fasevinkelendring som funksjon av utmatet strøm og effektfaktor. Her kan en oppgi fasevinkelen til den induserte spenningen i omformeraggregatet som referanse. Det er denne referansevinkelen som forplanter seg fra trefasenettet gjennom omformerer og inn på enfasenettet.

Ved alle simuleringene som er foretatt her, er spenningen på 16 kV samleskinne satt konstant lik 16500 V, og fasevinkel på indusert spenning er valgt lik 0 i alle omformerstasjonene.

Alle matestasjonene på strekningen består av 2 aggregater. Simuleringsprogrammet betrakter matestasjonen som om den består av ett aggregat, og beregner strømmer ut fra matestasjonene. Størrelsen på strømmene viser om grenseverdien for ett eller to aggregater er nådd.

2.2.2 Kontaktledningsanlegg

Kontaktledningsanlegget bli modellert som en konsentrert impedans:

$$R=0,21\Omega/\text{km}$$

$$X=0,21\Omega/\text{km}$$

$$Z= \sqrt{(R^2+X^2)} = 0,30 \Omega/\text{km}$$

Disse verdiene blir brukt over hele strekningen bortsett fra strekningen Varhaug

kondensatorbatteri - Ganddal omformerstasjon, der kontaktledningsanlegget har forsterkningsledning, og verdiene for den konsentrerte impedansen blir:

$$R=0,18 \Omega/\text{km}$$

$$X=0,18 \Omega/\text{km}$$

$$Z=0,25 \Omega/\text{km}$$

2.2.3 Seriekondensatorbatterier

Seriekondensatorbatteriene er alle representert som en konsentrert reaktans $X_c = -10 \Omega$. Dette er beregnet ut fra en kapasitansverdi på $955 \mu\text{F}$, $X_c = -1/(\omega C)$

2.2.4 Mateledning

Som mateledning ble valgt FeAl nr 120, både for 130 kV og 55 kV spenningsnivå. Dette ledningstverrsnittet har for énfase overføringslinjer følgende impedanser:

$$R = 0,151 \Omega/\text{km}$$

$$X = 0,27 \Omega/\text{km}$$

Omregnet til 16 kV nivå fra de andre spenningsnivåene blir dette:

130 kV:

$$R = 0,0023 \Omega/\text{km}$$

$$X = 0,0041 \Omega/\text{km}$$

55 kV:

$$R = 0,0128 \Omega/\text{km}$$

$$X = 0,0228 \Omega/\text{km}$$

2.2.5 Transformatorer

Som transformatorer er valgt 16 MVA transformatorer for 130 kV spenningsnivå med samme data som transformatorene i det svenske mateledningssystemet som er beskrevet i ref. 3.

For 55 kV spenningsnivå er valgt 8 MVA transformatorer med samme data som de nyeste 55/16 kV transformatorene som i dag finnes i nettet rundt Hakavik kraftverk. I simuleringene er det beregnet med et fast omsetningsforhold på transformatorere. Følgende data er referert 16 kV spenningsnivå:

130/16 kV transformator:

$$R_k = 0,16 \Omega$$

$$X_k = 0,80 \Omega$$

55/16 kV transformatorer:

$$R_k = 0,48 \Omega$$

$$X_k = 2,16 \Omega$$

2.2.6 Trekkraftmateriell

Trekkraftmaterialet er i simuleringene representert som belastninger med spesifisert effektuttak, aktiv og reaktiv effekt.

Størrelsen på pådraget (effektuttaket) blir variert under simuleringene. Tabell 2.1 viser de forskjellige trekkraftmaterialet som er brukt i simuleringene, og tabellen viser effektfaktor og maksimalt effektuttak til de forskjellige typene.

togtype	cos ϕ	P _{max} [kW]	Q _{max} [kVAr]
EI 11	0,9	1676	812
EI 14	0,9	5082	2461
EI 18	1,0	5000	0
BM 69	0,8	1188	891

Tabell 2.1 Data over trekkraftmateriell brukt i simuleringen

En av de største usikkerhetene under en slik simulering er trekkraftmaterialets pådrag. Det er her simulert med forskjellige pådrag, angitt i % av maksimal trekkraft for å se hvordan spenningsforholdene på kontaktledningsanlegget blir.

2.3 Data for simuleringen

Utgangspunktet for simuleringene er grafiske togruter for strekningen Kristiansand - Stavanger. Fra grafisk togrute er det mulig å lese plasseringer på de forskjellige togene, og fra Servicedivisjonen, (Togdrift, Framføring) oppgis lok- og motorvognturnuser.

Opplysninger om toggang i framtiden finnes foreløpig kun for ekspresstogene, og disse er plottet inn i grafisk togrute, se vedlegg 1. Denne angir ekspresstog-par for år 2008. Fram til den tid forventes det ikke at rutemønsteret vil forandre seg særlig på denne togstrekningen. Men type trekkraftmateriell vil forandre seg som beskrevet i kap. 1, innledning. For godstog, lokaltog og persontog var ikke framtidige prognoser med grafiske togruter tilgjengelige.

Dette førte da til at simuleringene måtte ta utgangspunkt i dagens rutetabell, men med en framtidig turnus for ekspresstogene. Dagens ekspresstog ble tatt ut og erstattet av "framtidens" ekspresstogavganger. Som trekkraft på de nye ekspresstogene ble EI 18 benyttet.

Den framtidige turnus for ekspresstogavganger viser flere togpar i løpet av døgnet, men det vil innenfor tidsrom av 2-3 timer vil det ikke være flere ekspresstog på strekningen enn det er i dag. Dette betyr at det stort sett er utskifting av trekkraftmateriell, spesielt på ekspresstogene, som får størst innvirkning på strømforsyningen på denne strekningen.

3. RESULTATER AV SIMULERINGENE

3.1 Innledning

For å kunne simulere med dette programmet må en ta for seg enkelte tidspunkt i ruteplanen og se enkeltvis på hvert av disse. Ved å undersøke grafisk togrute kan en se når det er størst tetthet med tog, det vil si når det er mest sannsynlig at det kan oppstå problemer med strømforsyningen.

Når en tar for seg ett enkelt tidspunkt i rutetabellen kan hele systemet modelleres i ACCAN. Togplasseringene kan leses ut av grafisk togrute, og en kan da beregne kontaktledningsimpedanser mellom togene og omformerstasjoner / kondensatorbatterier. Ved å lage en modell av nettet, og representere togene som lasttuttak med angitt aktivt og reaktivt effektuttak, kan lastflyten i nettet beregnes. Resultater av lastflytanalysen er strømmer og spenninger med fasevinkler i hvert knutepunkt av nettet. Nettbildet med beregnede verdier kan plottes ut for å få resultatene ut på en mer oversiktlig form.

Hvert enkelt tidspunkt som ble undersøkt ble først studert med dagens nett, og lasttuttaket ble variert for å se virkningen av dette. De tilfellene som viste tydelige problemområder med lav spenning i nettet ble undersøkt videre med forskjellig type forsterkning av strømforsyningsanleggene:

1. 130 kV mateledning
2. 55 kV mateledning
3. 2 nye omformerstasjoner plassert midt mellom dagens omformerstasjoner.

Tidspunkt som ble undersøkt:

- kl. 18.45 (utgangspunkt i ruteplan fra 1991)
- kl. 19.30
- kl. 20.45
- kl. 21.00

Alle disse 4 tidspunktene hadde stor trafikk på linjene, men det er kun ordinære tog som er tatt med i analysen. Alle ekstratog og forsinkelser er det sett bort i fra. De følgene underkapitlene ser på hvert enkelt av disse tidspunktene, og vurderer disse.

3.2 Tidspunkt 18.45

For dette tidspunktet er det tatt utgangspunkt i rutetabell fra 1991. Grunnen er at dette tidspunktet allerede var modellert i programmet. Også her er ekspresstogene byttet ut med "nye" ekspresstog i år 2008, med EI 18 som trekkraft. I tillegg er tog 5808 med EI 11 og EI 14 i dobbeltraksjon blitt erstattet med 2 stk EI 14 i dobbeltraksjon.

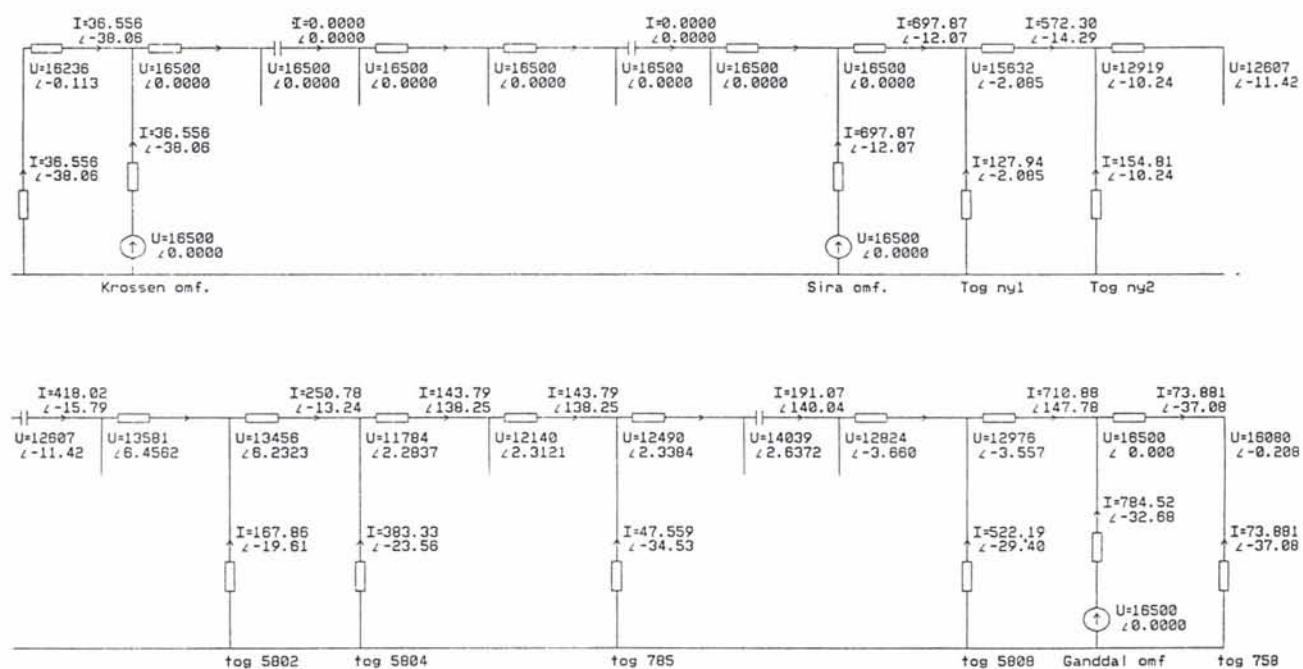
Under denne simuleringen oppsto det problemer med å få konvergens, så av denne grunn ble det benyttet en enklere matestasjonsmodell enn den som er beskrevet i kap. 2.2.1. Denne enklere matestasjonsmodellen består av en fast spenning lik 16,5 kV med en fast fasevinkel lik 0 på 16 kV samleskinne i omformerstasjonene. Den noe enklere matestasjonsmodellen får ikke fram den ulike lastfordelingen mellom to omformerstasjoner med ulik størrelse på omformeraggregatene. Spenningsforholdene vil likevel ikke avvike stort fra beregninger med den mer riktige matestasjonsmodellen.

I tabell nedenfor er angitt tognummer, trekkraftmateriell og % av max trekkraft som er benyttet under beregningene.

	loktype	
tog akk.	---	ekv. last øst for Krossen omf.
tog ny1	EI 18	40 %
tog ny2	EI 18	40 %
tog 5802	EI 14	40 %
tog 5804	EI 14	80 %
tog 785	BM 69	40 %
tog 5808	EI 14 + EI 14	60 %
tog 758	BM 69	80 %

Tabell 3.1 Oversikt over trekkraft og -materiell kl 18.45

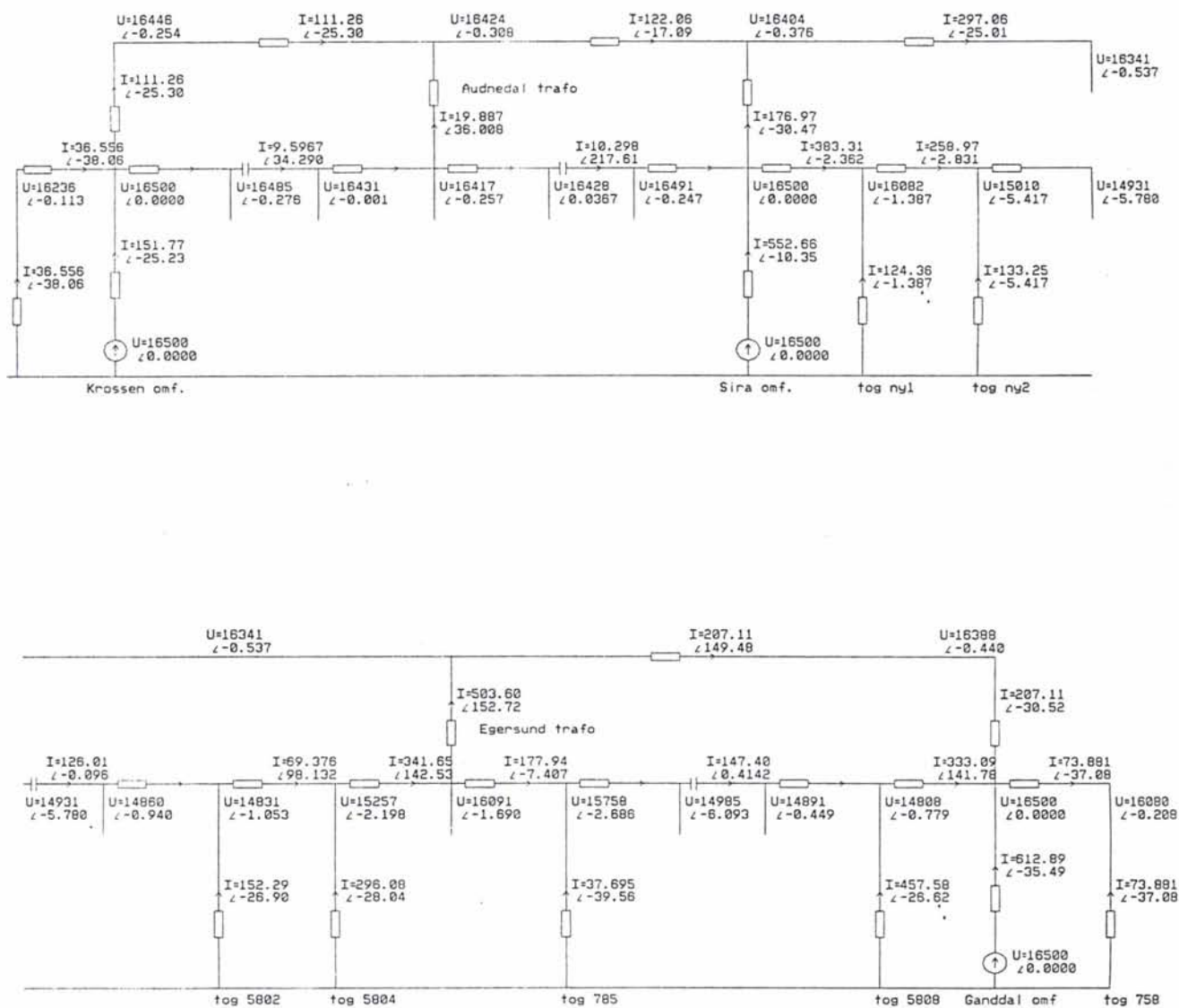
Ved pådrag og trekkraftmateriell som angitt i tabell 3.1 ovenfor får en resultat som vist i figur 3.1.



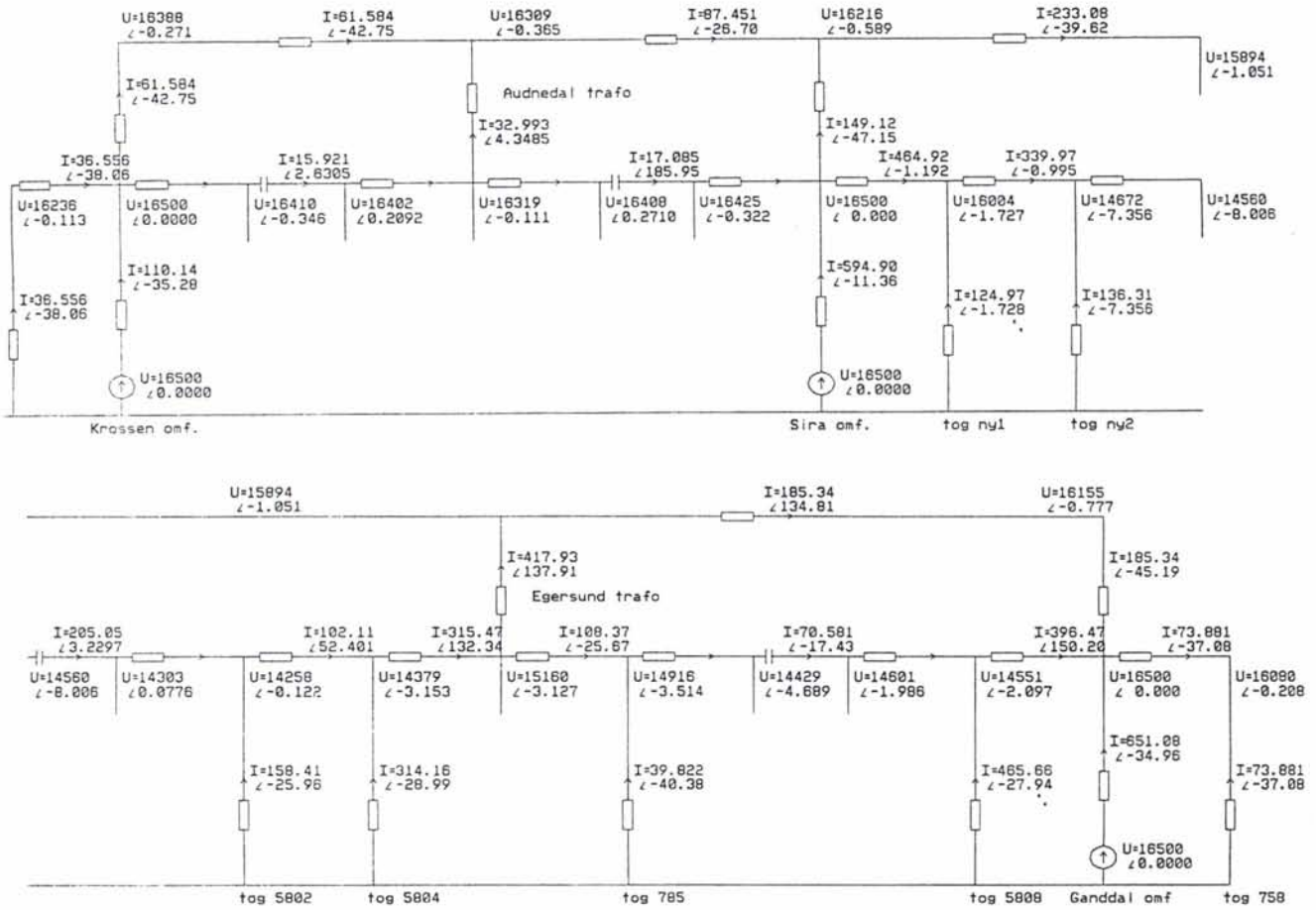
Figur 3.1 Spenningsforhold kl. 18.45 med dagens kontaktledningsanlegg

Her kan det ses at det allerede ved dette pådraget er problemer. Spenningen på tog 5804 er nede i 11,78 kV, som er under laveste tillatte spenning. Dette er meget betenkelig, for tabell 3.1 viser at det ikke er simulert med særlig store pådrag.

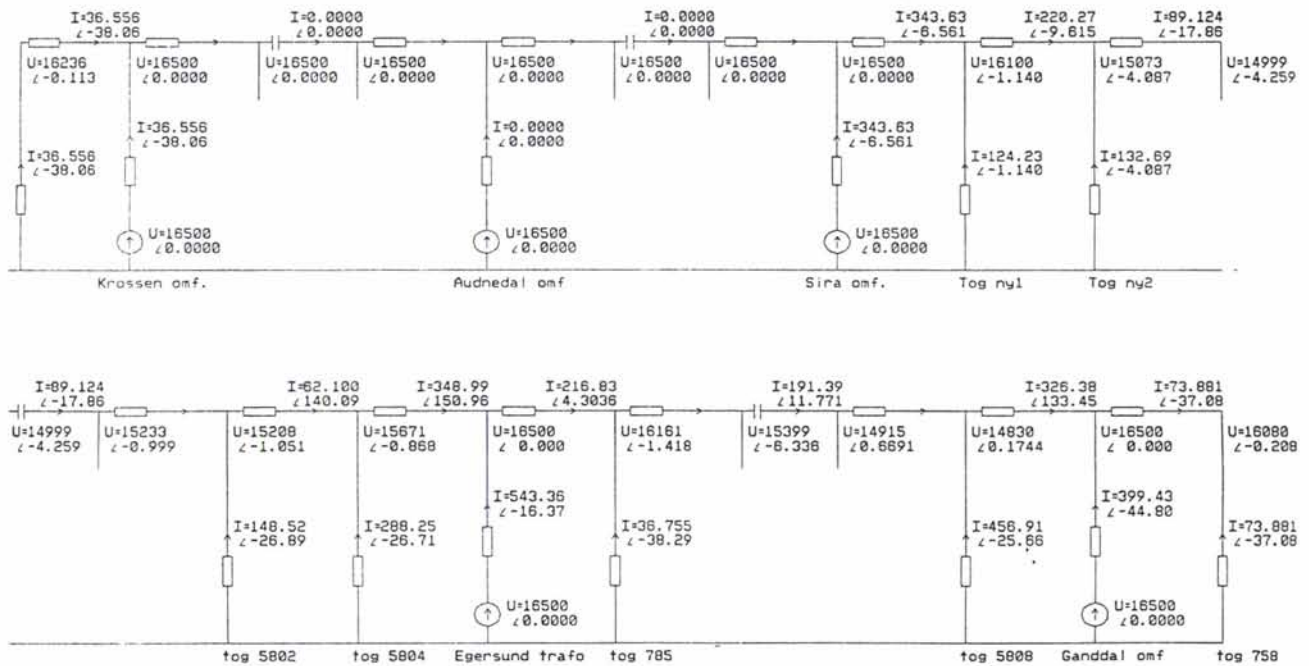
I figurene nedenfor er samme tilfelle beregnet med de 3 variantene av forsterkning.



Figur 3.2 Spenningsforhold kl. 18.45 med 130 kV mateledning



Figur 3.3 Spenningsforhold kl.18.45 med 55 kV mateledning



Figur 3.4 Spenningsforhold kl.18.45 med 2 nye omformerstasjoner

Her kommer det tydelig fram at alle de tre alternativene for forsterkning hever spenningen betraktelig på de mest utsatte punktene. De laveste spenningene er med de tre alternative forsterkningsmetodene er følgende:

130 kV mateledning : 14,81 kV
 55 kV mateledning : 14,26 kV
 2 nye omformerstasjoner : 14,83 kV

Jevnt over er spenningsforholdene noe bedre med 2 nye omformerstasjoner enn med 55 og 130 kV mateledning. Med 130 kV mateledning blir spenningsforholdene noe bedre enn med 55 kV spenningsnivå.

3.3 Tidspunkt 19.30

Ved dette tidspunktet er det tatt utgangspunkt i dagens rutetabell, og også her er ekspresstogene byttet ut med "framtidige" ekspresstog, år 2008, trukket av EI 18. Godstog nr 5804 blir i dag trukket av EI 11 og EI 14 i dobbeltraksjon. I disse simuleringene er EI 11 ikke blitt byttet ut med et annet og større lokomotiv, så forholdene i framtiden kan bli noe verre enn disse simuleringene viser. Tabell 3.2 nedenfor viser oversikt over trekraft og -materiell kl. 19.30.

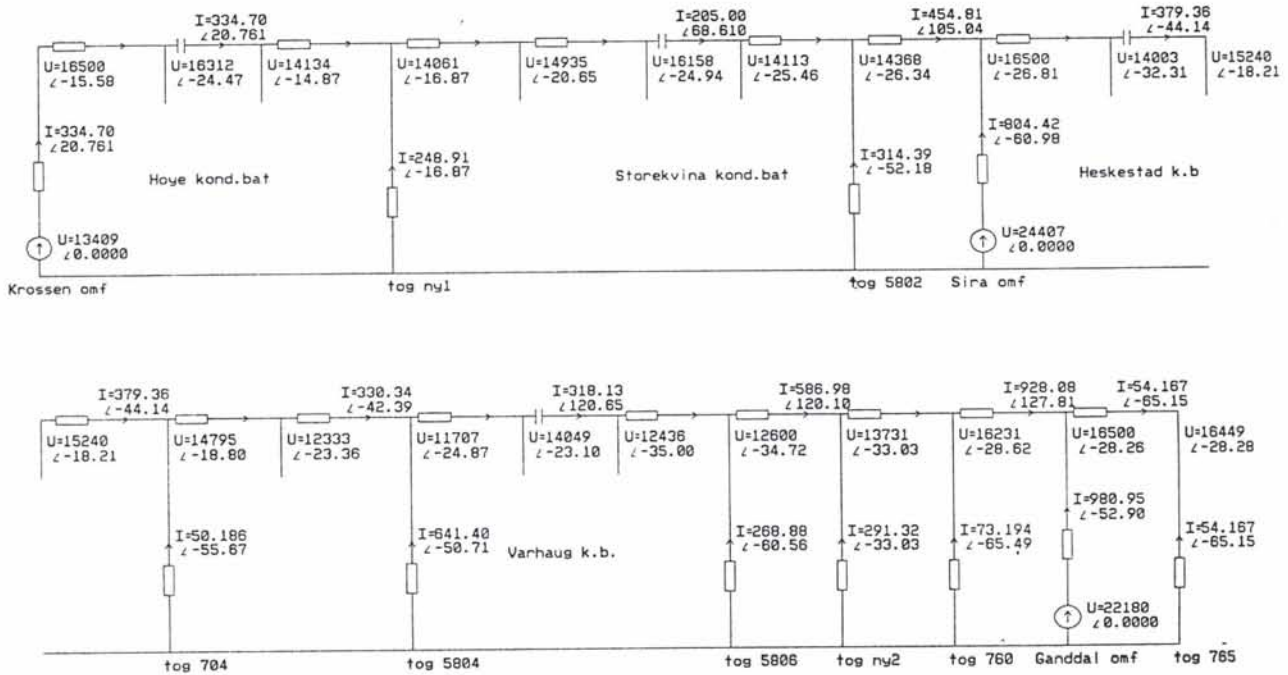
Simulerte lastsituasjoner med forskjellig pådrag						
tognummer	loktype	1930kl3	1930kl4	1930kl5	1930kl6	1930kl7
tog ny1	EI 18	70 %	70 %	70 %	70 %	70 %
tog 5802	EI 14	40 %	60 %	60 %	80 %	80 %
tog 704	BM 69	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %
tog 5804	EI 14+11	60 %	60 %	80 %	80 %	100 %
tog 5806	EI 14	50 %	60 %	60 %	60 %	60 %
tog ny2	EI 18	40 %	60 %	60 %	80 %	80 %
tog 760	BM 69	40 %	60 %	60 %	60 %	80 %
tog 765	BM 69	40 %	60 %	60 %	60 %	60 %

Tabell 3.2 Oversikt over trekraft og -materiell kl 19.30

1930kl3, 1930kl4 etc angir de forskjellige lastsituasjonene kl 19.30

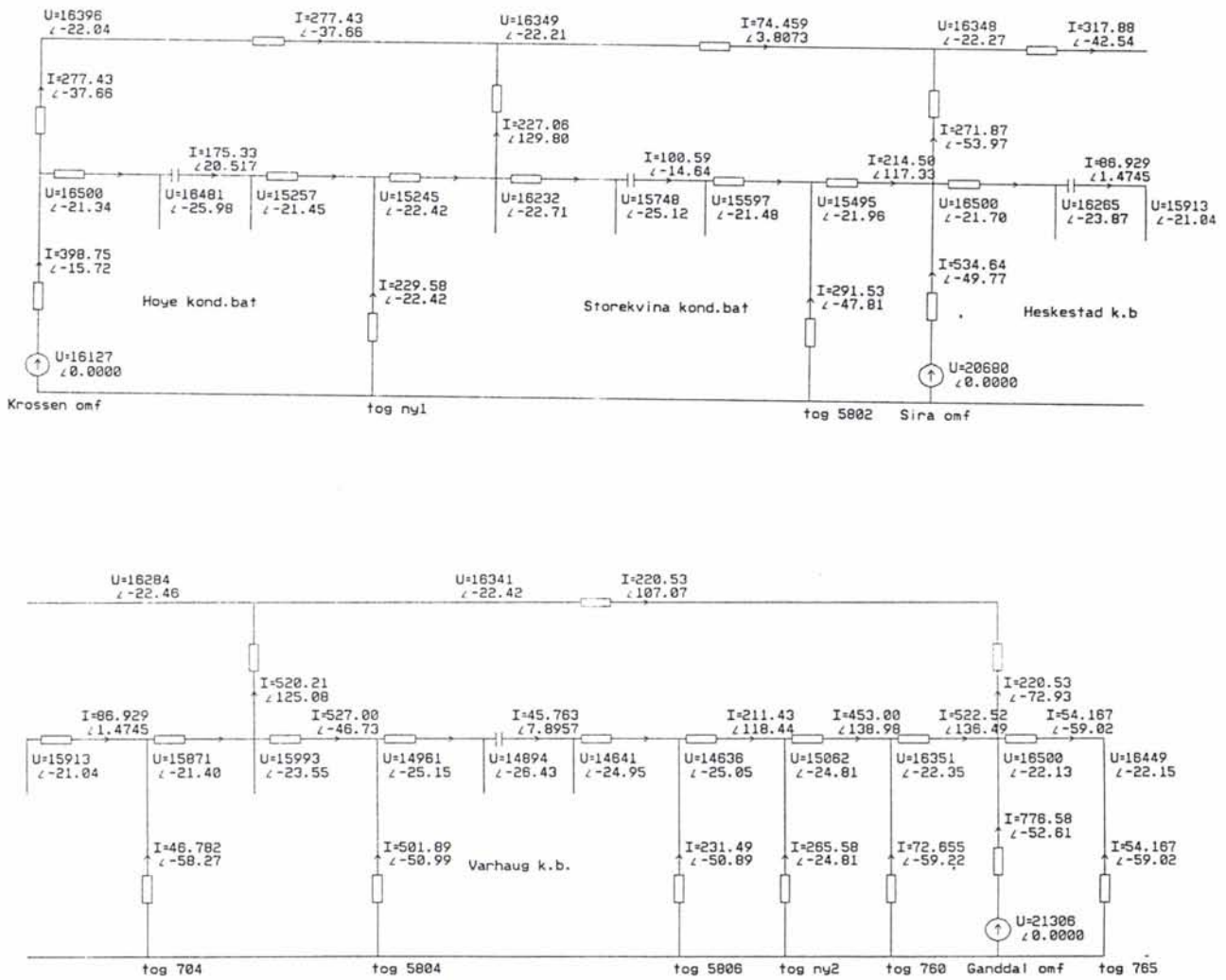
Alle de forskjellige tilfellene av lastuttak ble simulert med dagens kontaktledningsanlegg. Spenningsforhold for disse simuleringene er vist i vedlegg 3-6. Med et lastuttak som vist i den innrammede kolonnen, gikk spenningen på

kontaktledningen under grensen på 12 kV. Heller ikke her er lastuttaket usannsynlig høyt, bare ett av togene har max effektuttak. Resultatet fra simuleringen med dette effektuttaket er vist i figur 3.5.

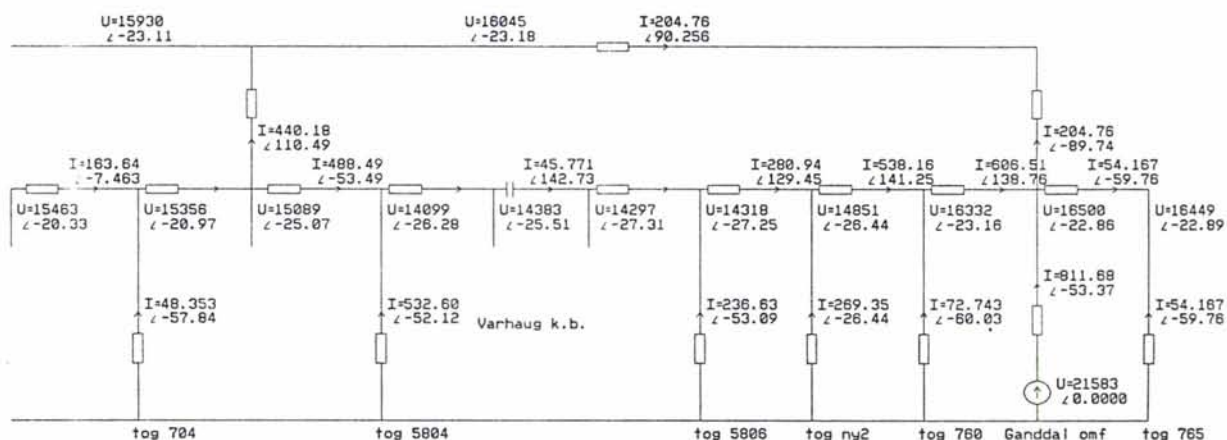
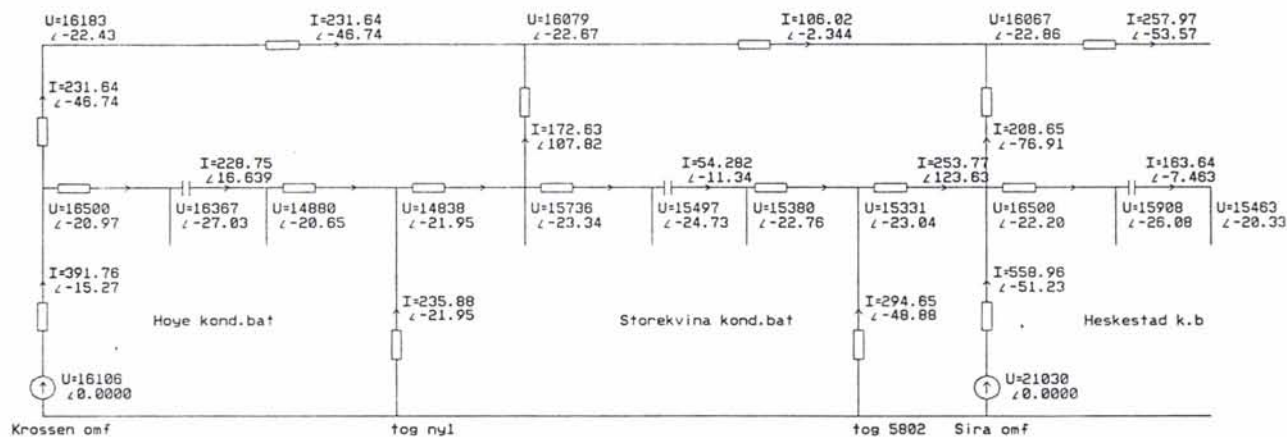


Figur 3.5 Spenningsforhold kl. 19.30 med dagens kontaktledningsanlegg

Her ser en at spenningen på tog 5804 er nede i 11,71 kV. I figurene 3.6 - 3.8 nedenfor er det samme lasttilfellet simulert med de 3 variantene av forsterket strømforsyning.



Figur 3.6 Spenningsforhold kl. 19.30 med 130 kV mateledning



Figur 3.7 Spenningsforhold kl. 19.30 med 55 kV mateledning

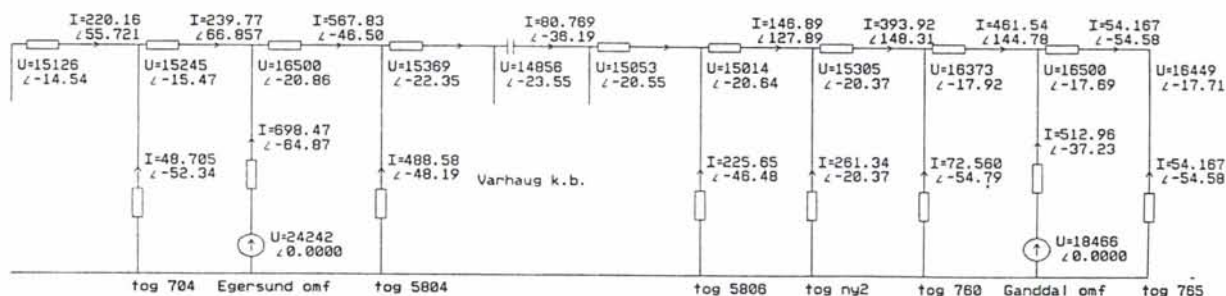
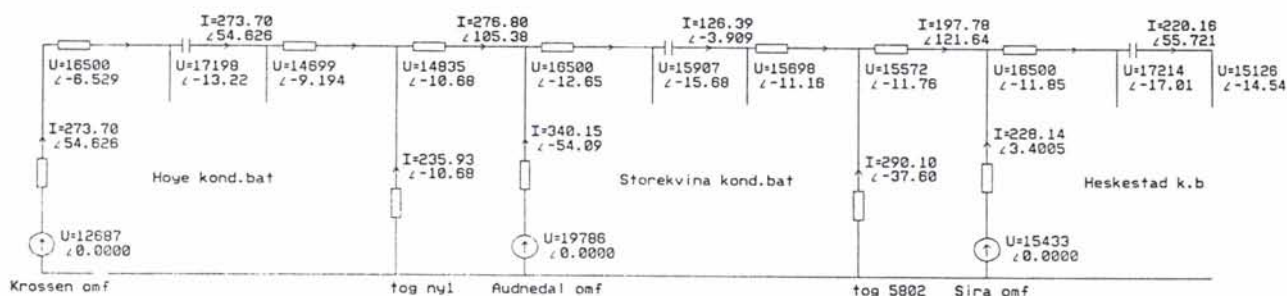


Fig. 3.8 Spenningsforhold kl. 19.30 med 2 nye omformerstasjoner

Her ser en tydelig at alle de tre alternativene for forsterkning hever spenningen betraktelig på de svakeste punktene i nettet. De laveste spenningene er med de tre alternative forsterkningsmetodene som følgende:

130 kV mateledning : 14,64 kV
 55 kV mateledning : 14,10 kV
 2 nye omformerstasjoner : 14,86 kV

Også her kommer det fram at spenningsforholdene jevnt over er noe bedre med 2 nye omformerstasjoner enn med mateledning, og at spenningsforholdene er bedre ved 130 kV mateledningsspenning enn ved 55 kV spenningsnivå.

3.4 Tidspunkt 20.45

Ved tidspunkt 20.45 oppsto det ikke problemer med for lav kontaktlednings-spenning til tross for den tett togtrafikken. Dette skyldes at togene var "heldig" plassert i nærheten av omformerstasjonene. Av denne grunn er dette tidspunktet ikke valgt å studere nærmere i denne sammenhengen.

3.5. Tidspunkt 21.00

Også ved dette tidspunktet er det tatt utgangspunkt i dagens rutetabell, der ekspresstogene er byttet ut med "fremtidig" rute for ekspresstog i år 2008. Ekspresstogene blir trukket av EI 18. Godstog nr 5804 blir i dag trukket av EI 11 og EI 14 i dobbeltraksjon. I disse simuleringene er EI 11 ikke blitt byttet ut med et annet og større lokomotiv, så forholdene i framtiden kan noe verre enn disse simuleringene viser. Tabell 3.3 nedenfor viser oversikt over trekraft og -materiell kl. 19.30.

Simulerte lastsituasjoner med forskjellig pådrag						
tognummer	loktype	2100kl1	2100kl2	2100kl3	2100kl4	2100kl5
tog 704	BM 69	40 %	40 %	40 %	40 %	2x60 %
tog ny3	EI 18	70 %	80 %	100 %	100 %	80 %
tog 5804	EI 14+11	70 %	80 %	80 %	100 %	100 %
tog 5806	EI 14	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %
tog 769	BM 69	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %
tog 764	2xBM 69	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %

Tabell 3.3 Oversikt over trekraft og -materiell kl 21.00

2100kl1, 2100kl2 etc angir de forskjellige lastsituasjonene kl 21.00

Alle de forskjellige tilfellene av lastuttak i tabellen ovenfor ble simulert med dagens kontaktledningsanlegg. Spenningsforhold for disse simuleringene er vist i vedlegg 7 og 8. Med lastuttak som vist i de tre innrammede kolonnene gikk spenningen på kontaktledningen under grensen på 12 kV. I den midterste av de tre innrammede kolonnene (2100kl4) gikk spenningen på kontaktledningen ved tog 5804 helt ned i 10.9 kV, samtidig med at spenningen på tog ny3 var nede i 11,6 kV. I dette tilfellet er det beregnet med et maksimalt pådrag på begge disse togene mens de andre togene er simulert med mer moderate pådrag. På dette tidspunktet er både tog 5804 og tog ny3 i områder med stigninger der en må kunne forvente store pådrag, så antagelse om maksimalt pådrag er ikke usannsynlig. Resultatet fra simuleringen med dette effektuttaket (2100kl4) er vist i figur 3.9.

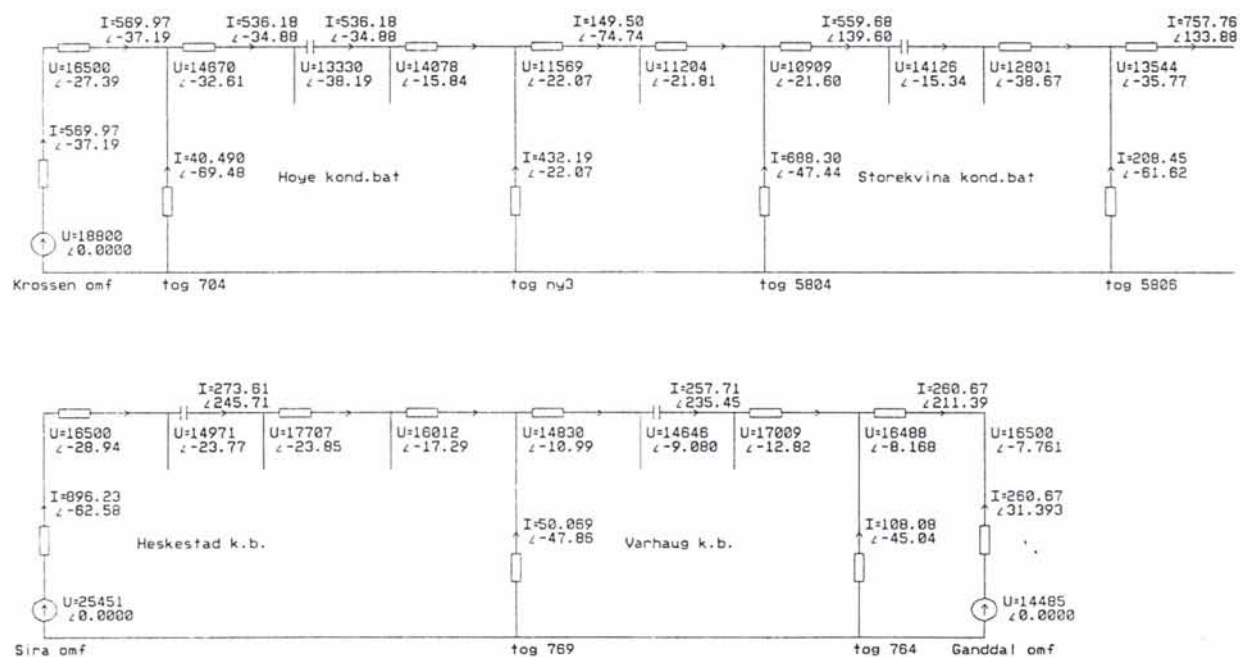


Fig. 3.9 Spenningsforhold kl. 21.00 med dagens kontaktledningsanlegg

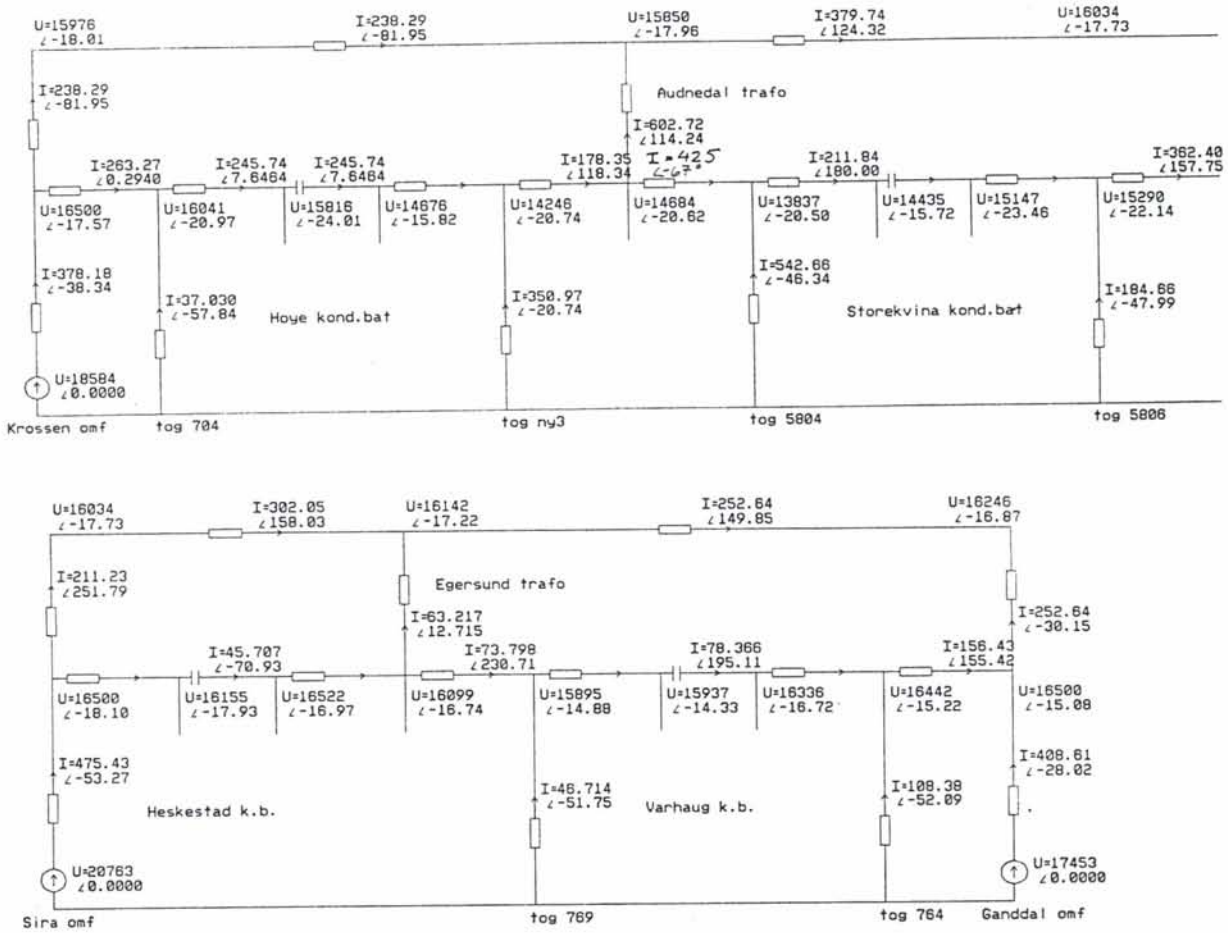


Fig. 3.11 Spenningsforhold kl. 21.00 med 55 kV mateledning

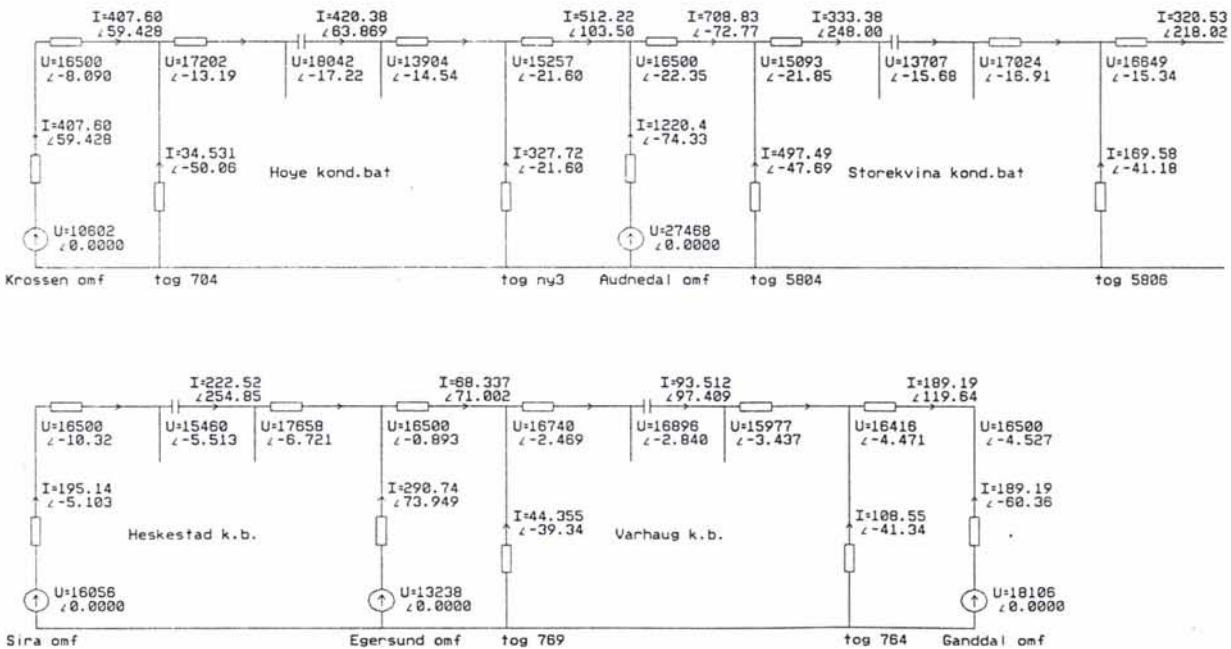


Fig. 3.12 Spenningsforhold kl. 21.00 med 2 nye omformerstasjoner

Her ser en igjen tydelig at alle de tre alternativene for forsterkning hever spenningen betraktelig på de svakeste punktene i nettet. De laveste spenningene er med de tre alternative forsterkningsmetodene som følgende:

130 kV mateledning	: 14,94 kV
55 kV mateledning	: 13,84 kV
2 nye omformerstasjoner	: 13,71 kV

Her viser det seg at spenningen blir lavere i enkelte av punktene i nettet med 2 nye omformerstasjoner enn med mateledning som forsterkning av nettet. Dette er ikke helt logisk siden spenningen på kontaktledningen i innmatningspunktene er høyere med nye omformerstasjoner enn med mateledning og transformatorstasjoner. Antageligvis er det iterasjonsprosessen i programmet som velger "gal" løsning for tilfellet med 2 nye omformerstasjoner.

Enhver problemstilling av denne typer gir flere matematisk riktige løsninger. Et simuleringsprogram itererer seg fram til den ene av disse løsningene, og denne behøver ikke nødvendigvis å være den mest sannsynlige. I dette tilfellet er det tydelig at løsningen ikke er helt logisk. Den ene omformerstasjonen, Audnedal, er flere ganger så sterkt belastet i forhold til de tilsluttende omformerstasjonene. Dette virker ikke helt logisk, og en må anta at en tilsvarende belastning i virkeligheten ikke vil gi en så skjev lastfordeling mellom aggregatene som simuleringen viser.

3.6 Simulering med utfall av Sira omformerstasjon

For å undersøke problemer omkring utfall av en omformerstasjon ble det foretatt en simulering av tidspunktet 19.30 med samme lastuttak som i kap. 3.3 (1930kl7) og med utfall av Sira omformerstasjon.

Med dagens kontaktledningsanlegg ville ikke programmet konvergere, og forsøk på å bruke en enklere matestasjonsmodell ga fortsatt ikke konvergens. Dette er tegn som tyder på at belastningene antageligvis er for store i forhold til innmatet effekt. Uansett vet vi at samme tilfelle med alle tre omformerstasjonene inne ga spenninger ned i 11,7 kV på det svakeste punktet. Det er da klart at når den ene omformerstasjonen faller ut, vil ikke de to andre klare å mate hele området tilfredsstillende.

Ved et utfall av Sira omformer vil spenningen på punktet midt mellom Ganddal og Krossen omformerstasjon være ved nedre grense, 12 kV, med et strømuttak på ca 400 A. Dette tilsvarer et effektuttak på 4.8 MW ved $\cos\phi=1$, eller ca 3.8 MW ved $\cos\phi=0,8$. Hvis det er flere tog på den 214 km lange strekningen blir forholdene forverret. Dette forklarer hvorfor simulering med dagens kontaktledning ikke konvergente.

Det samme feiltilfellet ble også simulert med de tre tilfellene av forsterket banestrømforsyning, og figur 3.13 - 3.15 nedenfor viser resultatene av disse simuleringene.

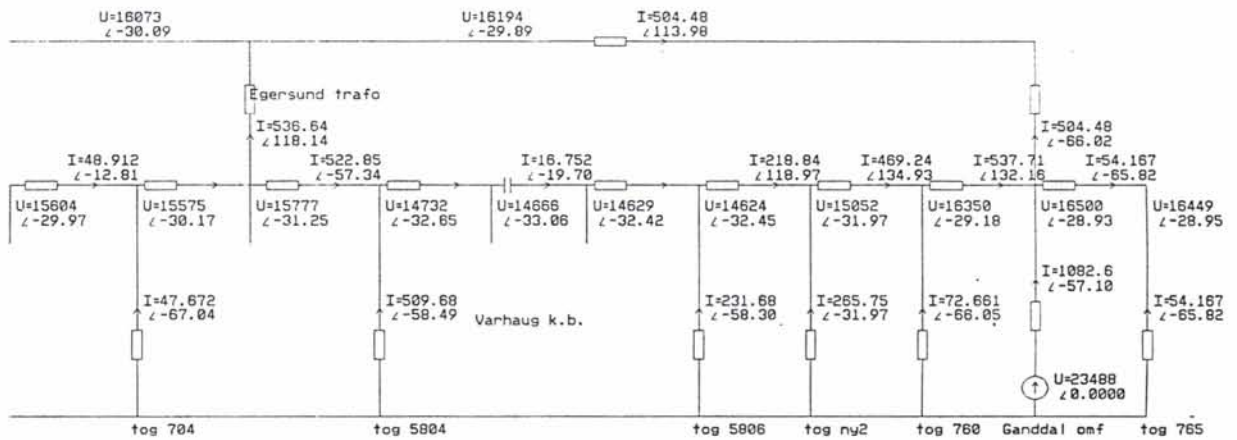
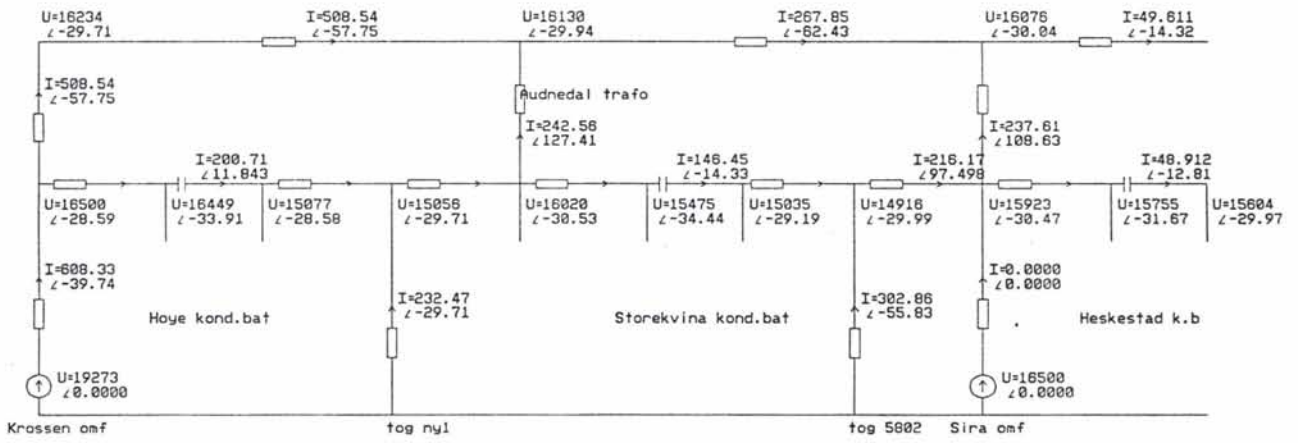
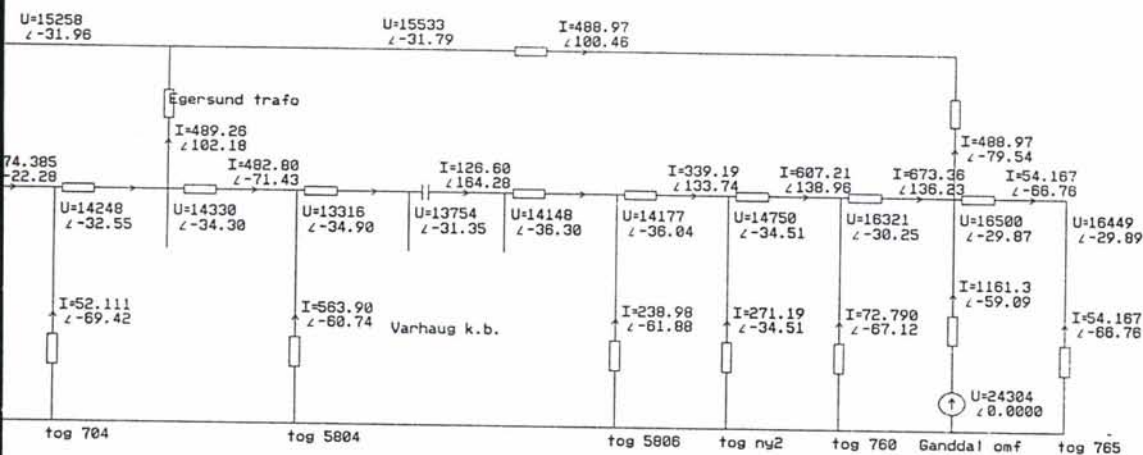
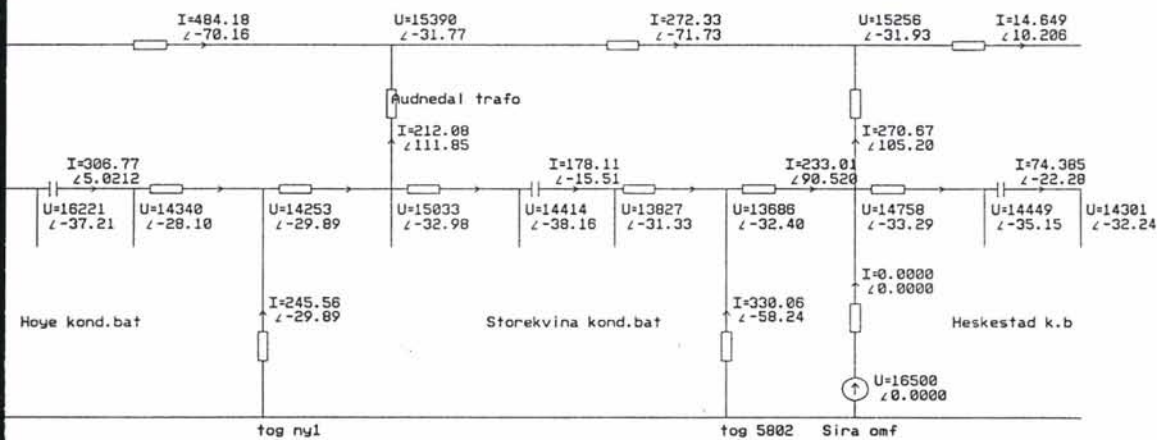
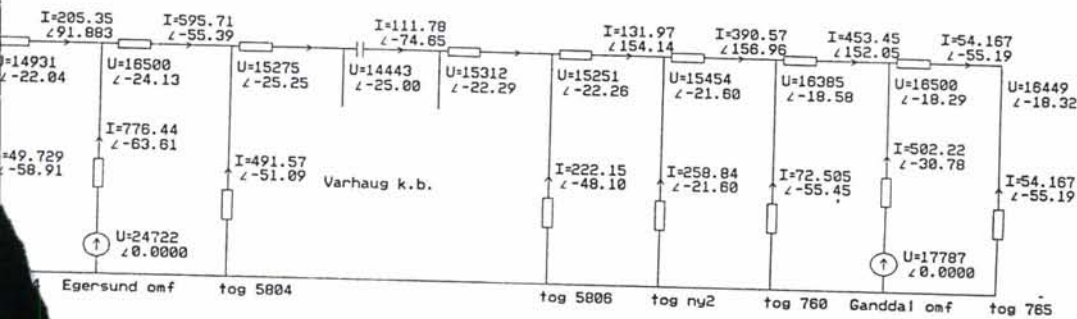
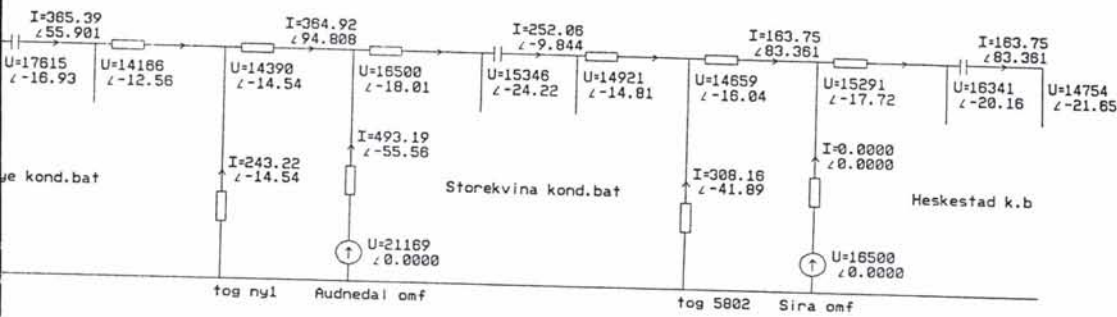


Fig. 3.13 Spenningsforhold kl. 19.30 med 130 kV mateledning, utfall av Sira omf.



Spenningsforhold kl. 19.30 med 55 kV mateledning, utfall av Sira omf.



Spenningsforhold kl. 19.30 med 2 nye omf. stasjoner, utfall av Sira omf.

Figurene ovenfor viser at alle tre variantene av forsterket strømforsyning vil greie å forsyne banestrekningen med utfall av en omformerstasjon, selv under perioder med sterk belastning på strømforsyningsnettet. De laveste spenningene vil da bli følgende:

130 kV mateledning	: 14,62 kV
55 kV mateledning	: 13,32 kV
2 nye omformerstasjoner	: 14,17 kV

Forholdene ble noe bedre omkring Sira omformerstasjon med en 130 kV mateledning enn med 2 nye omformerstasjoner. Grunnen er at hvis det blir brudd i 50 Hz kraftforsyningen inn til Sira omformer, vil det fortsatt mates $16 \frac{2}{3}$ Hz effekt ut på kontaktledningsanlegget ved Sira omformerstasjon via mateledning og transformator.

Ellers ser en her at spenningsforholdene er bedre med 130 kV enn med 55 kV spenningsnivå på mateledningen.

3.7 Tap i overføringsanlegg

Når det går strømmer i et kraftoverføringsanlegg som har en viss resistiv impedans (motstand), vil en få tap i overføringsanlegget. Disse tapene er proporsjonale med kvadratet av strømmen;

$P = \Delta R \times I^2$ der ΔR er overføringsanleggets resistans og I er strømmen som flyter gjennom anlegget.

For NSBs kontaktledningsanlegg vil også de samme lovene gjelde, og det betyr at ved økende belastninger på kontaktledningen vil også tapene øke. Tapene summert over tid er egentlig kraft som vi betaler for uten å kunne benytte oss av. Ved å øke antallet innmatingspunkter på kontaktledningsanlegget, dvs bygge nye omformerstasjoner mellom dagens stasjoner, vil strømstyrken bli lavere, og derav vil også tapene gå ned.

Ved å overføre kraft på et høyere spenningsnivå vil også tapene gå ned, fordi strømstyrken avtar omvendt proporsjonalt med spenningsnivået kraften blir overført på;

$I = S_t / U$ der S_t er total effektflyt i overføringsanlegget

Dette betyr at hvis en forsterker kontaktledningsanlegget med å bygge mateledning vil tapene bli lavere, og jo høyere spenningsnivå det er på mateledningen, jo lavere blir tapene.

Simuleringsprogrammet som er brukt her beregner også tapene i overføringsanleggene, og dette er listet opp i tabell 3.4 nedenfor. Der finnes tapsdata for de tre tidspunktene som ble undersøkt med forskjellig forsterkning i kapitlene 3.2, 3.3 og 3.5. Her kan tapene med og uten forsterkning av anleggene leses ut og sammenlignes.

tap i strømforsyningsanl. [MW], omformertap <u>ikke</u> inkludert				
Tidspunkt	Anlegg uten forsterkning	Anlegg med 130 kV matel.	Anlegg med 55 kV matel.	Anlegg med 2 nye omf.st.
18.45 Tap relativt til anlegg u/forst.	4,54 100 %	1,38 30 %	1,82 40 %	1,30 29 %
19.30 Tap relativt til anlegg u/forst.	3,22 100 %	0,25 8 %	0,27 8 %	0,01 0,4 %
21.00 Tap relativt til anlegg u/forst.	5,47 100 %	0,07 1 %	0,92 17 %	0,35 6 %

Her kommer det klart fram at tapene går drastisk ned med forsterket strømforsyningsanlegg, uansett hvilket av de tre alternativene som velges. Tapene er lavest med 2 nye omformerstasjoner, noe høyere med 130 kV mateledning og høyest med 55 kV mateledning. Kl. 21.00 kan en igjen se at resultatene ikke helt er som forventet, da tapene med 2 nye omformerstasjoner er høyere enn med 130 kV mateledning. Dette er trolig en konsekvens av den skjeve lastfordelingen som ble kommentert ved samme simulering i kap. 3.5.

Her bør det også bemerkes at tapene i omformerne ikke er medregnet.

Hvis en ser bare på tapene i mateledningen for å sammenligne de to spenningsnivåene, fås følgende resultater:

$$P_{130 \text{ kV}} = \Delta R \times |I|^2 = \Delta R \times (S_t / U_{130 \text{ kV}})^2$$

$$P_{55 \text{ kV}} = \Delta R \times |I|^2 = \Delta R \times (S_t / U_{55 \text{ kV}})^2$$

Forholdet mellom tapene med de to spenningsnivåene er :

$$P_{130 \text{ kV}} / P_{55 \text{ kV}} = (55)^2 / (130)^2 = 0,18$$

Her kommer det fram at tapene i selve mateledningen med 130 kV spenningsnivå utgjør kun 18 % av tapene med 55 kV spenningsnivå.

3.8 Kostnadsoverslag

For å kunne avgjøre hvilket alternativ som bør velges hvis strømforsyningsanleggene på strekningen Kristiansand - Satvanger skal velges, må en ha klart for seg kostnadene ved de forskjellige utbyggingsalternativene. Her er skissert et grovt overslag på kostnadene på å bygge 2 nye omformerstasjoner, og å bygge 130 kV mateledning med transformatorstasjoner. Tallene er grove tilnærmelser, men de viser omtrent hvor prisene ligger i forhold til hverandre:

Pris pr km for bygging av 130 kV enfaselinje	: 240000 kr
Pris pr transformatorstasjon, 130/16 kV	: 16 mill kr
Pris pr omformerstasjon, 2 x 14 MVA	: 70 mill kr

Prisene på 130 kV overføringslinje er mottatt av en norsk entreprenør som har bygd 130 kV mateledning i Sverige, og inkluderer ikke grunnerverv/ekspropriasjon.

Pris på transformatorstasjon inkluderer all nødvendig utrustning unntatt tomt.

Pris på omformerstasjon inkluderer:

- 2 stk 14 MVA omformere
- 50 kV apparatanlegg
- 16 kV apparatanlegg for 4 utgående linjer
- kontrollutrustning inkl. hjelpekraft, relévern og kontrollsystem
- bygg inkl. ventilasjon, lys og varme

Hvis en slik omformerstasjon må bygges i fjell, vil utgifter til det komme i tillegg. Det er foretatt utspill mot NVE om å klassifisere alle nye omformerstasjoner ett trinn lavere, slik at de kan stå utenfor fjell, med splintsikre betongvegger.

Totale kostnader for forsterkning av strømforsyningsanleggene på strekningen Kristiansand - Stavanger:

130 kV mateledning med transformatorstasjoner:

ca 220 km 130 kV mateledning + 5 transformatorstasjoner: ca 133 mill kr

ca 110 km 130 kV mateledning + 4 transformatorstasjoner: ca 90 mill kr

2 nye omformerstasjoner: ca 140 mill kr

4. DISKUSJON

På strekningen Kristiansand - Stavanger er dagens strømforsyning allerede i svakeste laget. Det har vært lagt restriksjoner på kjøring med EI 16, fordi dette lokomotivet forbruker så stor effekt at det fort oppstår problemer med høye strømmer og lave spenninger. Det største problemet med dagens strømforsyning er at det blir for store spenningsfall langs kontaktledningen. Langs denne strekningen på Sørlandsbanen er det 101 og 113 km mellom omformerstasjonene, og ved store belastninger fører dette til store spenningsfall. Omformerstasjonene er derimot godt nok dimensjonert m.h.t installert effekt så lenge begge aggregatene er driftsklare.

De simuleringene som er gjort her er foretatt med nytt trekraftmateriell på ekspressstogene, men i enkelte av godstogene er EI 11 fortsatt blitt brukt. (Med alle EI 11 utskiftet til EI 18 vil belastningen bli høyere. I følge Servicedivisjonen skal alle EI 11 være utrangert innen år 1998.)

Disse simuleringene viser at spenningen i høylastperioder går under grensen på 12 kV som er laveste tillatte spenning i ordinær drift. De pådragene det er simulert med er ikke spesielt store, da det kun har vært ett tog på strekningen med fullt pådrag når spenningen har gått under 12 kV. Dette er tegn som tyder på at dagens anlegg for kraftforsyning til togframføring ikke er sterkt nok for den trafikk som vil komme i årene framover.

Det en bør legge merke til, er at ved disse simuleringene er anleggene forutsatt å fungere på beste måte. Alle seriekondensatorbatterier er innkoblet, alle omformerstasjonene går i normal drift og kontaktledningen er samkjørt langs hele strekningen. Kontakttråden er beregnet å være slitasjefri. I tillegg til dette er det ingen ekstratog eller forsinkelser på strekningen som også kan gi økt togtetthet.

Ved en alvorlig feilsituasjon, som for eksempel når en omformerstasjon mister sin krafttilførsel fra 50 Hz nettet, vil det ikke være mulig å opprettholde normal togtrafikk med dagens anlegg. Til dette vil det på strekningen Kristiansand - Stavanger være for stor avstand mellom innmatingspunktene ved en slik feilsituasjon. Simuleringer i kap. 3.6 som er foretatt i en høylastperiode med utfall av krafttilførsel inn til Sira omformerstasjon, viser at det er mulig å opprettholde ordinær trafikk ved en slik alvorlig feilsituasjon med alle de tre variantene av forsterkning av forsyningsanleggene. Med dagens og framtidens krav til regularitet og punktlighet, er det viktig at slike feil ikke fører til fullstendig kollaps i strømforsyningsanleggene.

I framtiden er det også mulig at Godstrafikkdivisjonen ønsker å kunne sette opp større og tyngre godstog for å gjøre godstransporten mer lønnsom. Dette vil også kreve sterkere kraftforsyningsanlegg.

Et stort problem med slike undersøkelser som er gjort her, er å vurdere hva som er sannsynlige pådrag på lokomotivene og motorvognene. Det er kanskje noe overdrevet å dimensjonere strømforsyningsanleggene for fullt pådrag på alle tog til

enhver tid, men det må i alle fall være mulig for tog i aksellerasjonsfasen ut fra stasjoner og/eller krysninger, samt tog i stigninger å kunne dra ut maksimal effekt i perioder uten at spenningen skal bli for lav. Pådragene ble i denne undersøkelsen variert for å se hvordan forholdene på kontaktledningsanlegget endret seg. Da spenningen på kontaktledningen gikk under grensen på 12 kV, var ikke lastuttaket usannsynlig stort.

Et annet problem med slike undersøkelser er å vite hvilke ruteplaner som vil komme i framtiden. I dette tilfellet er det ikke gitt mange opplysninger om toggangen i framtiden. Det eneste som er gitt av opplysninger er prinsipper for ekspressstog-rutene i år 2008, og at ruteopplegget ikke vil forandre seg særlig fram til det året. Å bruke dette som et grunnlag kan virke noe søkt.

Det nye ruteopplegget for ekspressstogene i år 2008 vil gi flere ekspressstog-avganger pr døgn, men hver avgang vil være med flere timers mellomrom. Dette vil si at togtettheten på strekningen ikke vil bli særlig høyere enn den er i dag. Problemet er derimot at trekraftmateriellet blir skiftet ut, dette kommer klart fram i Servicedivisjonens materiellstrategi. Utskifting av de gamle og små lokomotivene med nye og betraktelig større lokomotiver vil derimot virke inn på spenningsforholdene på kontaktledningsanlegget.

Under simuleringene ble det simulert med en konstant spenning lik 16,5 kV på kontaktledningen. Dette er ikke helt riktig da omformerstasjonene i dag er justert slik at spenningen stiger fra 16,2 kV i tomgang til 16,5 kV ved merkelast. Dette betyr at simuleringene har gitt en litt for høy spenning på kontaktledningen ved omformerstasjonene. Hvis den riktige modellen med spenningsstigning fra 16,2 - 16,5 kV hadde vært brukt, ville spenningen på de svakeste punktene i nettet ha blitt noe lavere, men sannsynligvis ikke mer enn 0,2 kV lavere.

For hvert tidspunkt ble det gjort beregninger med de tre variantene av forsterkning. Jevnt over viste det seg at forholdene ble best med 2 nye omformerstasjoner, noe dårligere med 130 kV mateledning og dårligst med 55 kV mateledning. Grunnen til dette er at det er blitt simulert med et fast omsetningsforhold på transformatorene. På denne måten har spenningsfallet i mateledningen og tapene i transformatorene bidratt til at spenningen i innmatingspunktene i kontaktledningsanlegget er blitt lavere. Hvis en derimot utruker transformatorene i mateledningsnettet med automatisk trinnkobler, vil denne skjevheten forsvinne. Da vil transformatoren automatisk bli trinnet opp eller ned slik at spenningen på kontaktledningssiden vil ligge innenfor et angitt område såfremt det er mulig. Dette prinsippet brukes i dag på NSBs 55 kV mateledningsnett fra Hakavik kraftstasjon. Transformatorstasjonen på Neslandsvatn er utrustet med en elektronisk trinnkobler, og tilsvarende utstyr planlegges montert på transformatorene i Sande og Skollenborg. Hvis programmet kunne ha tatt hensyn til en slik regulering, ville trolig spenningsforholdene med 55 og 130 kV mateledning blitt omtrent sammenfallende med forholdene med 2 nye omformerstasjoner.

For simuleringene som er foretatt kl 21.00 ble resultatene ikke helt som forventet på simuleringen med 2 nye omformerstasjoner. Lasten fordelte seg svært ujevnt mellom Audnedal omformerstasjon og de to nærliggende stasjonene, Sira og

Krossen omformerstasjon. Audnedal omformerstasjon ble uforholdsmessig sterkt belastet i forhold til de to andre stasjonene. Dette viste seg ved at spenningen ble lavere i enkelte av punktene i nettet med 2 nye omformerstasjoner enn med mateledning som forsterkning av nettet. Dette er ikke helt logisk siden spenningen på kontaktledningen i innmatningspunktene er høyere med nye omformerstasjoner enn med mateledning og transformatorstasjoner. I tillegg ble også tapene ved dette tidspunktet høyere med 2 nye omformerstasjoner enn med 130 kV mateledning. Dette er heller ikke helt logisk siden en med mateledning også får inkludert tapene i selve mateledningsoverføringen. Antageligvis er det iterasjonsprosessen i programmet som velger "gal" løsning for tilfellet med 2 nye omformerstasjoner.

Enhver problemstilling av denne typer har flere matematisk riktige løsninger. Et simuleringsprogram itererer seg fram til den ene av disse løsningene, og denne behøver ikke nødvendigvis å være den mest sannsynlige. I dette tilfellet er det tydelig at løsningen ikke er helt logisk. Den ene omformerstasjonen, Audnedal, er flere ganger så sterkt belastet i forhold til de tilsluttende omformerstasjonene. Dette virker ikke riktig, og en må anta at en tilsvarende belastning i virkeligheten ikke vil gi en så skjev lastfordeling mellom aggregatene som simuleringen viser.

Kap 3.7 viser hvordan tapene i strømforsyningsanleggene minker når en får tettere innmatningspunkter og/eller en høgspennet mateledning. Dette vil over en viss tid utgjøre en del på kraftavregningen mot kraftleverandør. For å kunne si noe mer nøyaktig om hvor mye dette er i kroner, må det grundigere undersøkelser, eventuelt dynamiske simuleringer til. Men med det materiellet som finnes her ser en i alle fall at tapene reduseres drastisk med å få tettere innmatningspunkter på kontaktledningsanlegget.

Hvis det blir bestemt å forsterke anleggene med mateledning, er det viktig å tenke på tap i mateledningen når en skal vurdere om det bør bygges 130 kV eller 55 kV mateledning. Ved å velge 130 kV spenningsnivå vil tapene i selve mateledningen bli omtrent 1/6 av tapene med 55 kV spenningsnivå. Dette er også en fordel hvis det skal være automatisk trinnkobler på transformatorene for å regulere spenningen på 16 kV siden. Når tapene er lave, vil ikke spenningen ved transformatorene variere så mye med belastningen, og trinnkobleren vil få et mindre antall koblinger.

De tallene som er kommet fram i kostnadsoverslaget i kap 3.8 viser en svært lik pris på å bygge 2 nye omformerstasjoner og å bygge en 130 kV mateledning. Disse tallene er innhentet på kort tid, og grundigere undersøkelser bør gjøres. Hvis det bygges mateledning på bare halve strekningen (ensidig mateled transformatorstasjoner), blir omkostningene for mateledning betraktelig lavere.

5. KONKLUSJON

I denne rapporten er det lagt fram resultater på simuleringer av lastflyt i kontaktledningsanlegget på strekningen Kristiansand - Stavanger. Konklusjonen er at anleggene for banestrømforsyning på strekningen bør forsterkes, enten med å bygge 2 nye omformerstasjoner mellom dagens omformerstasjoner, eller å bygge en høgspenst mateledning med transformatorstasjoner. Det begrunnes med følgende:

- 1) Det vil i fremtiden vil bli problemer med spenningsfall i kontaktledningsanlegget, slik at spenningen blir for lav ved lokomotivene.
- 2) En forsterket strømforsyning vil føre til sterkt reduserte overføringstap.
- 3) Det finnes i dag ingen reserver i systemet, hvis en omformerstasjon faller ut vil det i perioder med tett trafikk ikke være mulig å opprettholde normal trafikk.
- 4) Med en forsterket strømforsyning vil vi ligge i forkant og stå rustet til å ta nye rutetabeller/tyngre godstog på kort tid, uten å kreve flere års utbyggingstid.
- 5) Det vil bli lettere å drive og vedlikeholde NSBs matestasjoner, da det med tettere innmatingspunkter er mulig å kunne koble ut en stasjon med trafikk på strekningen.

Hvilken av de tre alternative forsterkningsvariantene som bygges ut, bør velges ut fra økonomi hvis teknikkene er likeverdige. Foreløpig er det noe uklart om det er problemfritt å bygge en høgspenst mateledning med transformatorstasjoner, se rapport, referanse 2. Hvis undersøkelser viser at en høgspenst mateledning ikke vil føre til spesielle driftsproblemer, bør det minst kostbare alternativet velges, såfremt begge alternativene har en omtrent like lang utbyggingstid og levetid.

Hvis det blir bestemt å forsterke anleggene med en høgspenst mateledning, er det en fordel å bygge med høyest mulig mateledningsspenning. Høye systemspenninger gir lave tap og stor overføringskapasitet, noe som er en fordel ved eventuelle feilsituasjoner med utfall av omformerstasjoner. En 130 kV mateledningsspenning være å foretrekke framfor 55 kV spenningsnivå.

6. FORSLAG TIL VIDERE ARBEID

Hvis det blir bevilget penger til å foreta forsterkninger av banestrømforsyningen på strekningen Kristiansand - Stavanger er det to punkter som bør undersøkes før den endelige avgjørelsen blir tatt om hvilket av alternativene for forsterkning som skal bygges.

For det første bør det undersøkes mer grundig om vi på denne strekningen kan få driftsproblemer med en høgspennet mateledning med transformatorstasjoner, som er beskrevet i rapport, referanse 3. Dette bør absolutt undersøkes nærmere i forkant av avgjørelsen, så vi slipper å oppdage problemer når anlegget står ferdig, slik Banverket gjorde med sin 130 kV mateledning.

I tillegg bør kostnadene for de enkelte alternativene undersøkes nærmere, for å få et mer riktig grunnlag å foreta valget ut fra, hvis begge prinsippene viser seg å fungere for våre forhold. Det bør også undersøkes grundig hvor lang tid det vil ta å eventuelt bygge en mateledning hvis dette alternativet skulle være aktuelt, og hvor store kostnader NSB vil få i forbindelse med grunnverv og konsesjoner for bygging av ei slik linje.

Det bør også undersøkes hvis det er aktuelt, om NSB bør eie samt stå for drift og vedlikehold av en slik mateledning, eller om en et energiverk, eventuelt Statnett heller burde stå som eier av et slikt anlegg.

REFERANSELISTE

1. NJP 1994 - 97, Materiellstrategi
NSB Servicedivisjonen, 27. mai 1992
2. Behov for trekraft (toglok) 1997/2007
NSB Servicedivisjonen, Strategisk driftsmodell
Notat 5.5.92 LF/NH - JET
3. TU - rapport, Forsterkning av banestrømforsyningen med høgspent
mateledning, Brit Eggen
4. Jærbaneprojektet strømforsyningskapasitet
Carl Erik Hillesund

VEDLEGG

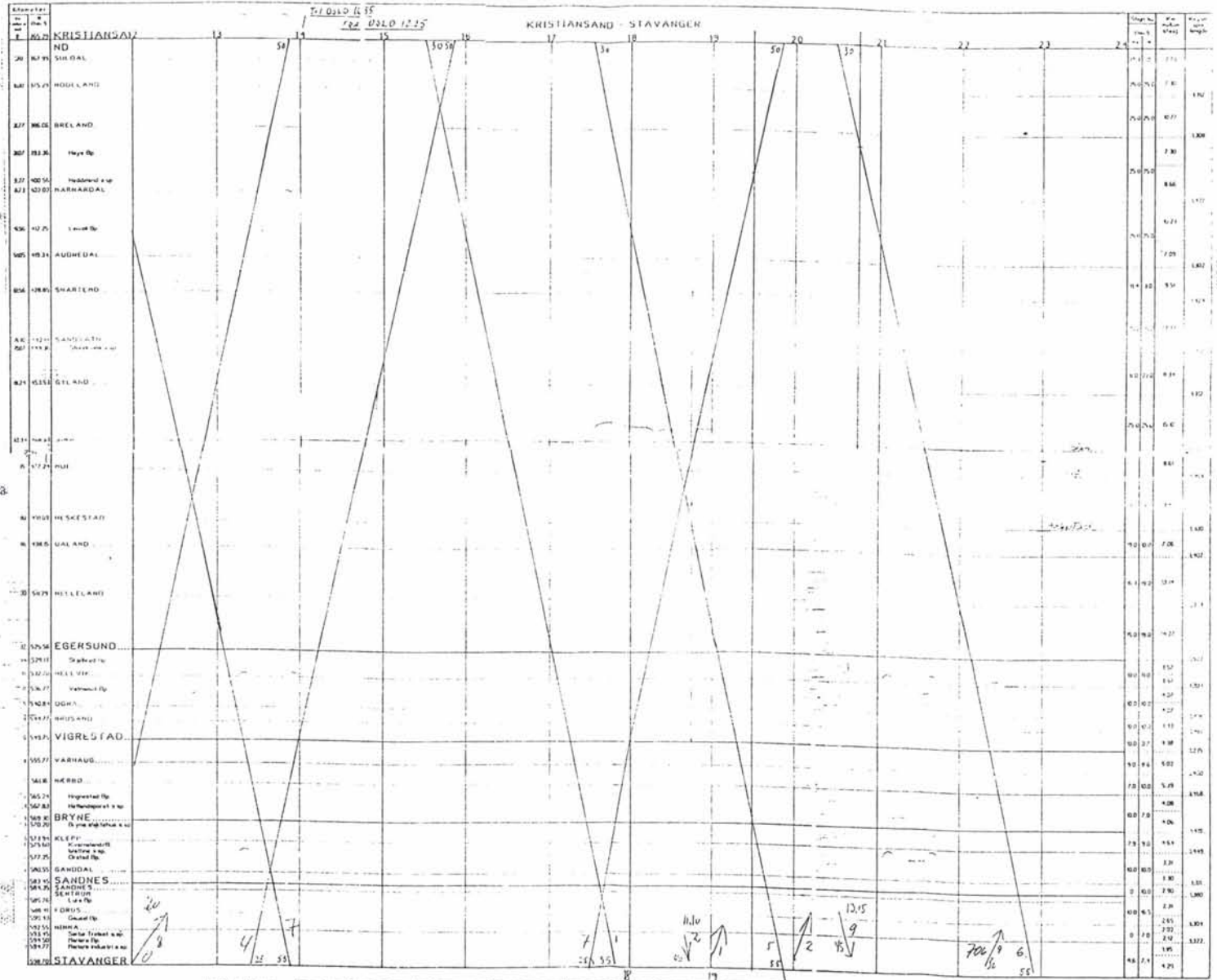
- Vedlegg 1 : Grafisk togrute for ekspresstog år 2008, Kristiansand - Stavanger
- Vedlegg 2 : Grafisk togrute for dagens trafikk, Kristiansand - Stavanger
- Vedlegg 3 : Spenningsforhold kl 19.30 med dagens kontaktledningsanlegg, lastsituasjon 1930kl3
- Vedlegg 4 : Spenningsforhold kl 19.30 med dagens kontaktledningsanlegg, lastsituasjon 1930kl4
- Vedlegg 5 : Spenningsforhold kl 19.30 med dagens kontaktledningsanlegg, lastsituasjon 1930kl5
- Vedlegg 6 : Spenningsforhold kl 19.30 med dagens kontaktledningsanlegg, lastsituasjon 1930kl6
- Vedlegg 7 : Spenningsforhold kl 21.00 med dagens kontaktledningsanlegg, lastsituasjon 2100kl2
- Vedlegg 8 : Spenningsforhold kl 21.00 med dagens kontaktledningsanlegg, lastsituasjon 2100kl3

VEDLEGG 1

2008

NORGES STATSBANER

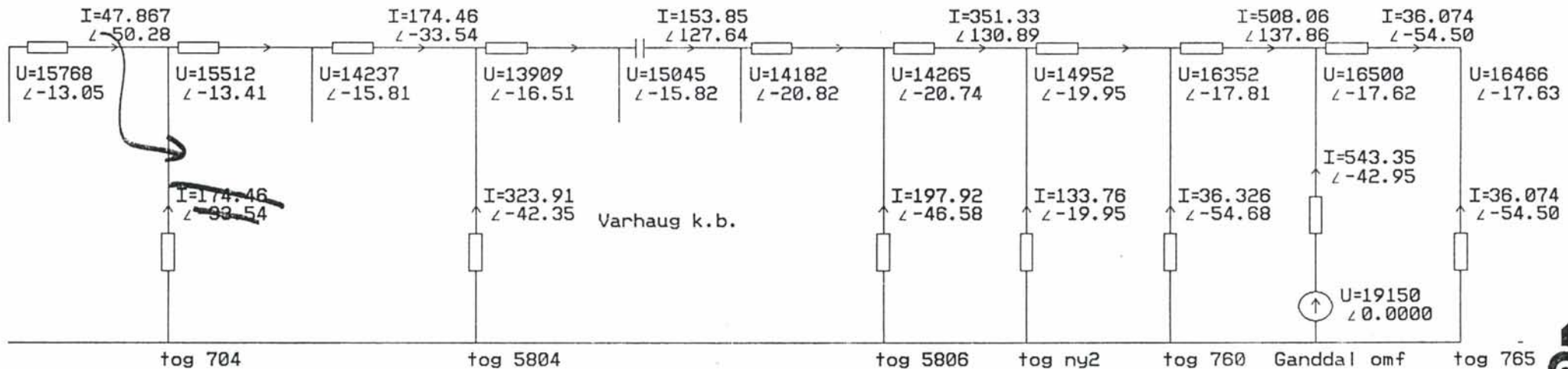
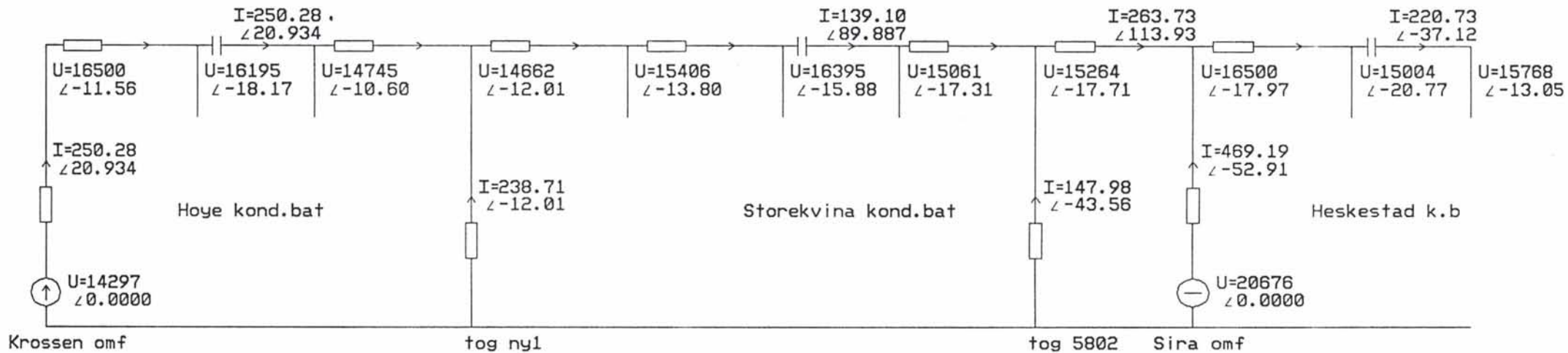
RUTEORDNING NR. 140 GJELDER FRA OG MED: 31. mai 1992 BLAD NR. 19



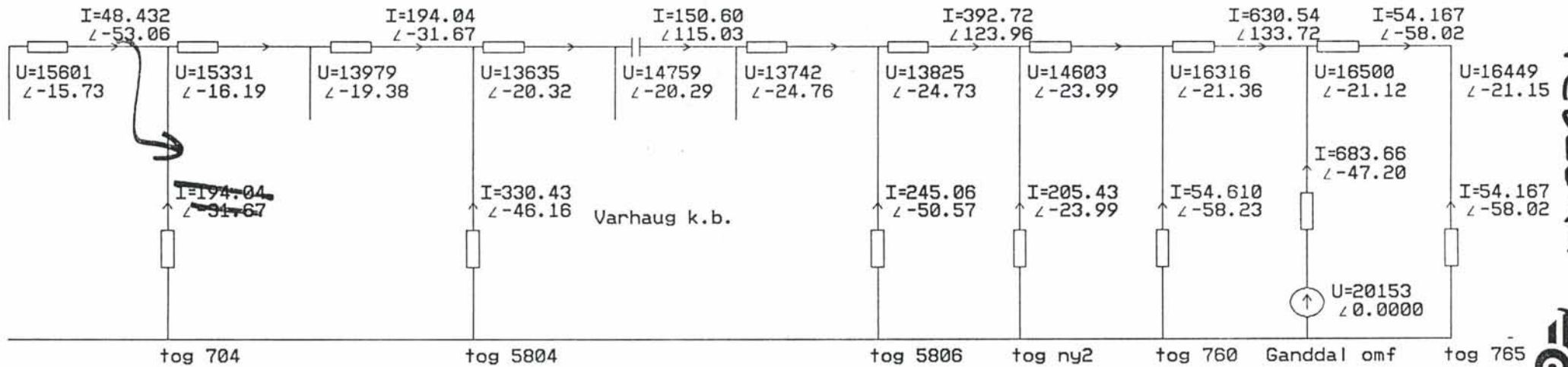
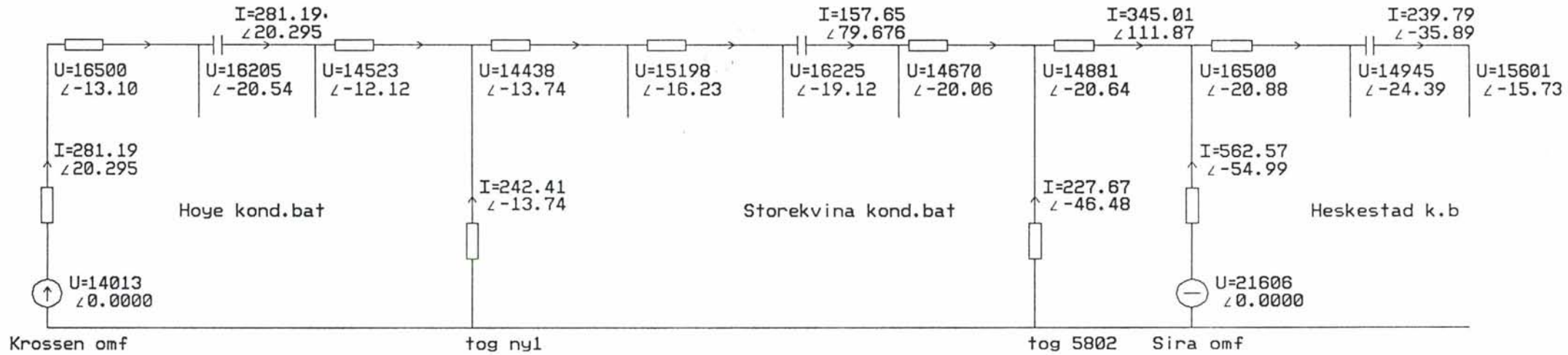
Legnforklaring:

Linjeforklaring	Fag som kjøres fast (fast linje)	Linjeforklaring	Fag som kjøres fast (fast linje)	Linjeforklaring	Fag som kjøres fast (fast linje)	Linjeforklaring	Fag som kjøres fast (fast linje)
Expresslinje	Alle dager	Linjeforklaring	Alle dager	Linjeforklaring	Alle dager	Linjeforklaring	Alle dager
Faglinje	Alle dager	Linjeforklaring	Alle dager	Linjeforklaring	Alle dager	Linjeforklaring	Alle dager
	Hver 2. dag	Linjeforklaring	Hver 2. dag	Linjeforklaring	Hver 2. dag	Linjeforklaring	Hver 2. dag
	Hver 3. dag	Linjeforklaring	Hver 3. dag	Linjeforklaring	Hver 3. dag	Linjeforklaring	Hver 3. dag
	Hver 4. dag	Linjeforklaring	Hver 4. dag	Linjeforklaring	Hver 4. dag	Linjeforklaring	Hver 4. dag
	Hver 5. dag	Linjeforklaring	Hver 5. dag	Linjeforklaring	Hver 5. dag	Linjeforklaring	Hver 5. dag
	Hver 6. dag	Linjeforklaring	Hver 6. dag	Linjeforklaring	Hver 6. dag	Linjeforklaring	Hver 6. dag
	Hver 7. dag	Linjeforklaring	Hver 7. dag	Linjeforklaring	Hver 7. dag	Linjeforklaring	Hver 7. dag
	Hver 8. dag	Linjeforklaring	Hver 8. dag	Linjeforklaring	Hver 8. dag	Linjeforklaring	Hver 8. dag
	Hver 9. dag	Linjeforklaring	Hver 9. dag	Linjeforklaring	Hver 9. dag	Linjeforklaring	Hver 9. dag
	Hver 10. dag	Linjeforklaring	Hver 10. dag	Linjeforklaring	Hver 10. dag	Linjeforklaring	Hver 10. dag

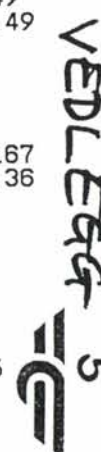
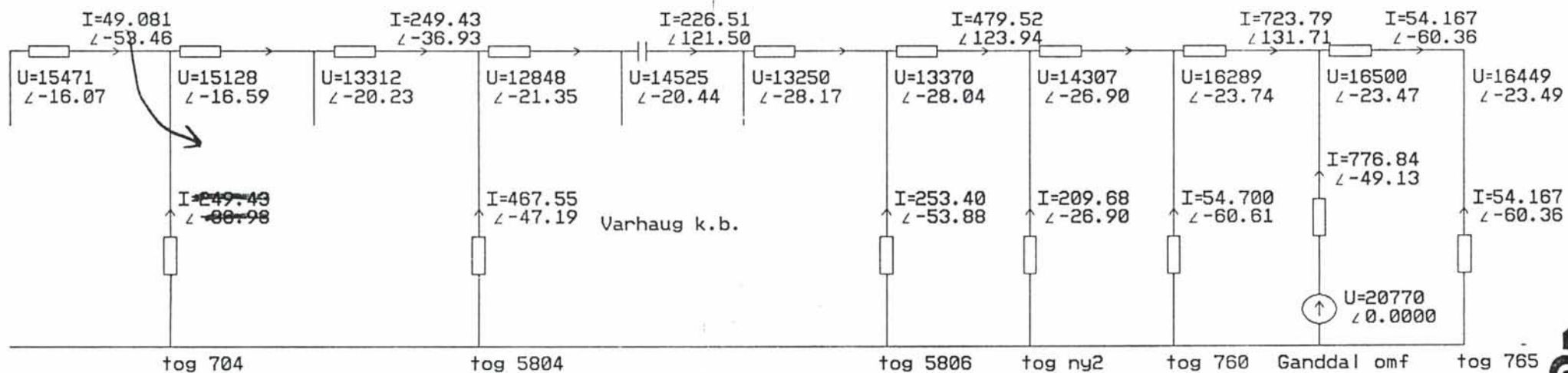
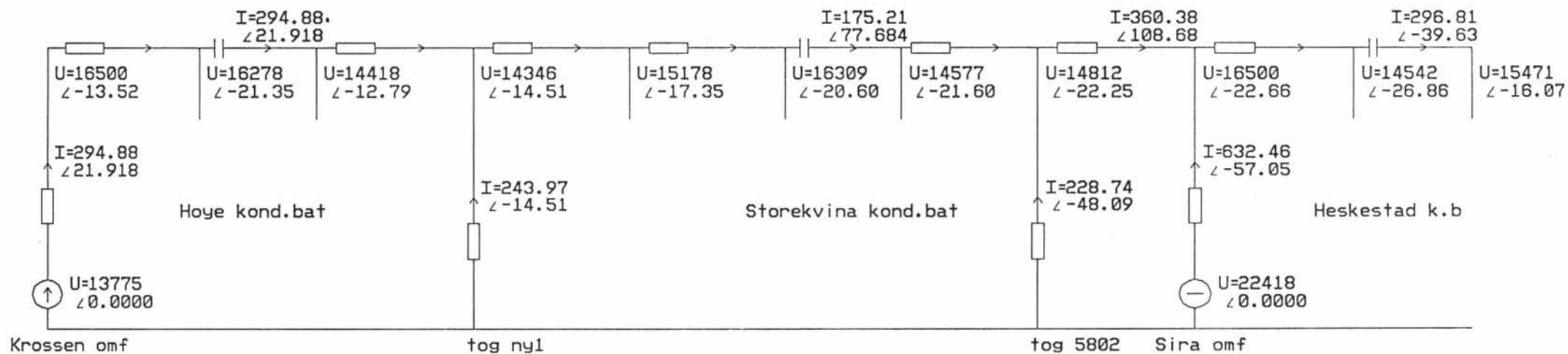
H = Ikke betjent O = Ikke betjent hverdager L = Ikke betjent lørdager S = Ikke betjent søndager / helligdager D = Ikke betjent søndager / helligdager O = Ikke betjent søndager / helligdager

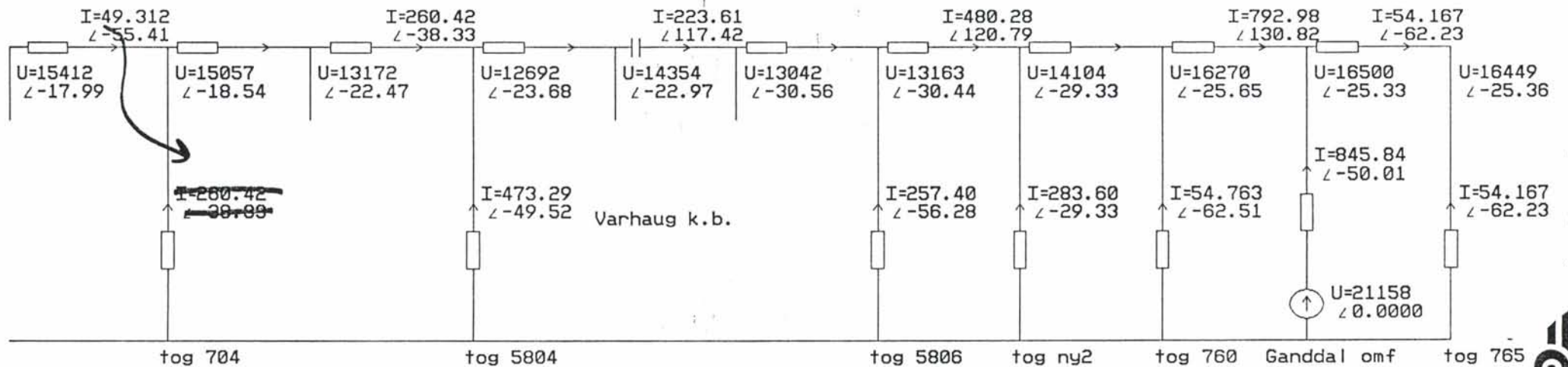
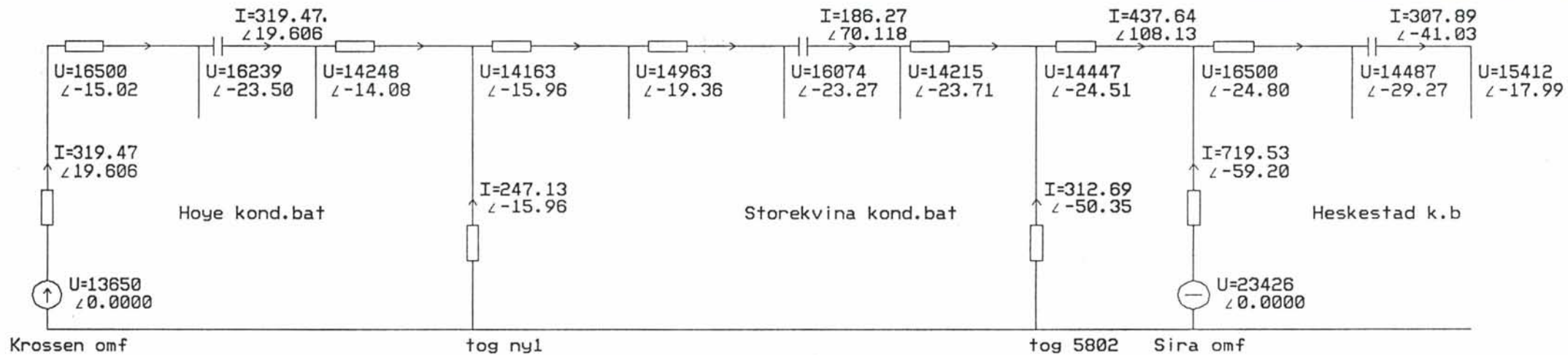


VEDLAG 3

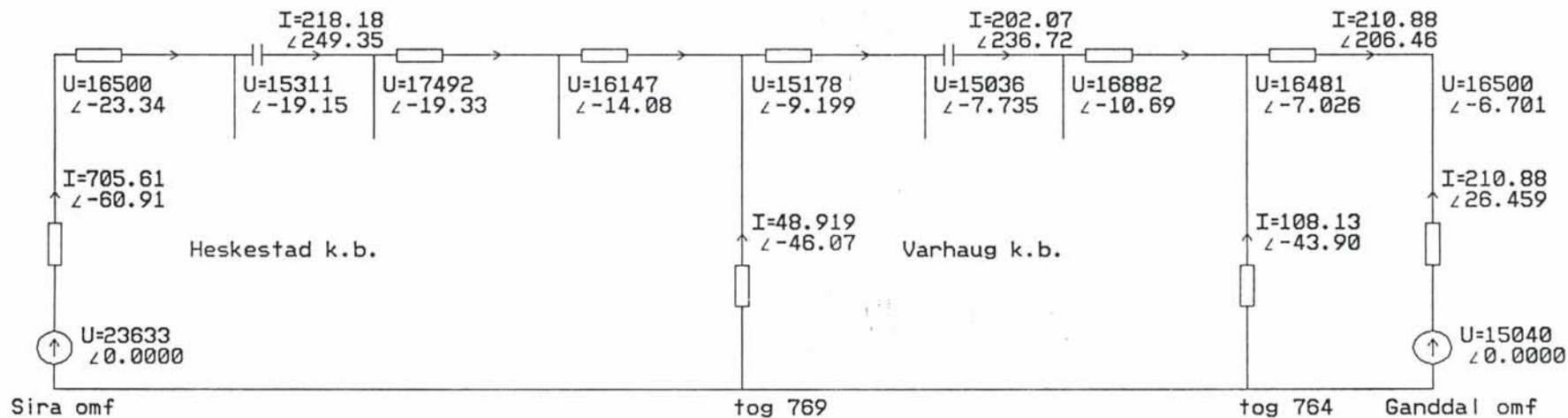
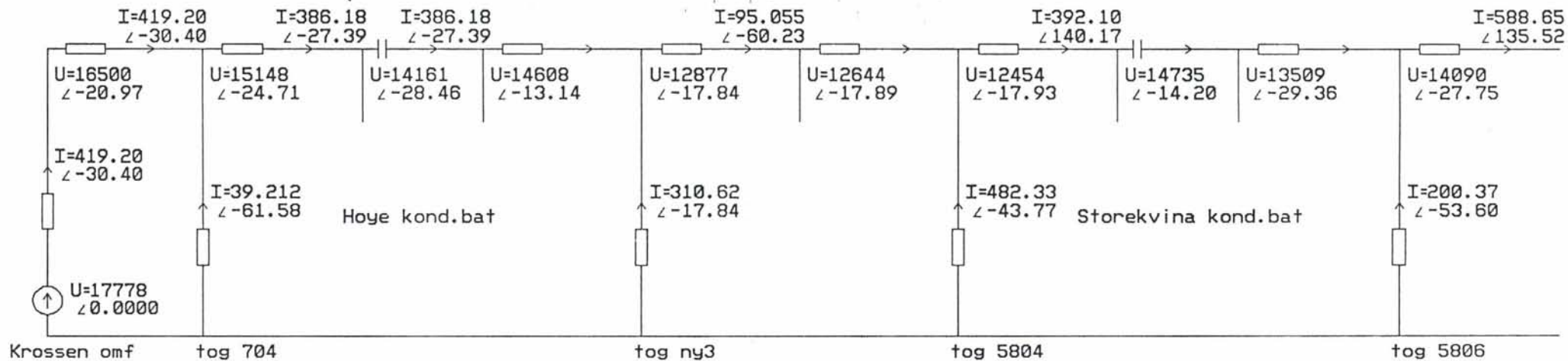


Vedlegg 4

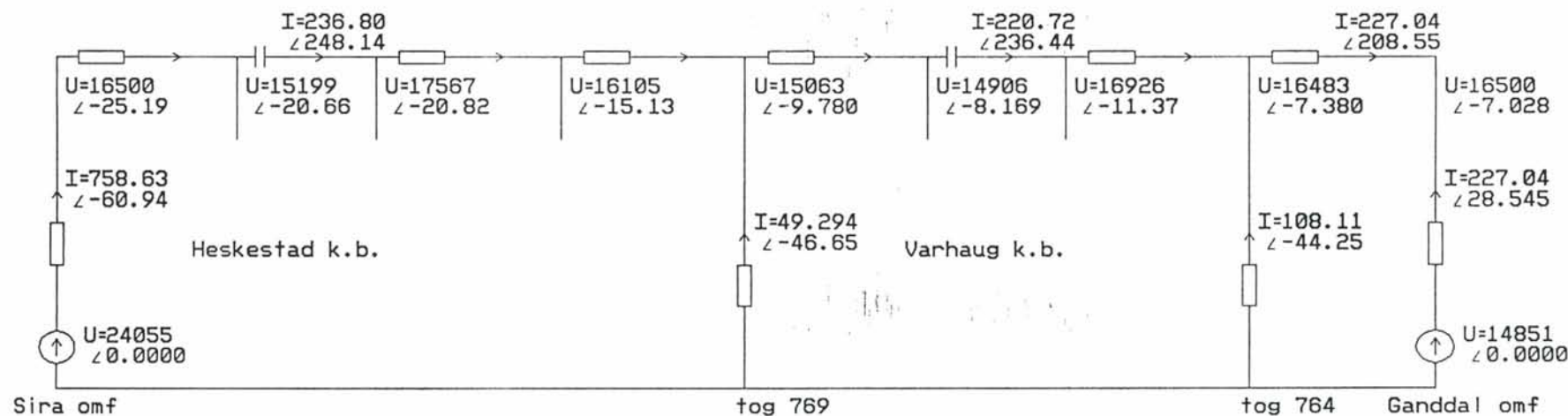
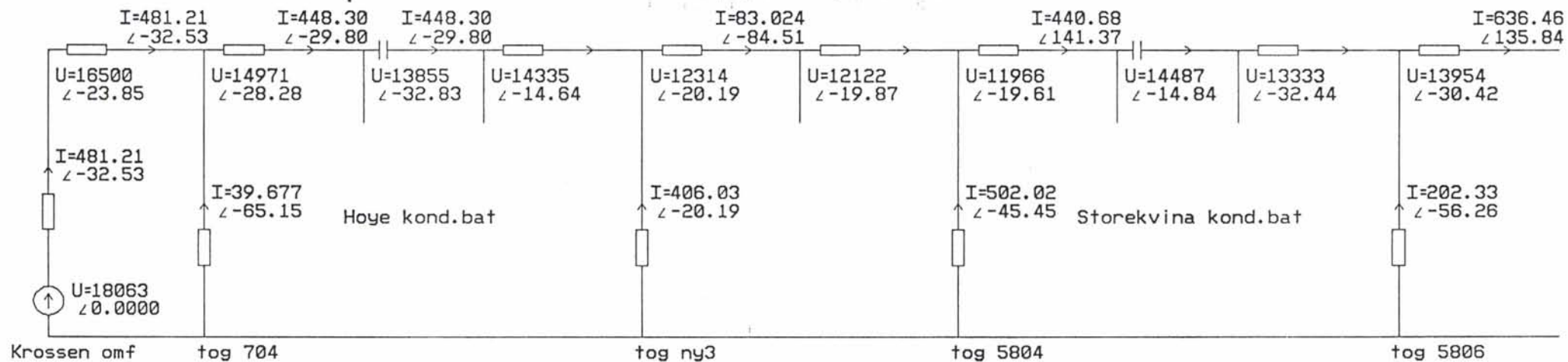




VEDLEGG 10



WEDLEGG 7



VEDLEGG 8

TU - Rapport

Forsterkning av banestrøm- forsyning med høgspennet mateledning

SAMMENDRAG

Rapporten er todelt, og beskriver i første del Banverkets erfaringer med sitt nybygde 130 kV enfase mateledningsnett. Denne delen beskriver matelednings-systemet og de driftserfaringer og -problemer som Banverket har hatt.

Rapportens andre del ser konkret på banestrømforsyningen på Sørlandsbanen mellom Kristiansand og Stavanger. Her er det foretatt undersøkelser v.hj.a. lastflytanalyseprogrammet ACCAN for å kartlegge om det på denne strekningen kan oppstå problemer med transitt av effekt i et eventuelt mateledningsnett. Undersøkelser er foretatt med 55 og 130 kV mateledningsspenning. Konklusjonen så langt er at den "uønskede" effektflyten er så lav, maksimal verdi på ca 0,8 MW, at det ikke vil oppstå problemer med at omformerstasjoner blir overbelastet. Det forutsettes da at det kan installeres energimålere som registrerer effektflyt i begge retninger. Det anbefales i tillegg å undersøke problemet med uønsket effektflyt samt å foreta en stabilitetsanalyse med annet dataverktøy før det tas en endelig avgjørelse om å bygge en høgspent mateledning som forsterkning av banestrømforsyningen på strekningen Kristiansand - Stavanger.

INNHALDSFORTEGNELSE

	side
1 Innledning	1
2 Banverkets erfaringer med 130 kV mateledningssystem	2
2.1 Generelt	2
2.2 Svensk 130 kVmateledningsnett	3
2.2.1 130 kV - linja	3
2.2.2 omformerstasjonene	4
2.2.3 Transformatorstasjonene	4
2.2.4 Transformatorene	4
2.3 Problemer med uønsket effektlyt i 130 kV nettet	5
2.4 Problemer med overharmoniske strømmer	6
2.5 Hvordan løse problemene som er oppstått	7
2.5.1 Overharmoniske strømmer	7
2.5.2 Uønsket effektlyt	7
3 Mateledning i norske anlegg	8
3.1 Innledning	8
3.2 Beskrivelse av NSBs nett	9
3.3 Modeller i simuleringsprogrammet	10
3.3.1 Matestasjonsmodell	11
3.3.2 Kontaktledningsanlegg	11
3.3.3 Seriekondensatorbatterier	11
3.3.4 Mateledning	12
3.3.5 Transformatorer	12
3.4 Innsamling av data	12
3.5 Resultater fra tomgangsundersøkelse	15
3.5.1 Modell med mateledn. KI og seriekond.batterier	15
3.5.2 Effektlyt i nettet med togtrafikk på linjene	18
3.5.3 Tomgangstilfeller med og uten seriekond.batt.	21
3.6 Problemer med overharmonisk elektrisk støy og resonnans	23
4 Diskusjon	24
5 Konklusjon	25
6 Forslag til videre arbeid	26

1. INNLEDNING

Da de elektriske anleggene for mating og overføring av kraft til elektrisk togdrift ble bygd, var de dimensjonert for helt andre belastningsforhold enn de vi har i dag. Rutene var ikke så tette, og trekraftmateriellet var av helt andre dimensjoner. Etter hvert har vi fått mye tettere togavganger, og lokomotiv og motorvogner har i dag mye større ytelse enn tidligere. I tillegg er effektfaktoren på mye av dagens materiell svært lav, ned mot 0,6 - 0,7.

Denne utviklingen har foregått sakte, og en stadig økende strøm i kontaktledningsanlegget har ført til økende problemer med spenningsfall langs linjene. På strekninger med lang avstand mellom matestasjonene har spenningen på ledningen etter hvert blitt for lav ved de store belastningstoppene.

I NSB ble det første skritt for å løse dette problemet startet i år 1976 da det første seriekondensatorbatteriet ble satt i drift. Etter hvert ble disse bygd flere steder, og i dag er 15 i normal drift. Seriekompensering med kondensatorbatteripar viste seg da å fungere bra ved å minske spenningsfallet langs kontaktledningen. Ved høy last med dårlig effektfaktor bedrer et kondensatorbatteripar spenninga mellom to matestasjoner med opp til 2 kV.

Etter hvert som vi vil få mer trekraftmateriell med asynkronteknikk som har en høy effektfaktor (nært opptil $\cos\phi=1.0$) vil ikke seriekondensatorbatteriene være nok til å holde spenninga høy nok mellom dagens matestasjoner.

For å løse problemene som er på veg inn, må det bygges flere matestasjoner for å forsyne kontaktledningsanleggene. Her er det to alternativer som peker seg ut.

Det ene alternativet er å bygge nye omformerstasjoner mellom dagens matestasjoner for å minke avstanden mellom matestasjonene. Avstandene vil da bli halvert og spenningsforholdene vil bli meget bra. Omformerstasjoner er kjent teknikk innen NSB, da de fleste av våre matestasjoner er rene omformerstasjoner.

Det andre alternativet er å bygge en høgspennet enfase mateledning for overføring av 16 2/3 Hz kraft, med transformatorstasjoner som mater effekt ut på kontaktledningsanlegget. En må da ha transformatorer i dagens omformerstasjoner for å få matet effekten ut på mateledningen. Mateledningen har da et høyere spenningsnivå enn kontaktledningsanlegget, og den vil da kunne overføre større effektmengder uten særlige tap. Jo høyere spenningsnivå en har på mateledningen, jo mindre tap og bedre overføringsevne vil den ha.

I Sverige har Banverket valgt denne løsningen på problemet med spenningsfall i kontaktledningsanlegget, og de har i de siste åra bygd ca 900 km sammenhengende 130 kV mateledning med tilhørende transformatorstasjoner. I september 1992 var representanter fra NSB på studietur til Banverket, hovedkontoret i Borlänge, og følgende kapittel summerer en del av de erfaringer som Banverket har med sitt nye strømforsyningsanlegg.

2. BANVERKETS ERFARINGER MED 130 kV MATELEDNINGSSYSTEM

2.1 Generelt

Den første utredningen om et slikt mateledningssystem ble foretatt i 1985 som et samarbeid mellom SJ, Vattenfall og ABB. Der ble det valgt å bygge 130 kV enfaset mateledningssystem. 130 kV er normert systemspenning på trefasesiden i Sverige, men der er spenningen 130 kV mellom fasene, og ikke til jord. Banverkets mateledningssystem har 130 kV systemspenning mellom fasene, men har jordet midtpunkt på 130 kV viklingen på transformatoren. Reelt sett er spenningen på 130 kV overføringen ± 65 kV, se figur 2.1 som viser prinsippet.

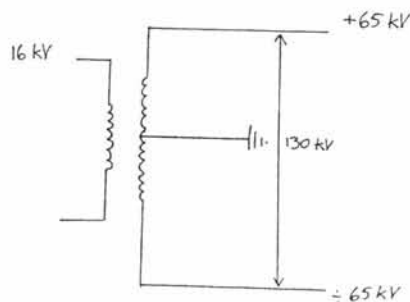


Fig. 2.1 Prinsippsskisse 16/130 kV transformator

Da mateledningssystemet ble utbygd, ble det ikke bygd noen nye omformerstasjoner for å mate kraft inn på 130 kV linja. Kraften blir matet inn fra de ordinære omformerstasjonene. Men flere av de eksisterende omformerstasjonene ble forsterket slik at de skulle ha nok effekt til også å mate inn på 130 kV-linja, og ikke bare på kontaktledningsavgangene. Stasjoner som ble forsterket er: Mellansel, Ånge og Ockelbo.

Fra hovedkontoret til Banverket i Borlänge kan det ikke gis noe klart svar på hvorfor akkurat dette spenningsnivået og jordet midtpunkt på trafoen ble valgt som systemløsning. Det finnes ikke underlag eller rapporter som forklarer valget. En løsning der den ene fasen er jordet, og den andre fasen har 130 kV spenning, bør kanskje ikke forkastes uten videre, selv om den da vil kreve et høyere isolasjonsnivå.

Banverket har ikke hatt særlig kontakt med Tyskland i forbindelse med disse utredningene. Grunnen er at det tyske systemet i prinsippet er annerledes, siden det ikke har den sterke bindingen til trefasenettet som det svenske 130 kV nettet har. I Tyskland er det egne kraftverk med enfasegeneratorer som genererer 16 2/3 Hz spenning. Her er det et 110 kV matenett som forsyner kraft til transformatorstasjoner som transformerer spenningen ned til 16 kV nivå. Det finnes også omformerstasjoner i Tyskland, men disse er det ikke mange av, så det tyske 110 kV nettet er elektrisk sett nesten helt skilt fra det ordinære trefase 50 Hz nettet.

2.2 Svensk 130 kV mateledningsnett

1. byggetrinn av 130 kV linja er ca 90 mil langt, og går fra Jörn i nord til Hallsberg i sør. På denne strekningen er det Vattenfall som har bygd og som eier linja. Selve linja går store deler av strekningen langs en gammel kraftgate, så traséen var klar langs store deler av strekningen. Banverket betaler leie for å kunne overføre på denne linjen. På deler av linjen er heller ikke stolper og ledning ny, her er linja en gammel trefaselinje der den tredje tråden er klipt ned.

Kostnader for linjen Jörn-Hallsberg: 380 mill SEK
 Kostnader for 20 trafostasjoner: 315 mill SEK

Det planlegges nå en ny 130 kV mateledningslinje i Sør-Sverige, og her er det Banverket selv som skal bygge og eie overføringslinja.

2.2.1 130kV - linja

Linja har 2 faseledere, føres på trestolper, og har ikke toppline (jordline) annet enn de siste 400 m før trafostasjonene. Det er valgt å ikke bygge dobbel line for å få en ekstra sikkerhet i systemet. Her er det entatt at en feil på 130 kV linja vil forekomme relativt sjelden, og i tillegg kan en ved bortseksjonering mate inn til trafostasjonene den andre veien, så en feil på 130kV linja vil ikke ha så store konsekvenser.

Data for linja:

Impedanser: $Z \approx 0,2 \Omega/\text{km}$ med en vinkel på ca 45° , dvs. $R \approx X \approx 0.14 \Omega/\text{km}$
 Dimensjoner: faseleder: $1 \times 329 \text{ mm}^2 \text{ FeAl}$

Alle effektbrytere på linja er SF₆ - brytere, og strøm- og spenningstransformatorer er av konvensjonell teknikk, men for 16 2/3 Hz. Alle 130 kV koblingsanlegg har hittil vært utendørs luftisolerte anlegg. Det planlegges nå et innendørs SF₆ - isolert koblingsanlegg i Gävle.

130 kV linja er beskyttet med distansevern og overstrømsvern, og i tillegg underspennings- og retningsfølede jordfeilrelé.

Innstilling på distansevernet:

sone1: 85 % av linja løser momentant
 sone2: 150 % av linja løser etter 1,2 sek.

En feil som registreres på en av de to ledningene løser bryterne i begge fasene.

Automatikk i gjeninnkobling:

På 130 kV effektbryterne er det koblet slik at 1. gjeninnkoblingsforsøk automatisk skjer etter 5 sek. Hvis en da får en ny feil etter 5 minutter går bryteren i blokkade, og den må debløkkeres.

2.2.2 Omformerstasjonene

Alle større omformerstasjoner har 2 transformatorer der begge har en merkeeffekt på 25 MVA. Denne/disse transformatorene har til hensikt å transformere opp spenningen fra KI-spenning til 130 kV slik at en del av omformerens produserte energi overføres til transformatorstasjonene og mates på kontaktledningen der. Størrelsen på 25 MVA er valgt å være fast, uavhengig av plassering og antatt togtrafikk. Dette er ment å skulle være stor nok ytelse til normal drift, slik at den ekstra transformatoren er plassert der for å få en større sikkerhet i systemet (redundans).

2.2.3 Transformatorstasjonene

I transformatorstasjonene er det bare en transformator med en ytelse på 16 MVA. I tillegg til koblingsanlegg i forbindelse med 130 kV linjene inn til transformatoren, er disse stasjonene også utstyrt med nødvendige 16 kV's koblingsanlegg for linjeavganger til kontaktledningen. På mange transformatorstasjoner er det ikke knutepunkt i nettet, så det er kun én linjeavgang i hver retning pluss ett reservefelt.

I transformatorstasjonene er det installert bare én prøvemotstand som skal være felles for alle utgående linjer pluss reservefelt. I de siste trafostasjonene som er bygd er det ikke X-skinne (reserveskinne).

2.2.4 Transformatorene

Transformatorene finnes i to størrelser, og begge typene er dimensjonert for bestemte og ganske harde krav blant annet når det gjelder kortslutninger. Krav til transformatorene ble satt opp i samarbeid mellom SJ, Vattenfall og ABB. For å kunne greie de harde kravene er transformatorene konstruert med folieviklinger. Transformatoren er beskyttet mot overspenninger med 400 m jordet toppline inn til alle trafostasjoner samt ventilavledere i transformatorens gjennomføringer på 130 kV-siden.

På 16 kV-siden finnes det ikke ventilavledere for å beskytte trafoen ved f.eks lynnedslag på kontaktledningen. I Sverige er ikke dette ansett for å være noe problem.

Transformatorene har kortslutningstap på 5%.

Transformatorene er plassert utendørs, inne i betongbunkere som er dimensjonert etter forsvarrets krav til bombe/splintsikkerhet.

Transformatorene er beskyttet med et differensialvern, som måler forskjell i strøm inn og ut av transformatoren (med omsetning), og løser ut ved for stor forskjell. I tillegg er det overstrømsvern, og diverse andre reléer for beskyttelse av transformatoren. (gassvakt, jordfeil, termisk relé og underspenningsrelé)

2.3 Problemer med uønsket effektflyt i 130 kV nettet

Det svenske 130 kV mateledningsnettet har høy reaktans og lav resistans. Selve ledningen har omtrent like stor resistiv som induktiv del, men når en i tillegg tar med transformatorene som omtrent bare har en induktiv impedanskomponent, får den totale impedansen en høy induktiv del i forhold til den resistive.

Spenningsforskjeller i et slikt induktivt nett gir en reaktiv effektflyt fra høy spenning til lavere spenning, mens forskjeller i fasevinklene på spenningene i to punkt gir en aktiv effektflyt på nettet.

ΔU - Reaktiv effektflyt

$\Delta \delta$ - Aktiv effektflyt

Med roterende omformere er spenningsvinkelen på 16 2/3 Hz siden av omformeren avhengig av vinkelen på 50 Hz siden. Denne vinkelen på 16 2/3 Hz siden er ikke styrbar, men endrer seg i takt med vinkelen på 50 Hz siden. Hvis en derimot har en statisk omformer, kan spenningsvinkelen på 16 2/3 Hz siden reguleres fritt i forhold til 50 Hz siden. I dag er de statiske omformerne i Sverige innstilt slik at de er mest mulig lik de roterende omformerne, men det er ingen stor sak å endre på dette.

Problemet som oppsto i Sverige da den nye 130 kV, (16 2/3 Hz) mateledningen etterhvert ble ferdigbygd og sammenkoblet, var at det begynte å flyte store effekter på linja som ikke skyldtes jernbanedrift. Den svenske 130 kV linja er ca 900 km lang, og går mer eller mindre parallelt med mye av de største kraftoverføringslinjene i Sverige som i hovedsak går fra kraftverk i nord til forbrukere lenger sør. Linja og transformatorene er dimensjonert slik at impedansene og tapene er så lave som mulig, og dette nettet har da en relativt god overføringsevne. I høylastperioder er det stor forskjell i 50 Hz spenningsvinklene i nord- og sørenden av 130 kV mateledningen, og dette fører til en overføring av aktiv effekt også på mateledningen.

Det som skjedde var at aktiv effekt gikk fra 50 Hz siden i nord, gjennom omformerne og ble transformert opp på 130 kV spenningsnivå. Mesteparten av denne effekten ble omformet gjennom noen få omformere, og resulterte i svært stor belastning på disse. Denne effekten ble overført delvis over lange avstander, og ble forbrukt langs kontaktledningen over et større område. I sør ble omformerstasjonene lavere belastet, fordi en uforholdsmessig stor del av kraftforbruket langs hele mateledningsstrekningen ble forsynt fra noen få omformerstasjoner lengst mot nord.

Banverket fikk da problemer med overlast i sine nordligste omformerstasjoner langs mateledningsstrekningen, og for å kunne opprettholde normal drift, ble 130 kV nettet seksjonert opp. Da ble den store effektflyten fra nord til sør forhindret å gå i 130 kV mateledningen, og problemet ble løst.

Slik nettet er koblet i dag fungerer det bra som forsterking av banestrømforsyningen, men det går ikke an å kjøre med samkjørt 130 kV mateledning. Det som er fordelene med å kunne kjøre med et samkjørt nett, er at en da har

muligheten til å drive nettet mer økonomisk. For det første kan det brukes til å overføre kraft fra ett område til et annet, hvis det er store forskjeller i kraftprisene. For det andre kan en drive omformerne mer optimalt med hensyn til virkningsgradskurver, slik at en får lavere tap. Dette er det prinsippet norske kraftprodusenter benytter seg av når de planlegger sin kraftproduksjon i flere kraftverk. I stedet for at alle kraftverkene går med en relativt lav belastning og dårlig virkningsgrad, kan heller flere av stasjonene stoppes mens resten går med større belastning og bedre virkningsgrad.

Banverket har i dag et dr.ing. prosjekt gående på KTH der en stipendiat arbeider med å utvikle et program som kan brukes til driftsoptimalisering av et samkjørt 130 kV nett. Dette programmet kan da brukes i en hoveddriftssentral for 130 kV nettet som skal overvåke og styre hele 130 kV nettet. Ved å mate inn data om forventet belastning i hele mateområdet kan en da drive dette nettet mest mulig optimalt mht tap, og det betyr i realiteten inntjente penger.

2.4 Problemer med overharmoniske strømmer

I Sverige finnes det svært mange RC-lokomotiv (tyristorlok, samme teknikk som vårt EI-16) som lager mye støy på kontaktledningsanlegget. Motoren i lokomotivet er likestrømsmotor og er utstyrt med tyristorlikerettere, som genererer elektrisk støy (overtoner) på kontaktledningsanlegget. Problemer med overharmoniske strømmer er ikke så veldig stort når en har roterende omformere, med når en har statiske omformere og tyristorlok, får en mer overharmoniske strømmer. De statiske omformerne er utstyrt med filter på enfasesiden som skal ta bort overtonene fra kontaktledningen, slik at de ikke skal forplante seg videre til trefasesiden gjennom omformeren. Disse filtrene er dimensjonert for strømmer i forhold til den grunnharmoniske strømmen som går i omformeren. Problemer som oppstod med 130 kV nettet var at overtoner fra trekraftmaterielet som tidligere gikk ut og ble dempet i kontaktledningen og de roterende omformerne, nå ble overført over 130 kV nettet og gikk ned i filteret på den statiske omformerstasjonen, siden de overharmoniske strømmene ser en svært lav impedans i filteret. Dette førte til at 3. og 5. harmoniske filter på 1-fasesiden i Mellansel omformerstasjon ble overbelastet. Filteret her tok unna overharmoniske både fra Mellansel's tidligere mateområde og overharmoniske strømmer generert langt unna på andre omformerstasjoners gamle "naturlige" mateområder. Da Mellansel omformerstasjon ble planlagt og filtrene der ble dimensjonert, tok en ikke en 130 kV mateledning med svært lav impedans med i beregningen.

ABB foretok en analyse av området rundt Mellansel omformerstasjon mht overtoner, der flere "overtonegeneratorer" (RC-lok) ble plassert rundt om i nettet. Det viste seg da at overtonene fra et stort område gikk gjennom 130 kV mateledningen og ned i filteret på Mellansel omformerstasjon.

Det som altså skjedde der var at grunntoneeffekten fordelte seg bra mellom de forskjellige omformer- og transformatorstasjonene, men at overtonene gikk til filteret i Mellansel omformerstasjon.

Flere filter er ikke nødvendigvis en god løsning på dette problemet, da en ikke vet hvordan disse filtrene virker inn på hverandre. Med et samkjørt 130 kV matenett vet en ikke helt hva som vil skje med de overharmoniske strømmene. Dette må også undersøkes grundig i Sverige, for å finne ut hva som eventuelt må gjøres. Banverket frykter at det eventuelt kan bety en større investering i nye og ombygde filter slik at de fungerer fornuftig i et sammenkoblet nett. Også når det gjelder problemet med overharmoniske strømmer er det en fordel å kjøre nettet slik det i dag går med seksjonert drift. Da kan en forhindre at flere filter virker inn på hverandre og lage problemer av den grunn.

2.5 Hvordan løse problemene som er oppstått?

2.5.1 Overharmoniske strømmer

Her er det i dag en systemanalyse i gang for å undersøke hvordan den nye 130 kV mateledningen overfører overtoner fra et stort område til ett eller noen få filter. Det blir da foretatt undersøkelser med sammenkoblet nett. I dag er ikke overtoner et særlig stort problem siden 130 kV nettet kjøres oppseksjonert. Etter hvert som en finner ut av problemene vil det bli undersøkt hva en eventuelt kan gjøre for å få kontroll over overtonene. Det er meget mulig at filtrene rundt om i nettet må endres eller byttes ut siden nettet i dag er annerledes enn da filtrene ble dimensjonert. Foreløpig er det mye arbeid igjen, og det vil antakeligvis ta litt tid før noen endelig løsning er klar.

2.5.2 Uønsket effektflyt

For å kunne løse dette problemet må Banverket kvitte seg med de roterende omformerene som mater inn på kontaktledningen der det er 130 kV mateledningsnett. Ved å ha bare statiske omformere er det mulig å endre spenningsvinkelen på 16 kV -siden, slik at det for eks er den samme vinkelen ved hver omformerstasjon langs hele strekningen. Dette gjør da at en ikke vil få uønsket effektflyt i 130 kV mateledningen, og omformerstasjonene i nord vil ikke bli overbelastet av uønsket effekt.

3. Mateledning i norske anlegg

3.1 Innledning

Erfaringene fra Sverige viser hvor viktig det er å foreta grundige undersøkelser før en planlegger å benytte en ny og mer uprøvd teknikk. Før en vedtar å bygge en tilsvarende mateledning for høyere spenningsnivå i Norge, bør en foreta en del undersøkelser i forkant. Det som i første runde bør undersøkes er om en vil få uønsket flyt av aktiv effekt på samme måte som i Sverige. I tillegg bør det også vurderes hva en høgspennet mateledning har å si for overtoner i nettet.

Resten av rapporten inneholder undersøkelser av forholdene ved en eventuell høgspennet mateledning langs Sørlandsbanen mellom Krossen omformerstasjon (Kristiansand) og Ganddal omformerstasjon (Sandnes).

Det er blitt foretatt undersøkelser med simuleringsprogrammet ACCAN ved to forskjellige spenningsnivå på mateledningen. Det ene nivået er på 55 kV som er det spenningsnivået mateledningen omkring Hakavik kraftstasjon drives med. Det andre spenningsnivået som er undersøkt er 130 kV nivå, som er det samme som det svenske systemet.

3.2 Beskrivelse av NSB's nett

I dag er NSB's nett på Sørlandsbanen mellom Kristiansand og Stavanger som vist på figur 3.1. Kontaktledningsanlegget bli forsynt med 16 2/3 Hz kraft gjennom 3 omformerstasjoner. Omformerstasjonene ligger tilknyttet det landsdekkende kraftforsyningsnettet på 66 eller 50kV spenningsnivå. Avstandene mellom disse omformerstasjonene er 101 og 113 km.

Mellom omformerstasjonene er det to seriekondensatorbatterier som begge ligger plassert ca 1/4 av full mateavstand fra hver omformerstasjon. Disse kondensatorbatteriene har til hensikt å heve kontaktledningsspenningen ved å kompensere for kontaktledningsanleggets reaktans, og også kompensere for enkelte typer trekraftmateriell's reaktive effektuttak.

Kontaktledningsanlegget kjøres i normal drift samkjørt, slik at alle omformerstasjonene er elektrisk samkjørt (sammenkoblet).

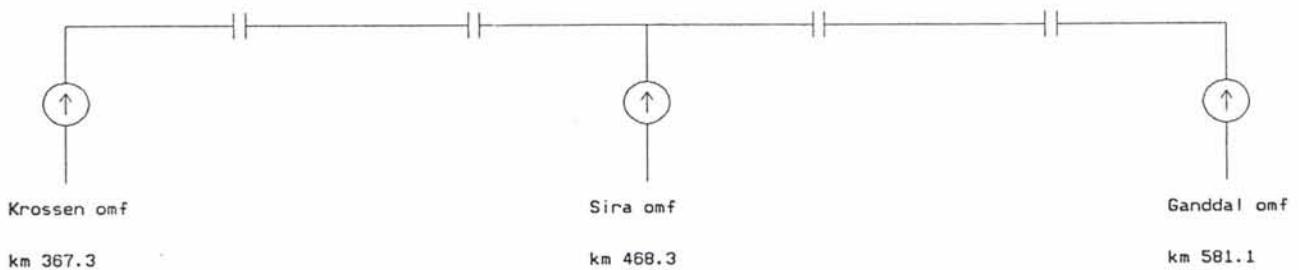


Fig. 3.1 Dagens nett

Hvis kraftforsyningsanleggene forsterkes med å bygge en høgspennet mateledning, vil nettet se ut som på figur 3.2.

Her er kontaktledningsanlegget matet fra samme omformere som tidligere, og kompensert med samme seriekondensatorbatterier som tidligere. I tillegg er det i prinsippet plassert en transformator i hver omformerstasjon for å transformere spenningen opp til mateledningens spenningsnivå. Mateledningen overfører kraften med lave tap til transformatorstasjonene som er plassert omtrent midt mellom omformerstasjonene. Dette gir et nytt innmatingspunkt på det stedet som i dag er det svakeste elektrisk sett, og gir tilnærmet samme virkning som en ny omformerstasjon på samme sted ville ha gitt. Spenningen heves opp til et akseptabelt nivå, og kraft til togframføring blir matet ut på kontaktledningen delvis fra omformerstasjonene, og delvis fra transformatorstasjonene.

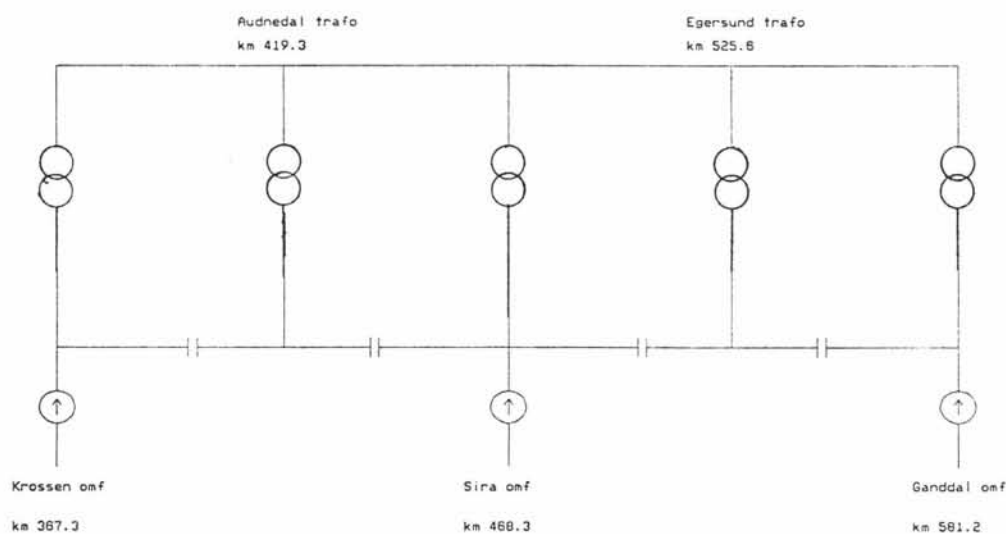


Fig. 3.2 Nett med mateledning og transformatorstasjoner

I de simuleringene som er foretatt er transformatorstasjonene plassert som vist på figur 3.2, så godt som identisk midt mellom de to nærliggende omformerstasjonene.

3.3 Modeller i simuleringsprogrammet

De oppgitte data for omformerstasjonene ble benyttet i lastflytanalyseprogrammet ACCAN, der en kan modellere kontaktledningsanlegget, seriekondensatorbatterier, transformatorer, mateledninger og matestasjoner.

Alle disse komponentene bortsett fra matestasjonsmodellen kan modelleres som impedanser. I alle beregningseksemplene er alle impedanser og spenningskilder referert 16 kV spenningsnivå.

3.3.1 Matestasjonsmodell

Matestasjonsmodellen i ACCAN er som vist på figur 3.3.



Figur 3.3 matestasjonsmodell i ACCAN

Spesifisert spenning U i knutepunkt X er spenningen på 16 kV samleskinne i omformerstasjonene. Spenningen er gitt lik $U=U_0+\text{coeff.}\cdot I$ der I er strømmens absoluttverdi.

Oppgitte verdier er minste spenning U_0 , maksimal spenning U_{lim} og coeff. som er valgt slik at spenningen U stiger fra 16200 - 16500 V fra tomgang til merkelast.

I tillegg til spenningsstigning som funksjon av lastuttak, inneholder modellen også omformeraggregatenes karakteristikk for fasevinkelendring som funksjon av utmatet strøm og effektfaktor. Her kan en oppgi fasevinkelen til den induserte spenningen i omformeraggregatet som referanse. Det er denne referansevinkelen som forplanter seg fra trefasenettet gjennom omformerer og inn på enfasenettet.

Alle matestasjonene på strekningen består av 2 aggregater. Simuleringsprogrammet betrakter matestasjonen som om den består av ett aggregat, og beregner strømmer ut fra matestasjonene. Størrelsen på strømmene viser om grenseverdien for ett eller to aggregater er nådd.

3.3.2 Kontaktledningsanlegg

Kontaktledningsanlegget bli modellert som en konsentrert impedans:

$$R=0,21\Omega/\text{km}$$

$$X=0,21\Omega/\text{km}$$

$$Z=0,30\Omega/\text{km}$$

Disse verdiene blir brukt over hele strekningen bortsett fra strekningen Varhaug kondensatorbatteri - Ganddal omformerstasjon, der kontaktledningsanlegget har forsterkningsledning, og verdiene for den konsentrerte impedansen blir:

$$R=0,18\Omega/\text{km}$$

$$X=0,18\Omega/\text{km}$$

$$Z=0,25\Omega/\text{km}$$

3.3.3 Seriekondensatorbatterier

Seriekondensatorbatteriene er alle representert som en konsentrert reaktans $X=-10\Omega$. Dette er beregnet ut fra en kapasitansverdi på 955 μF .

3.3.4 Mateledning

Som mateledning ble valgt FeAl nr 120, både for 130 kV og 55 kV spenningsnivå. Dette ledningstverrsnittet har for énfase overføringslinjer følgende impedanser:

$$R = 0,151 \Omega/\text{km}$$

$$X = 0,27 \Omega/\text{km}$$

For andre spenningsnivåer tilsvarer dette:

130 kV:

$$R = 0,0023 \Omega/\text{km}$$

$$X = 0,0041 \Omega/\text{km}$$

55 kV:

$$R = 0,0128 \Omega/\text{km}$$

$$X = 0,0228 \Omega/\text{km}$$

3.3.5 Transformatorer

Som transformatorer er valgt 16 MVA transformatorer for 130 kV spenningsnivå med samme data som transformatorene i det svenske mateledningssystemet. For 55 kV spenningsnivå er valgt 8 MVA transformatorer med samme data som de nyeste 55/16 kV transformatorene som i dag finnes i nettet rundt Hakavik kraftverk. Følgende data er referert 16 kV spenningsnivå:

130/16 kV transformator:

$$R_k = 0,16 \Omega$$

$$X_k = 0,80 \Omega$$

55/16 kV transformatorer:

$$R_k = 0,48 \Omega$$

$$X_k = 2,16 \Omega$$

3.4 Innsamling av data

For å kunne foreta undersøkelser omkring uønsket effektlyt i en eventuell mateledning på Sørlandsbanen mellom Kristiansand og Stavanger, var det nødvendig å skaffe data om nettene som forsyner våre omformerstasjoner. Først ble det innhentet data fra Statnett, som kunne oppgi fasevinkler på spenningene på 300 kV spenningsnivå i en del sentralnettspunkt. Deretter ble lokale netteiere kontaktet for å få data om omformerstasjonene, referert sentralnettspunkt som ble oppgitt av Statnett.

Fra Statnett ble det oppgitt data for 3 forskjellige lasttilfeller; tunglast vinter, og to forskjellige sommerlasttilfeller. Data fra Statnett og de forskjellige netteierne er som vist nedenfor.

Data om 300 kV overføringslinjer langs Sørlandsbanen

	Vinter	° rel	Sommer1	° rel	Sommer2	° rel
Stokkeland	37,6	0,0	14,7	0,0	-47,7	0,0
Tonstad	47,6	10,0	17,0	2,3	-44,3	3,4
Feda	42,2	4,6	13,7	-1,0	-47,4	0,3
Kristiansand	34,5	-3,1	7,4	-7,3	-53,4	-5,7
Arendal	42,2	4,6	14,5	-0,2	-46,4	1,3
Porsgrunn	42,9	5,3	17,6	2,9	-42,8	4,9
Rød	44,2	6,6	20,3	5,6	-39,7	8,0
Tveiten (Vestfold)	42,3	4,7	22,2	7,5	-38,6	9,1
Flesaker (Drammen)	45,8	8,2	24,9	10,2	-36,5	11,2
Sylling (Tyrifjorden)	44,8	7,2	26,6	11,9	-35,6	12,1

Tabell 3.1 Fasevinkler på 300 kV spenningsnivå i sentralnettpunkt langs Sørlandsbanen

Vinter:

Tunglasttilfelle med eksport til Danmark gjennom sjøkabler, ca 1000 MW
 Produksjon Tonstad: ca 1000 MW, Produksjon Sira-Kvina totalt: ca 2000 MW

Sommer1:

Lavlasttilfelle med eksport til Danmark ca 1000 MW (fra Kristiansand) og til Sverige gjennom Østfold

Sommer2:

Lavlasttilfelle med import fra Sverige gjennom Østfold og eksport til Danmark fra Kristiansand

Sommerlast fra Sira-Kvina er opp mot ca 15 % av max ytelse, ca 200 MW

NB!!!

Eksport til Danmark på 1000 MW er ikke tilfelle før 1995.
 Foreløpig overføringsevne er på 500 MW

Omformerstasjoner, 3-fase siden			
	Vinter	Sommer1	Sommer2
Ganddal	a	-3,9	-1,0
	b	-7,1	0,8
Sira	1,6	2,7	4,0
Krossen	-13,0	-7,5	-5,9

Tabell 3.2 Fasevinkler på innkommende spenninger, 3-fasesiden

Omformerstasjoner, 1-fase siden			
	Vinter	Sommer1	Sommer2
Ganddal	a	-1,30	-0,33
	b	-2,37	0,27
Sira	0,53	0,90	1,33
Krossen	-4,33	-2,50	-1,97

Tabell 3.3 Fasevinkler på spenninger i omformerstasjonene, 1-fasesiden

Tabell 3.2 viser sammensatt resultat med fasevinkler på de enkelte omformerstasjonene referert 300 kV samleskinne i Stokkeland ved Sandnes. Ved Ganddal omformerstasjon er det fra Lyse Kraft oppgitt 2 driftssituasjoner som det veksles mellom, tilfelle a og tilfelle b. Disse to driftssituasjonene gir ulik fasevinkel ved Ganddal i forhold til referansen, Stokkeland.

Tabell 3.3 viser fasevinklene på enfasesiden i omformerstasjonene. Disse er lik fasevinklene på trefasesiden dividert med 3. Dette forholdstallet kommer av forholdet mellom polpartall på motor og generator i de roterende omformerne.

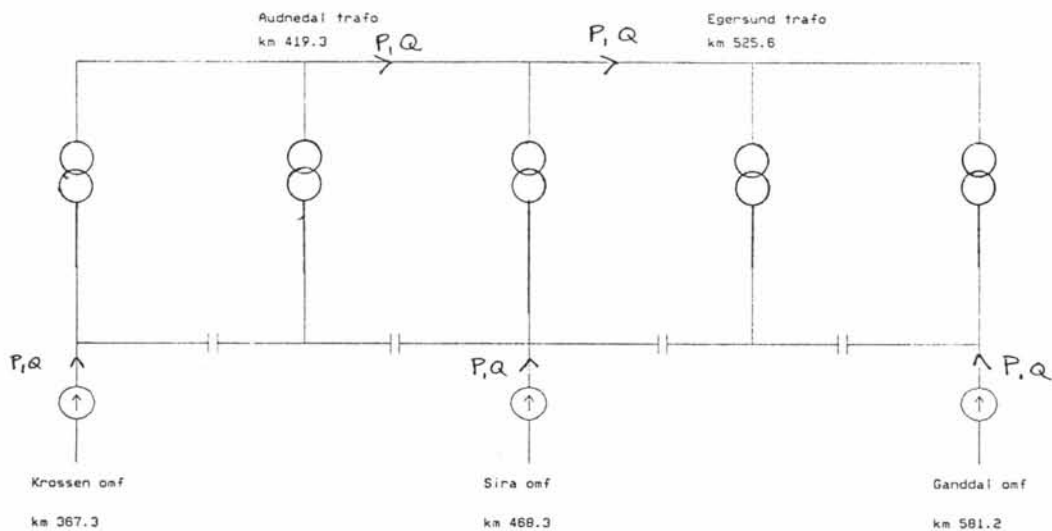
3.5 Resultater fra tomgangsundersøkelse

3.5.1 Modell med mateledning, KI - anlegg og seriekondensatorbatterier

Ved å modellere matestasjonene, kontaktledningsanlegg med kondensatorbatterier samt mateledning med transformatorstasjoner, var det mulig å undersøke om det vil oppstå problemer med større uønsket effektflyt i mateledningsnettet.

De forskjellige lastsituasjonene med forskjellige spenningsvinkler ble matet inn i modellen, og det var da mulig å se hvordan lastflyten ville bli.

Figur 3.4 nedenfor viser hvor i nettet de største effektene vil flyte, og piler viser hvilken retning effektene angitt i tabell 3.4, 3.5 og 3.6 er referert.



Figur 3.4 Angivelse av punkter med maksimal effektflyt og retningsreferanse

		Effektflyt, angitt i kVA			
		130 kV mateledning		55 kV mateledning	
	effekt [kVA]	vinter, a	vinter, b	vinter, a	vinter, b
Krossen omformer	aktiv	-831	-691	-698	-598
	reaktiv	484	356	541	447
Sira omformer	aktiv	658	772	610	715
	reaktiv	-182	-144	-361	-397
Ganddal omformer	aktiv	163	-90	86	-121
	reaktiv	-216	-137	-95	32
ml Audnedal-Sira	aktiv	-818	-674	-679	-570
	reaktiv	363	250	285	207
ml Sira-Egersund	aktiv	-177	70	-120	78
	reaktiv	250	178	155	65

Tabell 3.4 Effektflyt i nettet ved de 2 vinterlasttilfellene

		Effektflyt, angitt i kVA			
		130 kV mateledning		55 kV mateledning	
	effekt [kVA]	sommer1a	sommer1b	sommer1a	sommer1b
Krossen omformer	aktiv	-583	-659	-491	-546
	reaktiv	330	392	370	418
Sira omformer	aktiv	455	391	422	363
	reaktiv	-134	-158	-258	-239
Ganddal omformer	aktiv	123	263	67	183
	reaktiv	-156	-184	-71	-132
ml Audnedal-Sira	aktiv	-576	-655	-477	-538
	reaktiv	256	312	202	242
ml Sira-Egersund	aktiv	-132	-268	-90	-200
	reaktiv	176	205	111	154

Tabell 3.5 Effektflyt i nettet ved sommerlast, tilfelle 1a og 1b

		Effektflyt, angitt i kVA			
		130 kV mateledning		55 kV mateledning	
	effekt [kVA]	sommer2a	sommer2b	sommer2a	sommer2b
Krossen omformer	aktiv	-506	-582	-433	-488
	reaktiv	269	333	321	369
Sira omformer	aktiv	492	427	457	397
	reaktiv	-113	-136	-266	-246
Ganddal omformer	aktiv	9	150	-25	91
	reaktiv	-120	-157	-17	-82
ml Audnedal-Sira	aktiv	-497	-576	-416	-476
	reaktiv	202	261	163	204
ml Sira-Egersund	aktiv	-22	-159	-2	-112
	reaktiv	144	178	72	117

Tabell 3.6 Effektflyt i nettet ved sommerlast, tilfelle 2a og 2b

Kommentarer til tabell 3.4 - 3.6

Av tabellene ser en at den største uønskede effektflyten med 130 kV mateledning oppstår ved vinterlast, tilfelle b, som er rammet inn i tykk ramme. Dette er logisk siden det er i høylasttilfeller en vil få de største faseforskyvningene i 3-fasenettet. Den største effektflyten vil være i Krossen omformerstasjon der det for dette tilfellet vil gå en aktiv effekt på ca 830 kW, eller 0,83 MW fra jernbanens ledningsanlegg til 3-fasenettet utenfor. Dette er ca 7% av stasjonens installerte effekt.

Ved en mateledning på 55 kV spenningsnivå vil den uønskede effektflyten reduseres med 15 - 20 % gjennom Krossen omformerstasjon. Denne effektflyten tilsvarer ca 6% av stasjonens installerte effekt.

3.5.2 Effektflyt i nettet med togtrafikk på linjene

Det en bør være klar over er at det verste tilfellet av "uønsket" effektflyt er når linja er i tomgang. Når det er tog på linja med et visst effektuttak vil mye av denne effekten flyte fram til togene, og ikke forsvinne ut gjennom Krossen omformerstasjon og ut på 3-fasenettet igjen. Når det er stor belastning på linja vil det ikke flyte effekt tilbake til 3-fasenettet i det hele tatt. Da vil all effekten bli tatt opp i trekraftmateriellet ute på linja.

I tilfeller med lav belastning vil noe effekt likevel flyte tilbake til 3-fasenettet, men i mye mindre grad enn i tomgangeksemplet.

Eksempler på dette er vist i tabell 3.7 som viser effektflyt fra omformerstasjonene og ut på kontaktledning / mateledningen ved tilfeller med lav og høy belastning på linja. Her er det simulert med data fra 3-fasesiden under vinterlast, tilfelle B, som gir de største effektflyten. De samme to eksemplene er vist i kretsskjema i figur 3.5 og 3.6, der med 130 kV mateledning.

		Effektflyt, angitt i kVA Vinterlast, tilfelle B			
		130 kV mateledning		55 kV mateledning	
	effekt [kVA]	lavlast	høylast	lavlast	høylast
Krossen omformer	aktiv	-149	5119	-86	4923
	reaktiv	370	4033	460	4421
Sira omformer	aktiv	1315	5294	1257	6613
	reaktiv	-15	6470	-164	7814
Ganddal omformer	aktiv	639	6455	643	6170
	reaktiv	80	3481	142	3384

Tabell 3.7 effektflyt ved lavlast og høylast med faseforskyvninger i spenning

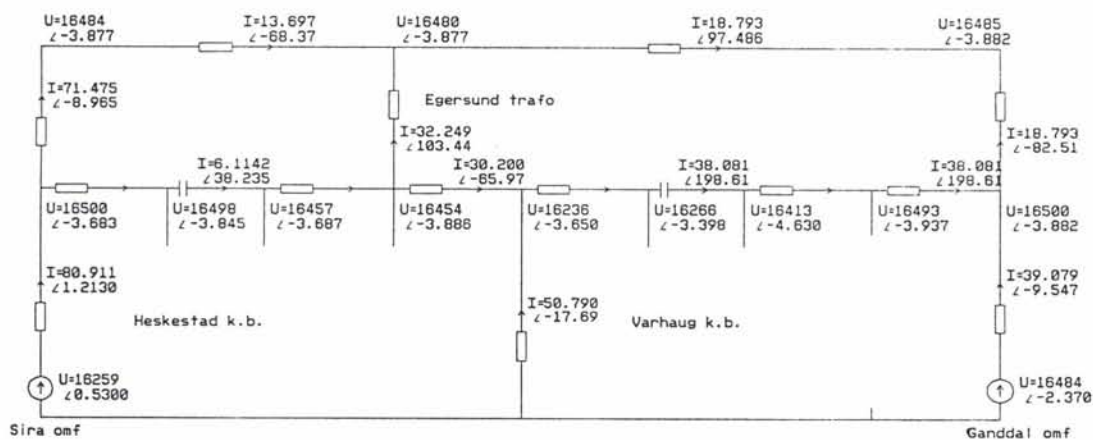
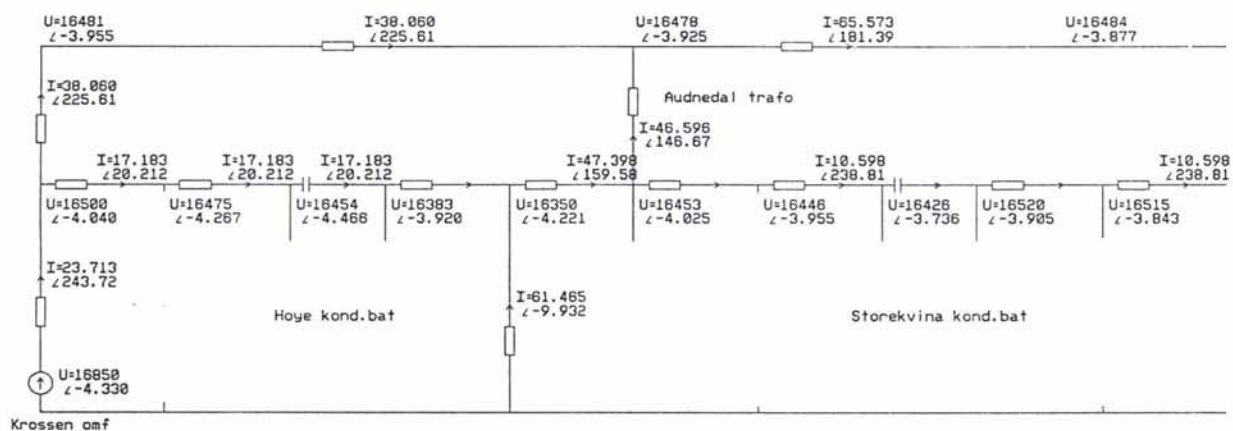


Fig 3.5 130 kV mateledning, lavlast, med faseforskyvninger i spenning

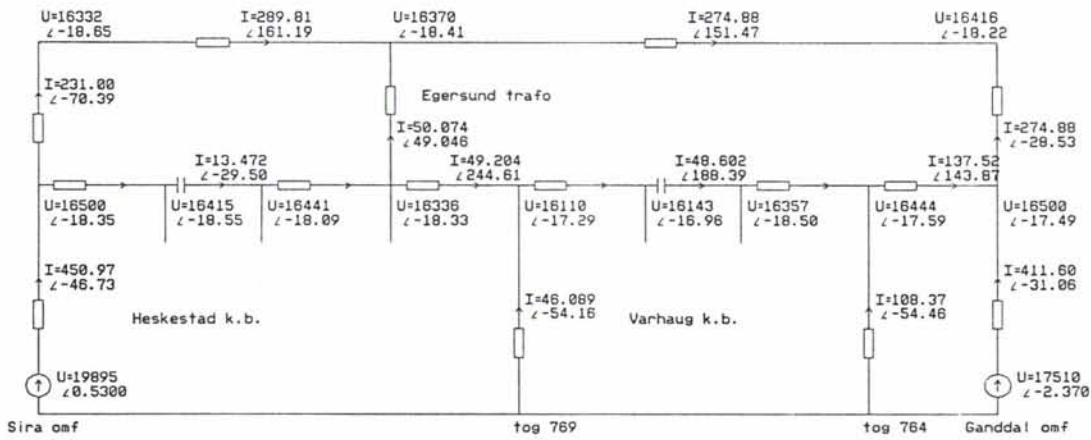
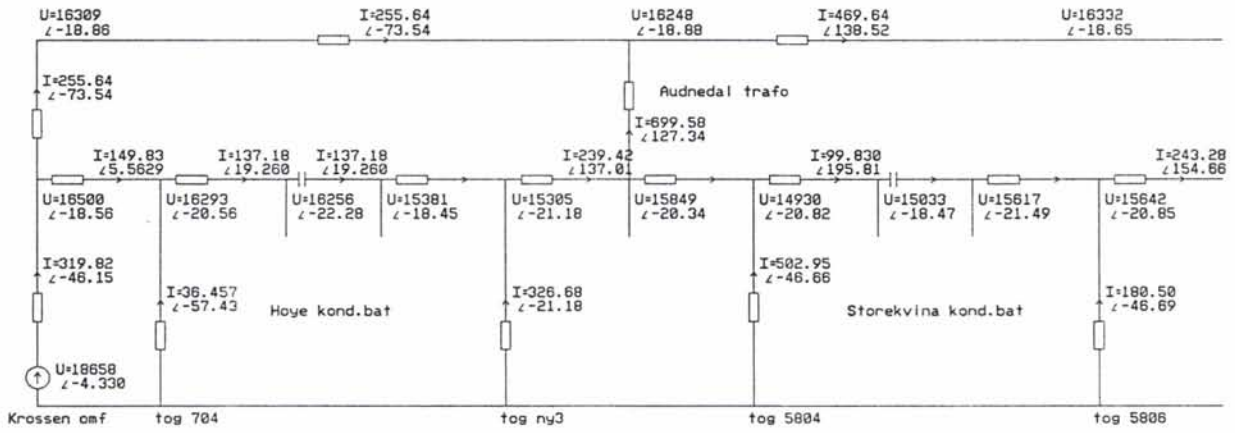


Fig. 3.6 130 kV mateledning, høylast, med faseforskyvninger i spenning

Her kommer det klart fram at med stor tetthet av tog, vil det ikke bli noe problem med at det vil flyte effekt den gale veien gjennom Krossen omformerstasjon. Effekten som i tomgang ville ha gått i transitt på jernbanens mateledning, vil i tilfeller med stor togtetthet forsyne trekraftmateriellet. Også i lavlasttilfellene vil den uønskede effekten stort sett gå med til å forsyne de togene som er på linjestrekningen, men noe effekt vil her gå ut på 3-fasenettet utenfor. I tilfellet i tabell 3.7 vil det med 130 kV mateledning flyte ca 150 kVA ut på trefasenettet fra Krossen omformer.

Det som skjer i tilfeller med større lastuttak på kontaktledningen samtidig som det er faseforskyvninger mellom omformerstasjonene grunnet nettet utenfor, er at lastfordelingen mellom omformerstasjonene blir annerledes enn i tilfeller med lik fase i alle omformerstasjonene. Den omformerstasjonen som ligger først i fase vil ta en større del av belastningen enn den/de omformerstasjonene som ligger etter i fase.

Med statiske omformere kan denne fasevinkelen reguleres, og en kan da benytte dette til aktivt å regulere lastuttaket og lastfordelingen mellom de enkelte omformerstasjonene.

3.5.3 Tomgangstilfeller med og uten seriekondensatorbatterier

I dag er det på strekningen Kristiansand - Stavanger seriekondensatorbatterier. Disse batteriene kompenserer i tomgang for kontaktledningsanleggets induktive spenningsfall. Ved tilfeller det en har faseforskyvninger mellom de forskjellige omformerstasjonene, vil en også ved rene kontaktledningsanlegg ha en viss lastflyt mellom stasjonene. Uten seriekompensering vil det være være omtrent like stor aktiv og reaktiv effektflyt mellom omformerstasjonene. Med seriekompensering vil det gå en større effekt mellom omformerstasjonene, men da vil det være en mye større andel reaktiv effekt som flyter. Tabell 3.8 viser tomgangstilfeller med data fra vinterlasttilfelle b, med kontaktledning med og uten seriekompensering.

Effektflyt i kontaktledningsanlegg angitt i kVA , Vinterlast, tilfelle B			
	effekt [kVA]	kl u/seriekond.batt	kl m/seriekond.batt
Krossen omformer	aktiv	-288	-74
	reaktiv	308	1074
Sira omformer	aktiv	431	255
	reaktiv	-385	-1343
Ganddal omformer	aktiv	-130	-100
	reaktiv	125	478

Tabell 3.8 Effektflyt på Kl med og uten seriekondensatorbatteri, vinterlast tilfelle b

Det en kan se av tabellen er at det også i dag er effektflyt på linjene i tomgang ved store faseforskyvninger i 3-fasenettet. Det vil flyte ca 250kVA inn på kontaktledningsnettet, men mye vil forsvinne i tap langs kontaktledningen, så ca 180 kVA vil flyte tilbake til 3-fasenettet igjen. Med en 130 kV mateledning vil denne effektflyten i tomgang øke med 3 - 4 ganger.

Effektflyt med 130 kV mateledning uten seriebatterier

Hvis en velger å bygge 130 kV mateledning kan det hende det vil oppstå problemer med stabilitet grunnet resonansproblemer mellom seriekondensatorbatteriene og den svært induktive mateledningen. Hvis dette skjer, må kondensatorbatteriene kobles ut, det vil si, de må kortsluttes. Det er også undersøkt om dette vil gi innflytelse på effektflyten i tomgangstilfellet med vinterlast, tilfelle B. Resultatene på dette er vist i tabell 3.9 nedenfor.

	effekt [kVA]	Effektflyt angitt i kVA Vinterlast, tilfelle B 130 kV mateledning
Krossen omformer	aktiv	-685
	reaktiv	300
Sira omformer	aktiv	766
	reaktiv	-85
Ganddal omformer	aktiv	-90
	reaktiv	-144

Tabell 3.9 Effektflyt med 130 kV mateledning, uten seriekondensatorbatterier

Resultatene viser at den aktive effektflyten (transitt) gjennom jernbanens ledningsanlegg da vil gå noe ned. Total effekt som vil flyte fra Sira omformer til de to andre omformerstasjonene på strekningen vil da være ca 770 kVA. Dette er ca 10 % lavere enn samme tilfelle med kondensatorbatteriene innkoblet.

3.6 Problemer med overharmonisk elektrisk støy og resonans

Som beskrevet i kapittel 2.1 har det i Sverige oppstått problemer ved en statisk omformerstasjon som er tilknyttet 130 kV mateledningsnett. Dette problemet oppsto når overharmoniske strømmer fra støykilder, dvs trekkraftmateriell, forplantet seg fra store forsyningsområder, via mateledningsnett og inn i énfasefilteret i omformer-stasjonen som da ble overbelastet.

Hvis den statiske omformerstasjonen og énfasefilteret hadde blitt bygd etter mateledningsnett, og filteret hadde vært dimensjonert for et slikt nett, ville det ikke ha vært noe problem. Problemet i Sverige oppsto fordi et filter som var dimensjonert for ett nettbilde, ikke fungerte når nettbildet ble kraftig forandret.

Et problem som kan oppstå med et høyspent mateledningsnett i Norge er svingninger og eventuelle resonansproblemer i forbindelse med seriekondensatorbatteriene. Med et høyspent mateledningsnett som er svært induktivt, seriekondensatorbatterier og et nettbilde som forandrer seg hele tiden når togene flytter på seg, skal en være klar over at dette kan bli et problem. I dag er det kun et kondensatorbatteri på Bergensbanen det har vært slike driftsproblemer med. Alle de andre batteriene som står plassert rundt om nettet vårt har det ikke vært problemer med. Dette kan skyldes at kondensatorbatterienes plassering i kontaktledningsnett tross alt er relativt godt separert fra et større maskenett.

I det landsdekkende 3-fasenettet er de fleste kondensatorbatterier shunkoblet, det vil si koblet mot jord, og dette er delvis gjort fordi en da ikke får så store problemer med stabiliteten i nettet. I kraftforsyningsbransjen har det vært en del problemer med nettopp slike seriekondensatoranlegg.

Med et høyspent mateledningsanlegg vil NSB's forsyningsanlegg bli mer sammenmasket, og dette kan føre til slike stabilitetsproblemer pga seriekompenseringen. Dette er et problem som bør undersøkes i forkant, slik at en vet noe om virkningen av seriekondensatorbatterier og mateledning. Med en høyspent mateledning er behovet for kondensatorbatteriene mye mindre enn det er i dag, da kraftforsyningen til kontaktledningen vil bli betraktelig forsterket. Hvis det viser seg at en med høyspent mateledning ikke kan benytte dagens kondensatorbatterier, er ikke dette ikke et stort problem, og batteriene kan frigis til bruk på andre strekninger hvis det er ønsket.

4. DISKUSJON

Innenfor de undersøkelsene som er foretatt er det 2 mulige kilder til feil. Den første er det dataunderlaget som er skaffet fra Statnett, Lyse Kraft, Vest-Agder Energiverk og Kristiansand Energiverk. Den andre mulige feilkilden er modellene i simuleringsprogrammet som er brukt.

De data som er samlet inn og satt i sammenheng er mottatt fra 4 forskjellige netteiere. Dette er data som de forskjellige netteierne har beregnet ved forskjellige koblingstilfeller og lastuttak. Faren med å sammenstille slike data er at det ikke er sikkert at en fra NSB's synspunkt får data fra de mest ekstreme tilfellene. En kan heller ikke være sikker på om det verste tilfellet som i praksis vil oppstå er så ekstreme som disse sammenstilte dataene for høylastperiodene er.

Det en i alle fall kan si er at de verste forholdene her helt klart er under høylastperioder, det vil si vinterlast. Da vil de største faseforskyvningene i nettet finne sted, og det er da de største effektene vil flyte i NSB's nett. Fra alle netteierne er det mottatt data fra høylastperioder, og en sammenstilling av disse burde gi et rimelig riktig resultat.

Den andre mulige kilden til feil er selve dataprogrammet, og da spesielt modellen for matestasjonene. Den måten matestasjonene er modellert på, der det tas hensyn til endret fasevinkel på utgangsspenningen som funksjon av effektuttak, gjør at effektflyten i NSB's anlegg ikke blir så stor som det kanskje var fryktet på forhånd. En enklere og mindre riktig modell for matestasjonene gir en effektflyt som er omtrent 10 ganger så stor.

Til forsvar av programmet skal det være sagt at matestasjonsmodellen som er blitt brukt er laget etter data fra våre omformere.

5. KONKLUSJON

Konklusjonen på undersøkelsene så langt er at den effektflyten som vil oppstå med en høgspenning mateledning ikke er faretruende stor. I det verste tilfellet fløt det ca 0,8 MW inn og ut fra NSB's nett, og dette er ca 7 % av total installert effekt i den mest belastede omformerstasjonen. Når det er større belastninger på linjen, vil det ikke være transitt av kraft på mateledningen, og ved små belastninger vil transitten være minimal.

Problemet er at det i dag betales for den kraften som flyter inn på NSB's nett gjennom omformerstasjonene, men den kraften som eventuelt flyter ut fra NSB's nett ikke blir registrert og godtgjort. Dette er ikke et stort problem. Ved å bytte ut energimålerne til en type som summerer kraftflyten inn og ut av stasjonene skulle ikke dette være noe problem. Dette er en type målere som er svært vanlig i det ordinære 3-fase kraftnettet rundt om i Norge, siden retningen på kraftflyten ofte endres etter lastuttak og produksjon på de forskjellige steder.

Det en også kan se av undersøkelsene er at problemet med kraftflyt i mateledningen ikke blir mye endret om en benytter 130 kV eller 55 kV spenningsnivå på mateledningen.

Konklusjonen på simuleringene er at det ikke bør være et stort problem med uønsket effektflyt på den strekningen som er blitt undersøkt. Ved å benytte seg av en annen type målere i de 3 aktuelle omformerstasjonene, burde ikke dette være noe hinder for å bygge en høgspenning mateledning som forsterkning av banestrømforsyningen på strekningen Kristiansand - Stavanger.

6. FORSLAG TIL VIDERE ARBEID

Resultatene fra denne undersøkelsen er for så vidt klare og greie, men det er kanskje behov for å gjøre tilsvarende undersøkelser med annet dataverktøy. Dette foreslås gjort for å få undersøkt ACCAN-programmet som er benyttet i denne undersøkelsen. Hvis resultatene med et annet dataverktøy blir tilsvarende disse resultatene, bør en kunne føle seg rimelig trygg på at det ikke vil oppstå problemer i et mateledningsnett på strekningen Kristiansand - Stavanger.

Hvis en benytter et dataprogram som kan beregne på det omliggende 50 Hz 3-fasenettet, samtidig med NSB's 16 2/3 Hz kontaktlednings- og mateledningsnett, kan en få undersøkt dette mer grundig, og kan få bekreftet/avkreftet om programmet ACCAN er godt nok å bruke til tilsvarende undersøkelser senere.

Et annet fenomen som bør undersøkes før en bestemmer seg for å bygge et høgspennet mateledningsnett, er om det vil oppstå stabilitetsproblemer i forbindelse med seriekondensatorbatteriene. Dette er ikke avgjørende for om en skal gå for denne type løsning eller ikke, men det er en fordel å vite konsekvensene av de ombygginger som blir gjort. Hvis dette ikke blir undersøkt, men en oppdager feil under drift, er sannsynligvis løsningen på problemet å koble ut seriebatteriene. Med et system med høgspennet mateledning og transformatorstasjoner mellom hver omformerstasjon, er også behovet for seriekompensering mye mindre enn tidligere. Med et slikt system vil seriekondensatorbatteriene sannsynligvis være noe overdimensjonert, og virkningen av de vil være mye lavere enn med dagens anlegg.

Jernbaneverket
Biblioteket

JBV



09TU09999

100057