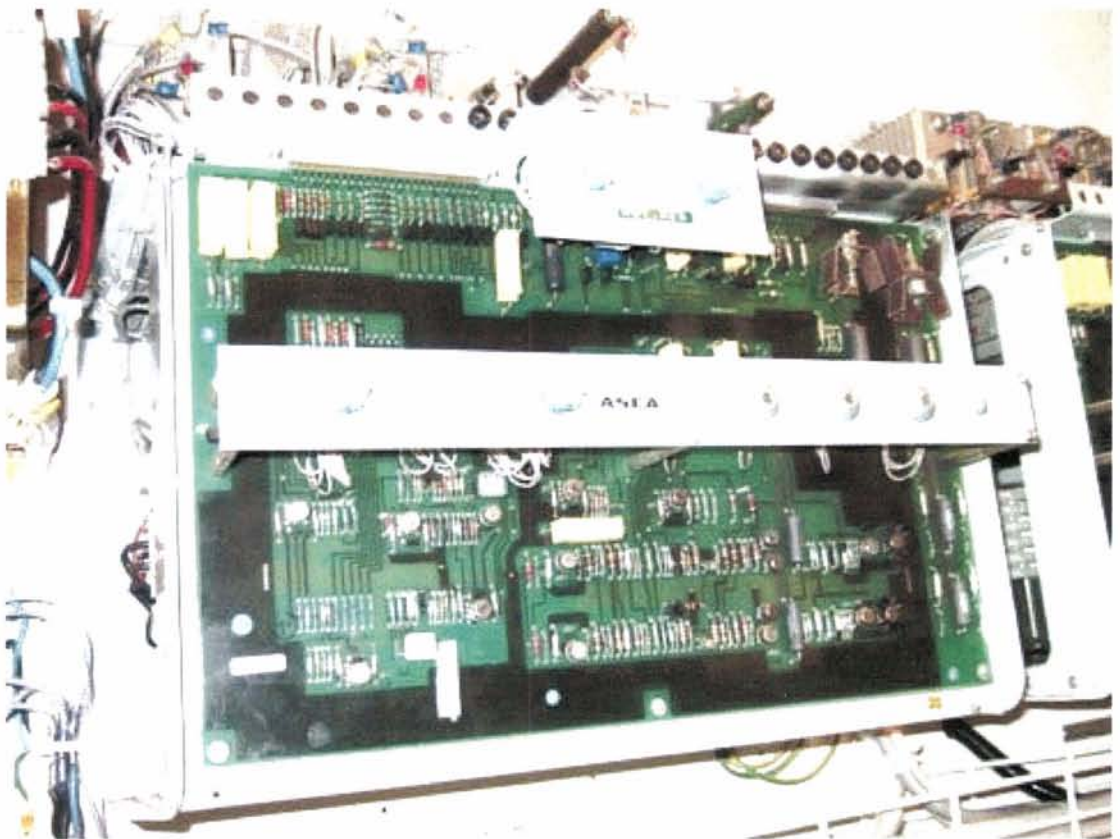


Simuleringsrapport

Lastflyt og fasevinkler mellom omformerstasjoner

Prinsipper og forslag til løsninger på noen kjente problemer i dagens og fremtidens banestrømforsyning



RAPPORT

Lastflyt og fasevinkler mellom omformerstasjoner

Prinsipper og forslag til løsning på noen kjente problemer i dagens og fremtidens banestrømforsyning

000	Endelig utgave	27.06.08	FM	COWI FJ	FJ
Rev.	Revisjonen gjelder	Dato	Utarb. av	Kontr. av	Godkj. av
Banestrømforsyning Lastflyt og fasevinkler mellom omformerstasjoner Spenningsregulering Prinsipielle forhold Rapport		Ant. sider	Fritekst 1d	Frank Martinsen	
		206	Fritekst 2d		
			Fritekst 3d		
			Produsent		
		Prod. dok. nr.			
Erstatning for					
Erstattet av					
 Jernbaneverket	Dokument nr.			Rev.	
	EB.800051-000			000	

Eis. 1

♀ 621.332, 3 JBV Mar

Sammendrag

Innledning

I dette arbeidet som her foreligger har det blitt sett på lastfordelingen mellom omformerstasjoner på en tenkt banestrekning med konvensjonell kontaktledning. Det er også sett på fremtidig AT-system. Hensikten er først å få kunnskap om lastflyt mellom omformerstasjoner og lage enkle illustrasjoner som viser hvorledes effekten fordeler seg mellom stasjonene. Ved at en gjør enkle stiliserte simuleringer der stadig flere momenter draes inn, får en se hvilke forhold som har betydning for spenningen på matestrekningen, fordeling av aktiv- og reaktiv effekt, belastningsgrad, etc. Det utredningen konkret skal finne svar på er blant annet følgende problemstillinger:

- Undersøke situasjonen rundt Leivoll omformerstasjon som leverer aktiv effekt til overliggende trefasenett, både med og uten trafikk på matestrekningen. Dette gjør den ved å trekke effekt fra sine nabostasjoner. Ved å undersøke forholdene mellom overliggende nett for Leivoll og nabostasjonene (Sira og Krossen) kan en muligens også finne tiltak som kan forbedre situasjonen.
- Se om det er tilfelle at Mjølfjell omformerstasjon har en spesielt svak forsyning, og om det er noen tiltak som eventuelt kan forbedre forholdene.
- Se om overmagnetisering av motorene vil kunne påvirke effektflyten på 15kV-siden.
- Finne ut om dagens praksis med spenningsregulatorer til omformergeneratorene med flat statikk er den beste i alle situasjoner.
- Se om det er tilfelle at fallende statikk for spenningsregulatorene er best med AT-system. I [1] blir det anbefalt en fallende statikk på 4 %.
- Få et forhold til hvor store forskjeller det må være mellom fasevinkler mellom overliggende nett til nabostasjoner før effektfordelingen og en stor lastflyt i tomgang blir problematisk.
- I AT-system er dette påstått å kunne bli et stort problem med fasevinkler mellom omformerstasjoner og stor effektutveksling i tomgang, se [6].
- Reaktorer for fasekompensering er foreslått som et tiltak i AT-system for å unngå stor uønsket effektflyt. En skal undersøke om det virkelig er nødvendig.
- Få kartlagt fasevinkler i overliggende nett på en strekning for å se hvordan disse endrer seg gjennom året og hvilke problemer dette eventuelt gir.
- Fastslå om en modell av det overliggende nettet er nødvendig for trafikksimuleringer der en skal dimensjonere banestrømforsyningen.

Lastflyt mellom omformerstasjoner:

Ved belastning av en roterende omformer fåes en fasevreining av spenningen med økende belastning, dreiningen er størst ved rent aktiv belastning. Det oppstår fasevreining både over trefasetransformator, motor/generator (polhjulsvinkel) og enfasetransformator. Alt etter styrken på overliggende nett (lengde, impedans, spenningsnivå, avstand til andre forbrukere og kraftstasjoner) fåes en ytterligere fasevreining. Disse er de lastavhengige fasevreiningene, men mellom omformerstasjoner som forsynes fra forskjellige overliggende nett kan det være relative fasevreininger som er helt uavhengig av belastningen av omformerstasjonen.

Det er den omformerstasjonen som har fasevinkel foran (leder) den andre som leverer aktiv effekt, og den som har fasevinkel etter den andre (sakker) som leverer reaktiv effekt. Om en belastning er nært ved en omformerstasjonen vil denne levere mye av den aktive effekten. Samtidig vil fasevreiningen som denne stasjonen opplever føre til at det flyter reaktiv effekt fra nabostasjonen(e) til den.

Mjølfjell omformerstasjon

Forsøk med et svakt og et sterkt overliggende nett for to nabostasjoner viser noen forskjeller for effektfordelingen, men ikke store. Observasjoner av stasjon med lang forsyningslinje (svakt nett som forsyningen til Mjølfjell) som leverer mindre effekt enn påstått, må nok tilskrives flere forskjeller enn bare impedansen i nettet. Fasevinkel på grunn av store forskjeller i det overliggende (stam-)nettet vil sannsynligvis være vel så betydningsfullt. Altså det som blir påvirket av regionale og nasjonale forhold mellom kraftproduksjon, forbruk og effekttransitt i kraftnettet.

På grunnlag av undersøkelsene her er det grunn til å tvile på at de påstander som har versert om at Mjølfjell omformerstasjon er svak og legger lasten over på nabostasjonene. Verken målinger eller dokumenterte observasjoner som tilsier dette er kjent.

Overmagnetisering av motorene i en omformerstasjon for å påvirke effektflyten

Overmagnetisering av motorene viste seg ikke å gi noen større fasevreining på 15 kV-samleskinne som vil ha noen praktisk betydning for effektflyten.

Spenningsregulatorer til omformergeneratorene med flat eller fallende statikk

Undersøkelser med 4 % fallende statikk (reaktiv kompensering) fra tomgang til fullast viste seg å ikke gi noen forbedringer av reaktiv effektflyt mellom stasjonene for tilfellet med konvensjonelt kl-anlegg og 80 km mellom omformerstasjonene. Imidlertid kan det være at for tilfeller der det er 40 km mellom omformerstasjonene, store relative forskjeller i fasevinkler i overliggende nett og store forskjeller på installert ytelse i hver stasjon kan fallende statikk være vert å undersøke.

Det skal påpekes at det i dag ikke er spesielle problemer med effektfordeling eller overbelastning av omformerstasjoner, men dette kan være et virkemiddel om slike problemer kommer.

Betydningen av fasevinkler i overliggende nett og konvensjonelt kl-anlegg

Forskjellige fasevinkler mellom omformerstasjoner gjør at det flyter effekt mellom dem. Med 80 km mellom omformerstasjonene, 2 x 5,8 MVA aggregater og en forskjell i fasevinklene i det overliggende nettet på 6° overføres det 130 kW og 120 kVAr mellom stasjonene, og tapet i kontaktledningen blir ca. 10 kW. Ved en forskjell på 12° overføres det 260 kW og 240 kVAr mellom stasjonene, og tapene er fortsatt ca. 10 kW. Når vinkelforskjellen blir så mye som

18°, overføres det 390 kW og 350 kVAr i tomgang. Det er ikke store tap, men tapene i omformerstasjonene vil kunne bli mer betydningsfulle. Ser en imidlertid på energitapet over ett helt år utgjør det nok et ganske volum, men tiltakene for å forbedre dette vil kunne bli omfattende.

Fallende statikk for spenningsregulatoren til omformergeneratorene med AT-system

Simuleringene viste at med AT-system blir det en ganske stor utveksling av reaktiv effekt når belastningen er ujevn på matestrekningen. Ulike fasevinkler i overliggende nett får også betydning, større enn med konvensjonelt kl-anlegg. Det ble undersøkt med 4 % fallende statikk (reaktiv kompensering) og dette forbedret forholdene en hel del. Antall omformere i drift samtidig har også stor betydning, slik at om en ikke har mer enn ett aggregat i drift ved liten trafikk reduseres effektflyten mye. Med fasevinkler i overliggende nett slik at forskjellen mellom stasjonene er 9° overføres det 470 kW og 290 kVAr. Tapene i kl-anlegget blir ca 20 kW.

Reaktorer for fasekompensering for AT-system

At effektutveksling mellom omformerstasjoner med AT-system kommer til å bli et stort problem ser ikke ut til å være tilfelle. Her har undersøkt dette for tilfellet med 120 km mellom omformerstasjonene, 381 mm² tverrsnitt for NL og PL, 3 x 5,8 MVA aggregater i omformerstasjonene og forskjellig fasevinkler på 18°. Reaktorer for kompensering som har blitt foreslått ser derfor ikke ut til å være nødvendig.

Fasevinkler i overliggende og problemene med Leivoll omformer

Fasevinklene til overliggende nett for omformerstasjonene langs Sørlandsbanen er blitt undersøkt nøye for Nelaug, Krossen, Leivoll og Sira. En har funnet følgende årstidsvariasjoner, se diagram nedenfor. Av denne kartleggingen ser det ikke ut til å være relative fasevinkler som gir en effektflyt mellom omformerstasjonene som det er noen grunn til å tro er opphav til at Leivoll omformerstasjon levere store energimengder til overliggende kraftnett.

En fant ut at denne utveksling av effekt ikke kan skyldes fasevinkler i overliggende nett relativt til nabostasjonene Krossen og Sira. Utvekslingen av effekt er så stor at det ble konkludert med at fasevridningen må skyldes andre årsaker som feil koblingsgruppe i transformatorer, enten i overliggende nett eller i stasjonen selv, ombytting av faseledere i mellom transformator og motor, eller en revolvering for mye (eller for lite) i overliggende nett.

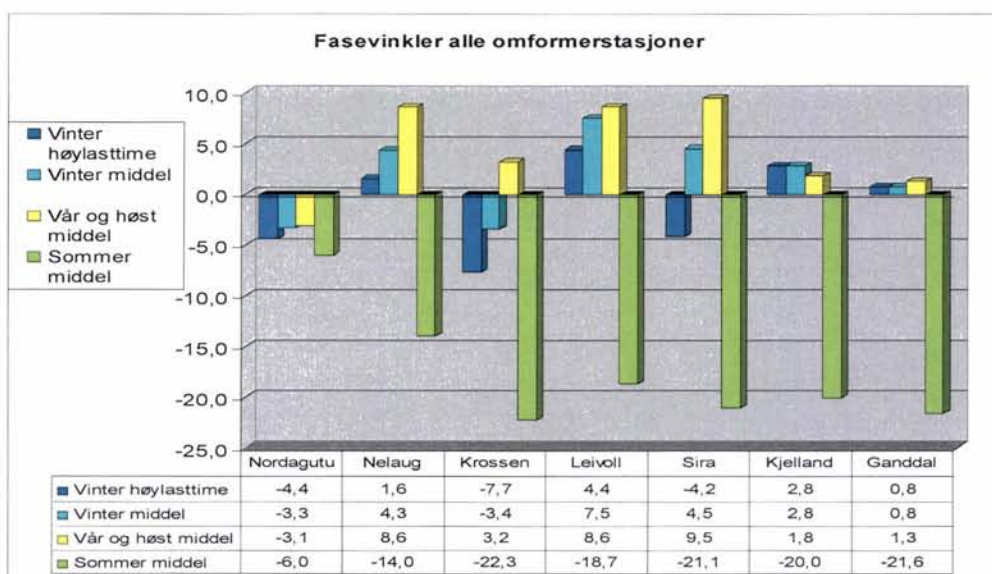
Ved å gjøre en fullskala test i omformerstasjonen ved å endre på faserekkefølgen (bytte om to faser på klemmebrettet mellom transformator og motor) fjernet en problemet. Allikevel er en ikke kommet helt tilbuds i hva problemet egentlig skyldes og ytterligere undersøkelser er planlagt.

Fasevinkler i overliggende og endringer over året og behovet for å lage simuleringsmodeller som tar med dette

Figuren nedenfor viser fasevinklene i overliggende nett og årstidsvariasjoner. En ser at forskjellene mellom to stasjoner ikke er spesielt store, selv om variasjonene over året viser store forskjeller. Spesielt ser en at forskjellen mellom "Sommer middel" og "Vår og høst middel" er stor.

Det er lagt ned mye arbeid i å modellere nettet til Agder Energiverk og innhente fasevinkler fra Statnett. Disse modellene inkluderer kraftstasjoners driftsmønster, industriens forbruk og generelt forbruksmønster. En må kunne si at arbeidet som har blitt lagt ned på dette var så stort og ga såpass små relative fasevinkler mellom omformerstasjonene at konklusjonen får bli at for fremtidige trafikksimuleringer er det ikke nødvendig å ha med modell for overliggende kraftsystem eller fasevinkler. Dette gjelder i alle fall for simuleringer med konvensjonell banestrømforsyning, men også for AT-system kan en nok ignorere dette om det da ikke er av spesiell interesse.

For eksempel simuleringer der tapene i banestrømforsyningen skal undersøkes kan det være aktuelt å inkludere overliggende netts fasevinkler. For Oslo-området kan det være nødvendig å se på fasevinkler da elektrisk avstand mellom omformerstasjonene er spesielt kort her. I de aller fleste tilfeller anbefales det at overliggende kraftsystemer modelleres som en stiv spenning med null fasevinkel bak en reaktans som illustrerer forsyningslinjen til omformerstasjonen.



1	INNLEDING	4
1.1	INNLEDNING	4
1.2	BAKGRUNN OG MÅLSETTING	4
1.3	FORUTSETNINGER METODIKK OG RAPPORTSTREKTUR	5
1.4	MODELLER	7
1.5	TAKKSIGELSE	8
2	UNDERSØKELSER FOR STILISERTE TILFELER	9
2.1	UNDERSØKELSER FOR TILFELLE MED EN OMFORMERSTASJON MED BELASTNING.....	9
2.1.1	<i>Vinkeldreining for 5,8 MVA roterende omformerstasjon.....</i>	<i>9</i>
2.1.2	<i>Vinkeldreining for 2 x 5,8 MVA roterende omformerstasjon.....</i>	<i>16</i>
2.1.3	<i>Oppsummering etter undersøkelser med en omformerstasjon.....</i>	<i>29</i>
2.2	UNDERSØKELSER FOR TILFELLE MED OMFORMERSTASJONER PÅ EN MATESTREKNING	30
2.2.1	<i>Undersøkelser for en matestrekning på 80 km.....</i>	<i>30</i>
2.2.2	<i>Undersøkelser for tilfellet med to matestreknings på 40 km.....</i>	<i>82</i>
2.3	UNDERSØKELSER FOR TILFELLER MED AT-SYSTEM OG 120 KM MELLOM OMFORMERSTASJONENE ..	116
2.4	UNDERSØKELSER FOR AVBØTENDE TILTAK	154
2.4.1	<i>Forsøk med avbøtende tiltak for omformerstasjoner med 40 km avstand og store faseforskjeller dem</i>	<i>154</i>
2.4.2	<i>Forsøk med avbøtende tiltak for AT-system, omformerstasjoner i avstander på 120 km og med store relative faseforskjeller.....</i>	<i>172</i>
3	KONKRETE UNDERSØKELSER VEDRØRENDE LEIVOLL OMFORMERSTASJON.....	177
3.1	MÅLINGER FOR LEIVOLL OMFORMERSTASJON.....	177
3.2	FASEVINKLER FOR OVERLIGGENDE REGIONAL- OG STAMNETT	179
3.2.1	<i>Forsøk med effektflyt mellom Krossen, Leivoll og Sira for fasevinkler som vinter høylasttime..</i>	<i>180</i>
3.2.2	<i>Fullskala forsøk i Leivoll omformerstasjon.....</i>	<i>182</i>
3.2.3	<i>Forsøk med lastflyt mellom Ganddal, Kjelland, Leivoll og Nelaug samt Nordagutu med et fremtidig AT-system.....</i>	<i>183</i>
4	OPPSUMMERING, KONKLUSJON OG ANBEFALINGER	189
4.1	OPPSUMMERING AV RESULTATENE	189
4.1.1	<i>Oppsummering av problem og løsning for de tre undersøkte hovedtypene av matestreknings..</i>	<i>189</i>
4.2	DISKUSJON	191
4.2.1	<i>De beste modellene for trafikksimuleringer</i>	<i>191</i>
4.2.2	<i>Lastflyten i tomgang og tap med dagens banestromforsyning</i>	<i>192</i>
4.2.3	<i>Lastflyten i tomgang og tap med AT-system.....</i>	<i>192</i>
4.2.4	<i>Modelleringen av det overliggende nettet i trafikksimuleringer</i>	<i>192</i>
4.2.5	<i>Sesongvarierende innstilling av spenningsregulatorer</i>	<i>193</i>
4.2.6	<i>Drøftinger rundt innstilling av spenningsregulatorer</i>	<i>194</i>
4.3	ANBEFALINGER	195
4.4	VIDERE ARBEID.....	195
5	REFERANSELISTE	196
6	APPENDIKS 1 SVAKT OVERLIGGENDE NETT OG BETYDNINGEN AV INITIAL LAST I OPTPOW.....	197
7	APPENDIKS 2 LASTFLYTEN I KRAFTNETTET SOM FORSYNER SØRLANDSBANEN.....	201

1 INNLEDING

1.1 Innledning

Det er viktig å kjenne til omformernes spenningsregulatorer og roterende aggregaters oppførsel for å forstå hvorledes effekten fordeler seg mellom omformerstasjonene. Med god kunnskap til denne effektfordelingen, kan en også bedømme hva som er ugunstige forhold, og hva som egentlig kan forbedres. Opp gjennom årene er det utført utallige trafikksimuleringer, men med mange tog som trekker effekt (tilsynelatende stokastisk), er det nesten umulig å analysere eksakt hvorledes effektfordeling skjer, og hva den aktuelle innstillingen av spenningsregulatorer har å si. For Oslo-området er det imidlertid gjort en del undersøkelser for blant annet spenningsvinkler og lastfordeling, se [1] og [2]. Det er flere forhold som skal undersøkes i dette arbeidet, og i denne rapporten settes det opp flere scenarier og problemstillinger. Følgende problemer har vært omtalt eller er kjent i Jernbaneverket, dette er:

1. Leivoll omformerstasjon leverer effekt til trefasenettet, og bare sjeldent leverer den effekt til togene.
2. Mjølfjell omformerstasjon er beskrevet som svak¹ i den forstand at den ikke tar leverer så mye effekt som forventet.
3. Små omformerstasjoner som Rudshøgda og Otta leverer mye reaktiv effekt og lite aktiv effekt.
4. Fornuftig innstilling av spenningsregulatorer i dag og med fremtidig AT-system.

Flere eller mange av tilfellene kan undersøkes med beregninger for hånd, men her er det benyttet simuleringsverktøyet SIMPOW siden det gir raske svar og illustrasjoner genereres fortløpende. Imidlertid er ikke grafikken som SIMPOW gir, av tilstrekkelig god kvalitet. Illustrasjonene er utydelige å lese, spesielt tallene. I nye versjoner av SIMPOW er dette forhåpentlig rettet opp, men inntil videre får en være fornøyd med det en har.

De stiliserte simuleringene skal undersøke visse typiske karakteristika for roterende omformere og omformerstasjoner på en matestrekning. Etter hvert hovedkapittel gjøres en oppsummering og diskusjon av de resultater en har sett. Til sist i kapitlet skal en forsøke å komme frem til de betingelser som skaper de problemene en ser ute i banestrømforsyningen slik at problemet kan isoleres og helt til slutt sees det på noen enkle tiltak til løsning.

1.2 Bakgrunn og målsetting

Det er en lang liste som rettfærdiggjør dette arbeidet og forhold som ønskes undersøkt:

- Sette opp en mengde scenarier med last på en matestrekning for å se hva som påvirker aktiv og reaktiv effektflyt mellom omformerstasjoner.
- Undersøke situasjonen rundt Leivoll omformerstasjon som leverer effekt til overliggende nett, både med og uten trafikk på matestrekningen. Dette gjør den ved å overføre effekt fra sine nabostasjoner. Ved å undersøke forholdene mellom overliggende nett for nabostasjonene (Sira og Krossen) kan en muligens også finne tiltak som kan forbedre situasjonen.

¹ Det foreligger ingen målinger eller konkrete undersøkelser, men Mjølfjell omformerstasjon er av sentrale personer beskrevet som svak. Dette er begrunnet ved at den har en lang overføringslinje. Ved forespørsel hos Bane Energis driftsentral i forbindelse med dette arbeidet, blir det benektet at denne omformereren skulle være noe annerledes enn andre stasjoner.

- Se om det er tilfelle at Mjølfjell omformerstasjon har en spesielt svak forsyning, og om det er noen tiltak som eventuelt kan forbedre forholdene.
- Se om overmagnetisering av motorene vil kunne påvirke effektflyten på 15kV-siden.
- Finne ut om dagens praksis med spenningsregulatorer til omformergeneratorene med flat statikk er den beste i alle situasjoner.
- Se om det er tilfelle at fallende statikk for spenningsregulatoren er best med AT-system. I [1] blir det anbefalt en fallende statikk på 4 %.
- Få et forhold til hvor store forskjeller det må være mellom fasevinkler mellom overliggende nett til nabostasjoner før effektfordelingen og en stor lastflyt i tomgang blir et problem.
- I AT-system er dette påstått å kunne bli et stort problem med fasevinkler mellom omformerstasjoner og stor effektutveksling i tomgang, se [6].
- Få kartlagt fasevinkler i overliggende nett på en strekning for å se hvordan disse endrer seg gjennom året og hvilke problemer dette eventuelt gir.
- Fastslå om en modell av det overliggende nettet er nødvendig for trafikksimuleringer.

1.3 Forutsetninger metodikk og rapportstruktur

Undersøkelsene tar utgangspunkt i enkle stiliserte tilfeller, og utvikles med stadig mer sammensatte tilfeller, slik at bare en ting endres av gangen. Slik kan en isolere problemene og lettere se årsakene og virkningen. Dessuten blir det tydeligere hvilke tiltak som gir tilsiktet virkning, og hvilke som ikke gir det, og som dermed kan ekskluderes fra den videre undersøkelsen. Undersøkelser for å optimalisere innstillingen av regulatorer eller finne best mulig størrelse på komponenter, blir ikke gjort, det er først og fremst prinsipper og grunnleggende sammenhenger som skal finnes. Det er heller ikke tenkt å gi utfyllende forklaringer til de fenomener en ser, men legge mer vekt på de deskriptive via klare illustrasjoner. Så får leseren selv enten betrakte fenomener som "naturlover" eller selv tenke over hva som er de bakenforliggende fysiske sammenhengene.

Simuleringene ser på situasjoner med høy belastning og situasjoner som kanskje bare oppstår noen få sekunder, siden togenes effekttopptak jo i sin natur er store og kortvarige. Dermed vil undersøkelser der innstillinger kan optimaliseres for å få lavest mulig tap, ikke kunne gjennomføres med den metodikken som er tenkt benyttet her. Om en for eksempel skal finne en statikk for spenningsregulatoren som gir lavest mulig tap under varierende belastning og vil undersøke om 3, 4 eller 5 % er mest optimalt, må trafikksimuleringer også gjøres.

Det gjøres først en rekke stiliserte undersøkelser, først med enkel og færrest mulig komponenter, deretter med en typisk matestrekning med to stasjoner. Deretter forsøkes det med spesielle tiltak for å bote på identifiserte problemer. I den andre delen av rapporten analyseres konkrete strekninger der en pr i dag kjenner problemer og ser på mulige løsninger. Grunnstrukturen i denne rapporten er:

- Undersøkelser av ett roterende aggregat 5,8 MVA
 - Økende aktiv belastning og økende blandet belastning
 - Innstilling av spenningsregulator
 - Sterkt og svakt overliggende nett.
- Undersøkelse av to roterende aggregater 2 x 5,8 MVA

- Økende aktiv belastning og økende blandet belastning
 - Betydning av spenningsregulator på motorene og innstillingen av denne ut fra lastflyt i OPTPOW
 - Innstilling av spenningsregulator
 - Sterkt og svakt overliggende nett.
- Undersøkelse av en stilisert matestreking på 80 km og omformere på 2 x 5,8 MVA i hver omformerstasjon
 - Forskjellen på lastflyt med stive spenningskilder og omformerstasjoner
 - Betydningen av nabostasjoner
 - Betydningen av spenningsregulatorennes innstilling for lastflyten
 - Sterkt og svakt overliggende nett
 - Forsøk med utfall av ett aggregat
 - Forsøk med lastuttak som er større enn installert ytelse i en stasjon
 - Forsøk med fasevinkler i overliggende nett.
 - Undersøkelse av en stilisert matestreking på 2 x 40 km og omformer på 5,8 MVA i midten og 2 x 5,8 MVA i de ytterste
 - Samme undersøkelser som for matestreking på 80 km.
 - Undersøkelse av stilisert matestreking på 120 km med AT-system og omformere på 2 x 5,8 MVA i hver omformerstasjon
 - Samme undersøkelser som for matestreking på 80 km.
 - Undersøkelse av avbøtende tiltak på kjente problemer, eller problemer som kan oppstå. Nedenfor er listet opp de stiliserte tilfellene som undersøkes:
 - Matestreking på 2 x 40 km med omformerstasjon i midten der det skjer en ugunstig lastflyt i tomgang på grunn av fasevinkler i overliggende nett (som for Leivoll omformerstasjon). Aktuelle tiltak er:
 - La aggregatet(ene) i stasjonen i midten gå i mekanisk tomgang
 - Lavere spenning på samleskinne
 - Innfasing som gir permanent fasevinkel
 - Fallende statikk
 - Reaktor.
 - Matestreking på 2 x 40 km med omformerstasjon med liten ytelse/ett aggregat i midten der dette leverer mye reaktiv effekt og har lett for å bli overbelastet:
 - Fallende statikk
 - La aggregatet(ene) i stasjonen i midten gå i mekanisk tomgang
 - Omformerstasjon med svakt overliggende nett slik at den ikke bidrar med ønsket effektproduksjon ved belastning (som Mjølfjell)
 - Overmagnetisering av motorene
 - Seriekondensator i overliggende nett
 - Matestreking med AT-system med forskjellige fasevinkler i overliggende nett
 - Reaktorer for kompensering om effektflyten blir for stor.
 - Undersøksler med nøyaktig oppbygde modeller for de følgende tilfellene:
 - Leivoll og ugunstig lastflyt i tomgang samt problem med bare ett aggregat i denne stasjonen vil kunne overbelastes. Normalt skulle en forvente at ett aggregat er tilstrekkelig
 - AT-system på Sørlandsbanen

- Mjølfjell og mulige tiltak for å kompensere for den svake forsyningslinjen.
- Trafikksimuleringer for å se om spesielle tiltak har ønsket virkning.

Når problemer og fenomener som bare delvis er kartlagt, skal undersøkes, blir veien ofte til mens en går. Dette er en iterativ prosess som kan medføre nye undersøkelser og kanskje også overraskende resultater.

1.4 Modeller

Modellene som benyttes i undersøkelsene, er de standardmodellene som finnes i SIMPOW, og de spesielle modellene for roterende omformere som er utviklet spesielt for banestrømforsyning. Bare aggregater på 5,8 MVA benyttes, og de parametrene for disse som er definert pr 28.10.2004 i det interne notatet "Standard omformer parametere". Mekanisk fasedreing mellom trefasesiden og enfasesiden av aggregatene (motor og generator) defineres som:

$$\frac{2}{p_3} \theta_3 = \frac{2}{p_1} (\theta_1 - \theta_C)$$

der p_3 er polpartallet til motoren og p_1 er polpartallet til generatoren. θ_1 og θ_3 er henholdsvis fasedreing på enfase- og trefasesiden sine magnetiske akser for fase "A". θ_C (CTETA i OPTPOW/DYNPOW) er en fast vinkeldreing som kan være lagt inn konstruksjonsmessig ved at polhjulene på motor og generatorsiden er vridt i forhold til hverandre. En kan snu om på formelen slik:

$$\theta_1 = \frac{p_1}{p_3} \theta_3 + \theta_C$$

og med typiske tall for poltallene blir forholdet mellom p_1/p_3 lik 1/3. θ_C er for øvrig lik 0, om ikke helt spesielle tiltak gjøres. I tillegg til denne vinkelen kommer fasedreing på grunn av belastning, den såkalte polhjulsvinkel.

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

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

Det settes inn suksessivt fem laster på matestrekingen, slik at for 80 km matestreking blir avstanden mellom dem 13,333 km og for AT-system blir den 20,0 km. Lastenes effekt settes til 7,0 MW, først med $\cos \varphi = 1,0$, og så med $\cos \varphi = 0,7$. Dette tilsvarer omtrent den

belastningen som et E116-lokomotiv maksimalt kan trekke, men $\cos \varphi = 0,7$ er nok mer typisk med lavere hastigheter og ikke fullt så stort effektuttak. Andre og nye lokomotivtyper vil typisk ha like stor aktiv effekt. Det tas ikke hensyn til flere tog på den samme strekningen siden samtidighet og kapasitet på strekning ikke er tema for denne undersøkelsen.

Ideelt sett ønskes ingen spenningsavhengighet til lasten ($MP = NP = MQ = NQ = 0$), men for å unngå at simuleringene skal få problemer med å konvergere numerisk, settes den allikevel opp til 0,2. Formelen nedenfor viser disse sammenhengene for SIMPOW:

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

Der:

P'_0 og Q'_0 er initiell last fra OPTPOW-løsningen,

U_0 og f_0 er henholdsvis initiell spenning og frekvens også fra OPTPOW-løsningen.

Om andre verdier velges blir dette nevnt. Riktignok vil tog og lokomotiver ha et effektopptak som er avhengig av spenningen på kontaktledningen, og EN 50388 setter krav til denne avhengigheten. Her skal ikke dette forholdet undersøkes spesielt, og dermed ønsker en ikke avhengighet mellom effekten og spenningen.

Lastene legges inn momentant, og det oppstår en transient periode før stabile forhold er etablert. Denne transienten er ikke interessant å undersøke her, og derfor avlese verdiene først ved stasjonære forhold.

1.5 Takksigelse

En vil få lov til å rette en takk til Agder Energiverk og nettplanlegger Rolf Erlend Grunt for velvillig bistand i arbeidet med å kartlegge nye linjer, belastninger og kraftstasjoner, samt kontroll av lastflyten i nettet.

2 UNDERSØKELSER FOR STILISERTE TILFELER

Scenarier for å avdekke typiske egenskaper for roterende omformere og omformerstasjoner på en matestrekning er beskrevet i kapittel 2 og 3. I slutten av hvert hovedavsnitt er det en oppsummering og diskusjon av resultater, hvor også mulige tiltak belyses.

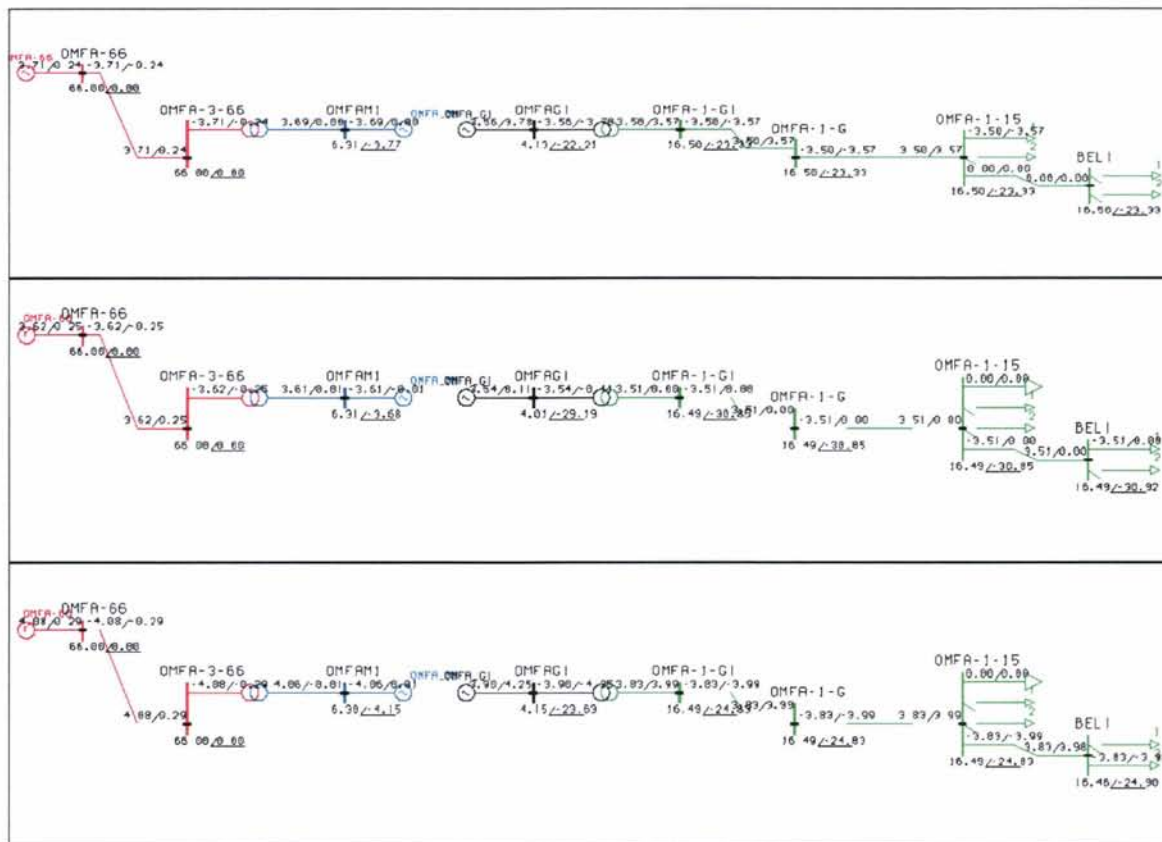
2.1 Undersøkelser for tilfelle med en omformerstasjon med belastning

2.1.1 Vinkeldreining for 5,8 MVA roterende omformerstasjon

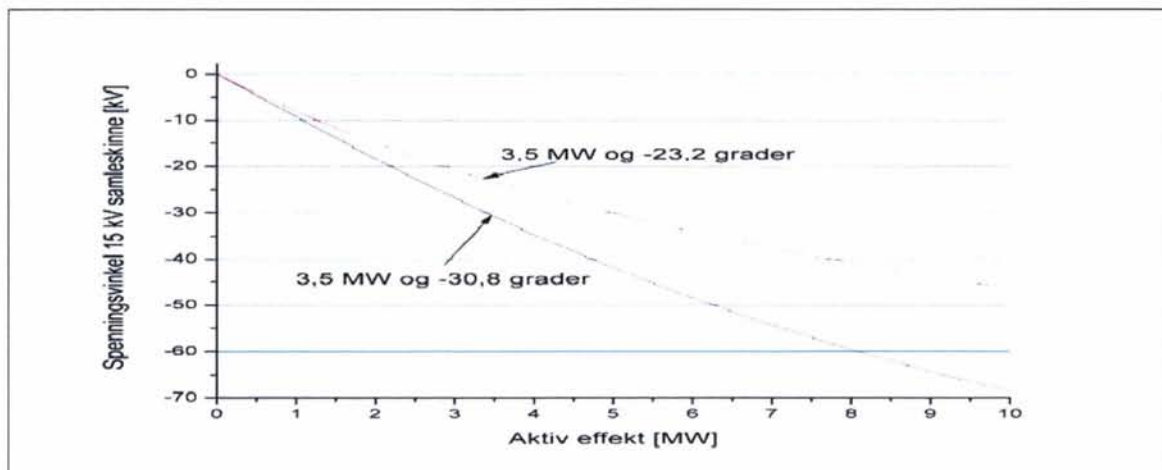
2.1.1.1 Vinkeldreining for 5,8 MVA roterende omformerstasjon med et ideelt stivt overliggende nett

Figur 1 nedenfor viser grafisk fremstilling av en lastflyt for en 5,8 MVA roterende omformer når den trekker henholdsvis 3,5 MW (øverst) for initialisering av spenningsregulatoren for motoren. Her skal det påses at spenningen for motoren innstilles til 6,3 kV med en reaktiv effekt på 0 MVar (normal innstilling). Neste rad i figuren viser belastningen når aggregatet trekker 3,5 MW og når $\cos \varphi = 1,0$ (i midten). Til sist er uttaket 3,5 MW med $\cos \varphi = 0,7$ (nederst). En observerer følgende fasedreining; ca 4° på trefasetransformatorens sekundærside, og på generatorsiden med henholdsvis 29° for aktiv last og 24° for både aktiv og reaktiv last. Videre er vinkeldreiningen på ca 1° for enfasetransformatoren for henholdsvis kun aktiv last og en belastning med $\cos \varphi = 0,7$. Den største fasevinkelen er på $30,9^\circ$ og observeres på 15 kV-samleskinne når lasten er kun aktiv. Mest vinkeldreining fåes ikke uventet over motor og generator der både polhjulsvinkel og effektfaktor for begge maskinene spiller inn. Overraskende er det at trefasetransformatoren bidrar med såpass stor endring av vinkelen. Likevel er forskjellen på fasevridning over transformatorene liten om det er rent aktiv eller blandet belastning.

Nedenfor er det i figur 2 vist fasevinkel som funksjon av en aktiv belastning når omformeren får en belastning som øker fra 1 til 10 MW. Rød kurve viser tilfellet med både aktiv og reaktiv effekt, mens sort kurve viser last med kun aktiv effekt. Som en ser er utslaget betydelig når lasten blir like stor som nominell ytelse eller større.



Figur 1 Grafisk fremstilling av lastflyt for tilfellet med et roterende omformeraggregat på 5,8 MW med et uendelig stivt overliggende nett. Lastflyten i OPTPOW med last NO=1 (øverst), last (BEL1 NO=1) som kun trekker en aktiv last på 3,5 MW (midten) og en last som trekker 3,5 MW (BEL1 NO=2) ved $\cos \varphi = 0,7$ (nederst). Det er benyttet en last for referanse for motorens spenningsregulator med en effekt på 3,5 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motoren skal trekke 0 MVar. Motorens spenningsregulator har for øvrig en fallende statikk.

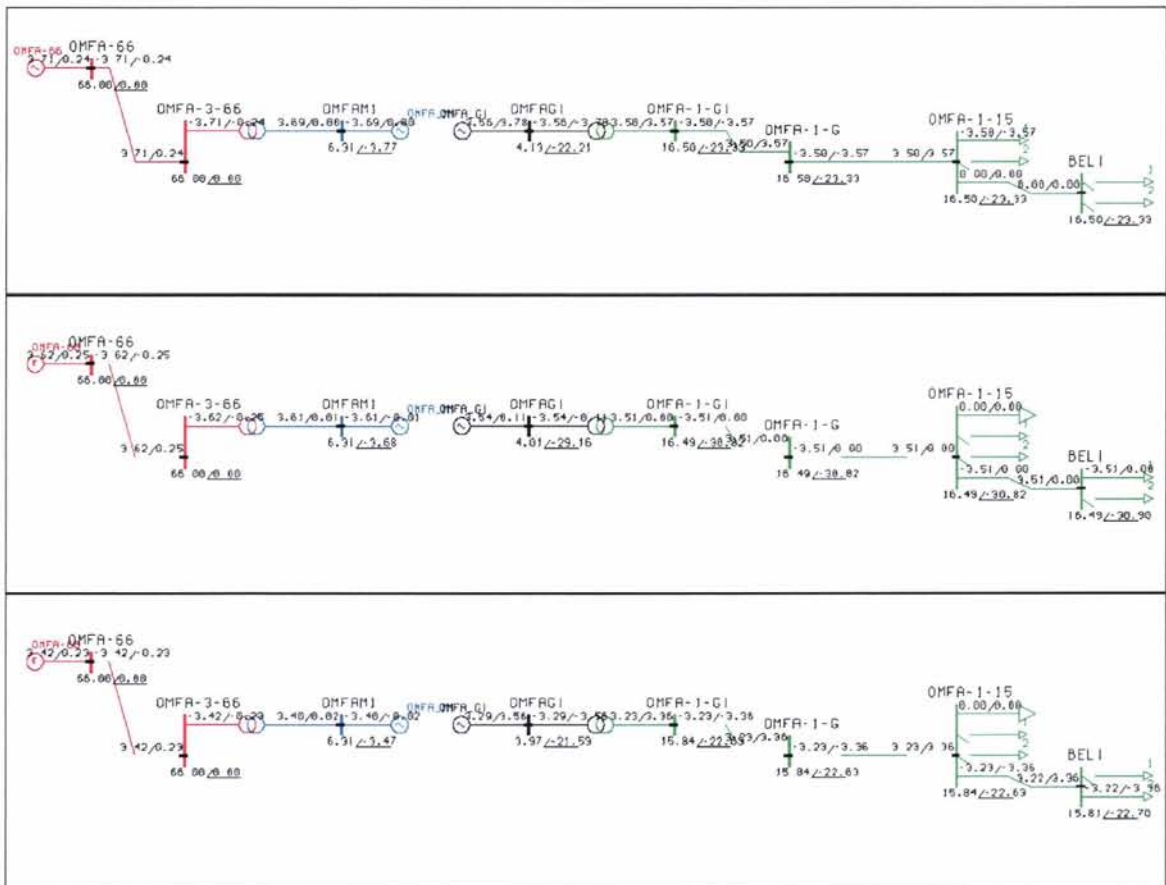


Figur 2 Vinkeldreining for et aggregat på 5,8 MVA når belastningen økes fra null til 10 MW og med $\cos \varphi$ på henholdsvis 1 og 0,7. Sort kurve er for last med kun aktiv effekt og rød for last med effekt faktoren $\cos \varphi = 0,7$.

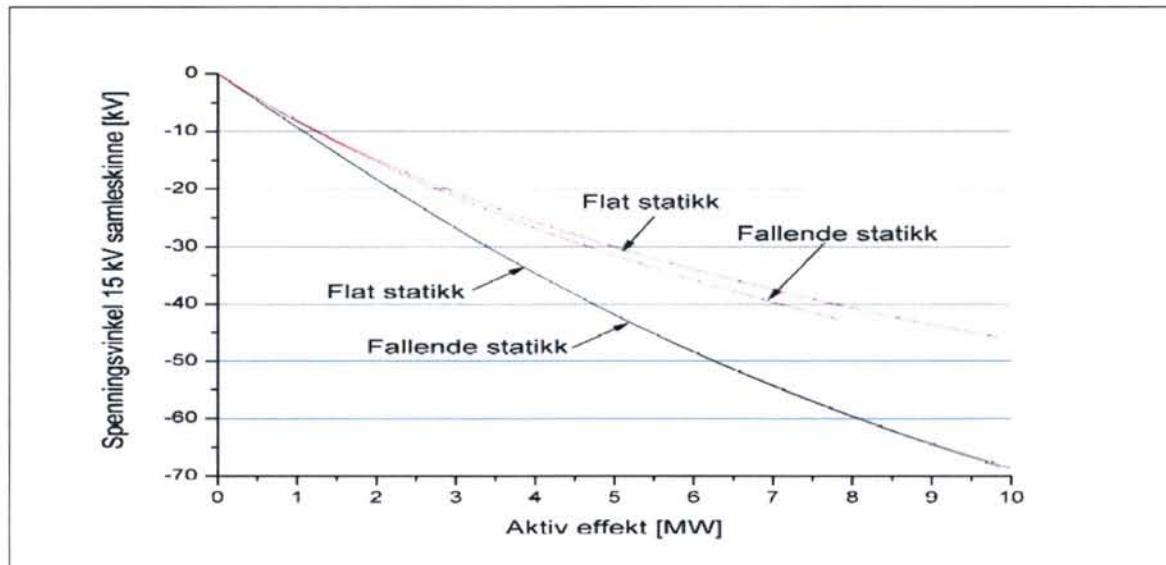
2.1.1.2 Vinkeldreining for 5,8 MVA roterende omformerstasjon med et ideelt stivt overliggende nett og fallende statikk

Nedenfor viser figur 3 grafisk fremstilling av en lastflyt for en 5,8 MVA roterende omformer når den trekker henholdsvis 0 MW (øverst), 3,5 MW når $\cos \varphi = 1,0$ (midten) og 3,5 MW når $\cos \varphi = 0,7$ (nederst). Statikken er i alle tilfeller fallende med 4 %. En observerer følgende fasevreining; ca $3,5^\circ$ på trefasetransformatorens sekundærside, og på generatorsiden med henholdsvis 29° for aktiv last og 21° for både aktiv og reaktiv last. Videre en vinkeldreining på ca 1° for enfasetransformatoren. Den største fasevinkelen er på $30,8^\circ$ og observeres på 15 kV-samleskinne når lasten her er kun aktiv. Mest vinkeldreining fåes ikke uventet over motor og generator der både polhjulsvinkel og effektfaktor for begge maskinene spiller inn.

Nedenfor er det i figur 2 vist fasevinkel som funksjon av en aktiv belastning, når omformer får en belastning som øker fra 1 til 10 MW. Rød kurve viser tilfellet med både aktiv og reaktiv effekt, mens sort kurve viser last med kun aktiv effekt. Som en ser er utslaget betydelig når lasten blir like stor som nominell ytelse eller større. Kurvene for flat statikk er også satt inn for sammenligningens skyld, og som en ser oppstår det en viss forskjell for blandet belastning.



Figur 3 Grafisk fremstilling av lastflyt for tilfellet med et roterende omformeraggregat på 5,8 MW med et uendelig stivt overliggende nett og fallende statikk på 4 % fra tomgang til fullast. Lastflyt i OPTPOW med last NO=1 (øverst), last (BEL1 NO=1) som kun trekker en aktiv last på 3,5 MW (midten) og en last som trekker 3,5 MW (BEL1 NO=2) ved $\cos \varphi = 0,7$ (nederst). Det er benyttet en last for referanse for motorens spenningsregulator med effekt 3,5 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motoren skal trekke 0 MVA. Motorens spenningsregulator har en fallende statikk.

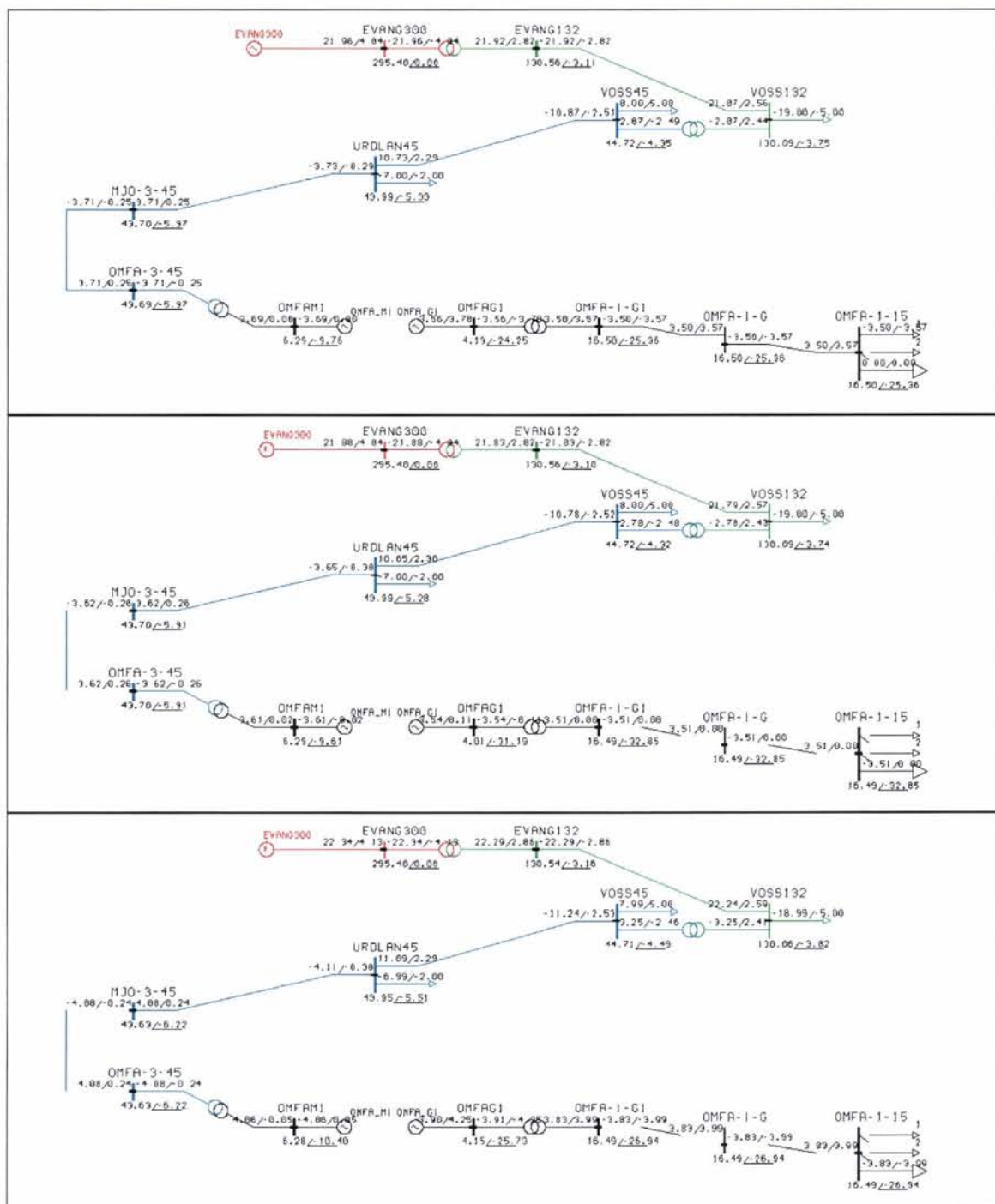


Figur 4 Vinkeldreining for et aggregat på 5,8 MVA når belastningen økes fra null til 10 MW med $\cos \varphi$ på henholdsvis 1 og 0,7. Sort kurve er for en last med kun aktiv effekt og rød kurve er for en last med $\cos \varphi = 0,7$. Det er satt inn kurver også for tilfellet med en flat statikk

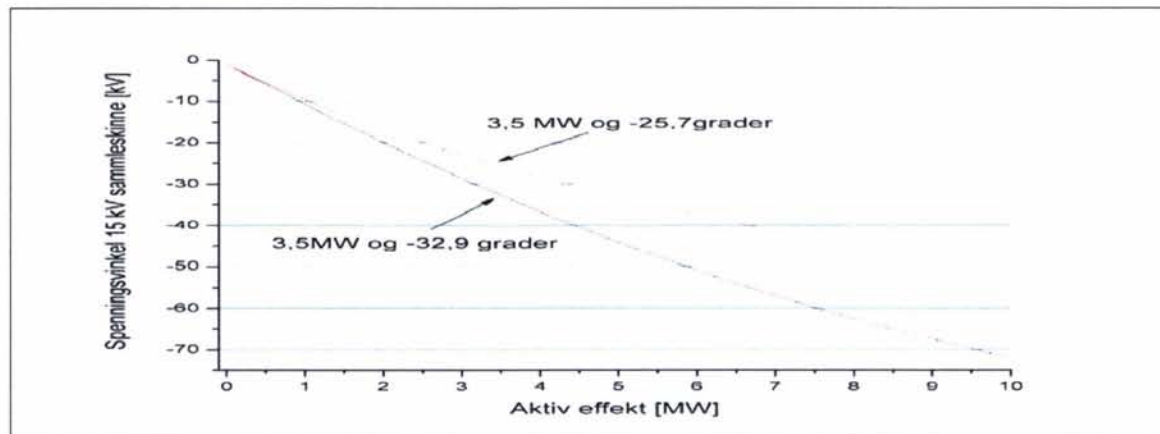
2.1.1.3 Vinkeldreining for 5,8 MVA roterende omformerstasjon og et svakt overliggende nett

Et svakt overliggende nett forventes å kunne gi store vridninger på fasevinkelen relativt til andre omformerstasjoner med sterkere overliggende nett. I figur 5 er det vist resultatet med en lastflyt med 3,5 MW aktiv (midterste bilde) og 3,5 MW med $\cos \varphi = 0,7$ (nederste bilde). Sammenlignes dette med resultatet fra lastflyt i et stivt nett, se figur 1, sees det at spennings vinkeldreining på 15 kV-siden er $1,9^\circ$ større. Dette er ikke mye, men en må tenke at fasevinkelen på generatorsiden vil være $1/3$ av vinkelen for motorens statorspenning, i tillegg til polhjulsvinkelen til både motor og generator (ved effektflyt fra motor til generator).

En forklaring kan være på sin plass. Ser en på det midterste bildet i figur 1 med et sterkt nett, og sammenligner med det midterste bildet i figur 5 for et svakt nett, ser en at vinkelen på transformatorens primærsiden blir henholdsvis 0° og $-5,9^\circ$, og på sekundærsiden er det henholdsvis $-3,7^\circ$ og $-9,6^\circ$ for et sterkt og svakt et nett (kun aktiv belastning). Nær halvparten av vinkeldreiningen i et svakt nett skyldes linjen og andre halvparten skyldes trefasetransformatoren. Videre ser en at vinkelen på generatorsiden er henholdsvis $-29,2^\circ$ og $-31,2^\circ$ for tilfellet med et sterkt og et svakt nett, en forskjell på 2° . Forskjellen på vinkelen på motorsiden var i de to tilfellene $5,9^\circ$ eller ca. 6° , og siden polhjulsvinkelen må være lik i de to tilfellene, konverteres 6° på trefasesiden til 2° på enfasesiden. I Figur 6 er det vist en vinkeldreining for 15 kV-samleskinne for et stort belastningsområde. Forskjeller i verdier for enlinjeskjemaet og diagrammet skyldes begrenset oppløsning på iterasjonen.



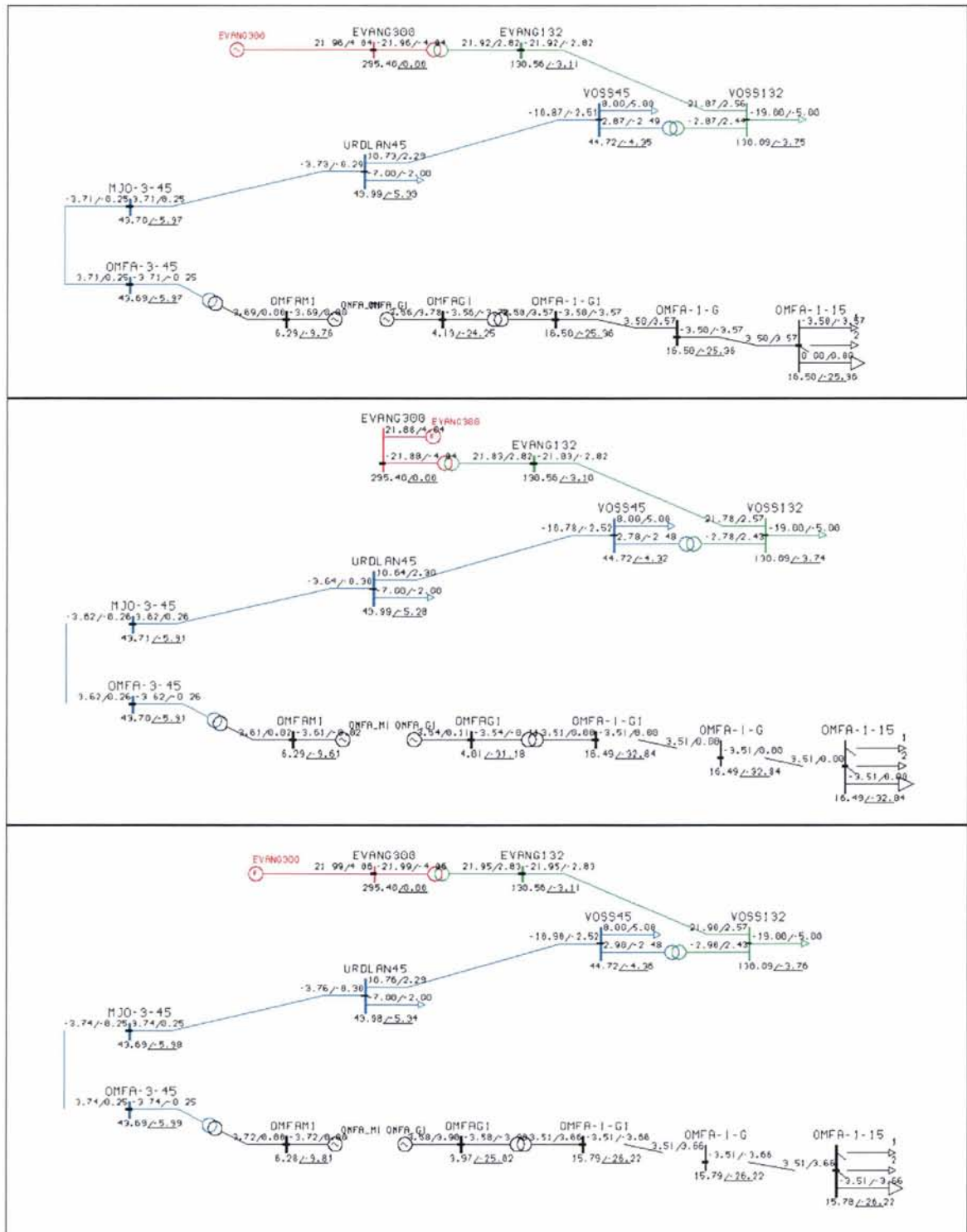
Figur 5 Grafisk fremstilling av lastflyten for et tilfelle med et roterende omformeraggregat på 5,8 MW med et svakt overliggende nett, der forsyningen fra Voss til Mjølfjell er brukt som eksempel. Lastflyten i OPTPOW med last NO=1 (øverst), en last (BEL1 NO=1) som kun trekker aktiv last 3,5 MW (midten), og en last som trekker 3,5 MW (BEL1 NO=2) ved $\cos \varphi = 0,7$ (nederst). Det er benyttet en last for referanse for motorens spenningsregulator med effekt 3,5 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar.



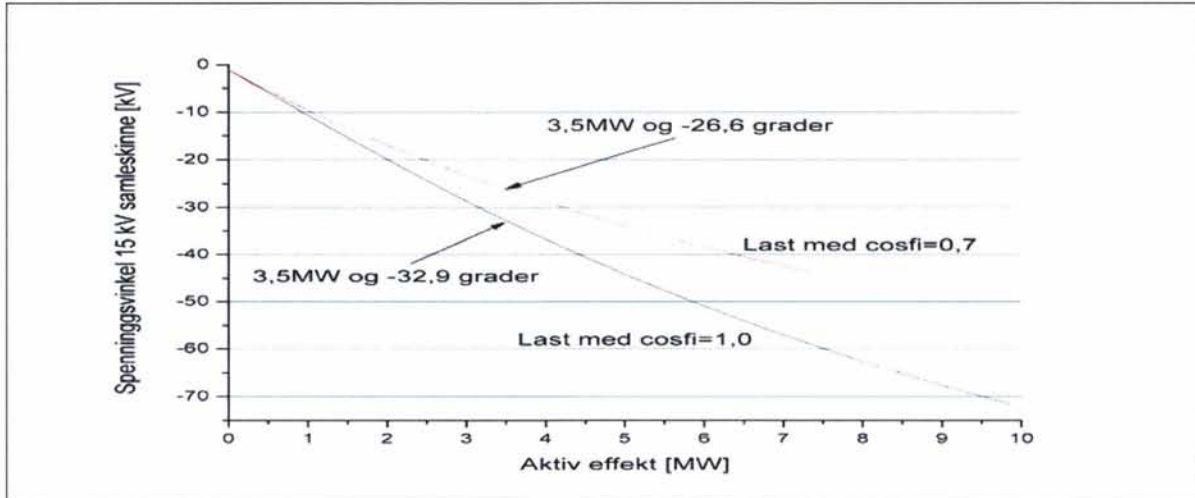
Figur 6 Vinkeldreining for aggregat på 5,8 MVA med svakt overliggende nett, når belastningen økes fra null til 10,0 MW med $\cos \varphi$ på henholdsvis 1,0 og 0,7. Den sorte streken er for last med kun aktiv belastning og den røde for last med $\cos \varphi = 0,7$.

2.1.1.4 Vinkeldreining for 5,8 MVA roterende omformerstasjon med fallende statikk og svakt overliggende nett

Med fallende statikk på 4 % ved fullast (nominell belastning og $\varphi = 70^\circ$ induktiv) og svakt overliggende nett oppstår det ingen endringer for tilfellet med ren aktiv belastning, se det midterste bildet i figur 7 og sammenlign med det midterste bildet i Figur 6. Med en reaktiv belastning og en flat statikk fåes en fasevinkel på $26,9^\circ$. Med fallende statikk blir vinkelen $26,2^\circ$. Dette gir en liten endring, og denne kan tilskrives en noe endret polhjulsinkel på grunn av en lavere magnetisering når spenningen reguleres ned. En stor endring blir det imidlertid for spenningen når lasten er reaktiv, og dette vil få betydning for lastfordelingen mellom flere omformerstasjoner. I figur 8 er fasevinkelen vist ved økende belastning når denne er kun aktiv (sort) og blandet (rød).



Figur 7 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med et roterende omformeraggregat på 5,8 MW med et svakt overliggende nett og en fallende statikk for spenningsregulatoren til generatoren. Lastflyten i OPTPOW med last NO=1 (øverst), en last (BEL1 NO=1) som kun trekker aktiv last 3,5 MW (midten), og en last som trekker 3,5 MW (BEL1 NO=2) ved $\cos \varphi = 0,7$ (nederst). Det er benyttet en last for referanse for motorens spenningsregulator med en effekt på 3,5 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar.



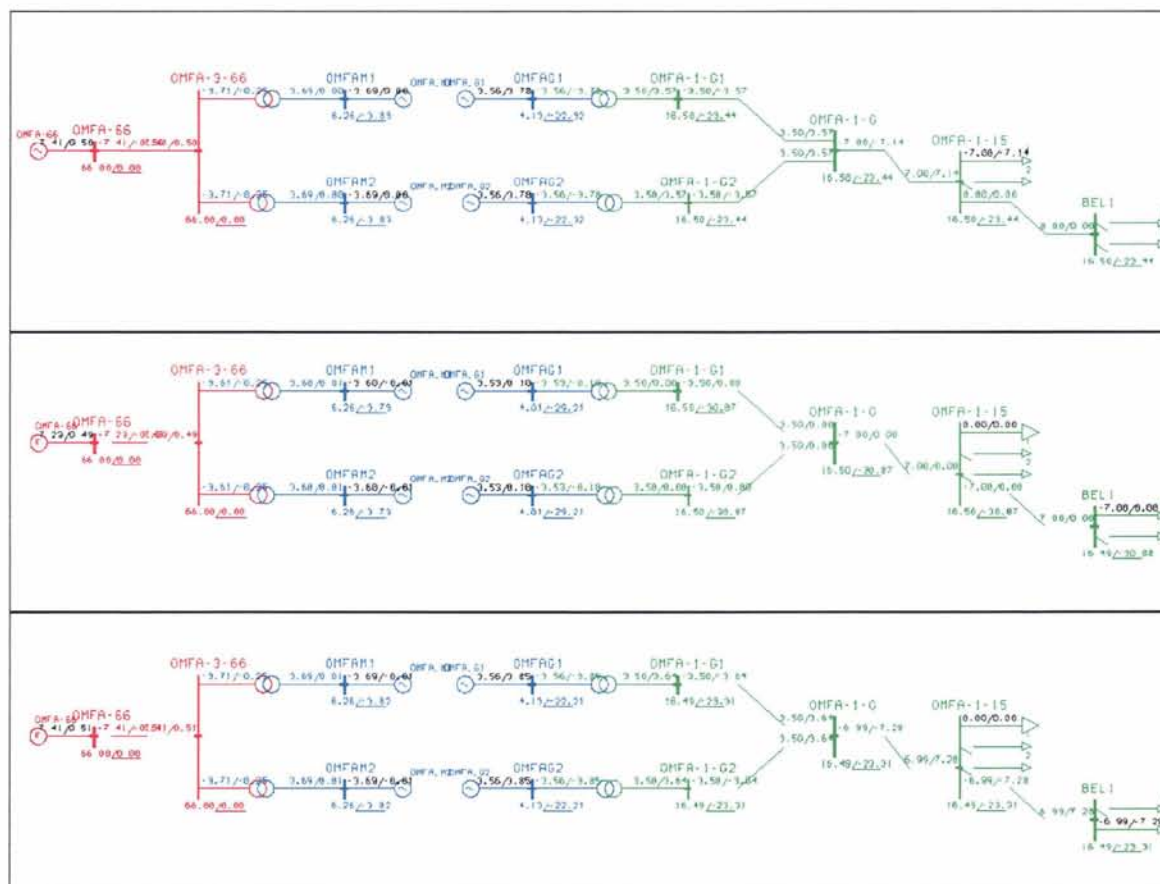
Figur 8 Vinkeldreiningen for et aggregat på 5,8 MVA med et svakt overliggende nett og en fallende statikk, når belastningen økes fra null til 10 MW med $\cos \varphi$ på henholdsvis 1,0 og 0,7. Den sorte kurven er for en last med kun aktiv effekt, og den røde kurven er for last med effektfaktor $\cos \varphi = 0,7$.

2.1.2 Vinkeldreining for 2 x 5,8 MVA roterende omformerstasjon

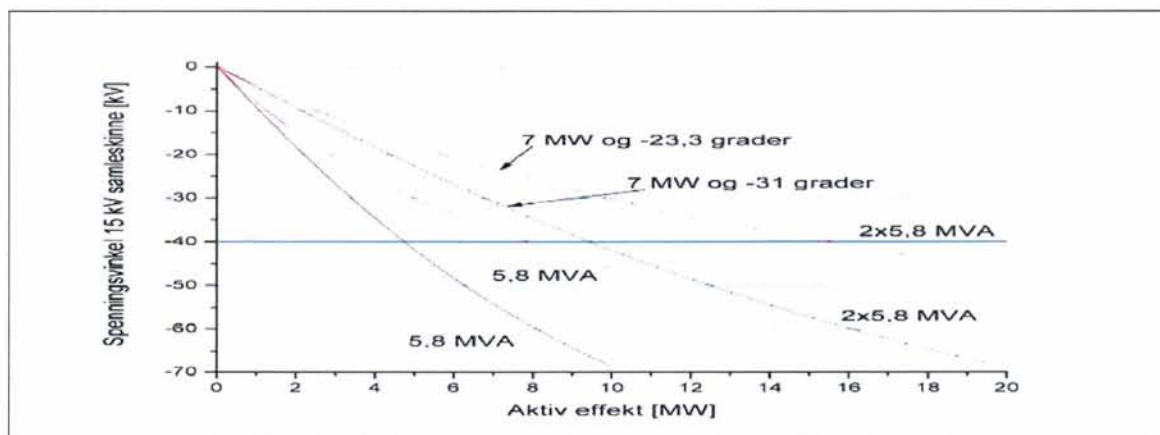
2.1.2.1 Vinkeldreining for 2 x 5,8 MVA roterende omformerstasjon med et ideelt stivt overliggende nett

Nedenfor i figur 10 sees spenninger og vinkelendringer med roterende aggregater på 5,8 MVA og et ideelt stivt nett. I det øverste bildet sees resultatene av initiell lastflyt i OPTPOW der lasten på 15 kV-siden er satt til 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$. Betingelsen er videre at motorene ikke skal produsere reaktiv effekt på samme måte som i tilfellene med ett aggregat. Sammenlignes dette med lastflyten med et stivt nett og ett aggregat i figur 1, ser en at endringen eller utslaget i fasevinkelen på 15 kV-siden nå er mye mindre.

I figur 10 er fasevinkelen for 15 kV-samleskinne og et stivt nett satt inn for tilfellet med både ett og to aggregater. At lasten i den initielle lastflyten er satt til forskjellige verdier, gjør at de to beregningene er direkte sammenlignbare uten at en behøver å tenke på spenningsreguleringen. Vridningen av fasevinkelen blir nå mye mindre siden det er to aggregater som deler på lasten.



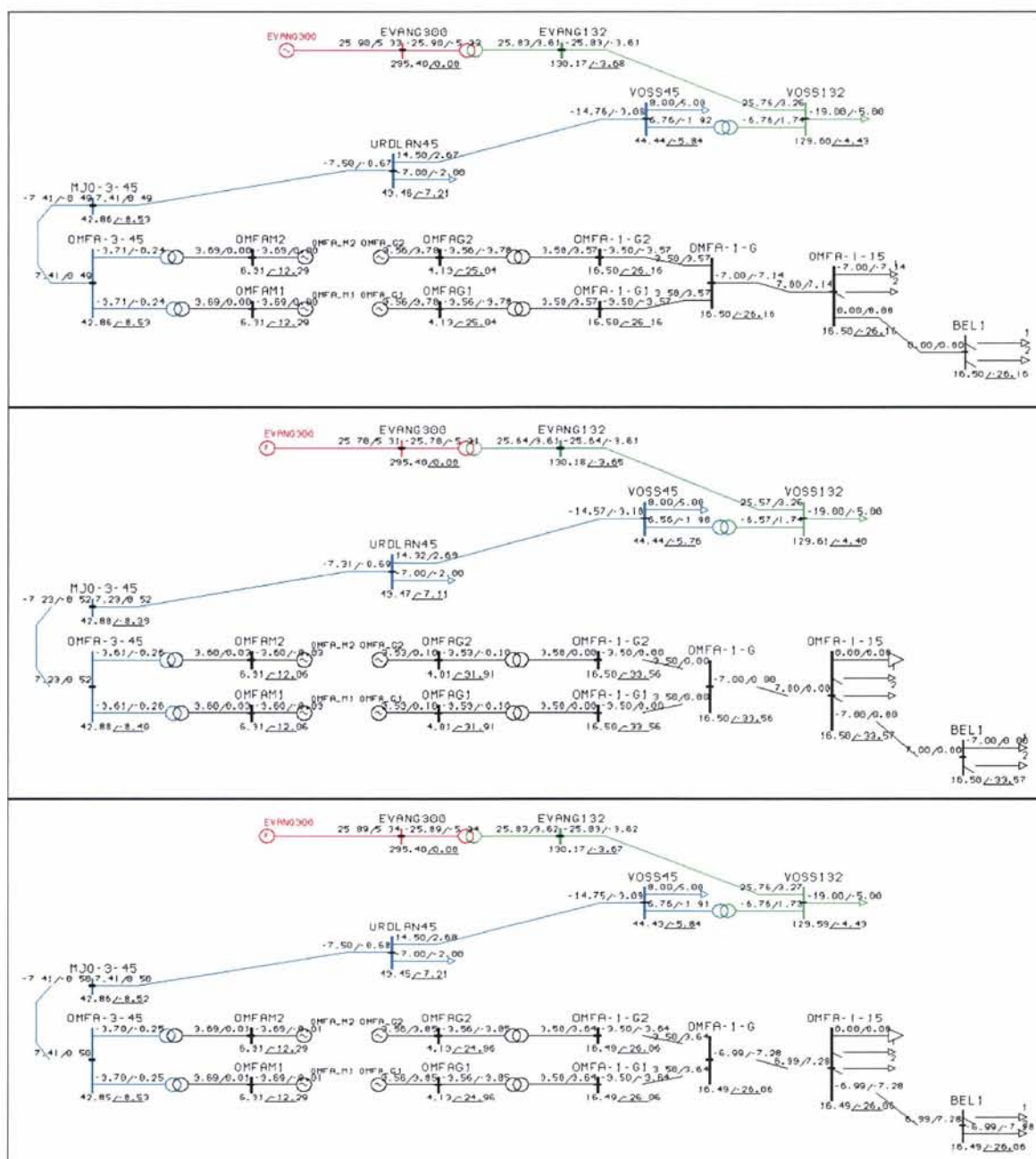
Figur 9 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to roterende omformeraggregat på 5,8 MW med et sterkt overliggende nett. Lastflyten i OPTPOW med last NO=1 (øverst), en last (BEL1 NO=1) som kun trekker aktiv last 7,0 MW (midten), og en last som trekker 7,0 MW (BEL1 NO=2) ved $\cos \varphi = 0,7$ (nederst). Det er benyttet en last for referanse for motorens spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar.



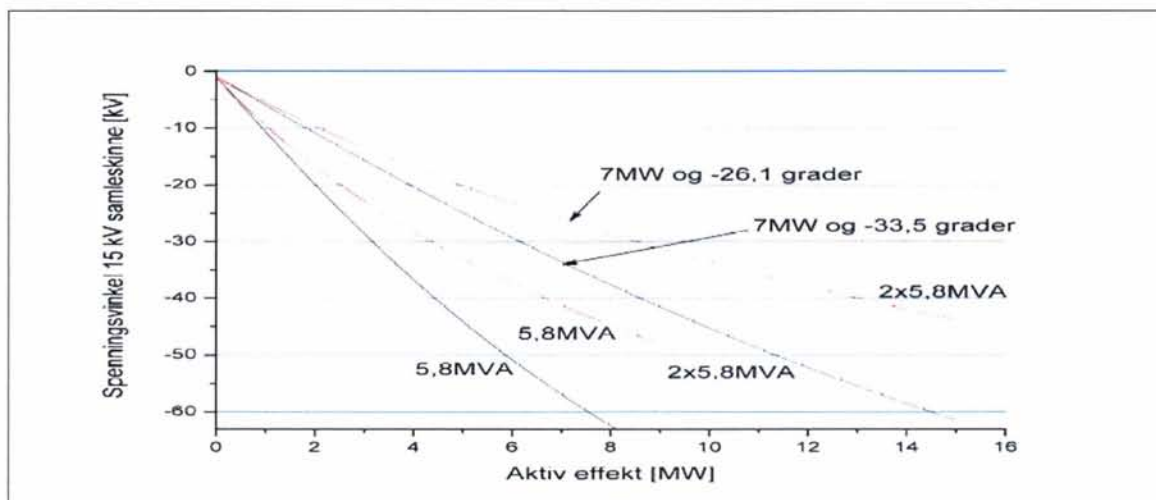
Figur 10 Vinkeldreining for to aggregater på 5,8 MVA med et sterkt overliggende nett, når belastningen økes fra null til 20 MW med $\cos \varphi$ på henholdsvis 1,0 og 0,7. Den sorte kurven er for en last med kun aktiv effekt, og den røde kurven er for last med effektfaktor $\cos \varphi = 1$. For sammenligning er det også satt inn resultatene fra tilfellet med kun ett aggregat.

2.1.2.2 Vinkeldreining for 2 x 5,8 MVA roterende omformerstasjon og et svakt overliggende nett

Med et svakt overliggende nett og to aggregater isteden for ett, fås mindre vridning av fasevinkelen, se det midterste og det nederste bildet i figur 11. For å sammenligne med den samme effekten viser figur 12 diagrammer for fasevinkelens vridning både med tilfellet med ett og med to aggregater. Med et effektuttak på 7 MW, rent aktivt eller både aktiv og reaktiv effekt, sees det at fasevinkelens vridning blir nesten det dobbelte.



Figur 11 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to roterende omformeraggregat på 5,8 MW med et svakt overliggende nett. Lastflyten i OPTPOW med last NO=1 (øverst), en last (BEL1 NO=1) som kun trekker aktiv last 7,0 MW (midten), og en last som trekker 7,0 MW (BEL1 NO=2) ved $\cos \phi = 0,7$ (nederst). Det er benyttet en last for referanse for motorens spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \phi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVAr.



Figur 12 Vinkeldreining for to aggregater på 5,8 MVA med et svakt overliggende nett, når belastningen økes fra null til 15 MW med $\cos \varphi$ på henholdsvis 1,0 og 0,7. Om lasten økes til 20 MW, vil spenningen i det overliggende nettet kollapse. Den sorte kurven er for last med kun aktiv effekt, og den røde kurven er for last med effektfaktor $\cos \varphi = 1$. For sammenligning er det også satt inn resultatene fra tilfellet med kun ett aggregat.

2.1.2.3 Vinkeldreining for 2 x 5,8 MVA roterende omformerstasjon med en fallende statikk og et svakt overliggende nett

I figur 13 er det vist lastflyten med aktiv effekt og $\cos \varphi = 1$ (midterste bilde) og $\cos \varphi = 0,7$ (nederste bilde). Som for tilfellet med en fallende statikk for spenningsregulatoren på generatoren og et svakt overliggende nett og ett aggregat, fåes det nå ingen endring av fasevinkelen med kun aktiv effekt, men en liten endring oppstår når det trekkes både aktiv og reaktiv effekt, se avsnitt 2.1.2.2. En sammenligning av spenningsvridningen med henholdsvis ett og to aggregater er vist i figur 13.

Nedenfor er vist formelen for spenningssenkningen som oppstår ut på 15 kV-samleskinne;

$$\Delta U = \Im(I_{station} \cdot X_{stationkomp} - I_{aggregat} \cdot X_{aggregat})$$

der;

$I_{station}$ er samlet strøm fra stasjonen

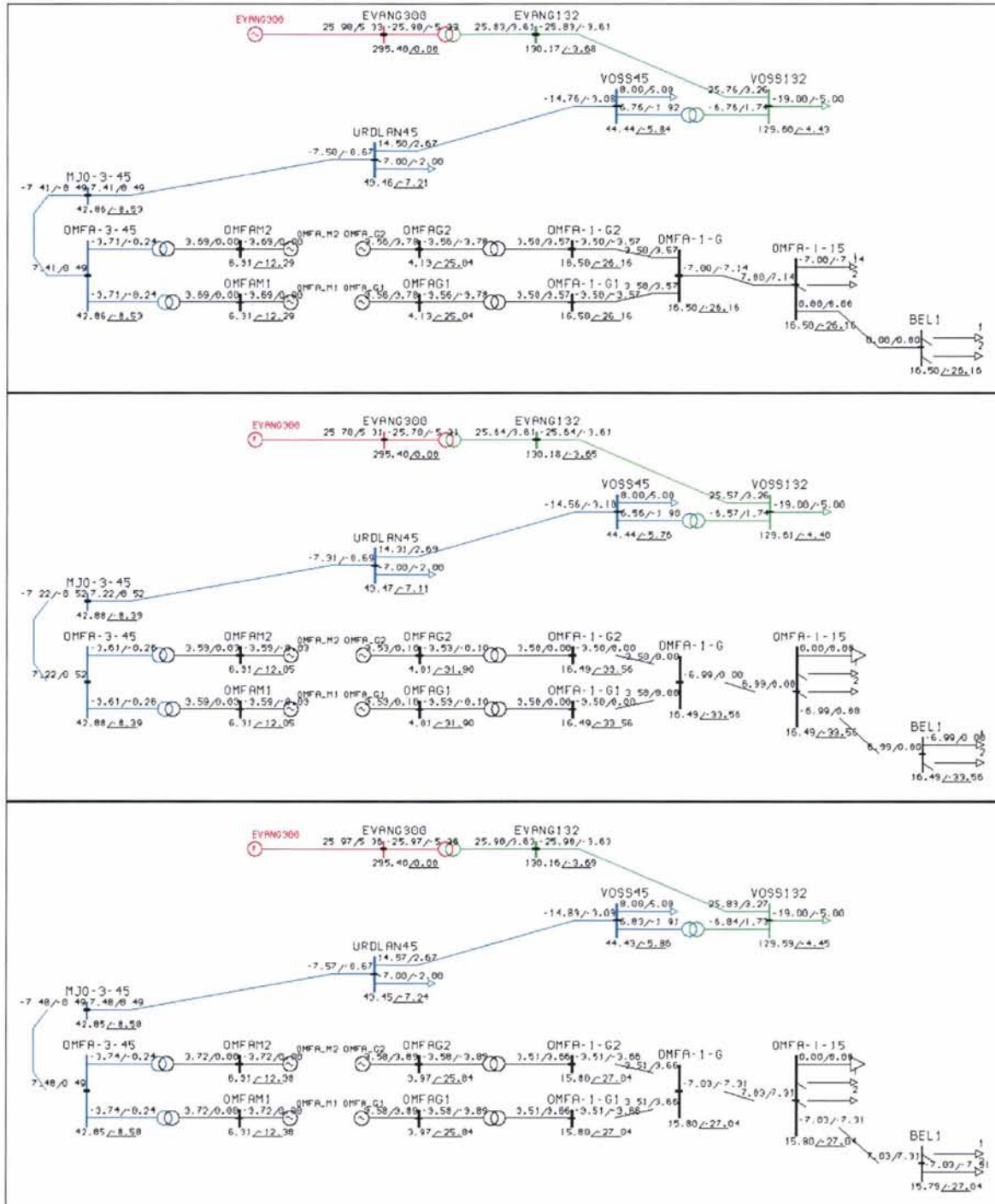
$I_{aggregat}$ er strømmen over ett aggregat

$X_{stationkomp}$ er statikken (eller stasjonskompenseringen) (her 0 eller 4 % for alle tilfeller)

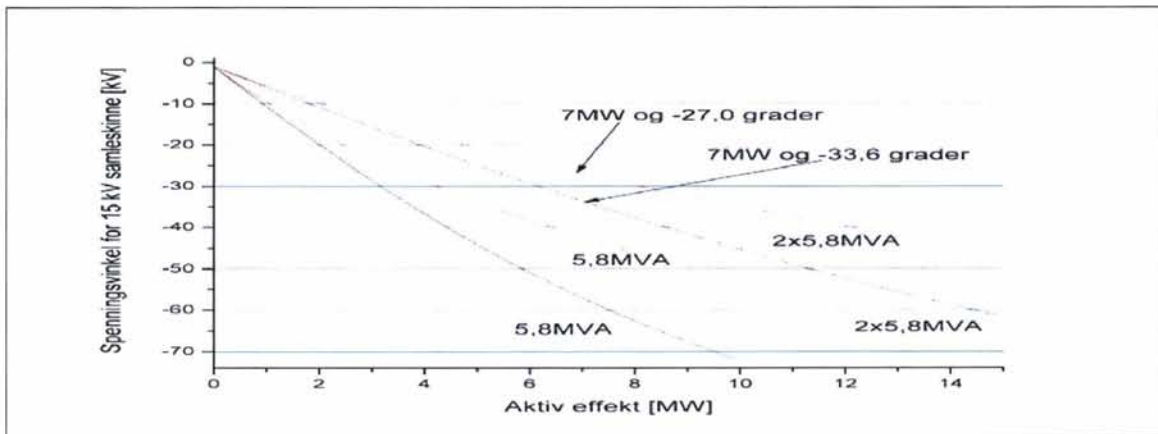
$X_{aggregat}$ er statikken (eller stabiliseringen) for hvert aggregat (her 5 % for alle simuleringer)

ΔU er spenningssenkningen som altså finnes av imaginærdelen av uttrykket i parentes.

Det gir en flat eller fallende statikk ved å velge $X_{stationkomp}$ til henholdsvis 0 eller 4 % i simuleringene som gjøres her. Se referanse [4] for gode forklaringer med hensyn til spenningsregulatorene i omformerstasjonene.



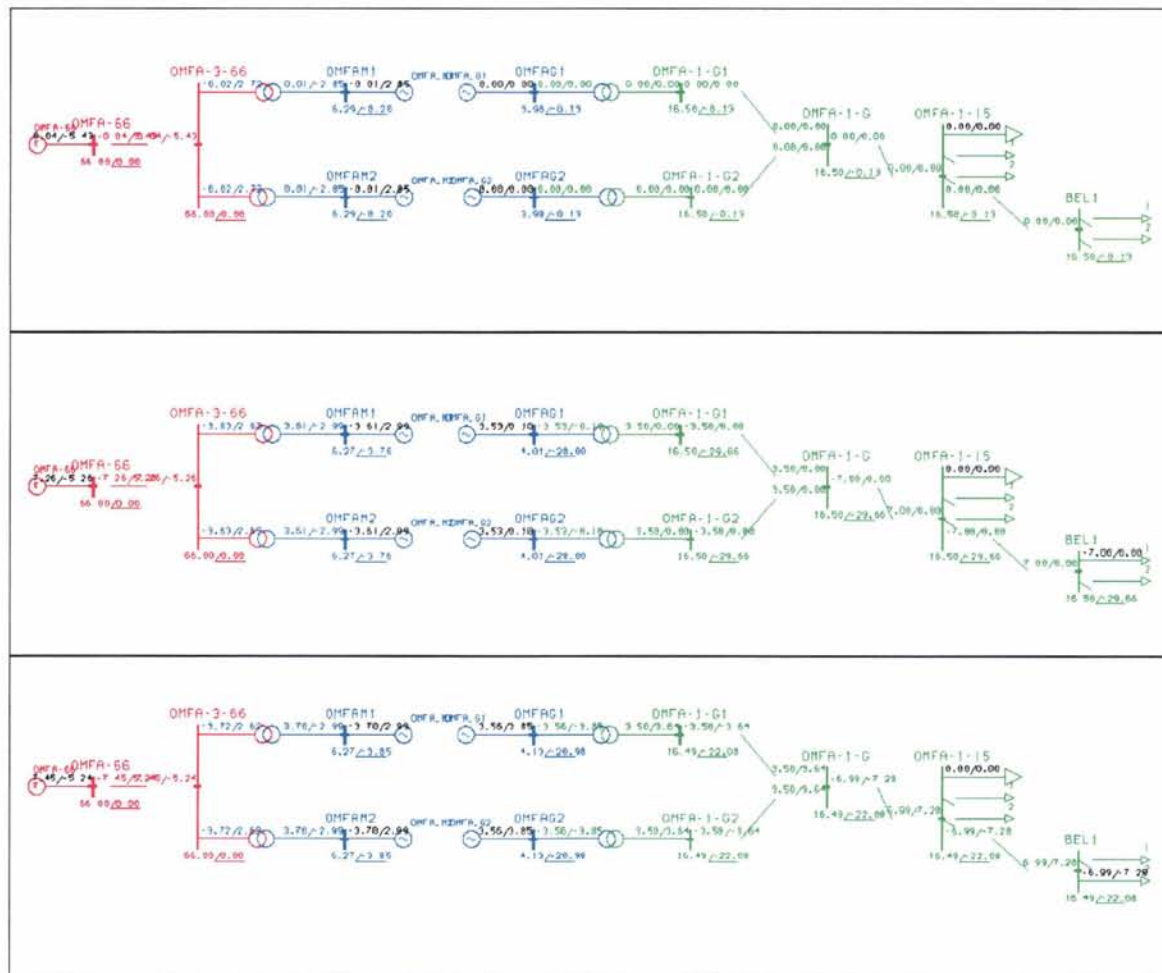
Figur 13 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to roterende omformeraggregat på 5,8 MW med et svakt overliggende nett og en fallende statikk for spenningsregulator for generatorene. Lastflyt i OPTPOW med last NO=1 (øverst), en last (BEL1 NO=1) som kun trekker aktiv last 7,0 MW (midten), og en last som trekker 7,0 MW (BEL1 NO=2) ved $\cos \varphi = 0,7$ (nederst). Det er benyttet en last for referanse for motorens spenningsregulator med en effekt på 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar.



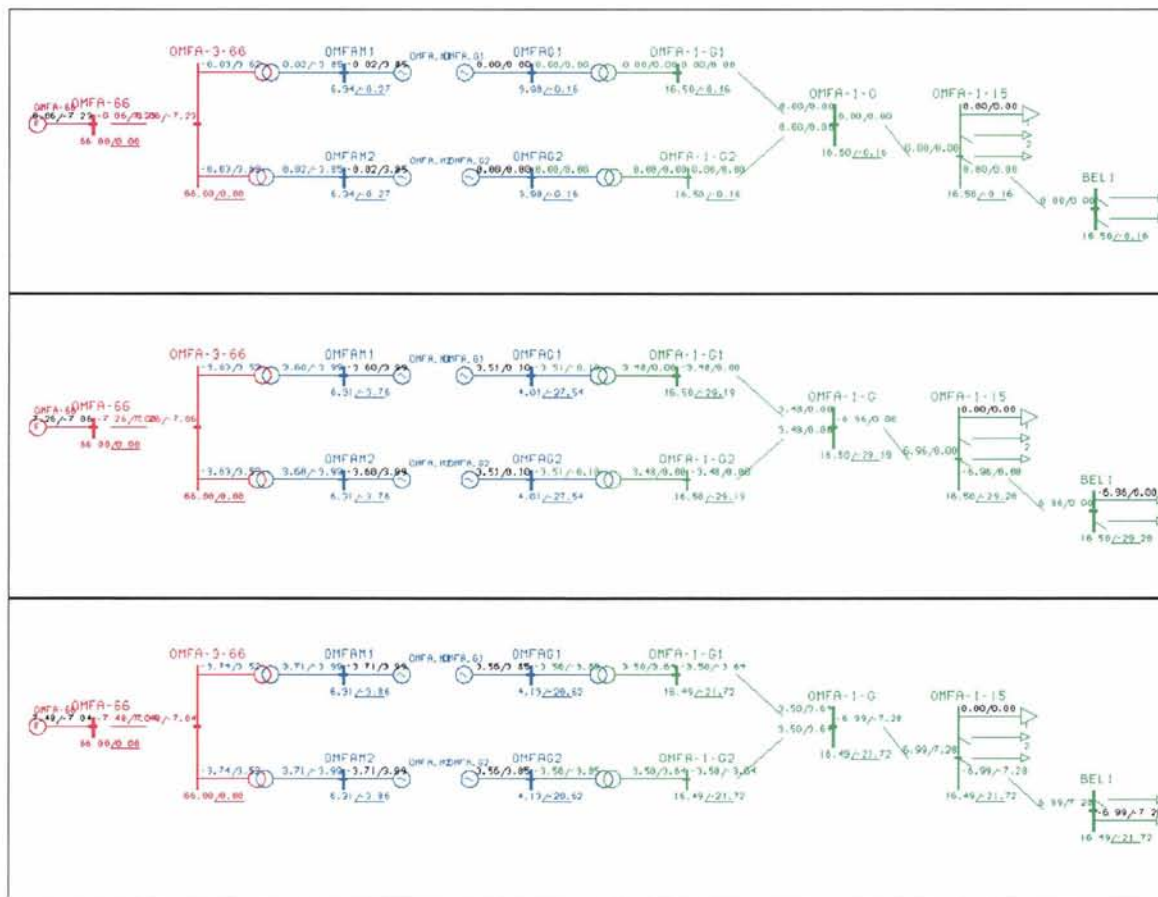
Figur 14 Vinkeldreining for to aggregater på 5,8 MVA med et svakt overliggende nett og en fallende statikk, når belastningen økes fra 0 til 15 MW med $\cos \varphi$ på henholdsvis 1,0 og 0,7. Den sorte kurven er for en last med kun aktiv effekt, og den røde kurven for enlast med effektfaktor $\cos \varphi = 1$. For sammenligning er det også satt inn resultatene fra tilfellet med kun ett aggregat.

2.1.2.4 Vinkeldreining for 2 x 5,8 MVA roterende omformerstasjon med overmagnetisering av motorene og et sterkt overliggende nett

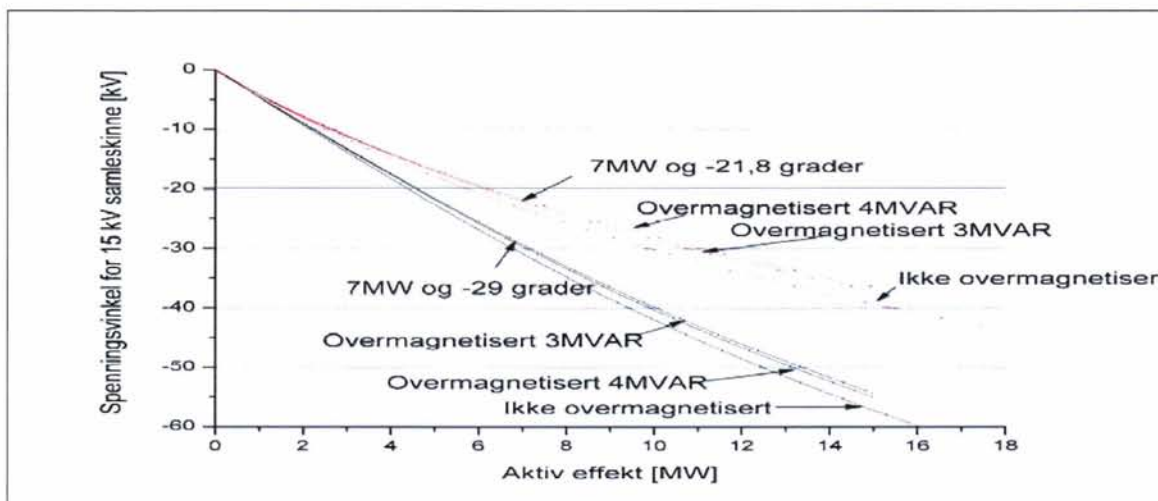
Overmagnetisering av motoren i roterende omformere har vært foreslått som en mulighet for å påvirke fasevinkelen på 15 kV-siden. I figur 15 er det vist at resultatet av dette for en belastning på 7,0 MW (midten) gir en fasevinkel på -29.66° og med belastning på 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ (nederst) blir fasevinkelen $22,8^\circ$, når begge motorene overmagnetiseres til å levere 3 MVA. Med å øke magnetiseringen ytterligere slik at motorene produserer 4 MVA, viser figur 16 at fasevinkelen for aktiv belastning blir $-29,2^\circ$ og for blandet belastning $-21,7^\circ$. Det er ikke særlig stor endring med økt reaktiv effektproduksjon på motorsiden. Diagrammet i figur 17 viser fasevinkelen som funksjon av aktiv effekt for disse tilfellene, og for sammenligningens skyld er også kurven for fasevinkel uten overmagnetisering av motorene vist.



Figur 15 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to roterende omformeraggregat på 5,8 MW med et sterkt overliggende nett. Lastflyten i OPTPOW med last NO=1 (øverst), en last (BEL1 NO=1) som kun trekker aktiv last 7,0 MW (midten), og en last som trekker 7,0 MW (BEL1 NO=2) ved $\cos \varphi = 0,7$ (nederst). Det er benyttet en last for referanse for motorens spenningsregulator med en effekt på 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 3,0 MVar.



Figur 16 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to roterende omformeraggregat på 5,8 MW med et sterkt overliggende nett. Lastflyten i OPTPOW med last NO=1 (øverst), en last (BEL1 NO=1) som kun trekker aktiv last 7,0 MW (midten), og en last som trekker 7,0 MW (BEL1 NO=2) ved $\cos \varphi = 0,7$ (nederst). Det er benyttet en last for referanse for motorens spenningsregulator med en effekt på 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 4,0 MVar.



Figur 17 Vinkeldreiningen for to aggregater på 5,8 MVA med et sterkt overliggende nett og en fallende statikk, når belastningen økes fra null til 15-18 MW med $\cos \varphi$ på henholdsvis 1,0 og 0,7 og overmagnetisering av motorene på 3 og 4 MVar for hver. Den sorte kurven er for en last med kun aktiv effekt, og den røde kurven er for en last med effektfaktor $\cos \varphi = 1$. For sammenligning er det også satt inn resultatene fra tilfellet uten overmagnetisering.

2.1.2.5 Vinkeldreining for 2 x 5,8 MVA roterende omformerstasjon med overmagnetisering av motorene og et svakt overliggende nett

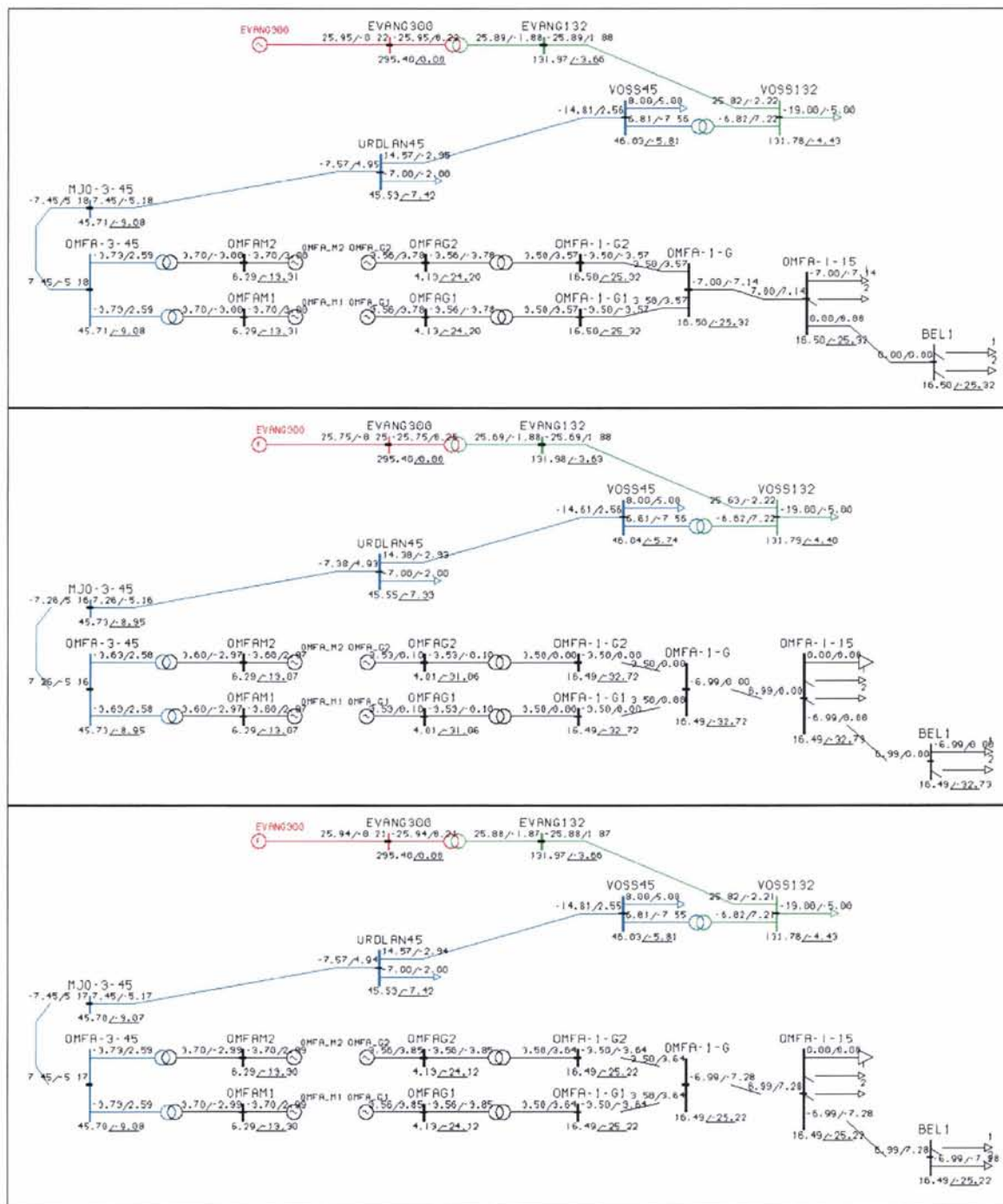
Overmagnetisering av motoren i roterende omformere forsøkes her i et svakt overliggende nett for å påvirke fasevinkelen på 15 kV-siden. Det svake nettet til Mjølfjell omformerstasjon er igjen benyttet som eksempel, og resultatet skal sammenlignes med avsnitt 2.1.2.2 under nær de samme forholdene, bare at motorene nå skal produsere minst mulig reaktiv effekt.

I det øverste bildet i figur 18 vises initialbetingelsene fra lastflyten der det leveres 6 MVAR reaktiv effekt fra motorene. I det midterste bildet viser resultatet når lasten er 7,0 MW, noe som gir en fasevinkel på 15 kV-siden på $32,7^\circ$. Tidligere simulering, uten reaktiv effektproduksjon fra motoren, gir en vinkel på $33,5^\circ$. I nederste bildet trekkes det samme effekt med $\cos \varphi = 0,7$, og vinkelen blir nå $25,2^\circ$ mens den tidligere var $26,2^\circ$.

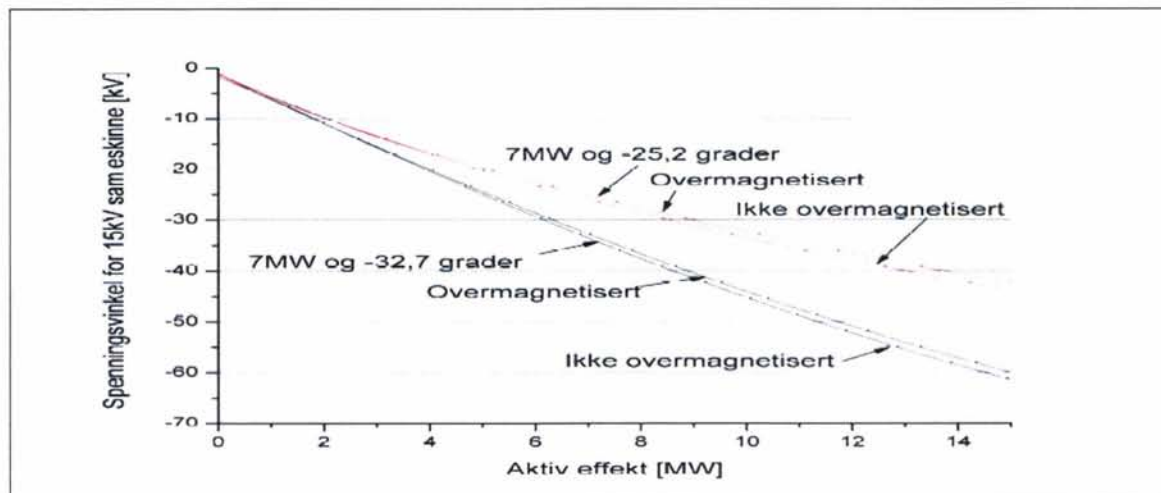
En kan se at fasevinkelen på 45 kV-siden ble forandret fra ca $8,5^\circ$ til ca 9° , noe som ikke er særlig mye. Imidlertid sees det at spenningen her ble en del høyere (noe som skyldes at linjens reaktive spenningsfall kompenseres induktivt). Mye av vridningen skyldes polhjulsvinkelen på aggregatene (motoren) der vinkelen ble ca. 1° mindre for tilfellet med kun aktiv last og ca. 2° for blandet belastning. Dette skjer selv om trefasetransformatoren fikk en dreining av fasevinkelen i motsatt retning på ca 1° når det nå går stor reaktiv effekt over den. Imidlertid deles denne vinkelen på tre når den konverteres til enfasesiden. Figur 19 viser sammenhengen mellom fasevinkelen og et aktivt effektuttak ved overmagnetisering av motorene, og til sammenligning er det samme resultatet uten overmagnetisering. Forskjellen er ikke stor, men det kan være interessant å vurdere overmagnetisering der en ser problemer med lastfordelingen. Ulempen med dette er større tap med en stor reaktiv effektproduksjon i motoren, men det kan likevel vise seg å være gunstigere enn kostnaden av tapene skulle tilsi. Dette vil være en optimalisering av tapene på grunn av ugunstig lastfordeling på enfasesiden på den ene siden og noe økt tap i motoren og transformatoren på trefasesiden.

Det er interessant å sammenligne dette med tilfelle med et sterkt nett, og i figur 20 er kurvene for både et svakt og et sterkt nett satt inn, med og uten overmagnetisering. Det er muligheter for å endre fasevinkelen, men variasjonen er redusert.

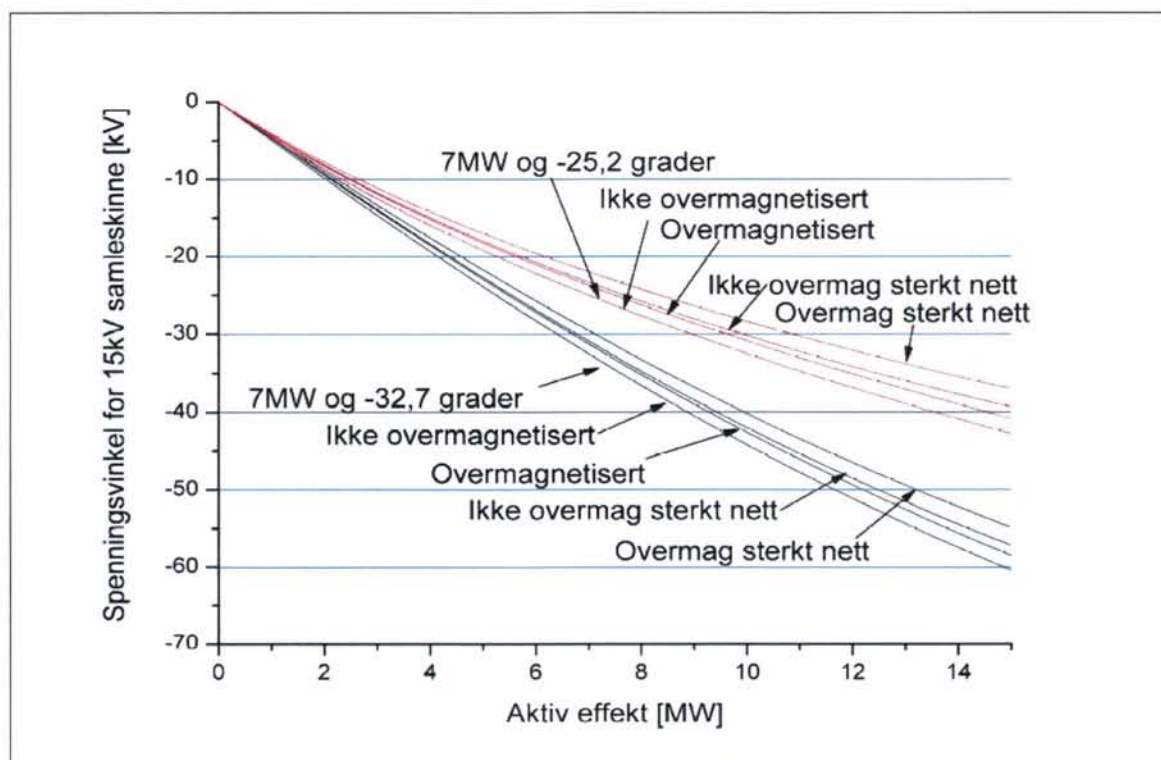
Trinningen av trefasetransformatoren kan også ha en viss betydning, og i figur 21 er det vist et tilfelle med overmagnetiserte motorer og høy spenning på motoren (ikke trinnet ned transformatoren), og som en ser er vinkeldreiningen for spenningen nå ca 1° mindre enn for tilfellet med normal motorspenning.



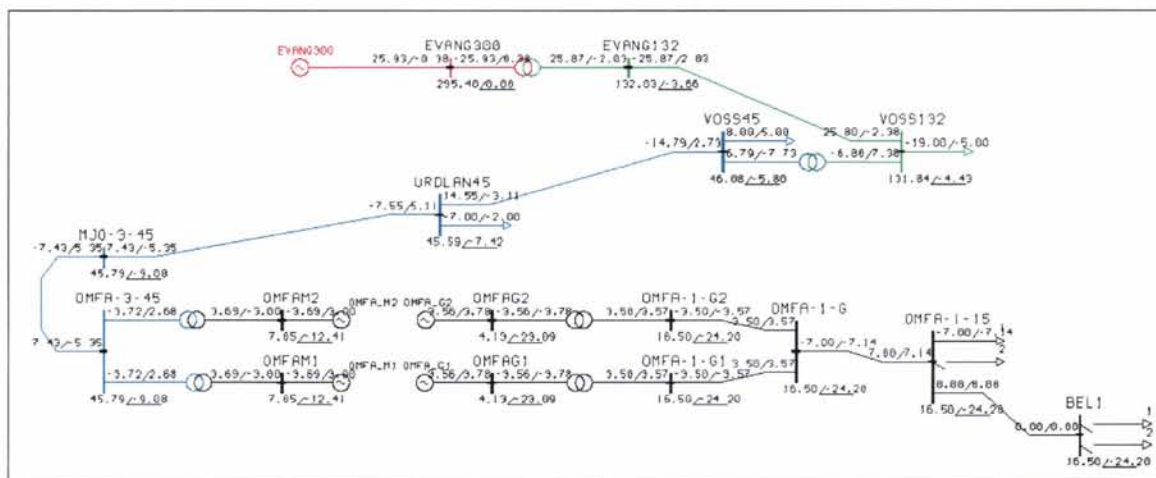
Figur 18 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to roterende omformeraggregat på 5,8 MW med et svakt overliggende nett og overmagnetisering av motorene. Lastflyten i OPTPOW med last NO=1 (øverst), en last (BEL1 NO=1) som kun trekker aktiv last 7,0 MW (midten), og en last som trekker 7,0 MW (BEL1 NO=2) ved $\cos \varphi = 0,7$ (nederst). Det er benyttet en last for referanse for motorens spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 3 MVar hver.



Figur 19 Vinkeldreining for to aggregater på 5,8 MVA med et svakt overliggende nett og en fallende statikk, når belastningen økes fra null til 15 MW med $\cos \varphi$ på henholdsvis 1,0 og 0,7 og overmagnetisering av motorene for 3,0 MVAR på hver. Den sorte kurven er for en last med kun aktiv effekt, og den røde kurven er for enlast med effektfaktor $\cos \varphi = 1$. For sammenligning er det også satt inn resultatene fra tilfellet uten overmagnetisering.



Figur 20 Vinkeldreiningen for to aggregater på 5,8 MVA med både et svakt og et sterkt overliggende nett når belastningen økes fra 0 til 15 MW med $\cos \varphi$ på henholdsvis 1,0 og 0,7. Med og uten overmagnetisering av motorene på 3,0 MVAR for hver. Den sorte kurven er for en last med kun aktiv effekt, og den røde kurven er for en last med effektfaktor $\cos \varphi = 1$. For tilfellet med et svakt nett er den lastuavhengige vinkelen satt til null for å få mest mulig lik sammenligning.



Figur 21 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to roterende omformeraggregater på 5,8 MW med et svakt overliggende nett og overmagnetisering av motorene, men der transformatorene for motorene er trinnet for høy spenning. Det er benyttet en last for referanse for motorens spenningsregulator med en effekt på 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 3 MVar hver.

2.1.2.6 Vinkeldreining for 2 x 5,8 MVA roterende omformerstasjon med utfall av ett aggregat under drift og et svakt overliggende nett

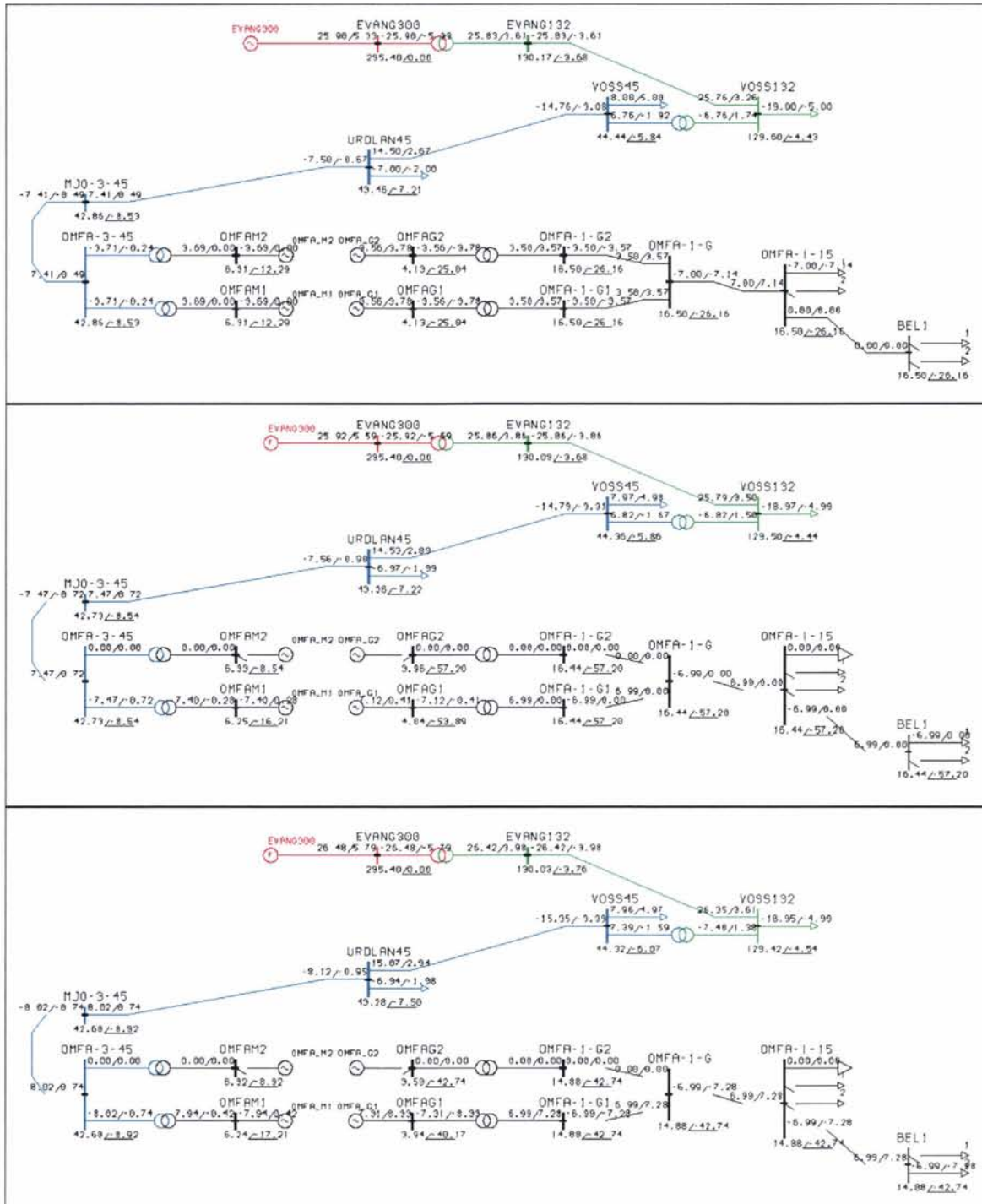
Når en omformerstasjon med to aggregater og en flat statikk, mister ett aggregat, er resultatet at det oppstår en fallende statikk på 15 kV-samleskinne. Her skal det undersøkes hvorledes spenningen og vinkelen endres når dette skjer. Øverst i figur 22 er det som vanlig vist lastflyten fra OPTPOW, mens det midterste bildet viser aktiv belastning og utfall av ett aggregat, noe som gir en fasevinkel på $57,2^\circ$. For tilfellet med aktiv last og $\cos \varphi = 0,7$ blir vridningen $42,7^\circ$, men her er spenningen også blitt mye lavere. Dette gjør sitt til at ved utfall av ett aggregat vil mye av lasten overføres til nabostasjoner, og en kan derved unngå overbelastning av det gjenværende aggregatet.

I figur 23 er det vist fasevinkelens vridning som funksjon av belastningen, med begge aggregater inne og med utfall av ett. Det er også sett på fasevinkelen for ett aggregat alene og innstilling av spenningsregulatoren for stasjoner med bare ett aggregat. Det gir en viss forskjell ved aktiv og reaktiv belastning, men for kun aktiv belastning er forskjellen minimal.

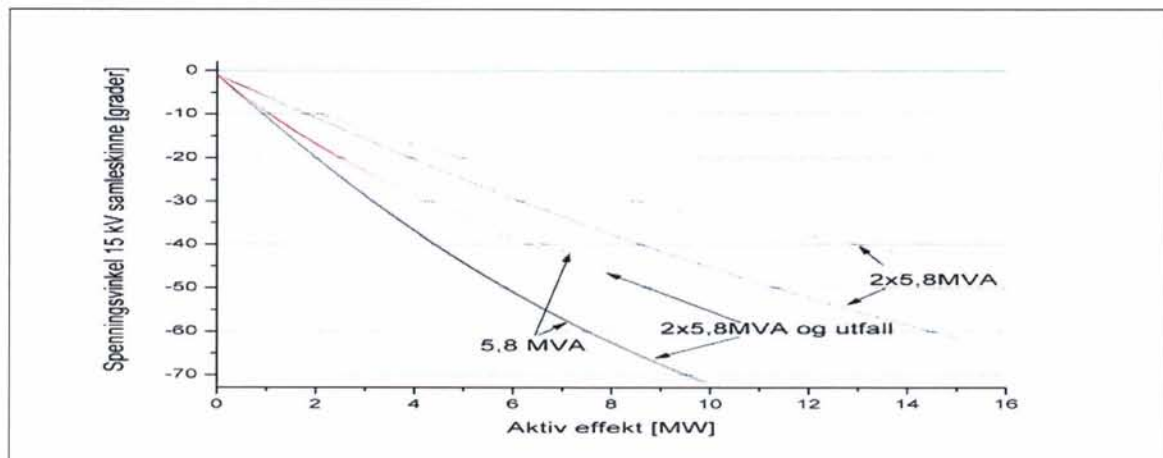
Spenningen som oppstår ved utfall av ett av to aggregater kan være interessant å undersøke, og i figur 24 er dette illustrert. Som en ser er spenningen lite påvirket av kun aktiv effekt, men når denne er blandet med $\cos \varphi = 0,7$ gir det et meget stort spenningsfall med økende last. Dette er mye større spenningsfall enn om stasjonene hadde vært utstyrt med bare ett aggregat i utgangspunktet og spenningsregulatoren var innstilt for dette. Se formelen i avsnitt 2.1.2.3 som i et slikt tilfelle med en flat statikk, vil kunne oppnå dette ved å la $X_{stationkomp}$ og $X_{aggregat}$ være 0.

Med utfall av ett av to aggregater som her, og en reaktiv belastning halvparten av nominell ytelse blir formelen, se også [5]:

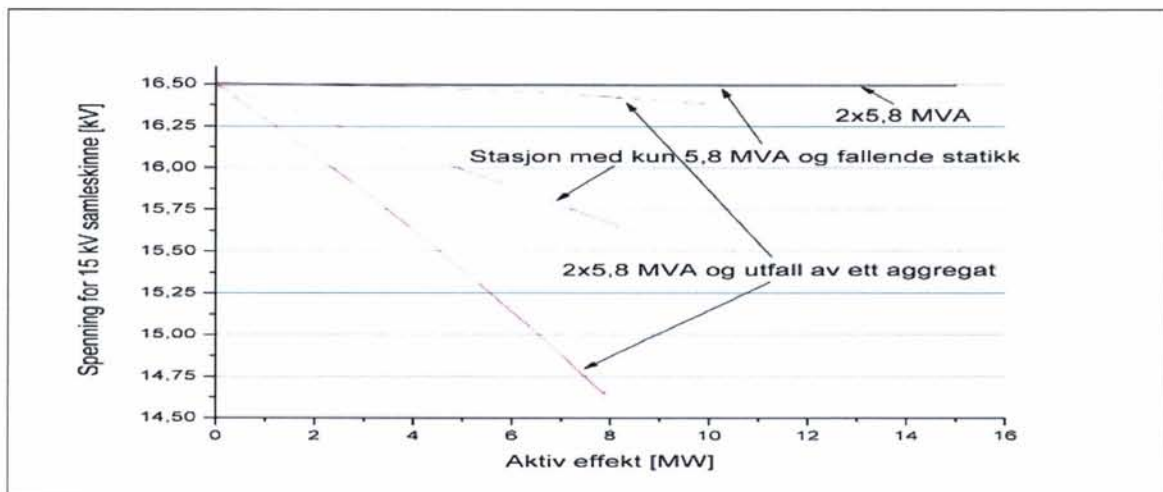
$$\Delta U = 0,5 \cdot (0,5 \cdot X_{stationkomp} - X_{aggregat})$$



Figur 22 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to roterende omformeraggregat på 5,8 MW med et svakt overliggende nett der ett aggregat faller ut. Tomgang (øverst) der begge aggregatene er innkoblet, last (BEL1 NO=1) som kun trekker en aktiv last 7,0 MW (midten), og en last som trekker 7,0 MW (BEL1 NO=2) ved $\cos \varphi = 0,7$ (nederst). Det er benyttet en last for referanse for motorens spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motoren skal trekke 0 MVar hver.



Figur 23 Vinkeldreining for to aggregater på 5,8 MVA der ett av dem faller ut og et svakt overliggende nett, når belastningen økes fra null til 15 MW med $\cos \varphi$ på henholdsvis 1,0 og 0,7. Den sorte kurven er for en last med kun aktiv effekt, og den røde kurven er for en last med effektfaktor $\cos \varphi = 1$. For sammenligning er det også satt inn resultatene fra tilfellet med kun ett aggregat og tilfellet uten utfall.



Figur 24 Spenningen for to aggregater på 5,8 MVA der ett av dem faller ut og et svakt overliggende nett, når belastningen økes fra null til 15 MW med $\cos \varphi$ på henholdsvis 1,0 og 0,7. Den sorte kurven er for en last med kun aktiv effekt, og den røde kurven er for en last med effektfaktor $\cos \varphi = 0,7$. For sammenligning er det også satt inn resultatene fra tilfellet med kun ett aggregat og en fallende statikk, dessuten også tilfellet uten utfall (med tekst "2 x 5,8 MVA").

2.1.3 Oppsummering etter undersøkelser med en omformerstasjon

Følgende forhold er observert:

- Med belastning av ett eller to roterende aggregater (som i jernbanens omformerstasjoner) fåes en økende dreining av fasevinkelen med økende belastning. Denne vridningen er størst med en rent aktiv belastning.
- Det oppstår en vinkeldreining både over transformatorene og omformereren, men denne er klart størst over omformereren (polhjuls vinklene i motor og generator).
- Med et svakt overliggende nett fåes en ytterligere dreining av fasevinkelen, der en del er konstant og en del er lastavhengig.
- Med en fallende statikk for omformerstasjonens 15 kV-samleskinne reduseres spenningen med økende reaktiv belastning, men fasevinkelen er lite påvirket.

- Overmagnetisering av motoren har en viss betydning for fasevinkelens vridning, omtrent 1° på 15 kV-siden med en belastning på 7 MW, og der motorene leverer til sammen 6 MVAR i en stasjon med 2 x 5,8 MVA aggregater.
- Om det overliggende nettet er svakt, og motorene overmagnetiseres (3 MVAR for hvert 5,8 MVA aggregat), fås en noe mindre vridning av fasevinkelen. Det er ikke særlig forskjell på et svakt eller et sterkt nett, og vridningen er i underkant av 2° for 7,0 MW.
- I en stasjon med utfall av det ene av to aggregater fås en enda større vridning av fasevinkelen enn for en stasjon med bare ett aggregat som har spenningsregulator innstilt for dette. Normalt innstilles spenningsregulatoren forskjellig avhengig av om omformerstasjonen er utstyrt med ett eller to aggregater. I tillegg vil det også bli en redusert spenning i det tilfellet der det er utfall av ett av de to aggregatene.

Årsaken til en større vridning av fasevinkelen med en aktiv belastning kan forklares ved at den aktive strømmen, som ligger i fase med klemmespenningen, gjør at spenningsfallet over synkronreaktansen står vinklerett på klemmespenningen. Denne fasevinkelen er det samme som polhjulsvinkelen. Dermed blir polhjulsvinkelen størst for en rent aktiv belastning. En endret feltmagnetisering kan endre på disse forholdene mellom spenninger og vinkler, men da vil også klemmespenningen og den reaktive effektproduksjonen endres (noe som ikke kan tillates ut på kl-anlegget). Fasevridningen over transformatorene skulle en kanskje tro spilte en større rolle og var avhengig av forholdet aktiv og reaktiv effekt, men det ser ikke ut til å være tilfelle. En mulig årsak kan være fasedreiningen over generatorens synkronreaktans.

2.2 Undersøkelser for tilfelle med omformerstasjoner på en matestrekning

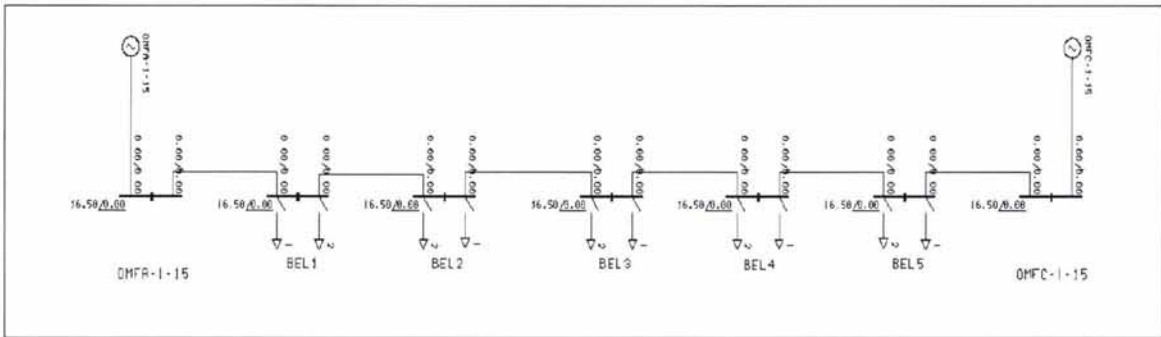
Undersøkelser gjøres på en strekning på 80 km med typiske omformerbestykning i stasjonene på 2 x 5,8 MVA roterende aggregater. Lasten som settes inn, er på 7 MW, noe som omtrent tilsvarer maksimaluttaket for et lokomotiv (for eksempel E116). Omformerstasjonens spenningsregulator for motorene initialiseres for denne effekten når det er 2 x 5,8 MVA aggregater, og for 3,5 MW når det er ett aggregat på 5,8 MVA.

2.2.1 Undersøkelser for en matestrekning på 80 km

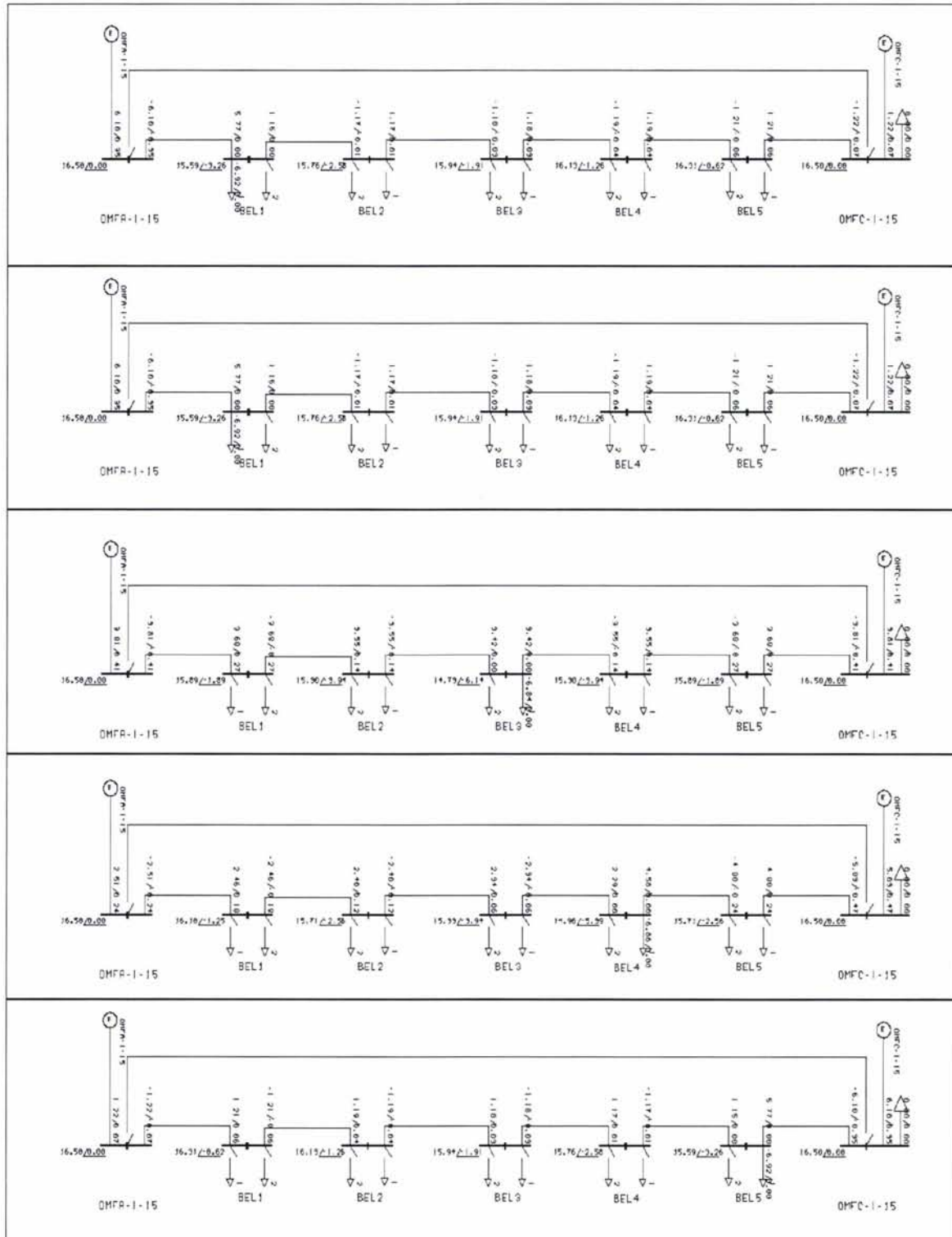
2.2.1.1 Forsøk med en matestrekning med en stiv spenningskilde i stedet for roterende omformere

Det kan være interessant å se på lastflyten og spenningene når omformerstasjonene erstattes av stive spenningskilder. I figur 26 og figur 27 er dette undersøkt for belastninger som overføres over en 80 km lang matestrekning. Det er fem belastninger som er benevnt BEL1, BEL2 osv., og til hver av dem er det en last som trekker kun aktiv effekt ($\text{NO}=1$), eller en som trekker aktiv effekt med $\cos \varphi = 0,7$. Det er lik avstand mellom lastene på 13,3 km, og med stive spenningskilder kan en se at lastfordelingen mellom omformerstasjonene er den samme som prosentvis avstand mellom dem.

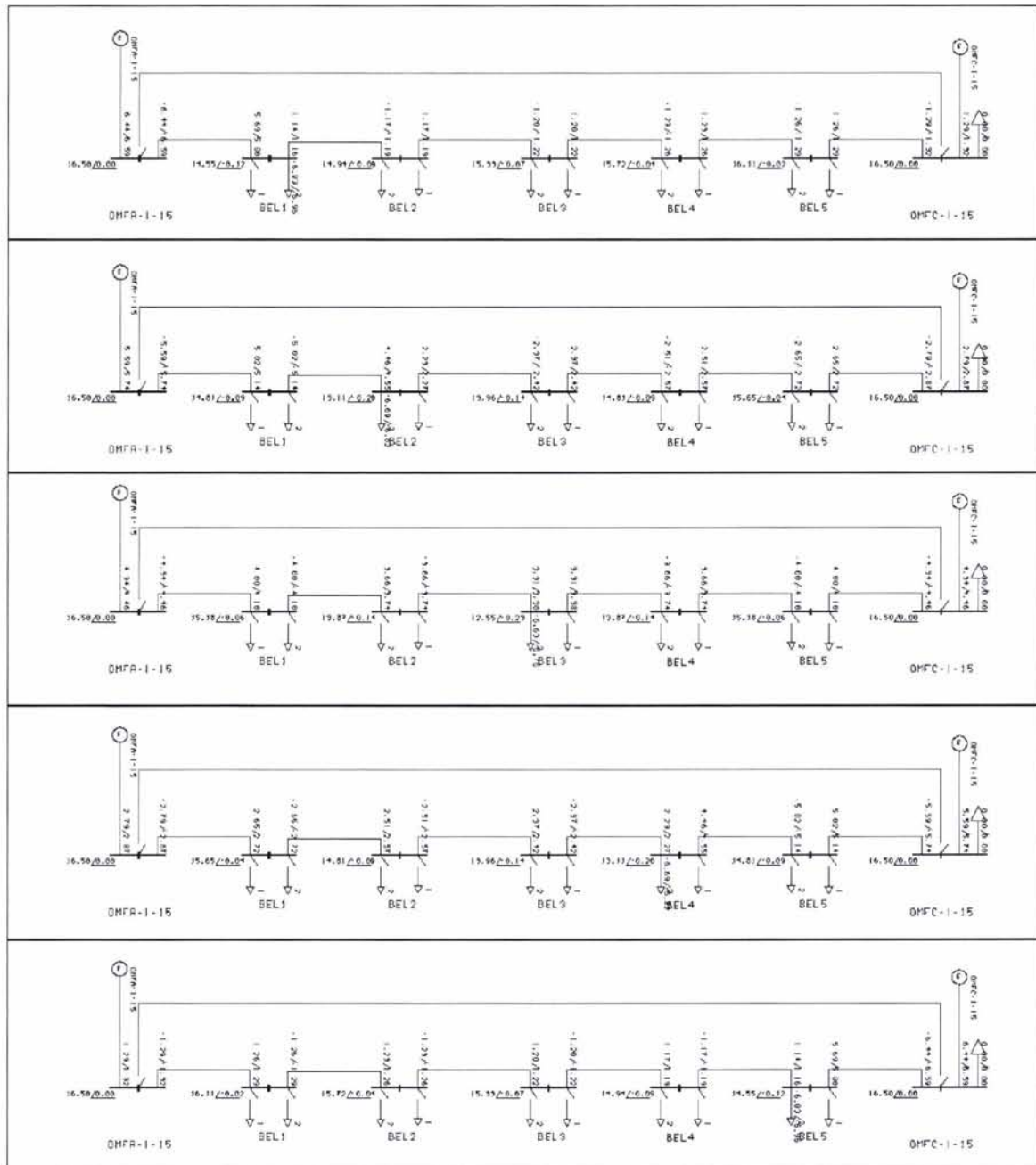
En kan muligens kalle dette for ideell lastfordeling, i alle fall ut fra et tapsperspektiv. For et ønske om å unngå store effekttopper, vil en nok ønske en større grad av lastfordeling mellom omformerstasjonene. Med en slik effektfordeling vil den belastningen som er nær en stasjon, trekke praktisk talt all effekt fra denne. Legg for øvrig merke til at det er relativt store mengder reaktiv effekt som overføres, selv om lasten er rent aktiv.



Figur 25 Spenninger og vinkler i tomgang på en 80 km lang matestrekning. Det er stive spenningskilder i hvert innmatingspunkt.



Figur 26 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med et stivt overliggende nett. Fasevinklene for det overliggende nettet er 0° . Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 27 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett. Fasevinklene for det overliggende nettet er 0°. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.

2.2.1.2 Forsøk med en matestrekning med to omformerstasjoner

Forsøk med to matestasjoner med 2 x 5,8 MVA roterende omformere i hver og belastninger som trekker 7 MW, undersøkes. I figur 28 er det vist lastflyten i tomgang. Det er kun meget små effekter som trekkes fra det overliggende nettet for å dekke tapene i transformatorene og omformerne. Det er ingen fasevinkel mellom de stive spenningskildene i det overliggende nettet og heller ingen effektoverføring på 15 kV-nivå i tomgang.

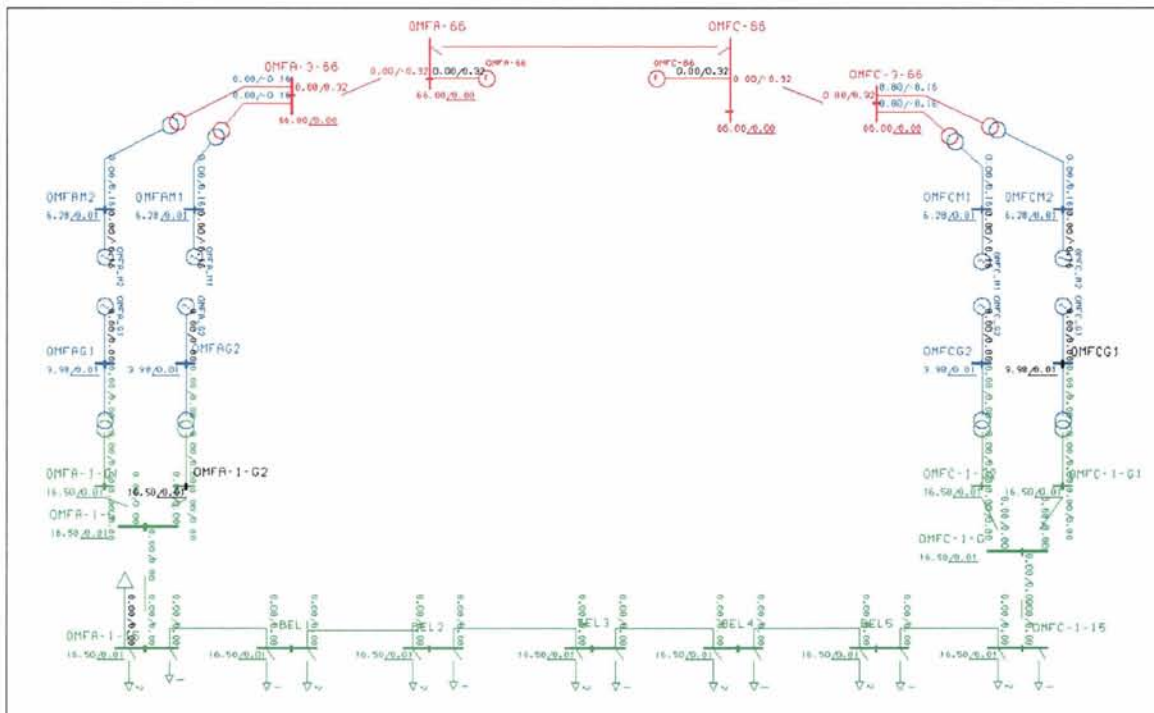
Figur 29 viser nettet i en forenklet utgave for kun å studere forholdene på 15 kV-nivå ved forflytting av lasten på 7 MW med 13,3 km mellom hvert steg. Det er et bilde for hvert av stegene. Figuren viser at det meste av den aktive effekten er forsynt fra omformer A (til høyre) for belastning 1 (BEL1) og plassert 13,3 km fra denne. Likevel kommer så mye som 2,6 MW kommer fra omformer C (til venstre). Dette er henholdsvis 65 % og 35 % fra omformer A og C. Dessuten overføres så mye som 1,3 MVAR reaktiv effekt i hver retning ved belastningene i posisjon 1 og 5 mellom stasjonene, og mer reaktiv effekt enn dette leveres fra omformerstasjonene. Fasevinkelen ved belastningen i posisjon 1 er $22,5^\circ$, ved omformer A blir vinkelen $20,6^\circ$ og ved C bare $12,7^\circ$. Når belastning 3 på midten trekker effekt, blir forholdene symmetriske om denne. Legg merke til at den reaktive effektflyten nå er minst med bare 0,4 MVAR fra hver stasjon. Ved forflytting av lasten videre mot omformerstasjon C, ser en at de samme forholdene gjentar seg som da lasten var nærmest omformer A.

Figur 30 viser effektflyten, spenningene og vinklene når lasten er på 7 MW med $\cos \varphi = 0,7$ og forflyttes til de samme stedene som med en ren aktiv belastning. Det er nå atskillig mer reaktiv effekt som skal overføres, og spenningen blir lavere. For tilfellet med belastning 1 (BEL1) nærmest omformer A, leverer omformer A 5,5 MW og omformer C 2,4 MW. Fordelingen er henholdsvis 70 % og 30 %. Legg spesielt merke til fasevinklene nå er mindre enn for tilfellet med en rent aktiv belastning.

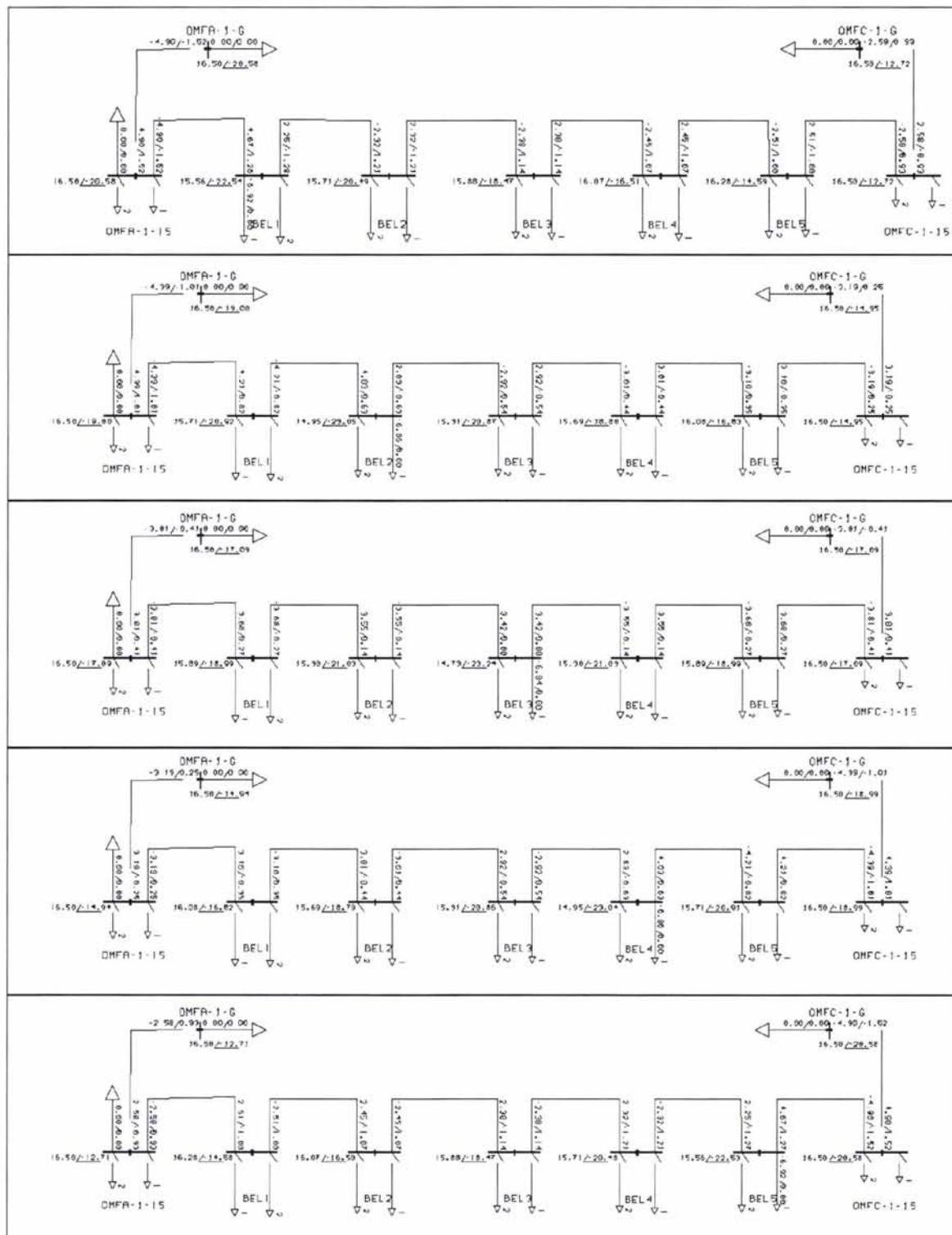
Figur 31 viser søylediagrammer for fordelingen av aktiv og reaktiv effekt mellom de to omformerstasjonene når de enkelte aktive belastningene legges. Det er størst aktiv effektproduksjon fra de to omformerstasjonene når lasten er på midten, mens det er størst reaktiv effektproduksjon når lasten er på bare én av de to halvdelene av matestrekingen. Når lasten er nærmest A produseres det en reaktiv effekt her (positivt fortegn; kapasitiv effekt), mens det ved omformer B taes opp en reaktiv effekt (negativt fortegn; induktiv effekt). Følgelig overføres det en reaktiv effekt mellom dem.

For belastninger med $\cos \varphi = 0,7$ viser figur 32 fordelingen av effekten mellom omformerstasjonene. Det er nå betydelig større effektmengder som overføres og omformerne produserer en reaktiv effekt (kapasitiv) for å dekke lastens reaktive effektbehov samt det reaktive tapet på linjen (induktive effekter). Den nærmeste omformerstasjonen til lasten påtar seg en veldig stor del av den reaktive effekten. Når lasten er 13,3 km (1/6 av matestrekingen) fra en stasjon, leverer denne hele 95 % av den reaktive effekten, og når lasten er kommet 1/3 ut på linjen, leverer den nærmeste stasjonen 72 %. Dette er ikke en gunstig fordeling. Om belastningen økes ytterligere, kan det være fare for at omformerne overbelastes og kobler ut. For å forbedre lastfordelingen ved mye reaktiv effekt kan en fallende statikk vurderes.

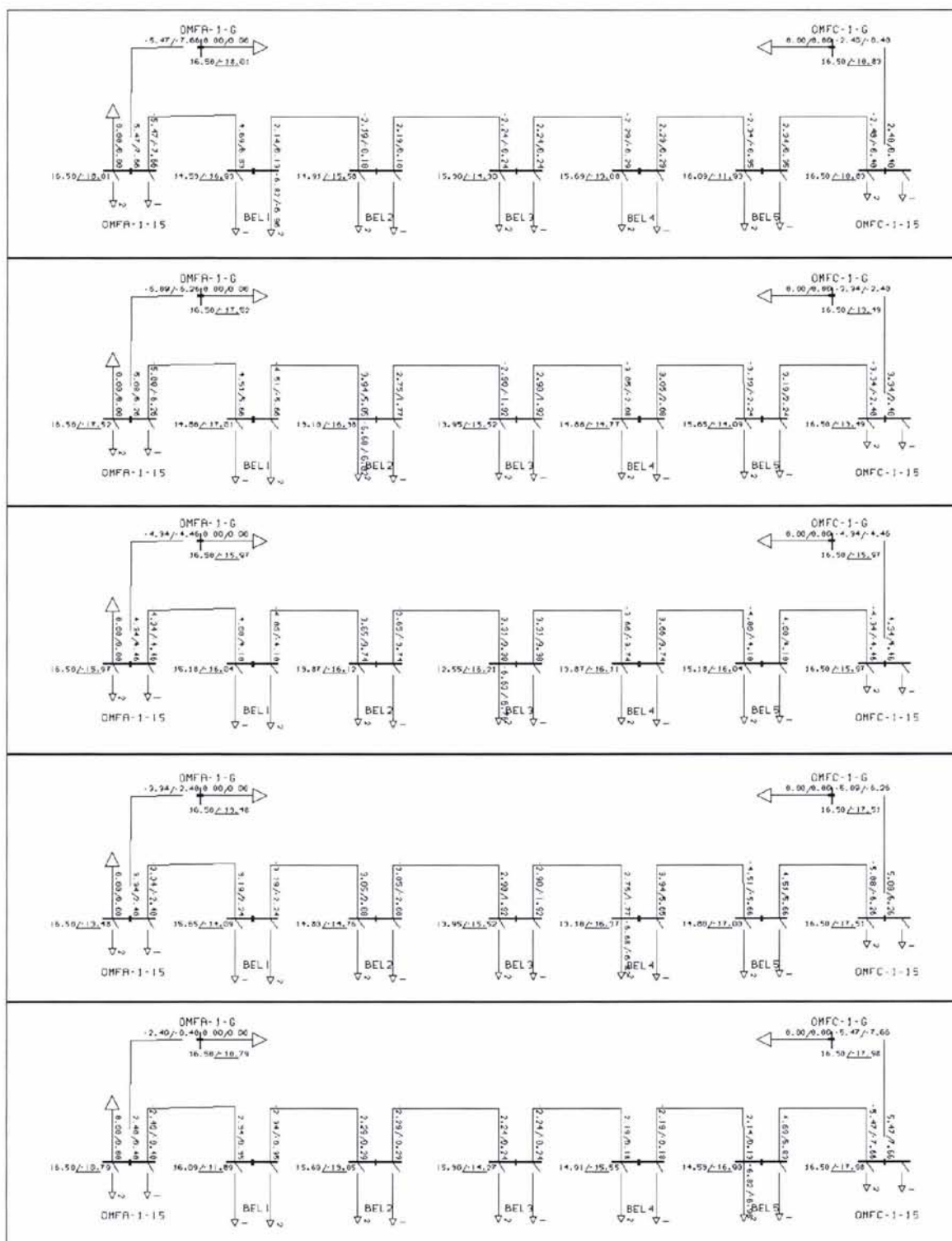
Tapene i kontaktledningen er for tilfellet med kun aktiv belastning midt på matestrekingen ca. 780 kW med en blandet belastning på 2060 kW. Det er en reaktiv belastning som gir en stor økning av de elektriske overføringstapene, men så er jo også tapene kvadratisk proporsjonale med strømmen.



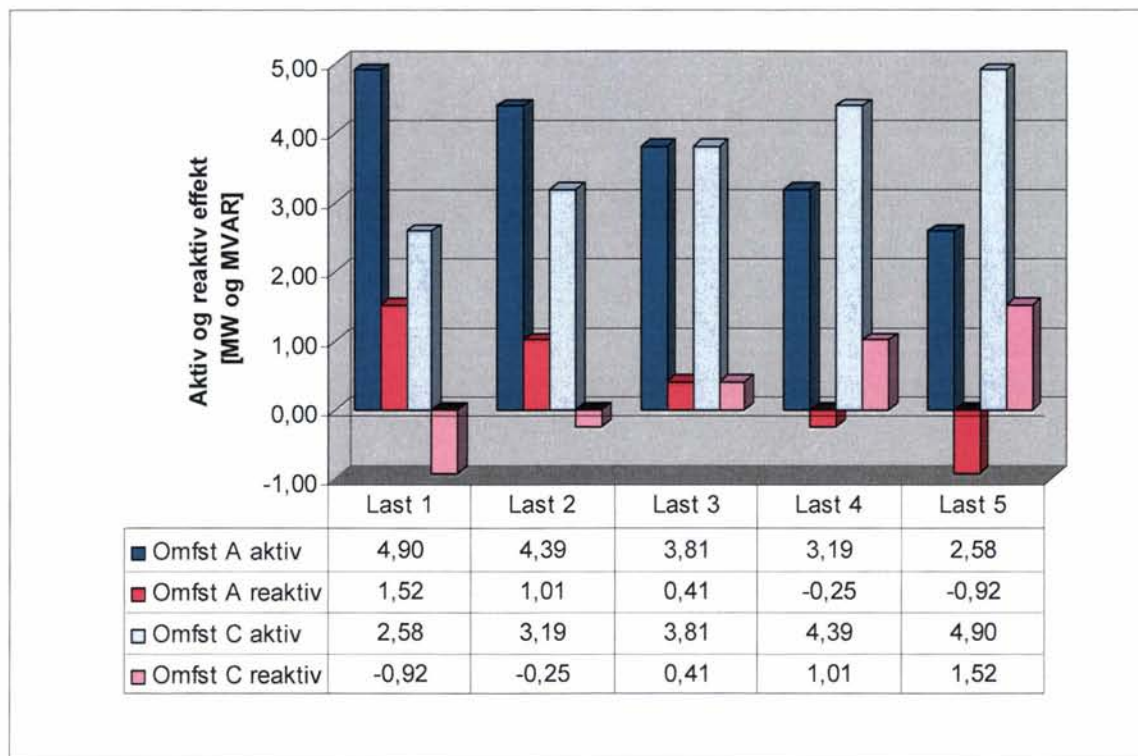
Figur 28 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning. Her er det bare effekt for å dekke tomgangstapene som trekkes fra det overliggende nettet til omformerne. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med en referanse for motorens spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



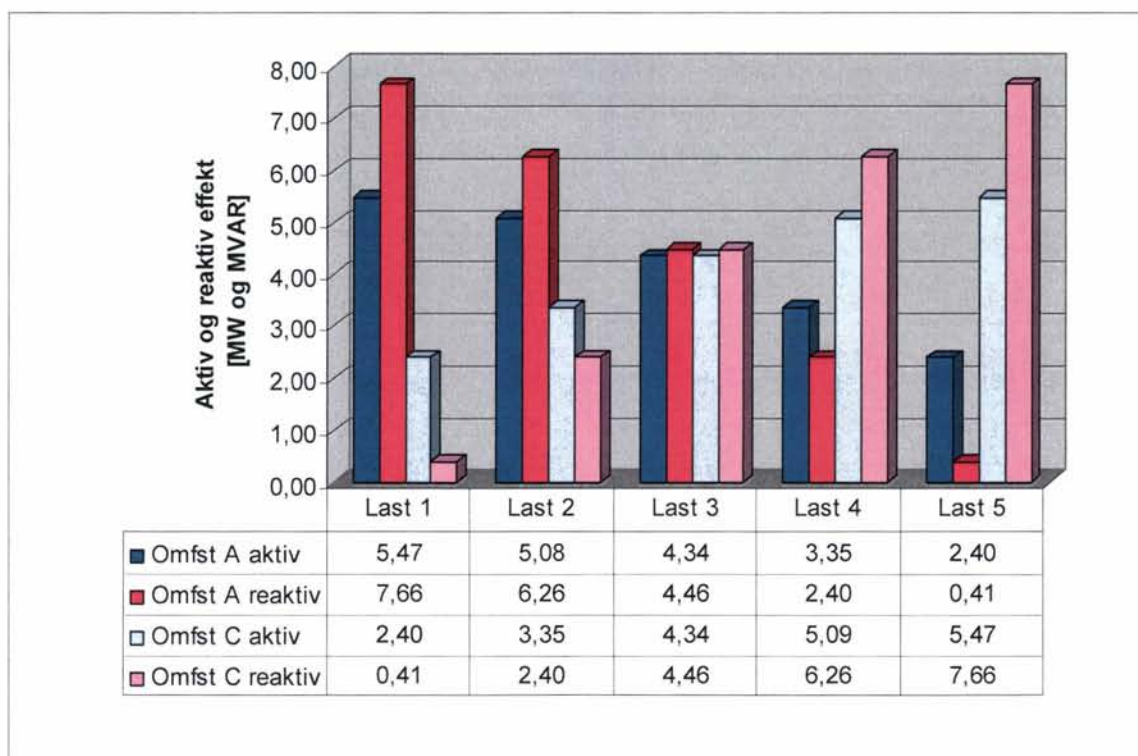
Figur 29 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett. Fasevinklene for det overliggende nettet er 0°. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 30 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett. Fasevinklene for det overliggende nettet er 0°. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 31 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



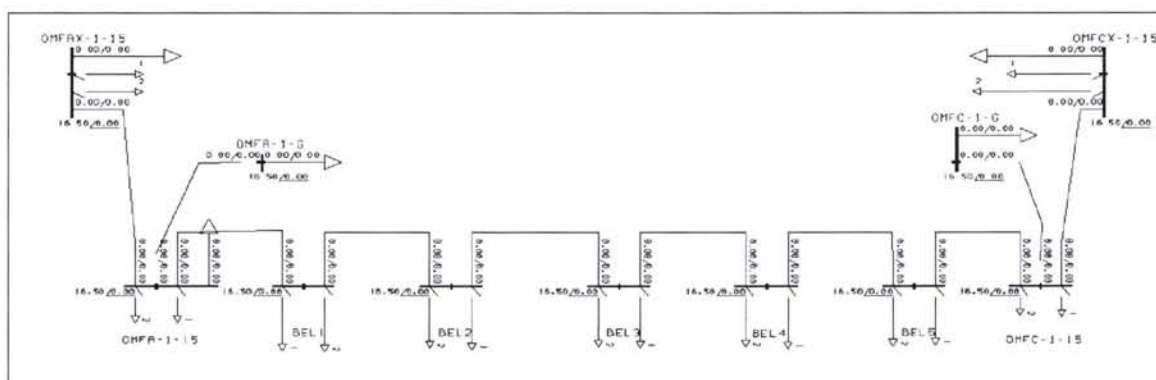
Figur 32 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.1.3 Forsøk med en matestrekning med nabostasjoner

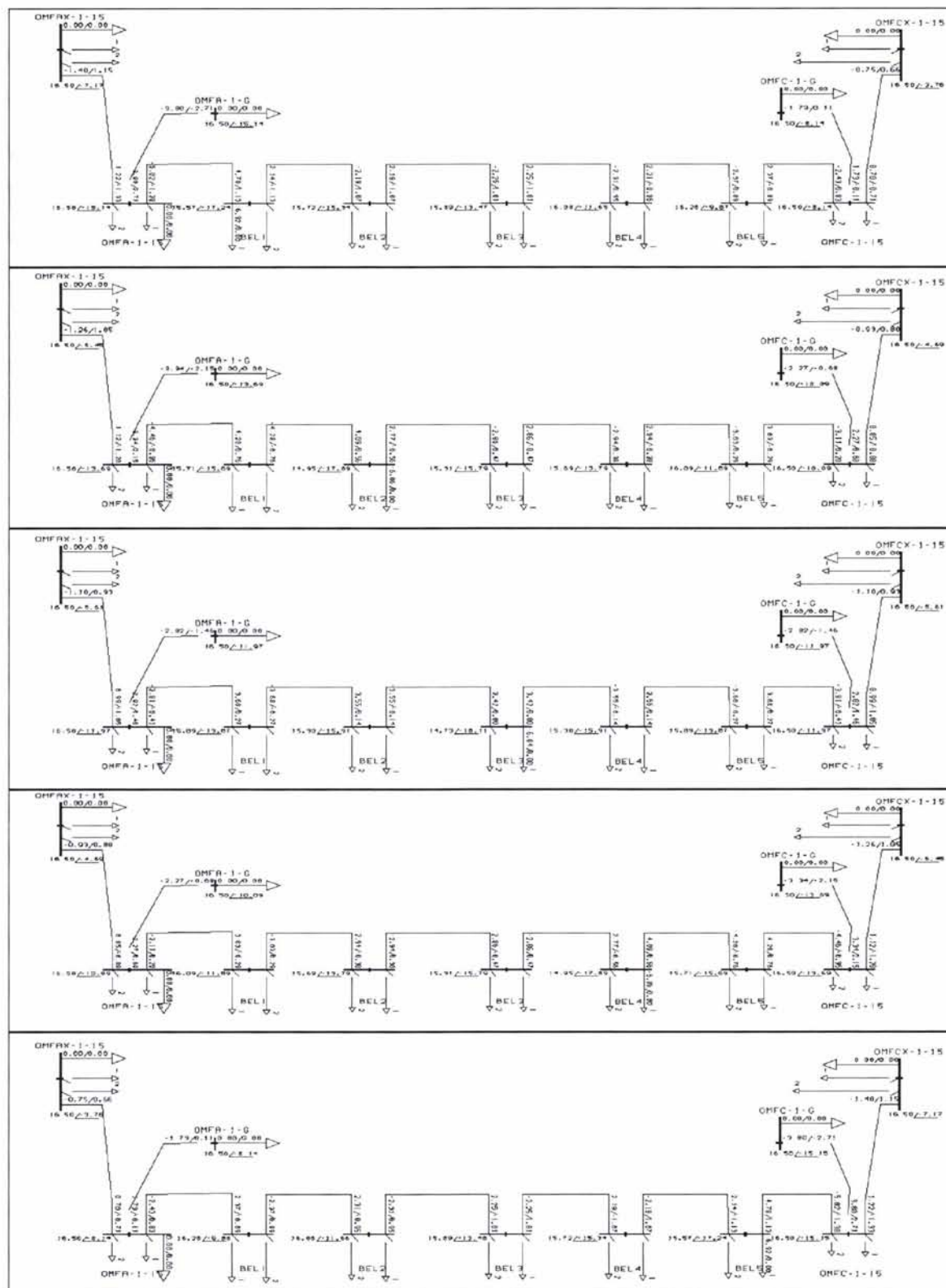
Det er interessant å finne ut hvor meget effekt som overføres fra nabostasjoner til den matestrekningen som undersøkes. Det forventes at en omformerstasjon som ligger 80 km bortenfor de stasjonene som undersøkes, ikke gir noe bidrag av betydning, siden impedansen i et kontaktledningsnett er meget stor. I figur 33 er det vist tomgangstilfellet for et nett med to nabostasjoner (AX og CX) tilsluttet, og her er spenningen 16,5 kV og fasevinkelen null ved alle omformerstasjonene.

I figur 34 er det vist 5 bilder for de forskjellige posisjonene som lasten er flyttet og effekten fra nabostasjonene er ikke ubetydelige. For tilfellet med belastningen (BEL1) 13,3 km fra omformerstasjon A ser en følgende fordeling av aktiv effekt; fra omformer AX er bidraget 18 %, fra A er det 49 %, fra C er det 23 % og fra CX er det 10 %. Det er bemerkelsesverdig at omformerstasjon CX som er 146,7 km unna lasten, leverer så mye som 10 %. Legg også merke til at denne stasjonen leverer mer reaktiv effekt (0,66 MVar) enn stasjon C (0,11 MVar), som er nærmest. Når belastningen BEL3 på midten trekker effekt, leverer omformerstasjon AX og CX 1,1 MW eller hele 13 % av den leverte effekten fra omformerne. Fasevinkelen ved BEL1 er 17,2°, ved omformer A blir vinkelen 15,4° og ved C bare 6,4°. Dette er betydelig mindre fasevinkler enn i tilfellet med simulering uten nabostasjoner.

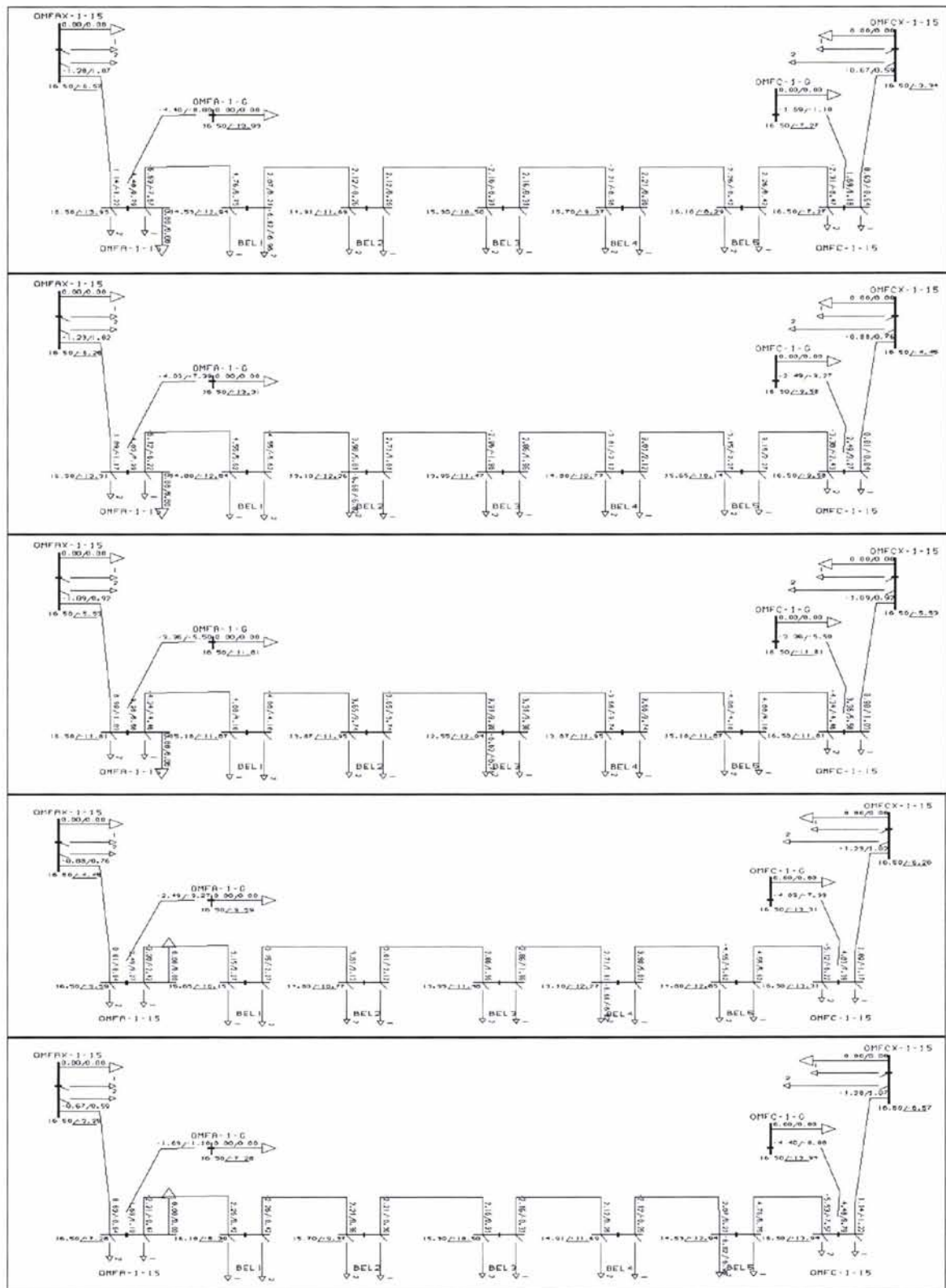
Figur 35 viser forholdene når belastningene trekker effekt med $\cos \varphi = 0,7$, og sammenlignet med tilfellet uten nabostasjoner er fasevinklene nå mindre enn når lasten er rent aktiv. Faktisk er fasevinklene betydelig mindre når nabostasjonene er med på å mate inn effekt. Spenningen er imidlertid ikke særlig endret. I figur 36 og figur 37 er effektfordelingen mellom omformerstasjonene vist, og her ses et betydelige effektbidrag fra nabostasjonene. Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt produsert i omformerne er mindre når nabostasjonene er inkludert og lasten er rent aktiv, mens for tilfellet med laster som er aktiv og reaktiv, blir denne forskjellen større med nabostasjoner. Følgelig har nabostasjoner stor betydning for fasevinklene og fordelingen av effekt. Når tiltak for å forsøke å styre effektfordelingen mellom omformerstasjoner skal vurderes bør modellen ta hensyn til dette. I de neste undersøkelsene å analysere andre prinsipielle forhold rundt lastfordelingen tas ikke nabostasjoner med i modellen. Dette er for å forenkle undersøkelsene.



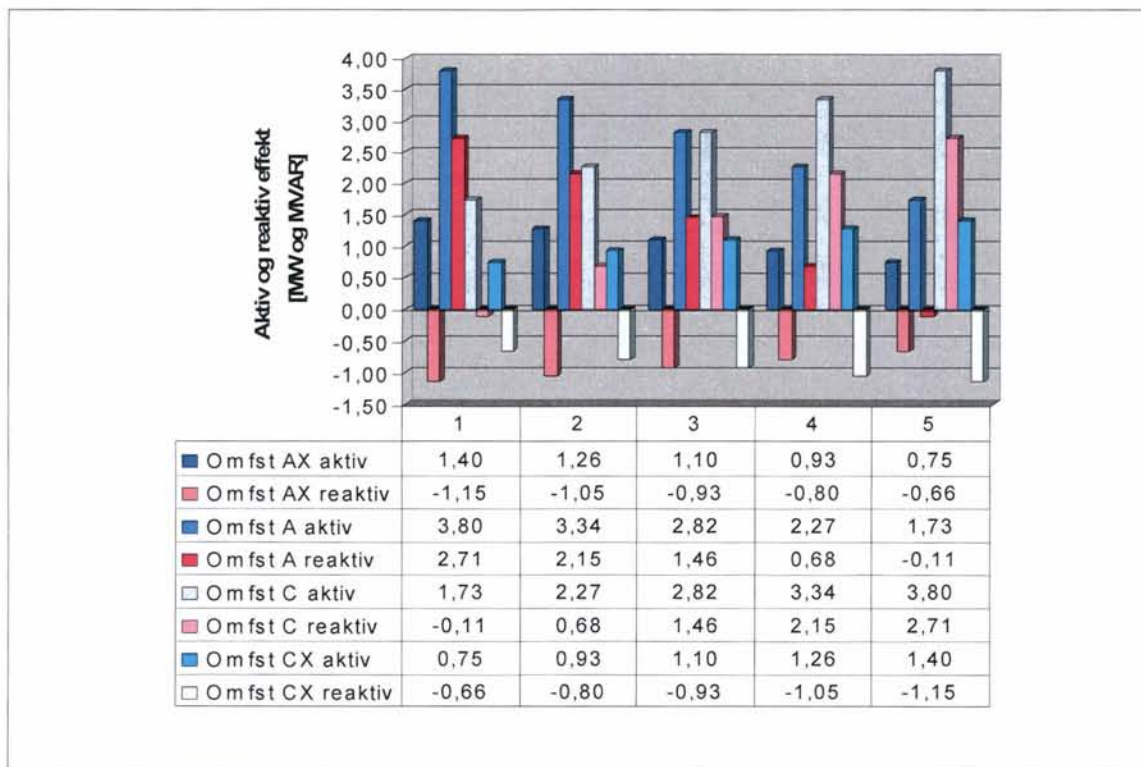
Figur 33 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning mellom stasjon A og C. Stasjon AX og CX er nabostasjoner til henholdsvis stasjon A og C i en avstand på 80 km. Det er bare effekten for å dekke tomgangstapene som trekkes fra det overliggende nettet til omformerne. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorens spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



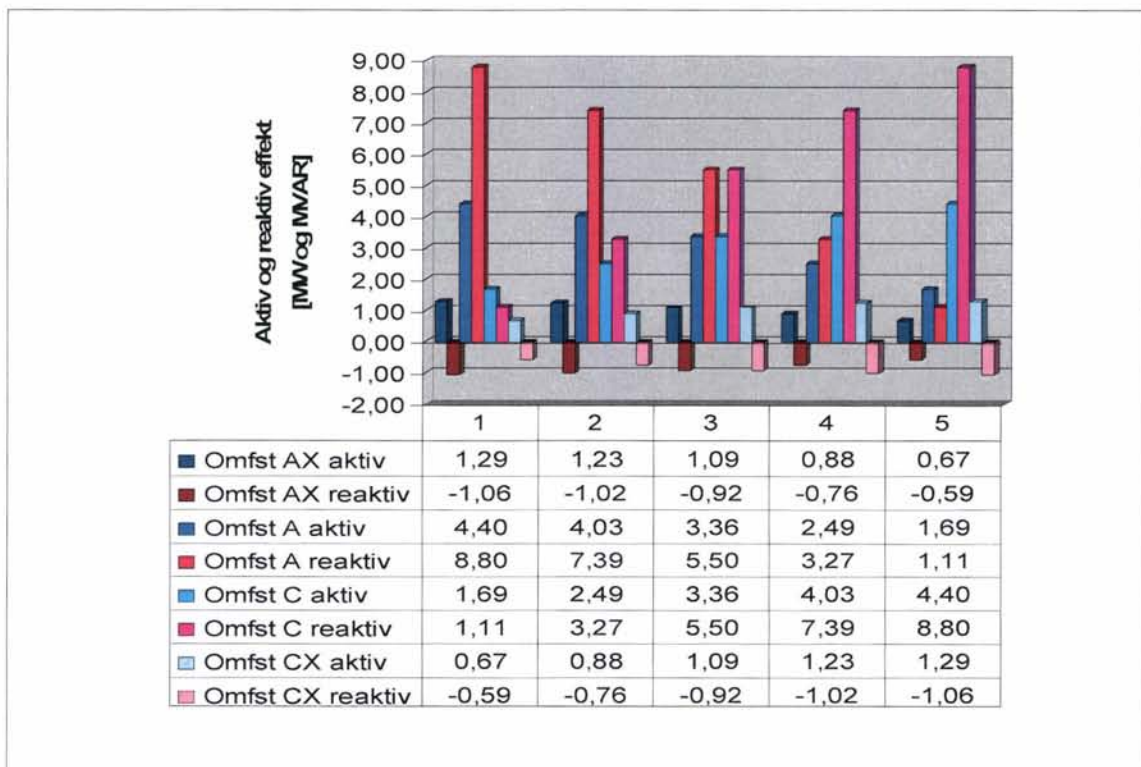
Figur 34 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Fasevinklene for det overliggende nettet er 0°. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 35 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Fasevinklene for det overliggende nettet er 0°. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 36 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



Figur 37 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.1.4 Forsøk med en matestrekning der omformerstasjonene har spenningsregulatorer med en fallende statikk

Lastfordelingen forventes å endres om det innføres en fallende statikk for omformerstasjonene. Først og fremst forventes det en bedre fordeling av reaktiv effekt ved at omformerstasjonen lengst unna belastningen tar på seg mer av effektproduksjonen. En har også forhåpninger om at dette kan føre til mindre elektriske tap. Det innføres her en statikk slik at spenningen blir 4,0 % lavere på 15 kV-samleskinne ved fullast.

I figur 38 er det vist hele nettet i modellen når hver av omformerne A og B går i fullast med en last som trekker aktiv og reaktiv effekt med 70° induktiv fasevinkel. Spenningen på 15 kV-samleskinne er da ca. 4 % lavere enn 16,5 kV som er spenningen i tomgang.

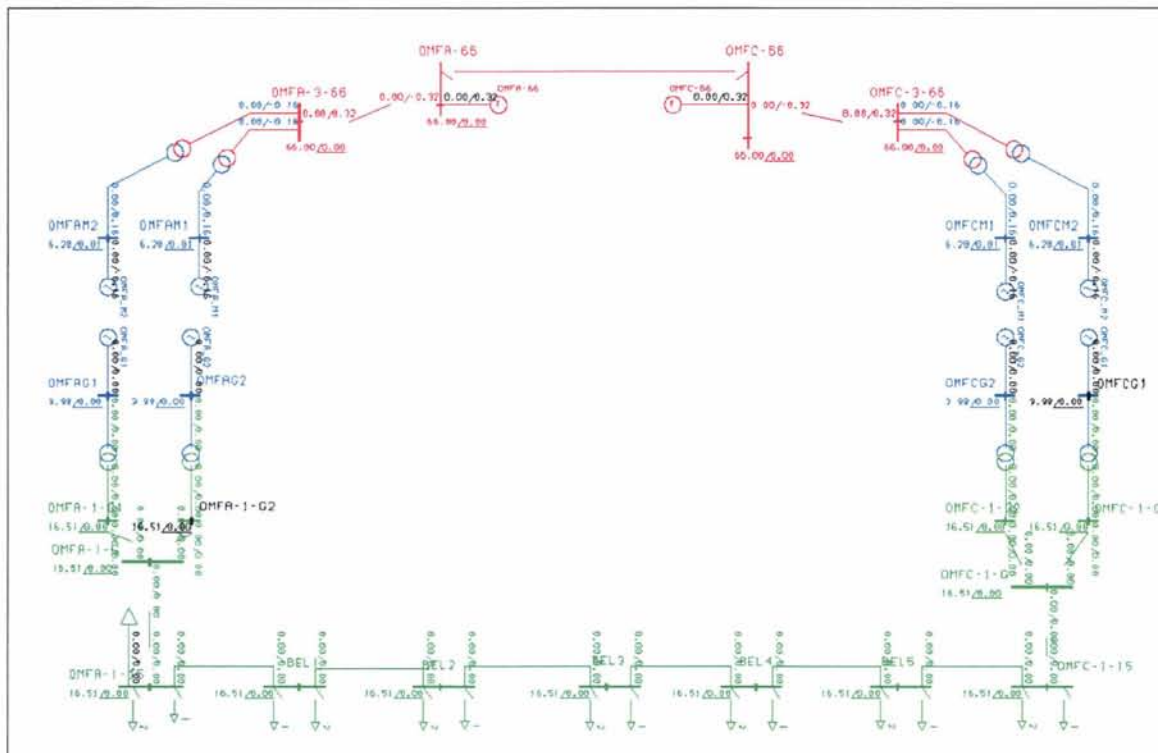
Figur 39 viser bilder for effektflyten og spenningene når belastningene flyttes bortover, og dette kan sammenlignes med avsnitt 2.2.1.2 der spenningsregulatorene sørger for en helt stiv spenning. Som forventet er det små endringer av spenningene, fasevinklene og effektfordelingen i dette første tilfellet med rent aktive belastninger. Det er en viss endring av spenningen for de belastningene som er nær omformerstasjonene (BEL1 og BEL5). Dette kan tilskrives at spenningsregulatoren selv om den kompenserer kun for reaktiv effekt, gjør den nettopp dette fordi det leveres en del reaktiv effekt ut fra omformerer selv om lasten ikke trekker reaktiv effekt.

Større forskjeller sees imidlertid for tilfellet med reaktiv belastning i figur 40. I tilfellet med belastningen nærmest omformerstasjonene (BEL1 og BEL2) trekkes spenningen nå betydelig mer ned; til 13,9 kV ved lasten, mens den tidligere var 14,6 kV. Den reaktive effektfordelingen mellom stasjonene er endret noe siden stasjonen som er lengst unna belastningen, leverer omtrent dobbelt så mye reaktiv effekt. Imidlertid leverer stasjonen nærmest belastningen ikke noe mindre. Dermed ser det ut som om den totale reaktive effekten er større, og med økt strøm øker de reaktive tapene som må dekkes av omformerne. For tilfellet med belastningen midt på matestrekningen (BEL3) er endringene små: Den største forskjellen er at spenningen ved belastningen blir ca. 560 V lavere.

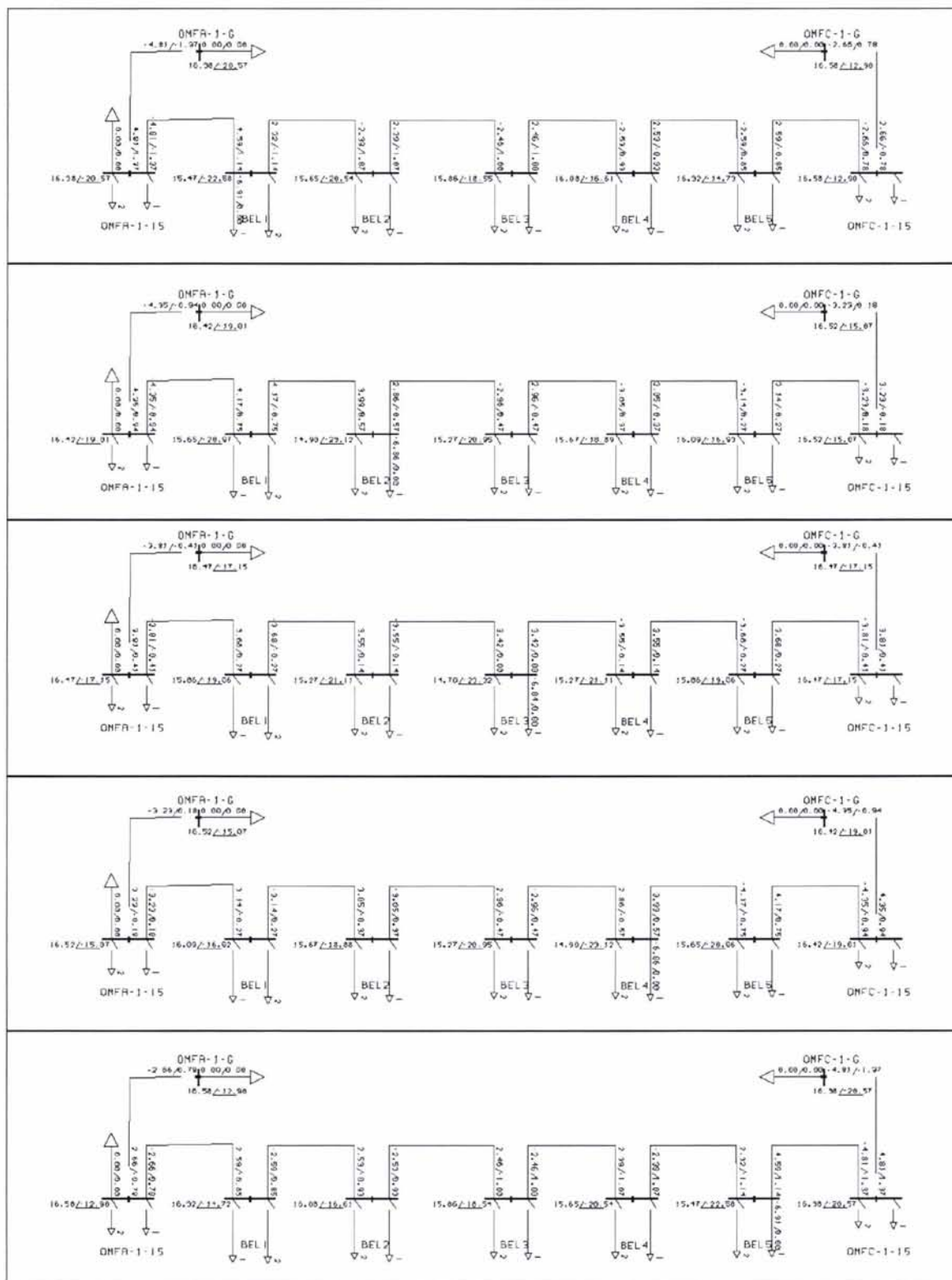
Figur 40 og figur 41 viser den aktive og reaktive effektfordelingen. Sammenlignet med undersøkelsen av lastfordeling med omformerstasjoner med en flat statikk er endringene minimale. I tilfellet der lasten er blandet ($\cos \varphi = 0,7$) og 13,3 km fra en stasjon (1/6 av matestrekningen) leverer denne hele 91 % av den reaktive effekten, og når lasten er kommet 26,6 km (1/3) ut på linjen, leverer den nærmeste omformerstasjonen 69 %. Dette er en liten forskjell fra tilfellet med omformere uten fallende statikk der fordelingen for 13,3 km fra den nærmeste stasjonen ble 95 % og for 26,6 km ble 72 %. I prosentpoeng er forskjellen henholdsvis 4 og 3.

Tapene når lasten er kun aktiv og midt på linjen, er 780 kW, og for en blandet belastning blir tapene 2220 kW. For det tidligere forsøket uten fallende statikk ble tapene for de samme forholdene henholdsvis 780 kW og 2060 kW. Altså ser det ut til at tapene øker i stedet for en ønsket reduksjon.

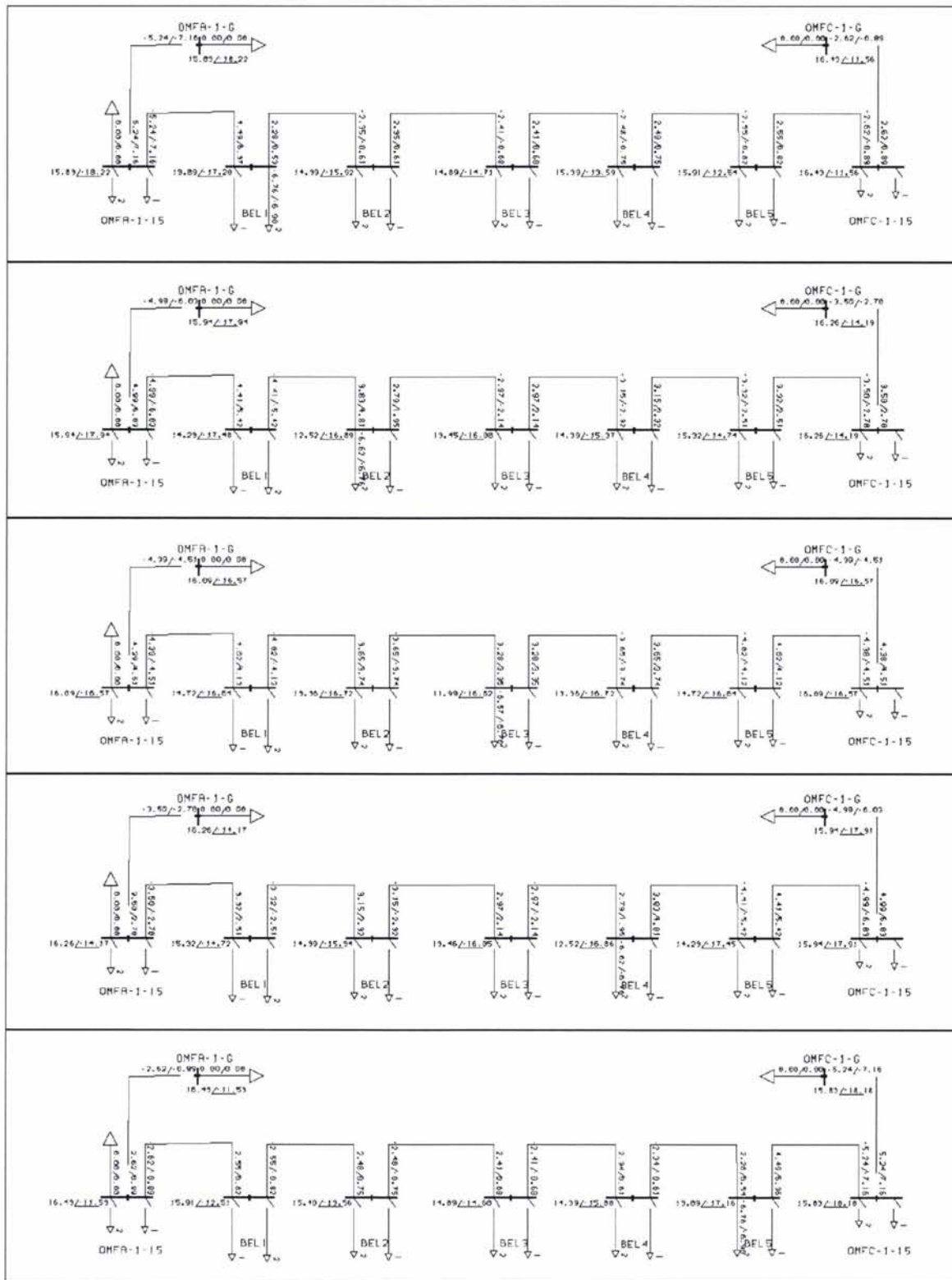
Av dette kan det se ut om en fallende statikk med like omformerstasjoner med 80 km mellom og konvensjonelt kl-anlegg ikke har noen hensikt. Ikke noe av det en kunne ønske å forbedre, blir bedre, og spenningen blir lavere for belastninger som trekker en reaktiv effekt.



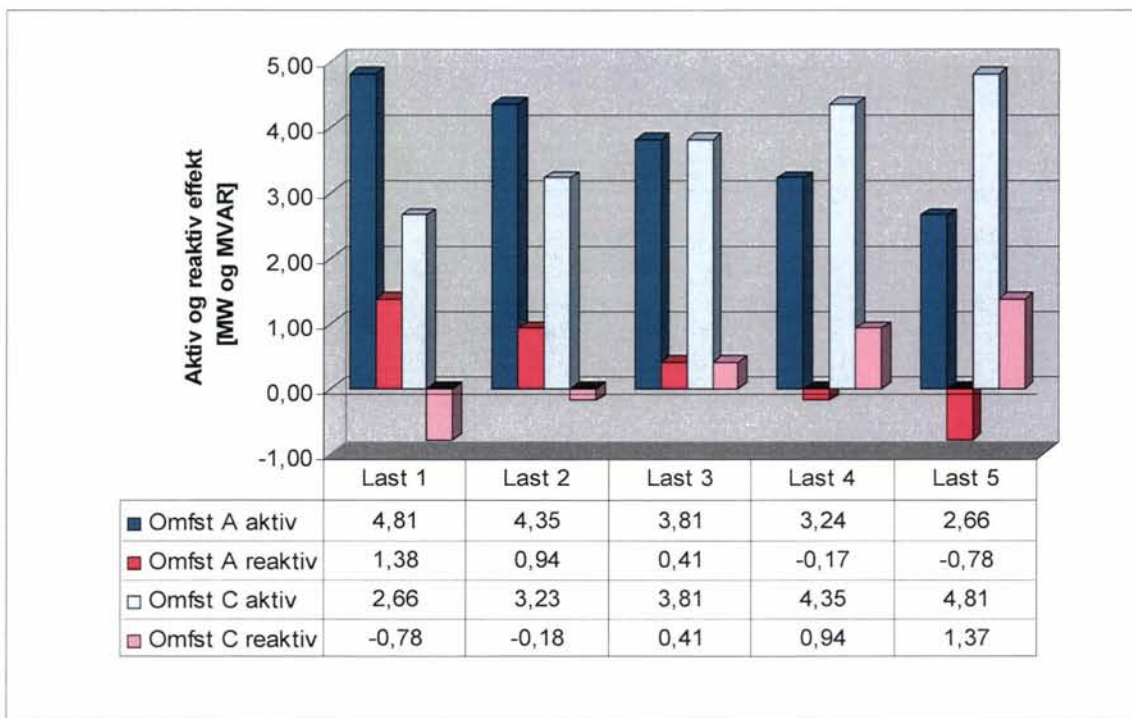
Figur 38 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning. Det er bare effekt for å dekke tomgangstapene som trekkes fra det overliggende nettet til omformerne. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorens spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



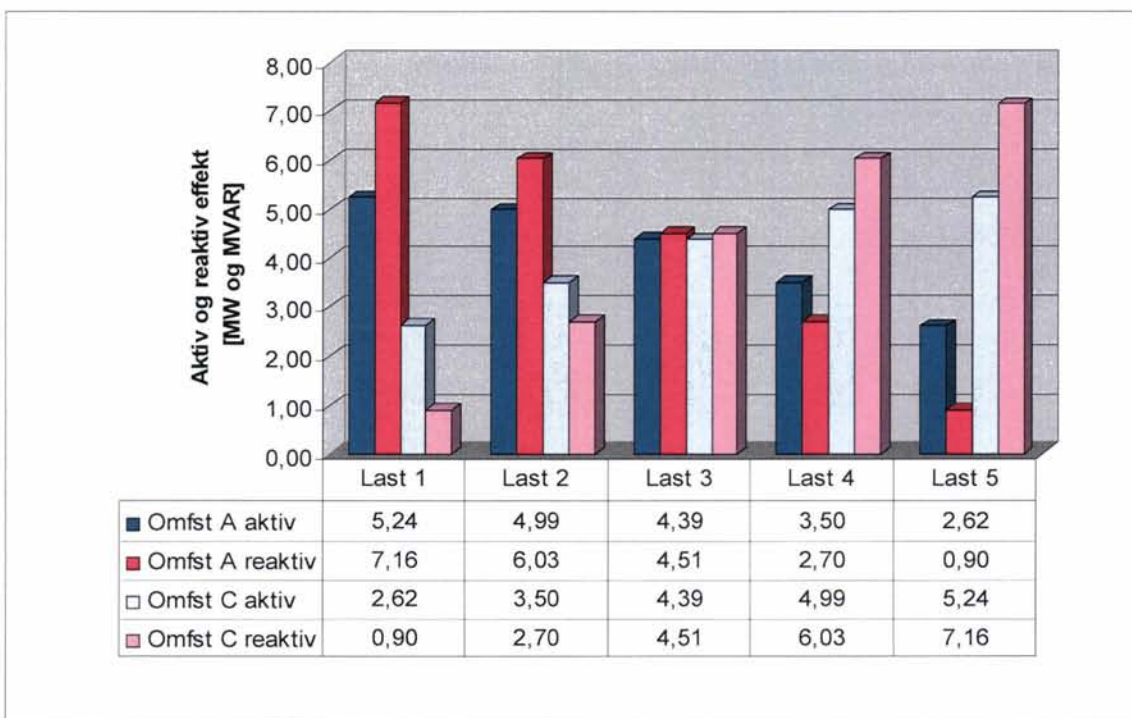
Figur 39 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett og en fallende statikk for spenningsregulatorene. Spenningen på 15 kV-samleskinne blir 4 % lavere ved full last. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Fasevinklene for det overliggende nettet er 0°. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 40 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett og en fallende statikk for spenningsregulatorene. Spenningen på 15 kV-samleskinne blir 4 % lavere ved full last. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Fasevinklene for det overliggende nettet er 0°. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 41 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



Figur 42 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

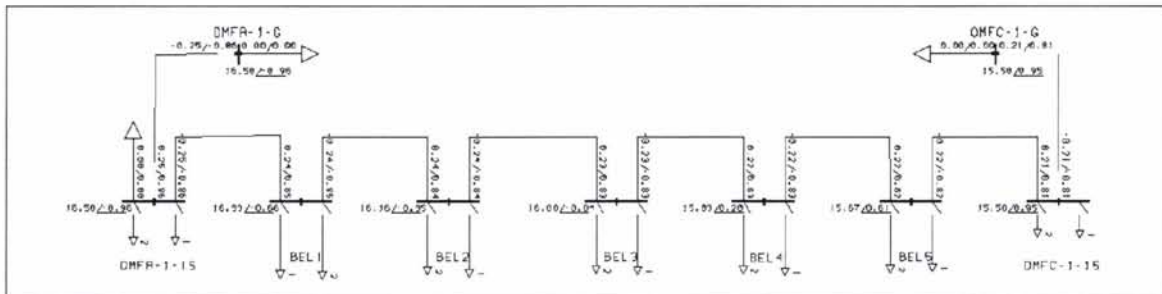
2.2.1.5 Forsøk med en matestrekning der omformerstasjonene har spenningsregulatorer med ulikt settpunkt

Spenningen ut på 15 kV-samleskinne i omformerstasjonene kan stilles forskjellig for å kunne redusere utvekslingen av reaktiv effekt i tomgang ved forskjellige fasevinkler i det overliggende nettet. Det kan også være ønskelig å begrense en liten omformerstasjons effekt ved stor last der det er fare for overlast. Et annet tilfelle kan være at det er oppstått forskjellige spenninger ved en feil, eller fordi måleunøyaktigheten er stor eller forskjellig. Spesielt i tilfeller med ulike fasevinkler i det overliggende nettet kan dette være en mulighet for å redusere effektutvekslingen i tomgang. I forsøket her stilles settpunktet for spenningen ned 1,0 kV i stasjon C. Det er samme fasevinkel for det overliggende nettet i de to stasjonene.

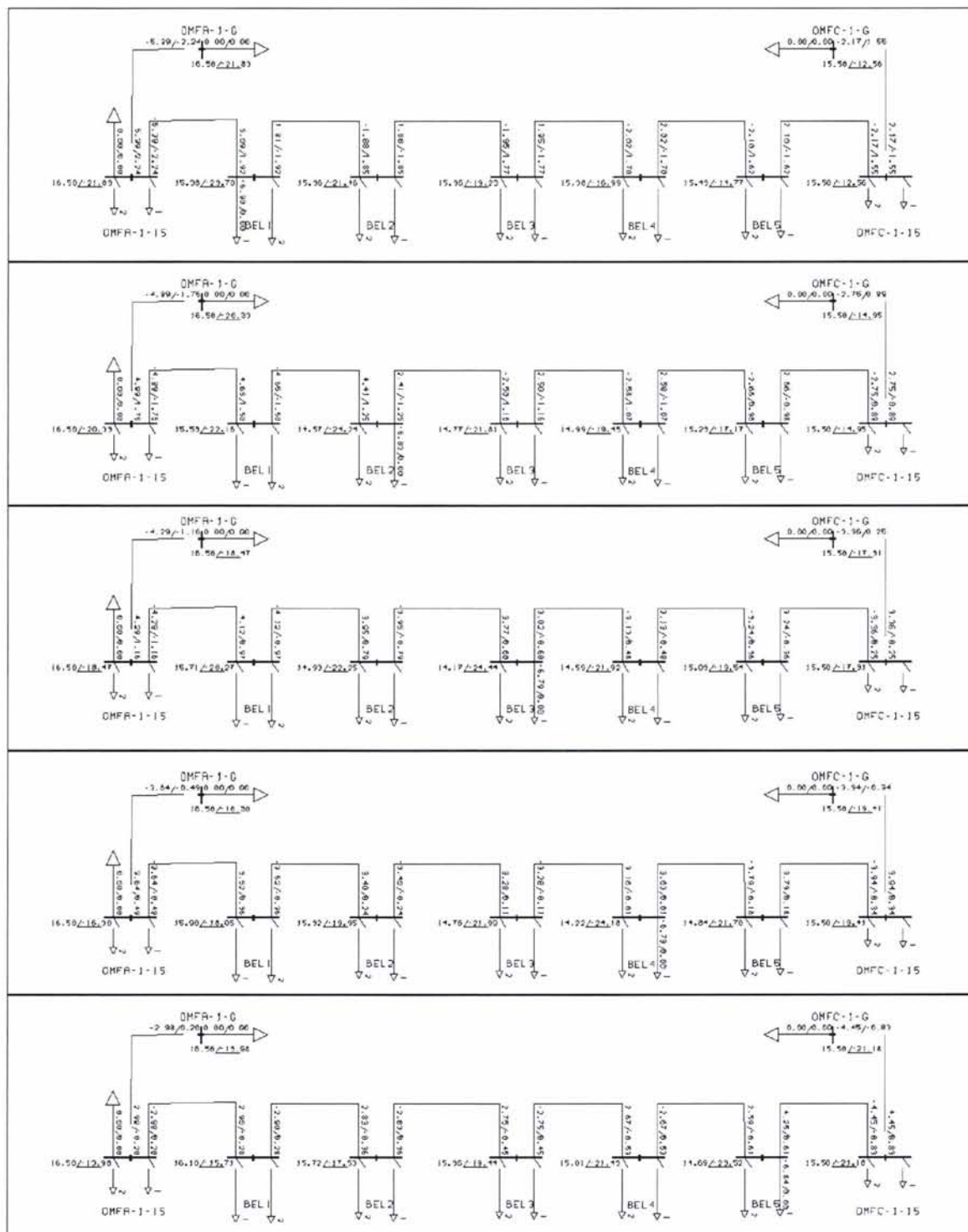
I figur 43 er situasjonen i tomgang vist når stasjon C har 1,0 kV lavere spenning, og det er mye effekt som utveksles mellom stasjonene. Ut fra stasjon A går det 250 kW og 860 kVAR mot stasjon C, og på veien tapes også en del effekt (40 kW).

Videre viser figur 44 og figur 45 spenningene og effektfordelingen for lasten som forflyttes langs matestrekningen. Legg merke til at det denne gangen er mye reaktiv effektutveksling mellom omformerstasjonene i forhold til tilfellet med like forhold i de to stasjonene, se avsnitt 2.2.1.2. Det ser ut til å være en tendens til at det er stasjon A som mater ut mest reaktiv effekt i tilfellet med både en aktiv belastning og med en blandet belastning. Den usymmetriske lastfordelingen kommer tydelig frem i figur 46 og figur 47 der stasjon A med normal spenning leverer ut mest effekt, unntatt når lasten kommer helt nær stasjon C.

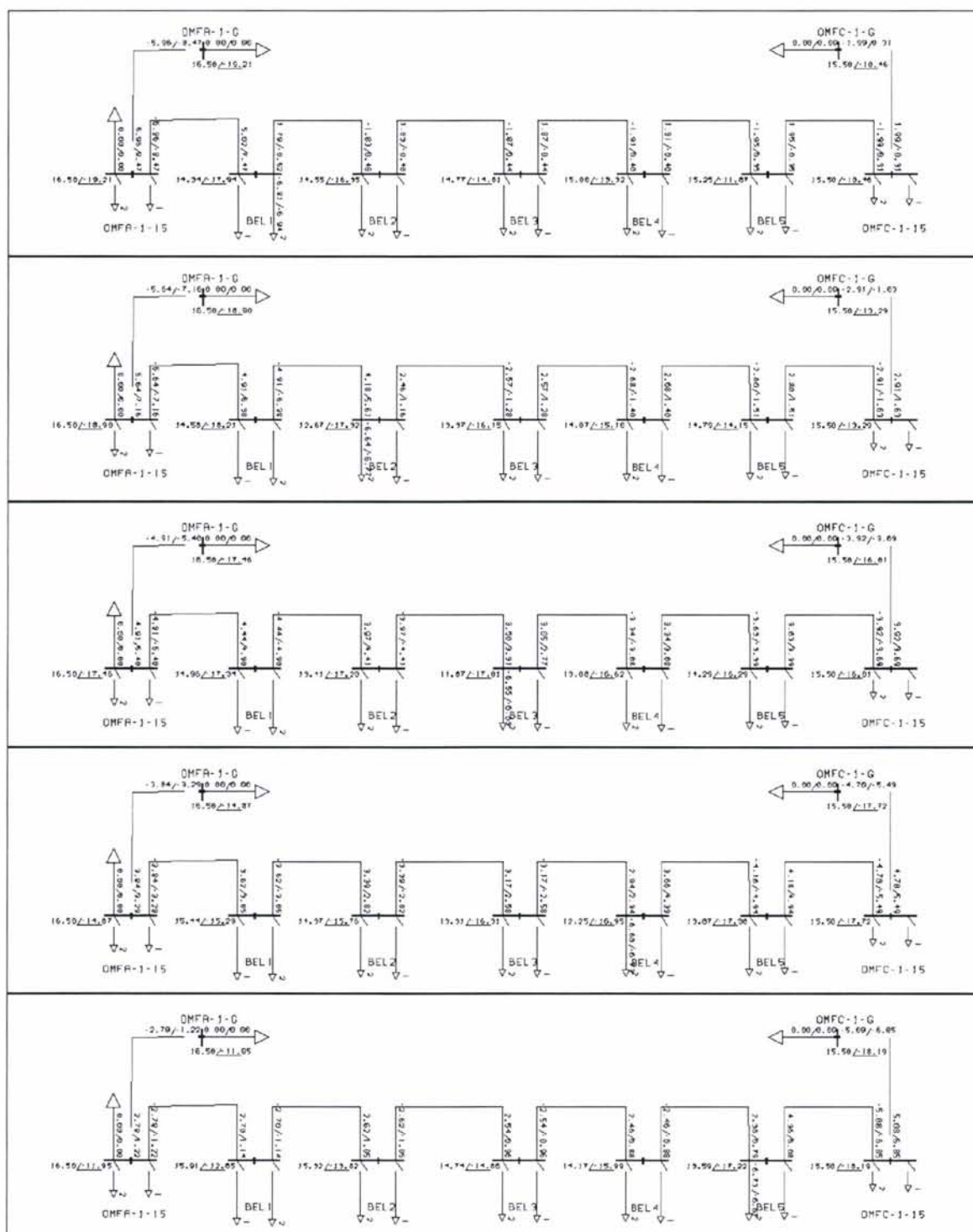
Under normale forhold foretrekkes mest mulig lik spenning for omformerstasjonene, men en slik ulik innstilling kan være en brukbar måte å få en stasjon til å påta seg mindre effekt, for eksempel en liten stasjon med store naboer. Imidlertid vil problemet bli effektutvekslingen i tomgang.



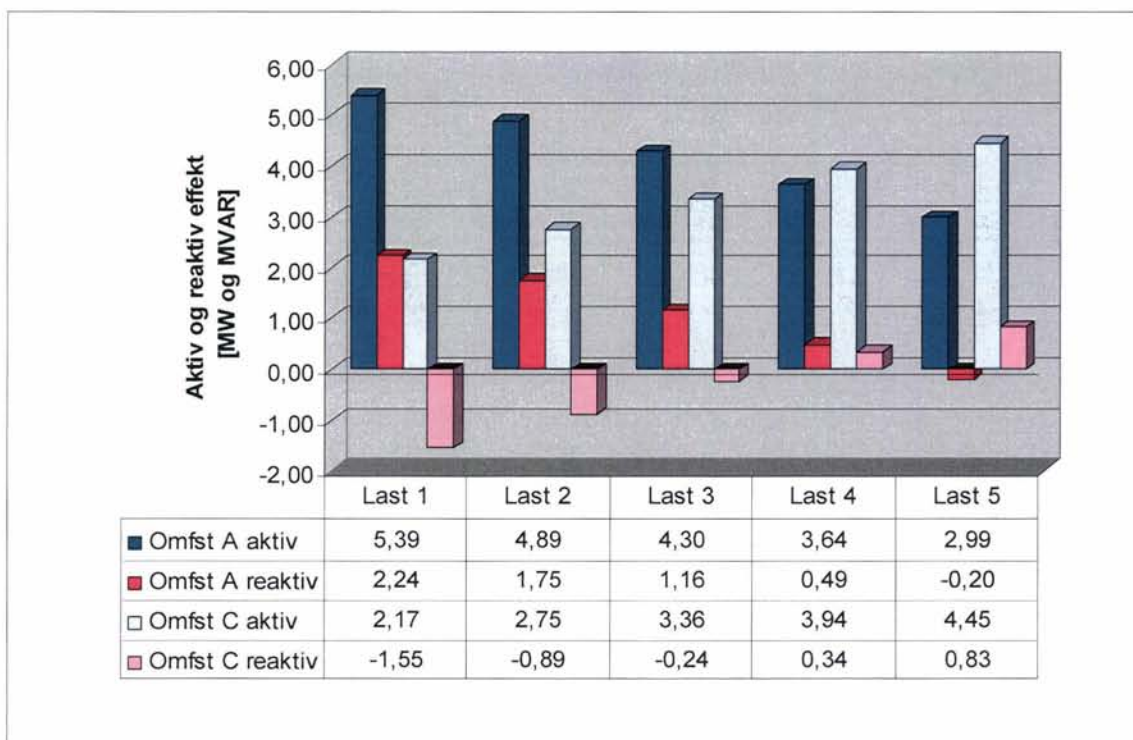
Figur 43 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning og ulike settverdier for spenningsregulatorene, der stasjon C har 1,0 kV lavere spenning enn stasjon A. Effekt for å dekke tomgangstapene trekkes fra det overliggende nettet. Likeledes er det effektutveksling mellom omformerstasjonene. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorens spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVAR hver.



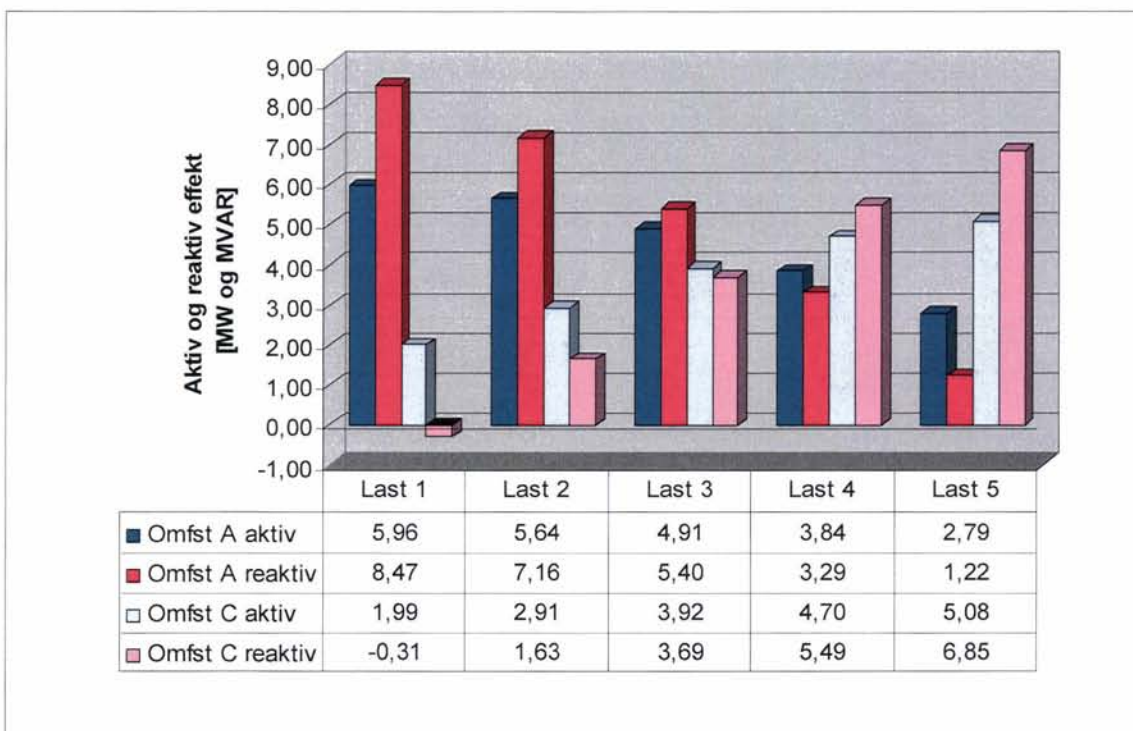
Figur 44 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett og ulike settpunkter for stasjonene, der stasjon C har 1,0 kV lavere spenning enn stasjon A. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 45 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett og ulike settpunkter for stasjonene, der stasjon C har 1,0 kV lavere spenning enn stasjon A. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 46 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.

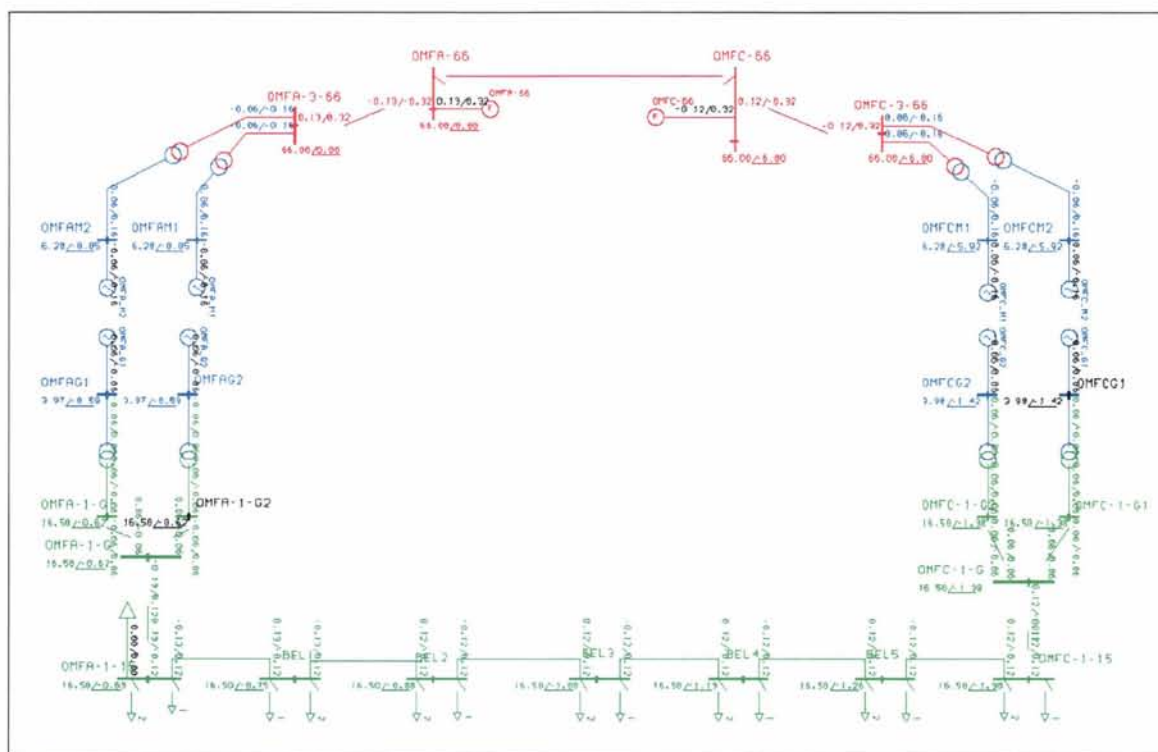


Figur 47 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

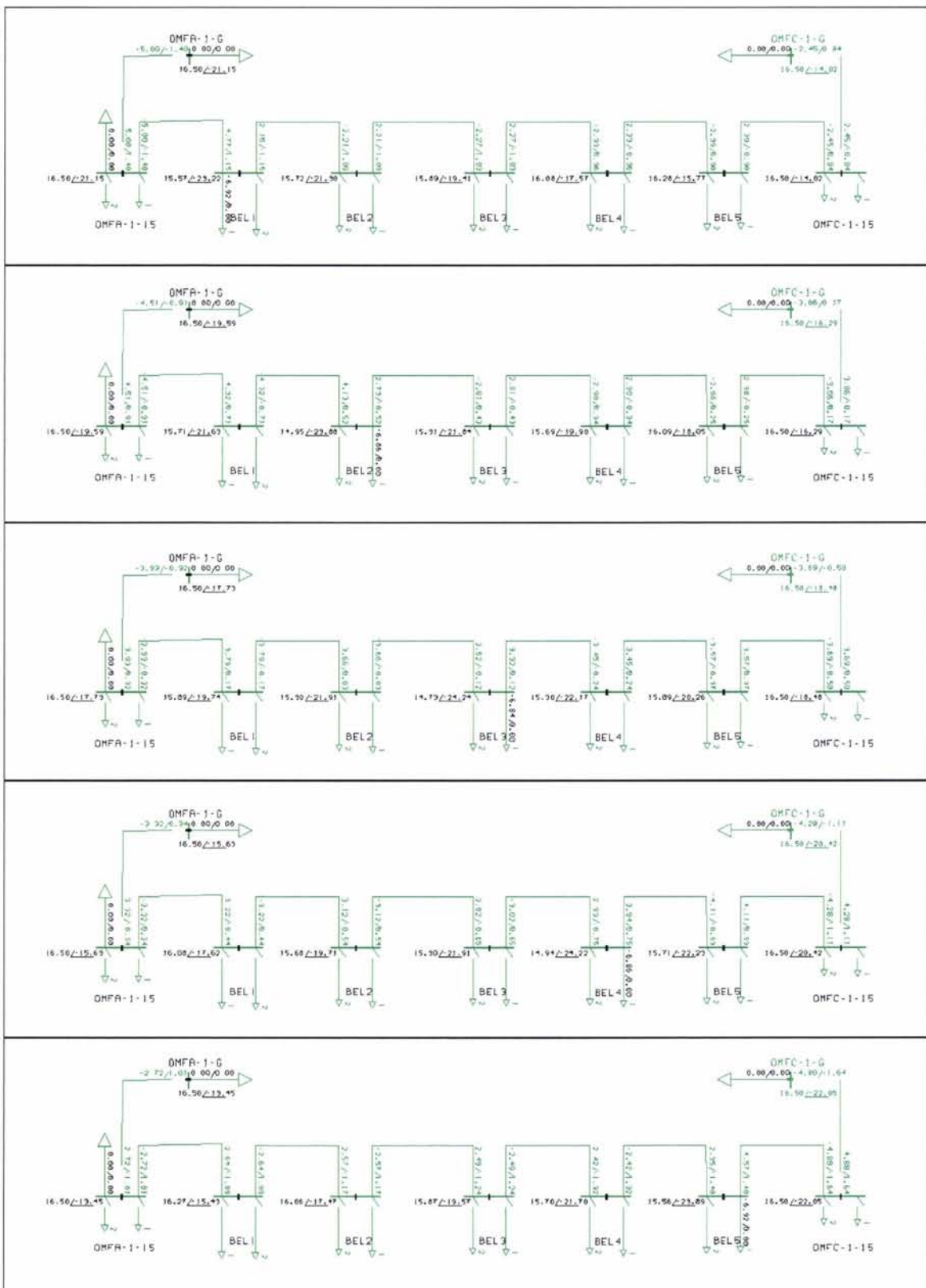
2.2.1.6 Forsøk med en matestrekning der omformerstasjonene har overliggende forsyning med forskjellige fasevinkler med $\delta_1 = 0^\circ$ $\delta_2 = -6^\circ$

Analyser av lastflyten i tilfeller med forskjellige fasevinkler i det overliggende nettet gjøres for å avdekke hvor store disse forskjellene må være før det får vesentlig betydning for fordelingen av effekt mellom stasjonene. I figur 48 er det to omformerstasjoner der det overliggende nettet er stivt, og der forskjellen mellom spenningskildenes fasevinkel er 6° . På grunn av denne vinkelforskyvningen oppstår det en effektoverføring på kontaktledningen fra den ledende stasjonen til den stasjonen som sakter. I dette tilfellet overføres det 130 kW aktiv effekt og 120 kVAr reaktiv effekt fra omformerstasjonen A til B. Ved B er det 10 kW mindre effekt som tas opp, og energitapet i løpet av et døgn blir da 240 kWh. På årsbasis tilsvarer en slik effektoverføring 86 400 kWh. Med 6° vinkelforskyvning over ett roterende aggregat blir denne vinkelen på generatorsiden 2° , men som en ser oppstår det en fordeling av denne vinkelen mellom de to stasjonene, ved at summen av vinklene på generatorsidene blir 2° .

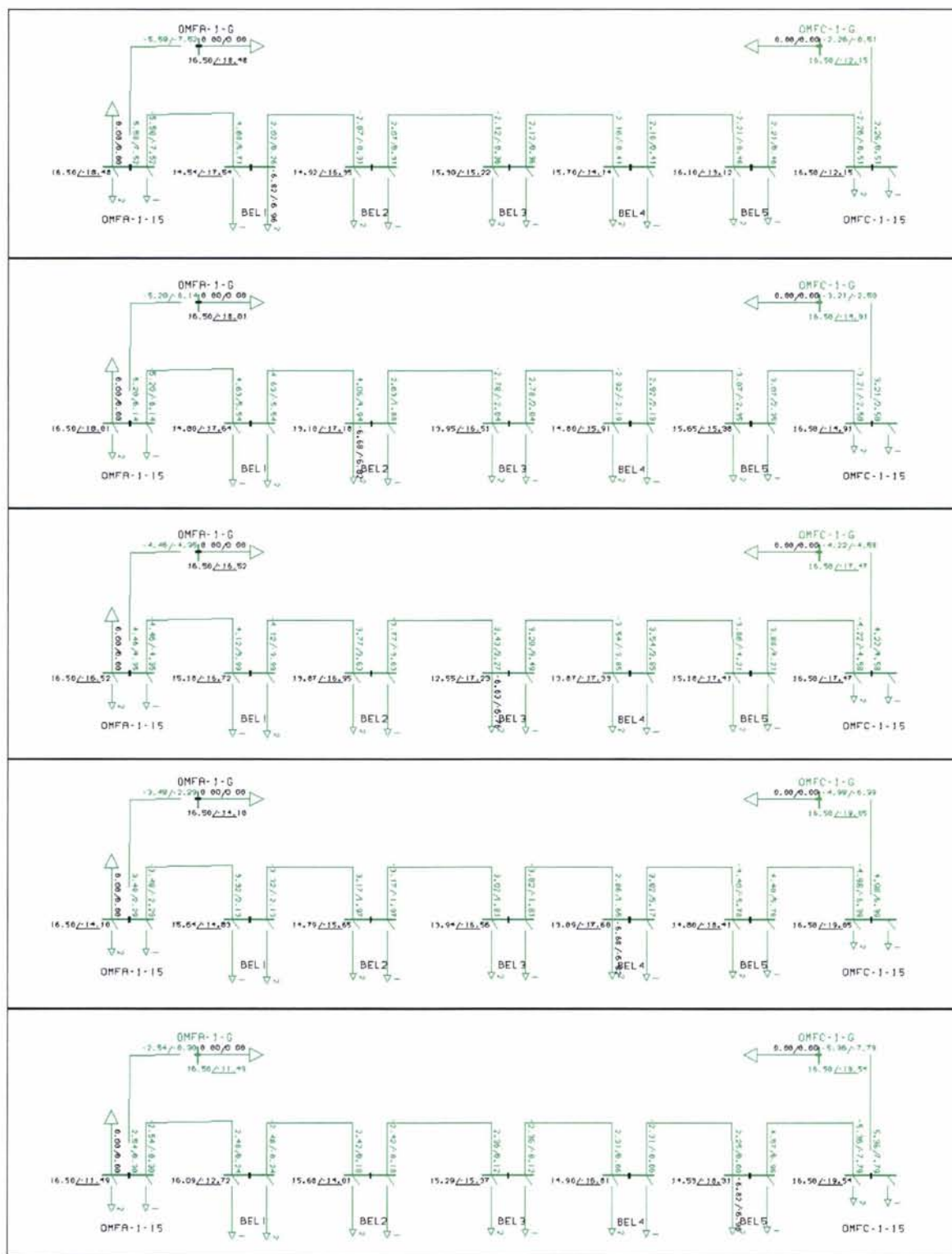
I figur 49 og figur 50 sees spenningene og lastflyten når belastningen på 7 MW forflyttes fra venstre mot høyre, spenningene blir praktisk talt de samme som i tilfellet med like fasevinkler i det overliggende nett, se avsnitt 2.2.1.2. Imidlertid er effektfordelingen mellom stasjonene noe endret, og dette kommer tydeligere frem av søylediagrammene i figur 51 og figur 52. Imidlertid er forskjellene ikke store fra tilfellet med like fasevinkler, det ser ut til å være en tendens til at omformerstasjon A leverer mest aktiv effekt, mens C leverer mest reaktiv effekt.



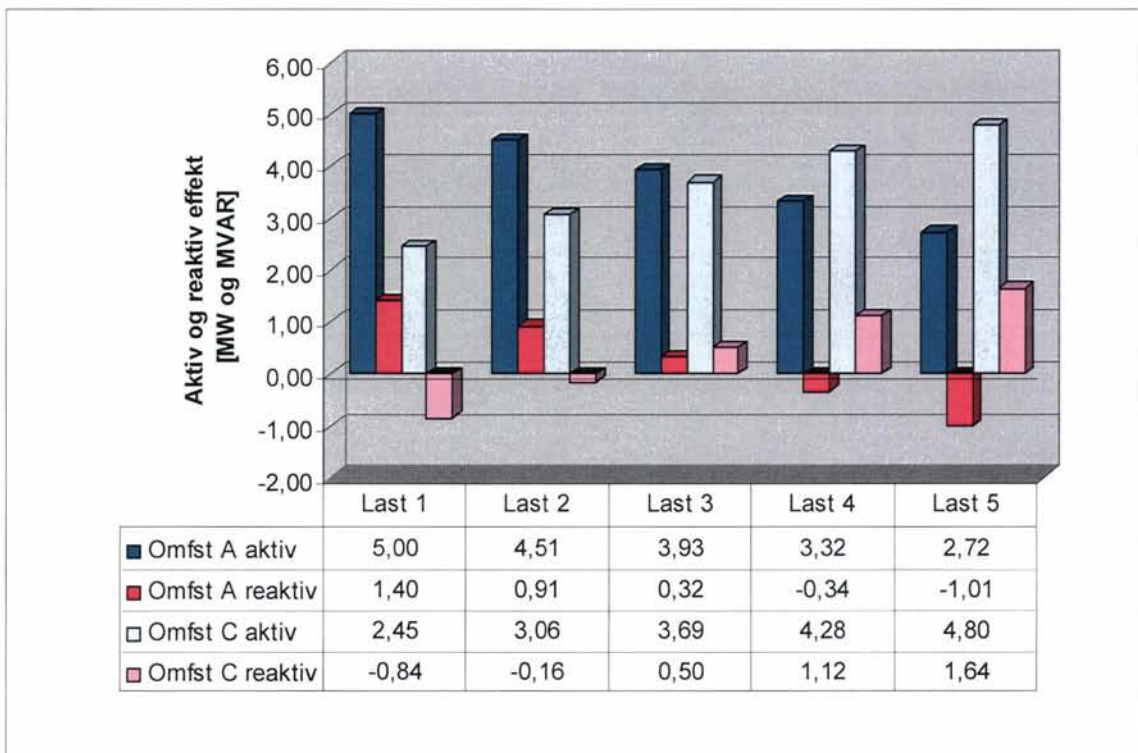
Figur 48 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning. Med -6° sakkning i det overliggende nettet til stasjon C oppstår det en effektoverføring på 130 kW og 320 kVAr fra stasjon A til stasjon C, men på grunn av tapene er det mindre effekt enn dette som overføres på kontaktlinjen. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorens spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \phi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



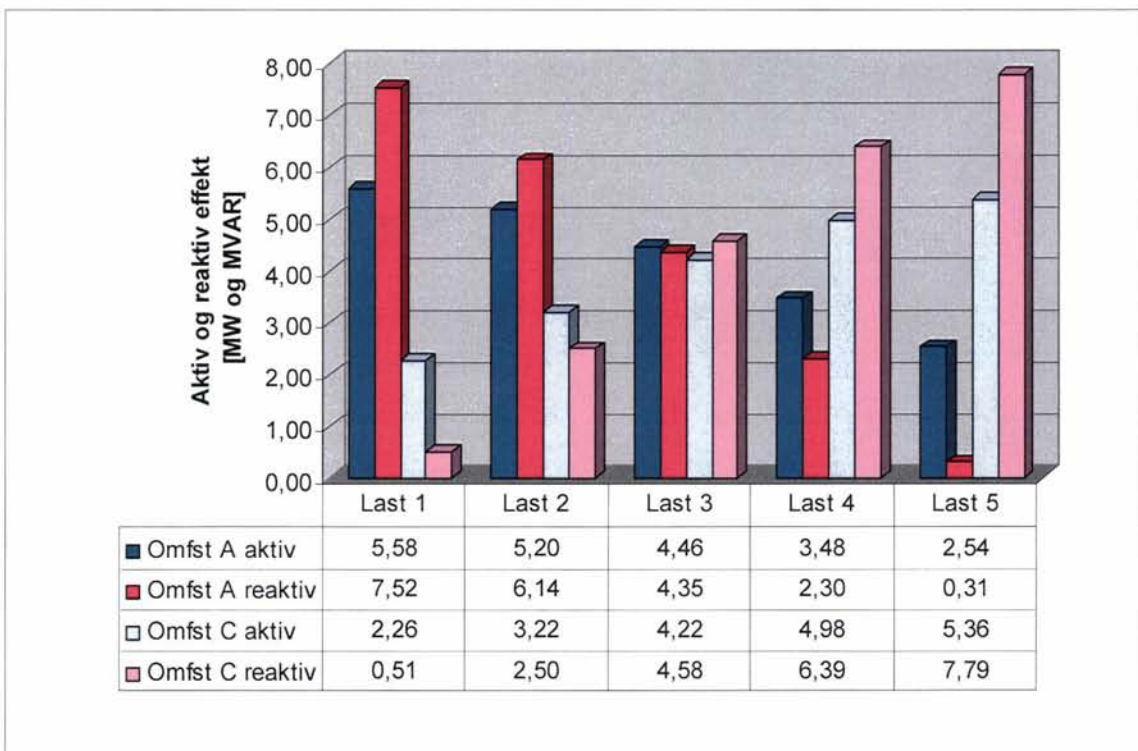
Figur 49 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett og med forskjellige fasevinkler. Fasevinkelen i det overliggende nettet for omformer C er -6° . Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 50 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett og med forskjellige fasevinkler. Fasevinkelen i det overliggende nettet for omformer C er -6° . Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 51 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



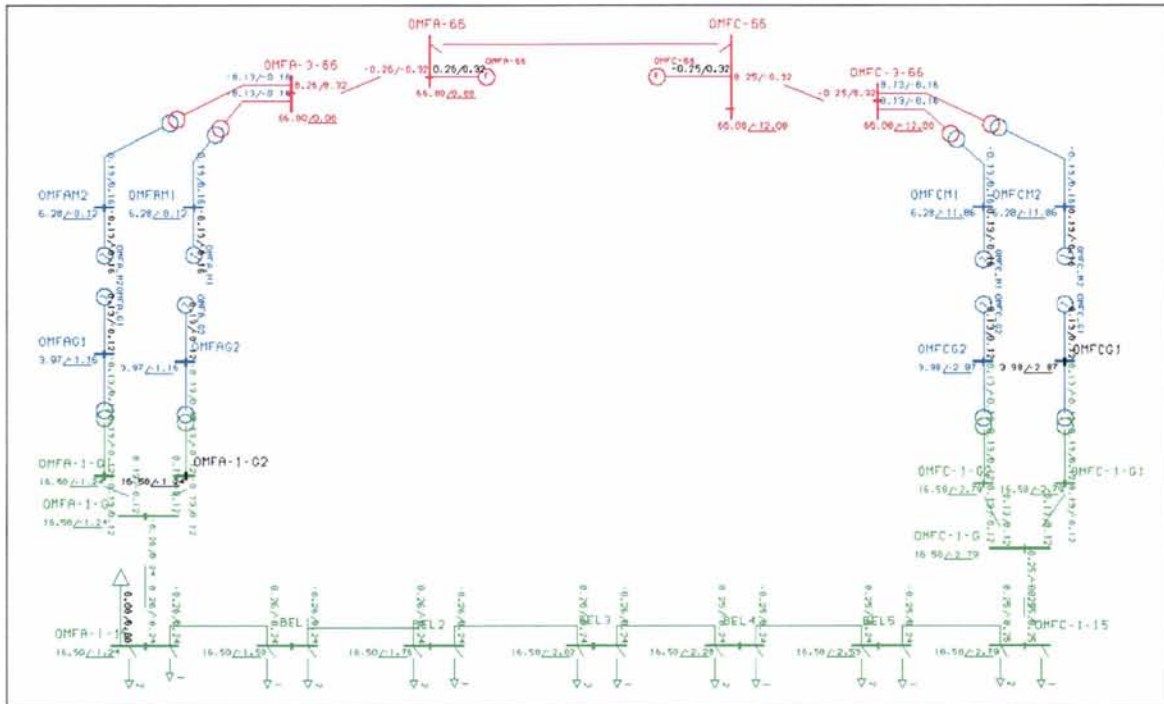
Figur 52 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.1.7 Forsøk med en matestrekning der omformerstasjonene har overliggende forsyning med forskjellige fasevinkler med $\delta_1 = 0^\circ$ $\delta_2 = -12^\circ$

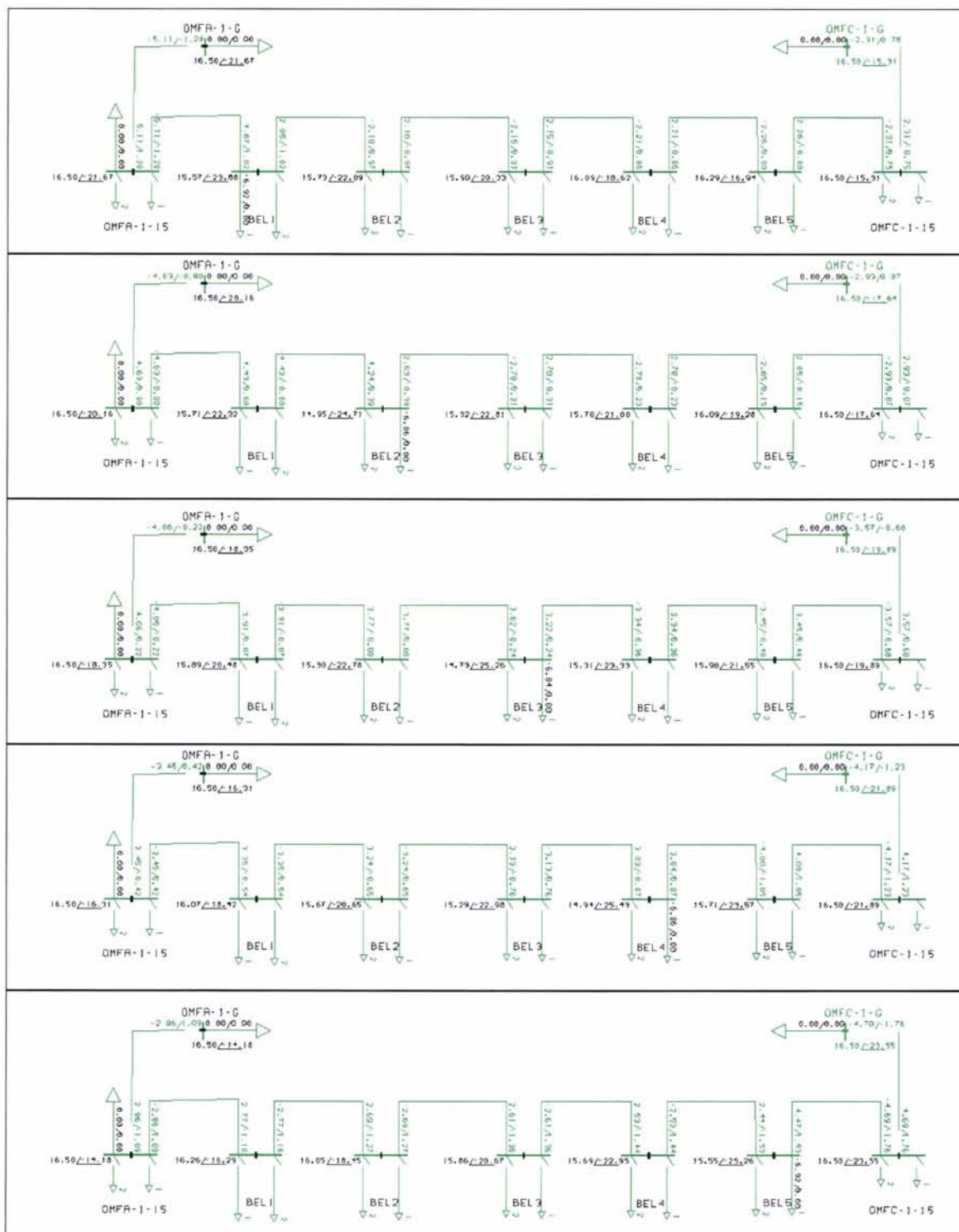
En endring av fasevinkelen i det overliggende nettet til -12° gir en endring av vinkelen på 15 kV-siden på 4° . I figur 53 er det nå er 260 kW og 240 kVAR som overføres fra omformer A til omformer B i tomgang. Dette er en fordobling av effektoverføringen i forhold til avsnitt 2.2.1.6 der fasevinkelforskjellen var halvparten så stor i det overliggende nettet. Fremdeles er det bare ca. 10 kW som tapes på denne overføringen.

Figur 54 og figur 55 viser at denne økte forskjellen i fasevinklene i det overliggende nettet knapt får noen betydning for spenningen ved belastningene; det gir kun en liten endring av fasevinklene ute på kontaktledningen.

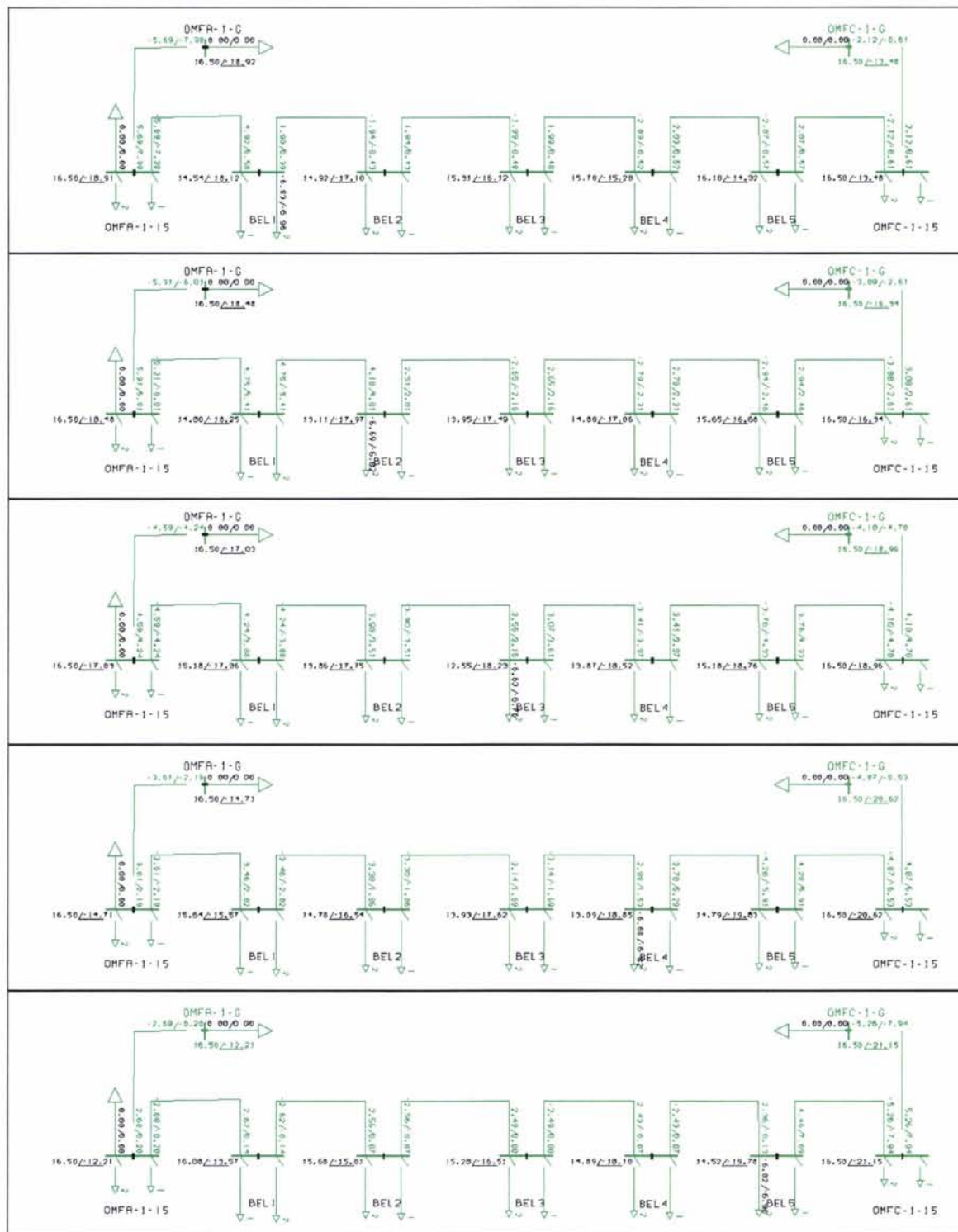
Søylediagrammene i figur 56 og figur 57 viser en noe mer usymmetrisk lastfordeling, men egentlig er forskjellen liten fra tilfellet uten vinkelforskjeller i det overliggende nettet, se avsnitt 2.2.1.2. Når lasten er midt på strekningen, leverer omformerstasjonen A 12 % mer effekt (MVA) enn stasjon C.



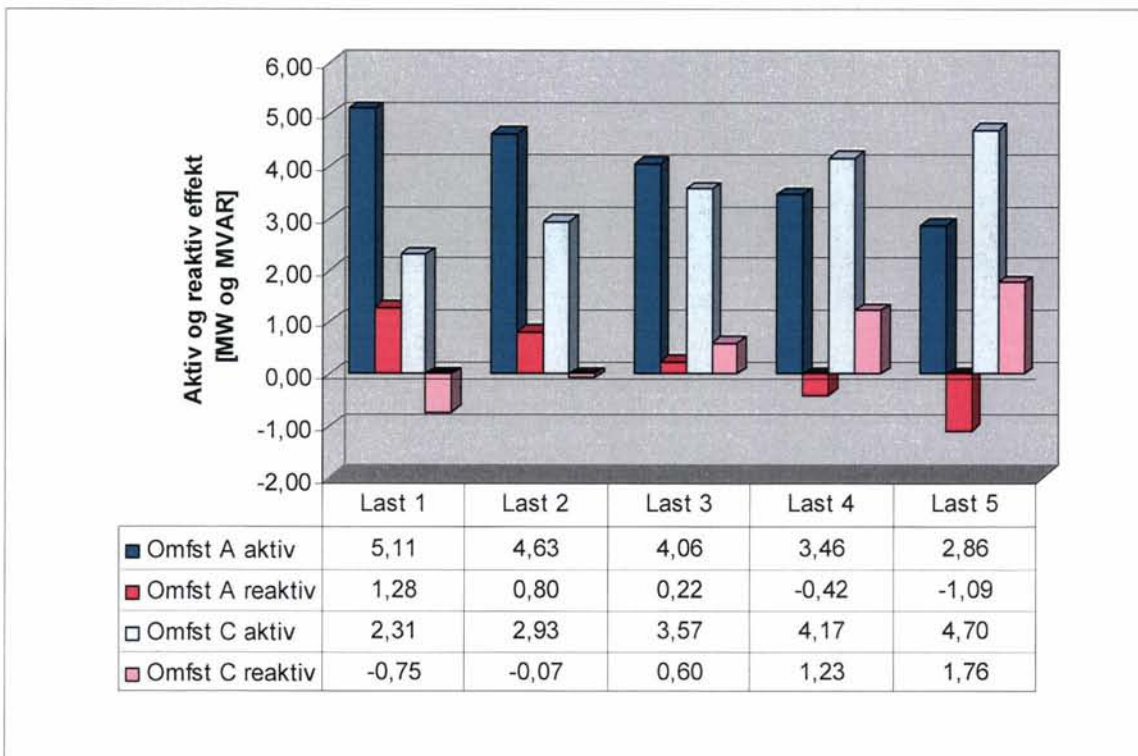
Figur 53 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning. Med -12° saking i det overliggende nettet til stasjon C oppstår det en effektoverføring på 260 kW og 320 kVAR fra stasjonen A til C, men på grunn av tapene er det mindre effekt enn dette som overføres på kontaktlinjen.



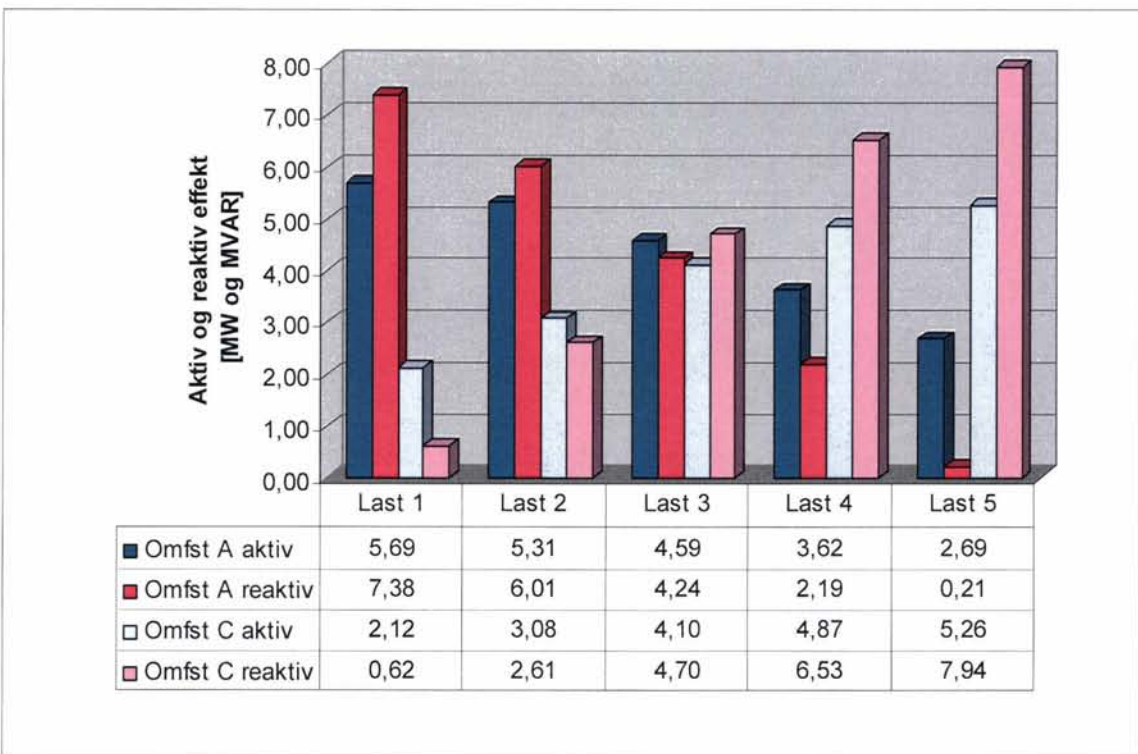
Figur 54 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stift overliggende nett og med forskjellige fasevinkler. Fasevinkelen i det overliggende nettet for omformer C er -12° . Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 55 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett og med forskjellige fasevinkler. Fasevinkelen i det overliggende nettet for omformer C er -12° . Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 56 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.

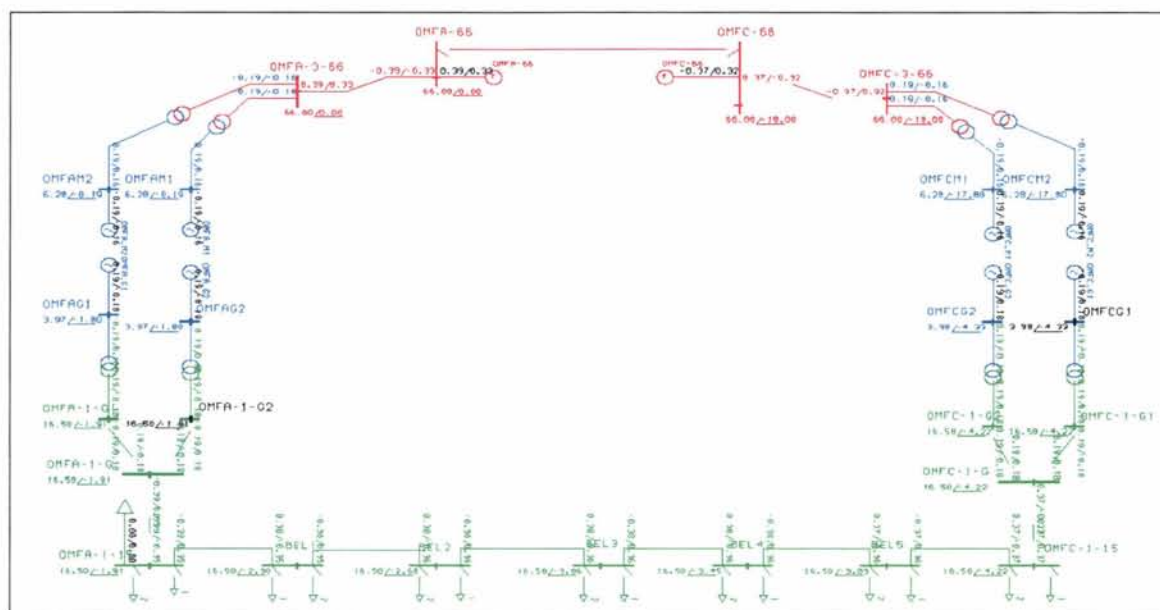


Figur 57 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

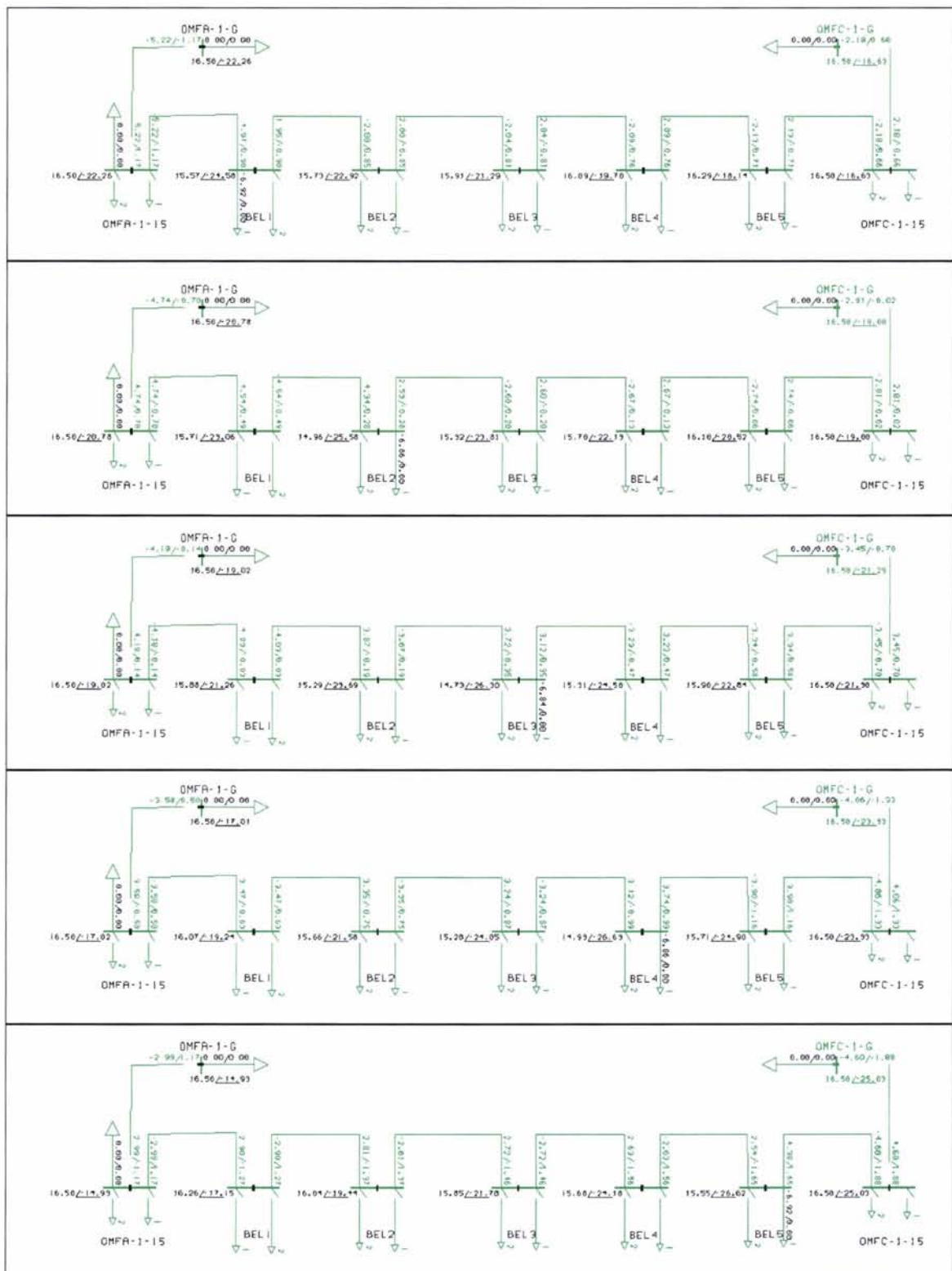
2.2.1.8 Forsøk med en matestrekning der omformerstasjonene har overliggende forsyning med forskjellige fasevinkler med $\delta_1 = 0^\circ$ $\delta_2 = -18^\circ$

Når forskjellen mellom fasevinklene i det overliggende nettet er så mye som -18° , kan en i tomgang se at det er 390 kW og 350 kVAr som overføres i nettet i tomgang, se figur 58. Det er en betydelig mengde reaktiv effekt som nå overføres mellom stasjonene, og forskjellen mellom aktiv effekt sendt ut fra stasjon A og mottatt effekt i stasjon B tilsvarer et tap på ca. 200 kW.

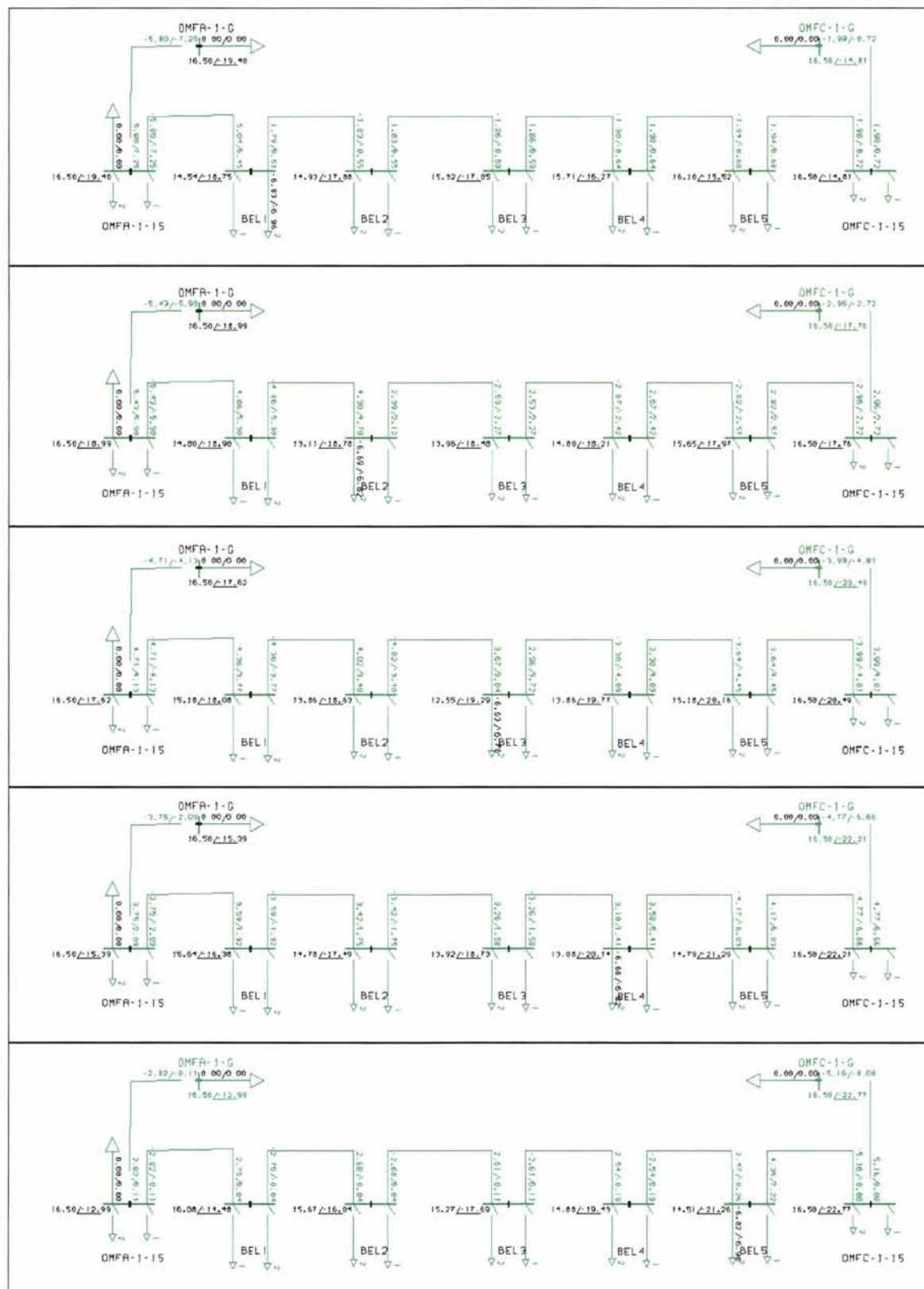
Figur 59 og figur 60 viser effektflyten og spenningene for henholdsvis rent aktiv belastning og aktiv og reaktiv belastning. Også denne gangen er spenningene praktisk talt uendret. Imidlertid viser søylediagrammene for lastfordelingen mellom omformerstasjonene i figur 61 og figur 62 at belastningen nå er påfallende mer ujevnt fordelt. Det er mer aktiv effekt som kommer fra stasjon A (55 %) og betydelig mer reaktiv (83 %) effekt fra stasjon C når lasten er rent aktiv og plassert midt på matestrekningen. For tilsynelatende effekt, leverer omformerstasjon A 19 % mer effekt enn stasjon C. Med blandet belastning midt på blir effektfordelingen jevnere med 54 % av aktiv effekt fra stasjon A og 54 % av reaktiv effekt fra stasjon C. Forskjellige fasevinkler fører ikke til at det er store reaktive effektmengder som overføres, se avsnitt 2.2.1.2, Dette gjelder både ved rent aktiv og ved blandet belastning. Det ser heller ikke ut til å bli særlig stor usymmetri i lastfordelingen på grunn av denne forskjellen i fasevinkler.



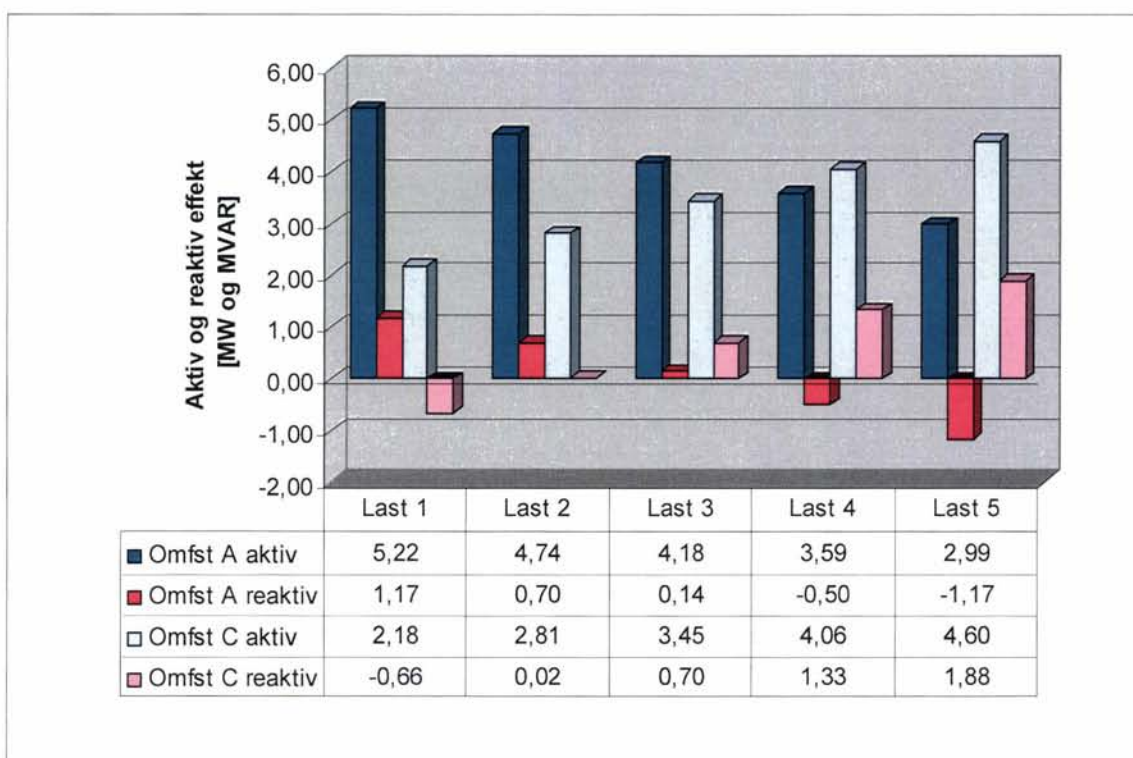
Figur 58 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning. Med -18° saking i det overliggende nettet til stasjon C oppstår det en effektoverføring på 390 kW og 350 kVAr fra stasjonen A til C, men på grunn av tapene er det mindre effekt enn dette som overføres på kontaktlinjen.



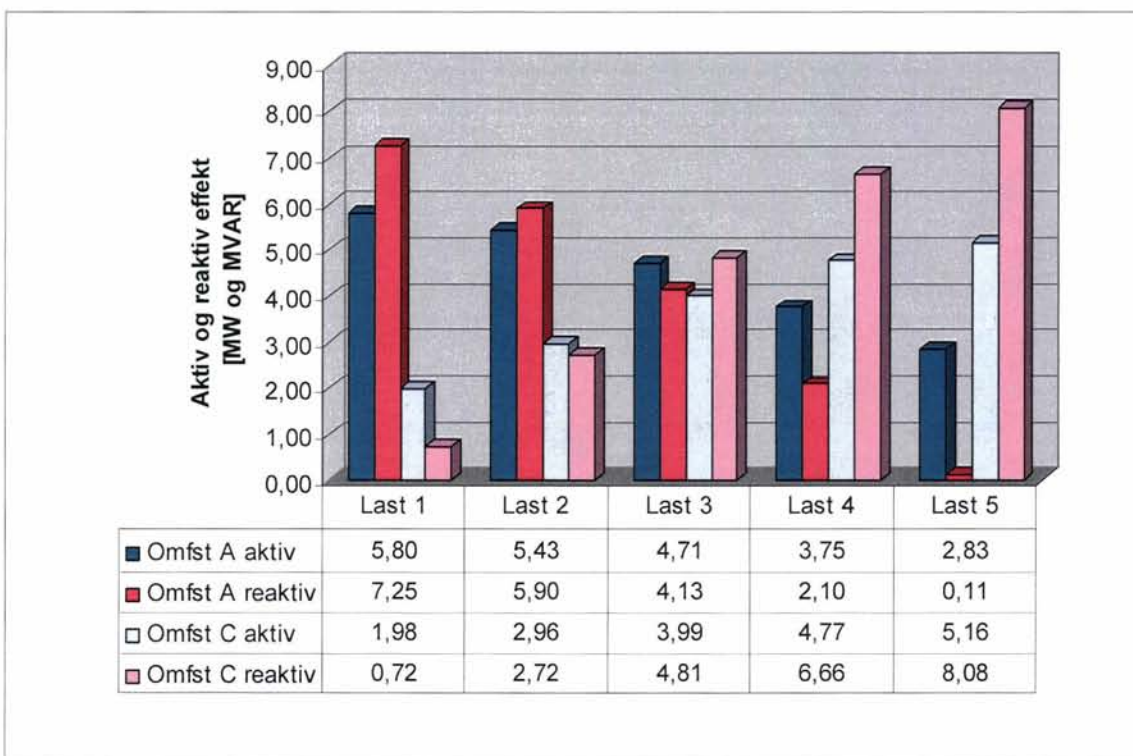
Figur 59 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett og forskjellige fasevinkler. Fasevinkelen i det overliggende nettet for omformer C er -18° . Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 60 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett og forskjellige fasevinkler. Fasevinkelen i det overliggende nettet for omformer C er -12°. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 61 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



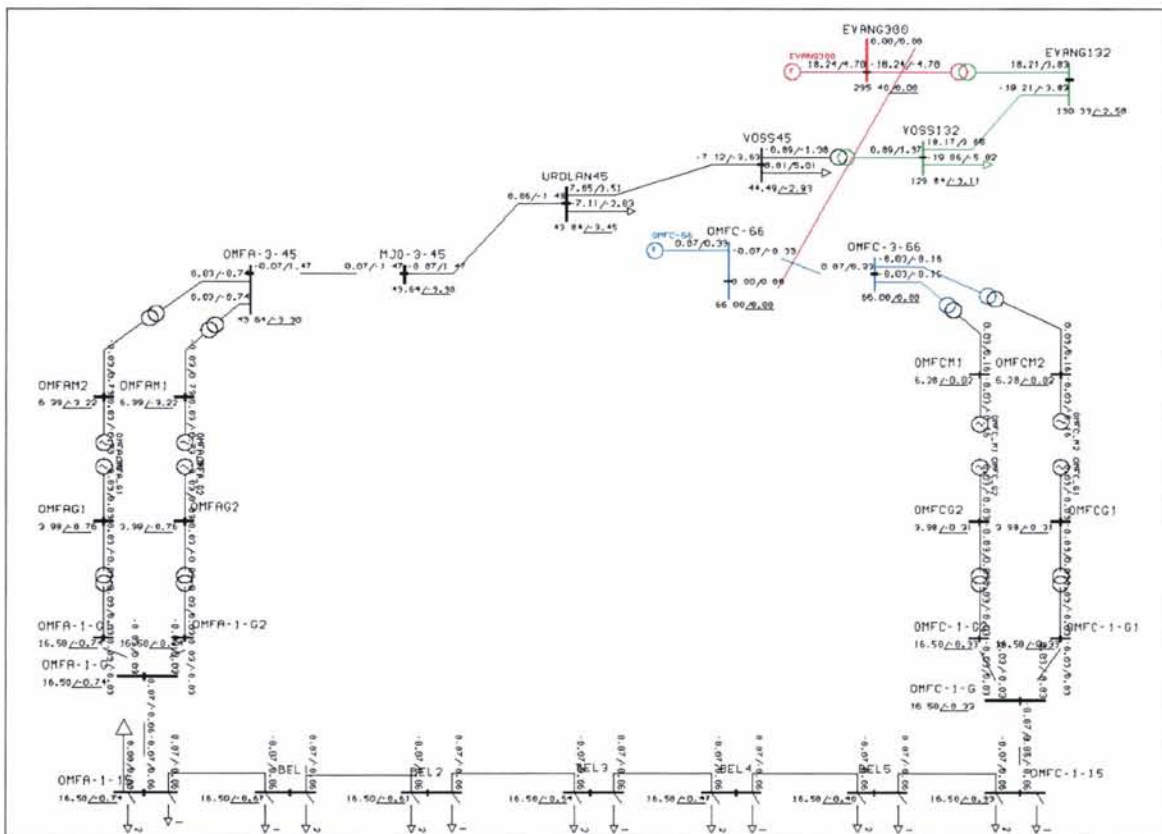
Figur 62 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.1.9 Forsøk med en matestrekning der en omformerstasjon har et svakt overliggende nett og den andre sterkt nett

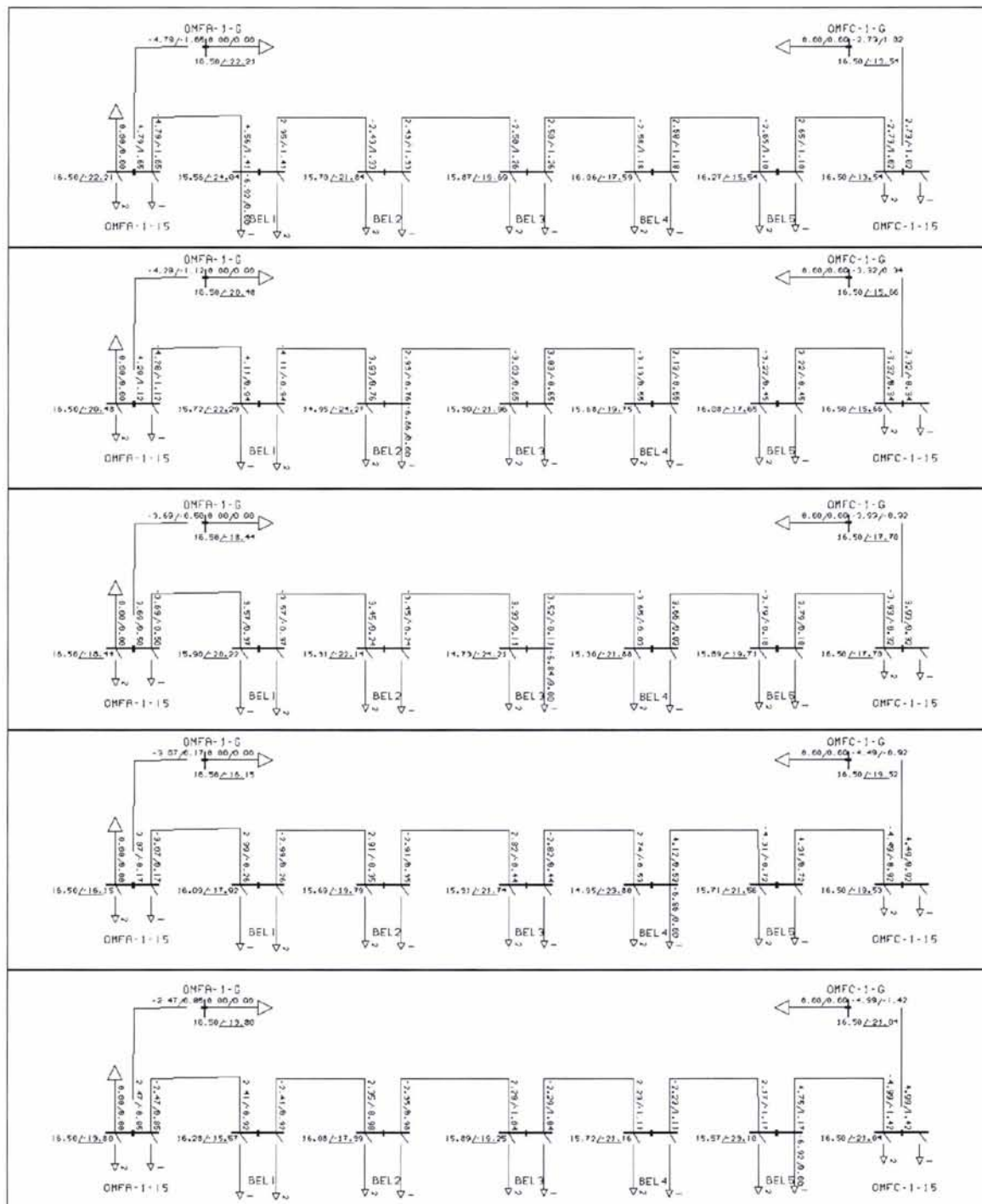
På en matestrekning der den ene stasjonen har et sterkt overliggende nett og den andre ett svakt overliggende nett vil det kunne oppstå en uønsket lastfordeling av aktiv og reaktive effekter. Dette kan skyldes både belastningsavhengige og uavhengige lastvinkler mellom de to overliggende nettene. Nedenfor er vist resultatene for et slikt tilfelle, og igjen benyttes det overliggende nettet for Mjølfjellet som modell for et svakt nett.

Figur 63 viser lastflyt i tomgang. Fasevinkelen på trefasesiden for de to stasjonene har en forskjell på $3,3^\circ$, noe som gir en effektflyt på kontaktledningen på 70 kW og 70 kVAr. Figur 64 og figur 65 viser effektflyten og spenningene for henholdsvis rent aktiv belastning og blandet belastning. Også denne gangen er spenningene praktisk talt uendret. Imidlertid viser søylediagrammene for lastfordeling mellom omformerstasjonene i figur 61 og figur 62 at belastningen nå er mer ulikt fordelt. Det er noe mer aktiv effekt som kommer fra stasjon B, og tilsvarende mer reaktiv effekt fra stasjon C.

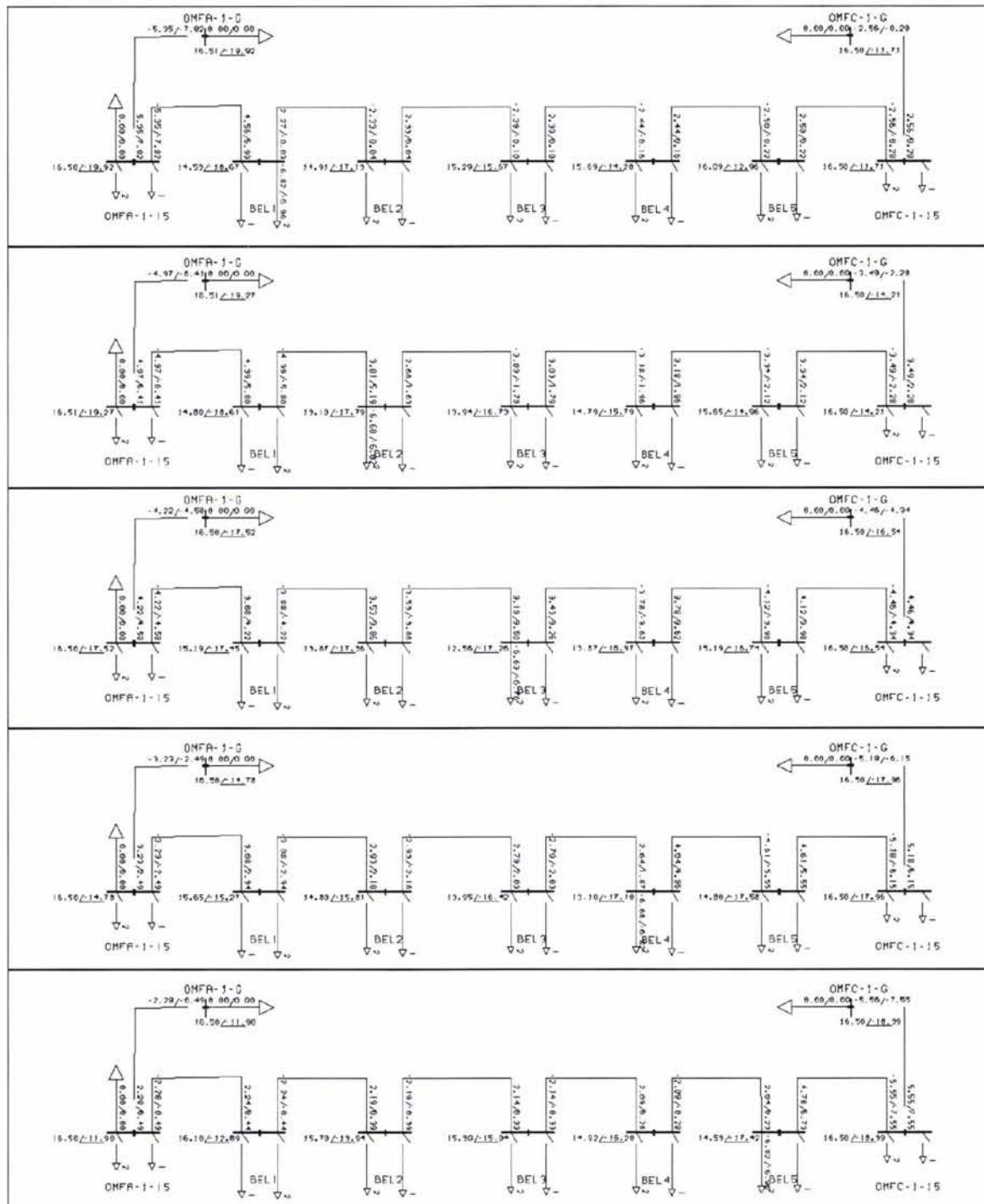
Forskjellene kan neppe sies å være betydelige, men større faseforskjeller i det overliggende nettet vil i tillegg gjøre utslag. De beskrevne forhold vil sannsynligvis kunne endre seg om nabostasjoner tas med i modellen.



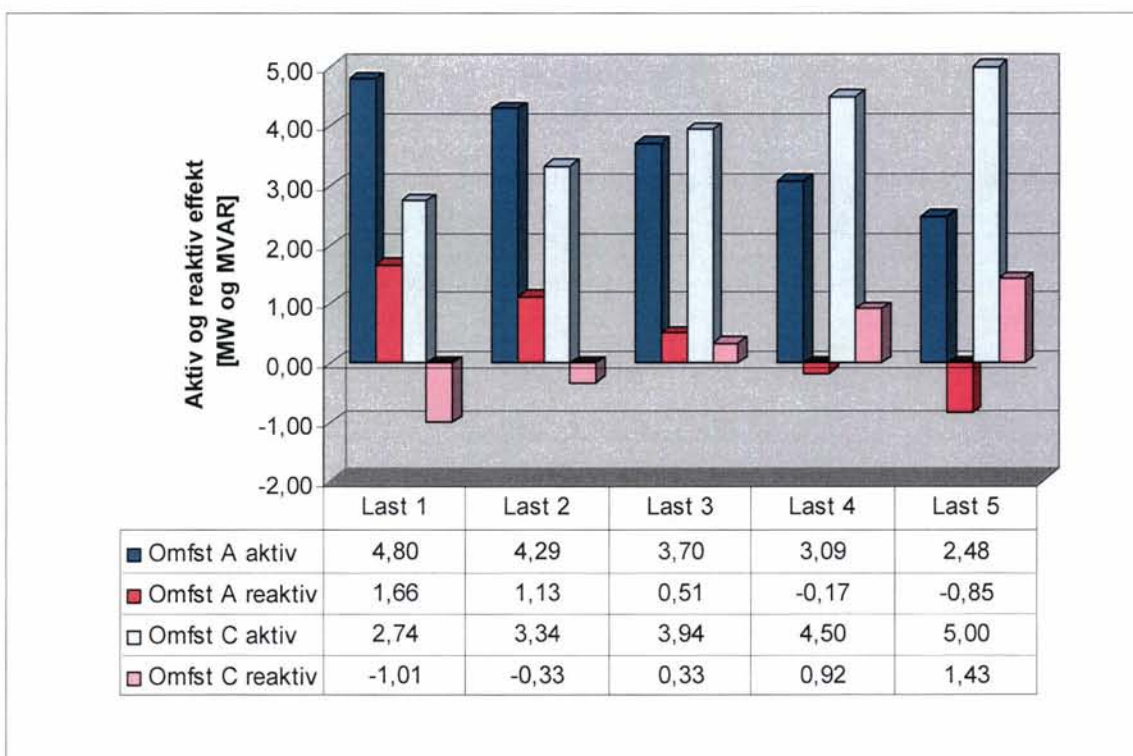
Figur 63 Spenningen og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning. Det er et svakt overliggende nett for stasjon A og et sterkt overliggende nett ved stasjon B. Det gir en effektoverføring på 70 kW og 70 kVAr fra stasjon C til A som skyldes fasevinkler i det overliggende nettet på grunn av belastningsuttakene mellom den stive spenningskilden og omformerstasjonen.



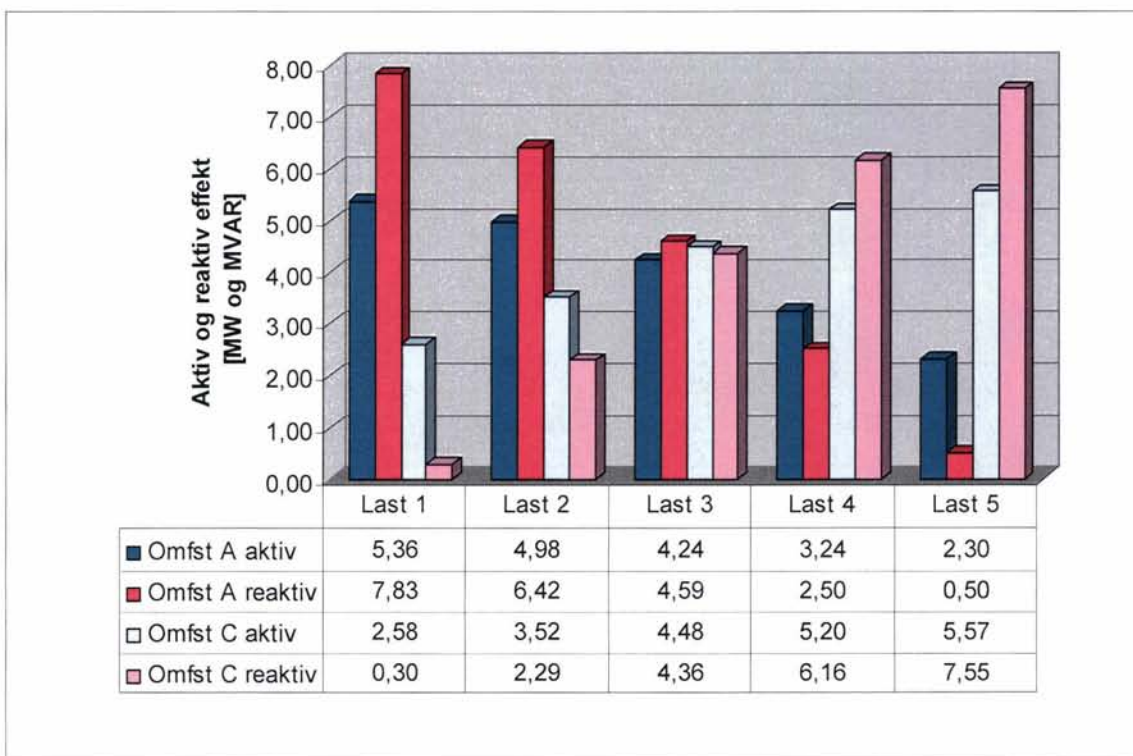
Figur 64 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på $2 \times 5,8$ MW. Det er et svakt overliggende nett for stasjon A og et sterkt overliggende nett ved stasjon B. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 65 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW. Det er et svakt overliggende nett for stasjon A og et sterkt overliggende nett ved stasjon B. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 66 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



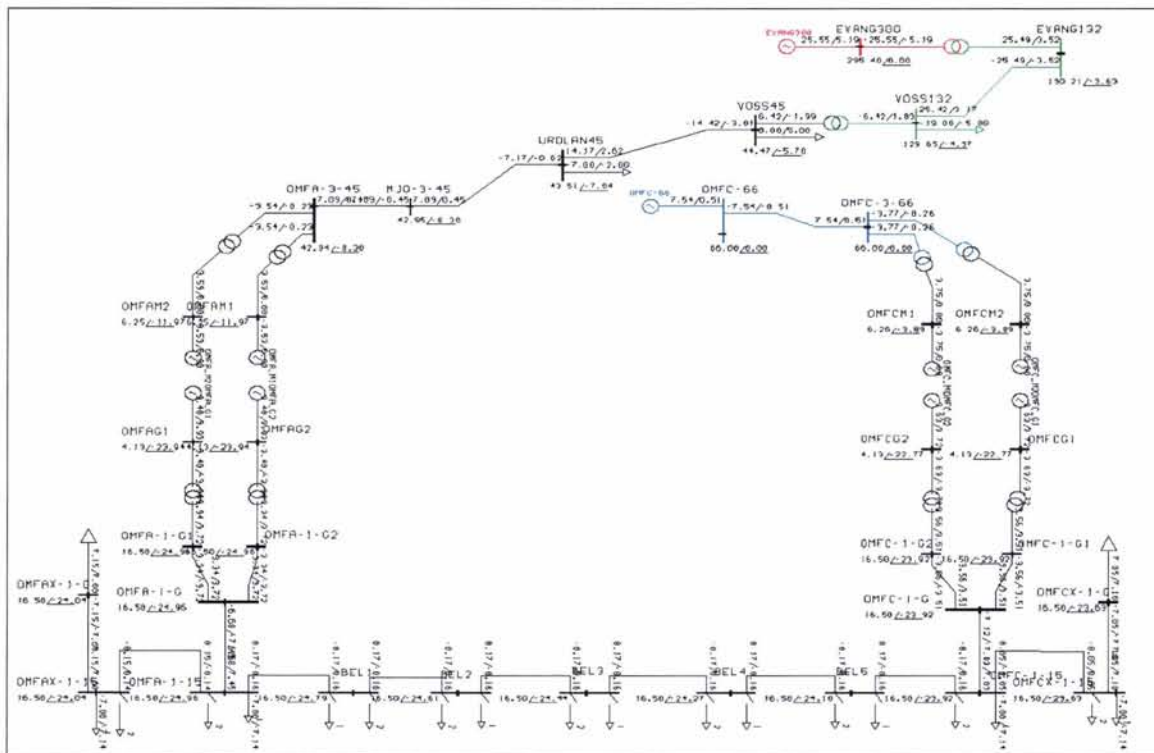
Figur 67 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.1.10 Forsøk med en matestrekning der en omformerstasjon har et svakt overliggende nett og nabostasjoner med et sterkt overliggende nett

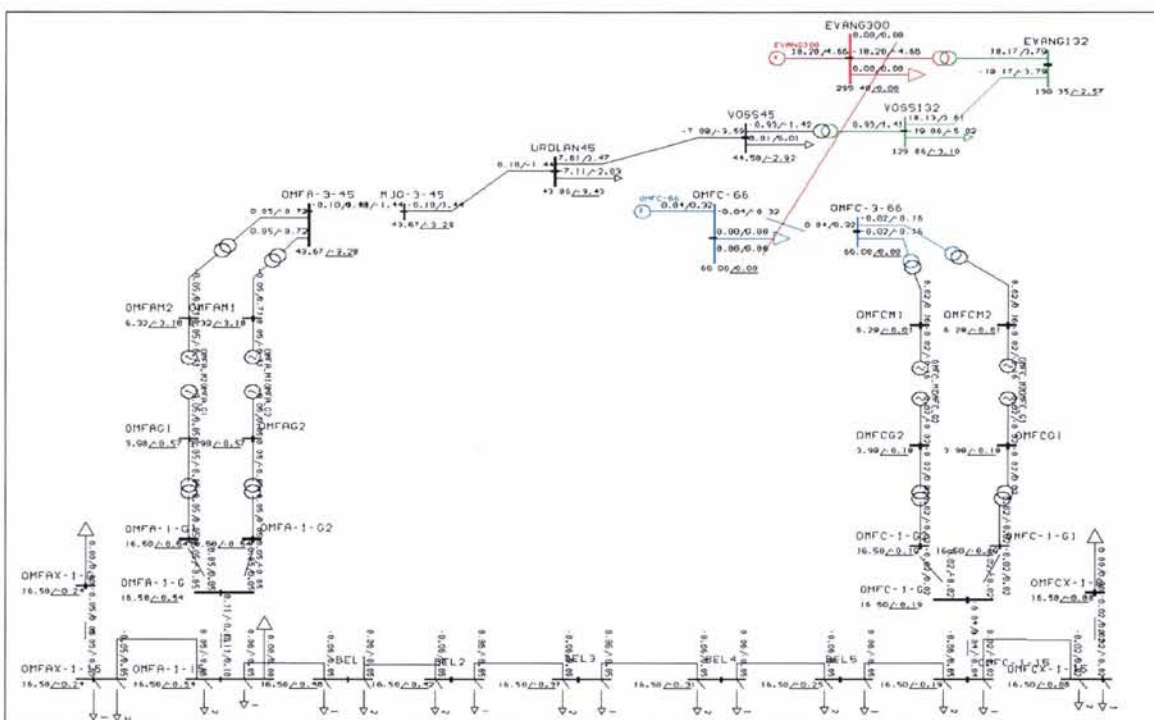
Forrige avsnitt 2.2.1.9 viste at et svakt overliggende nett til en omformerstasjon med nabostasjon med et sterkt nett ga liten forskjell i effektfordelingen mellom stasjonene. En antok at lastfordelingen mellom de tilhørende nabostasjonene måtte være med i modellene for å kunne vise at den stasjonen som har et svakt overliggende nett, mater inn mindre effekt enn sine sterkere naboer. Her skal det gjøres et forsøk med nabostasjoner til den matestrekningen som studeres for å se om det påvirker lastfordelingen.

Figur 68 viser lastflyten med belastninger på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$ på 15 kV-samleskinne. Dette brukes for å initialisere spenningsregulatoren på motorsiden. Denne illustrasjonen tas med for vise fasevinkler med stor last og i tomgang i figur 70. Med stor last blir fasevinkelen $8,3^\circ$ på 45 kV-samleskinne før motortransformatorne, mens den samme vinkelen på den stasjonen som har et sterkt overliggende nett er 0° . Allikevel ser en at fasevinkelen på 15 kV-samleskinne er bare 1° forskjellig. I tomgang blir fasevinkelen som skyldes den svake linjen, bare $3,29^\circ$ for stasjon A, og vinkelforskjellen mellom A og C på 15 kV-samleskinne blir tilsvarende liten.

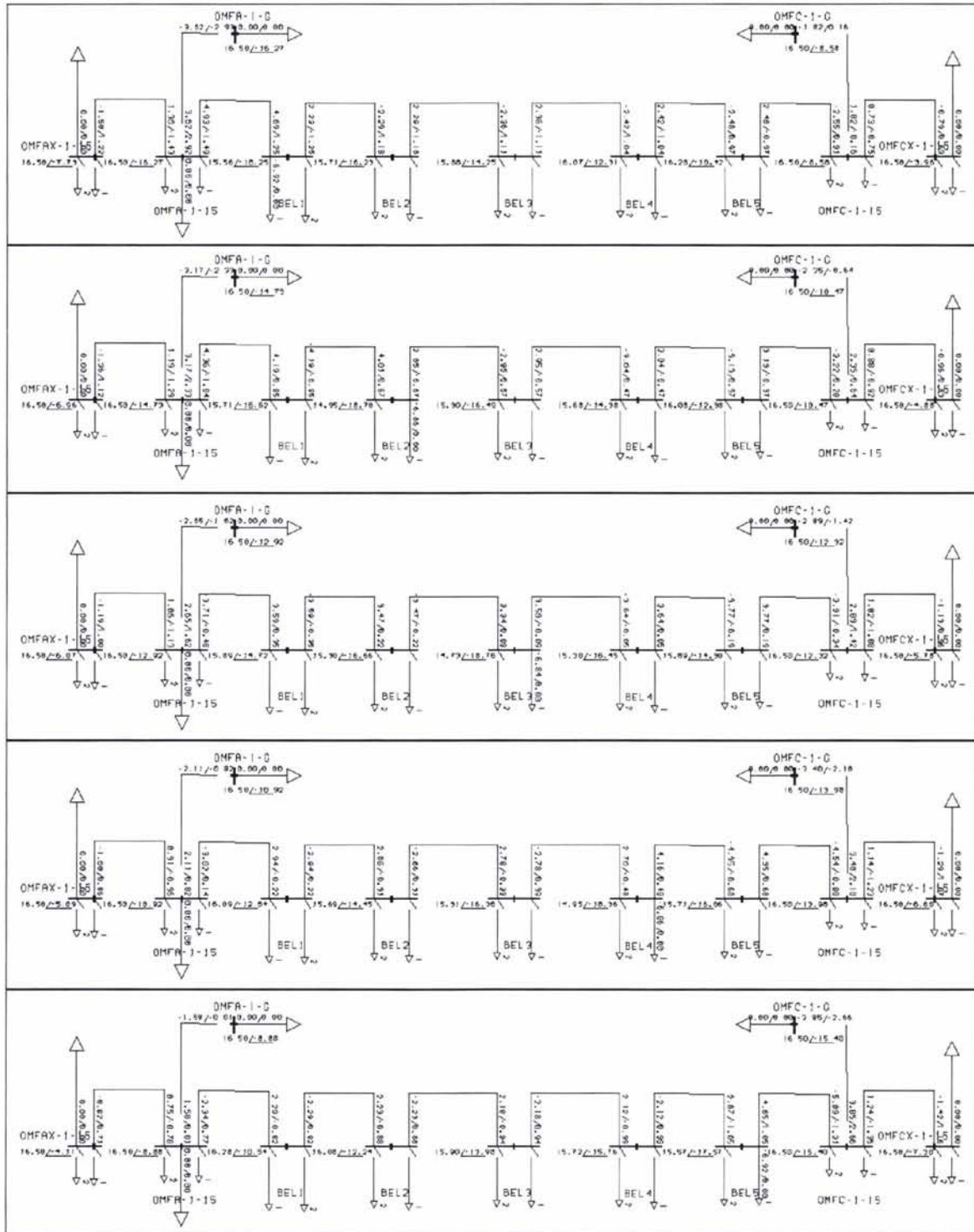
Sammenlignes figur 70 og figur 71 med tilfellet uten nabostasjoner, leveres det nå mindre effekt for stasjonene A og C ved at AX og CX også bidrar. Det utveksles en del reaktiv effekt mellom stasjonene på matestrekningen som studeres og nabostasjonene. Imidlertid ser en ikke at stasjon A med et svakere nett enn stasjon C, leverer påfallende mindre effekt enn stasjon C. Selv om en nok ser større forskjeller for levert effekt enn i undersøkelsen uten nabostasjoner. Det må nok være større forskjeller i fasevinkler i det overliggende nettet for å se en betydelig reduksjon av forsyningen fra stasjon A.



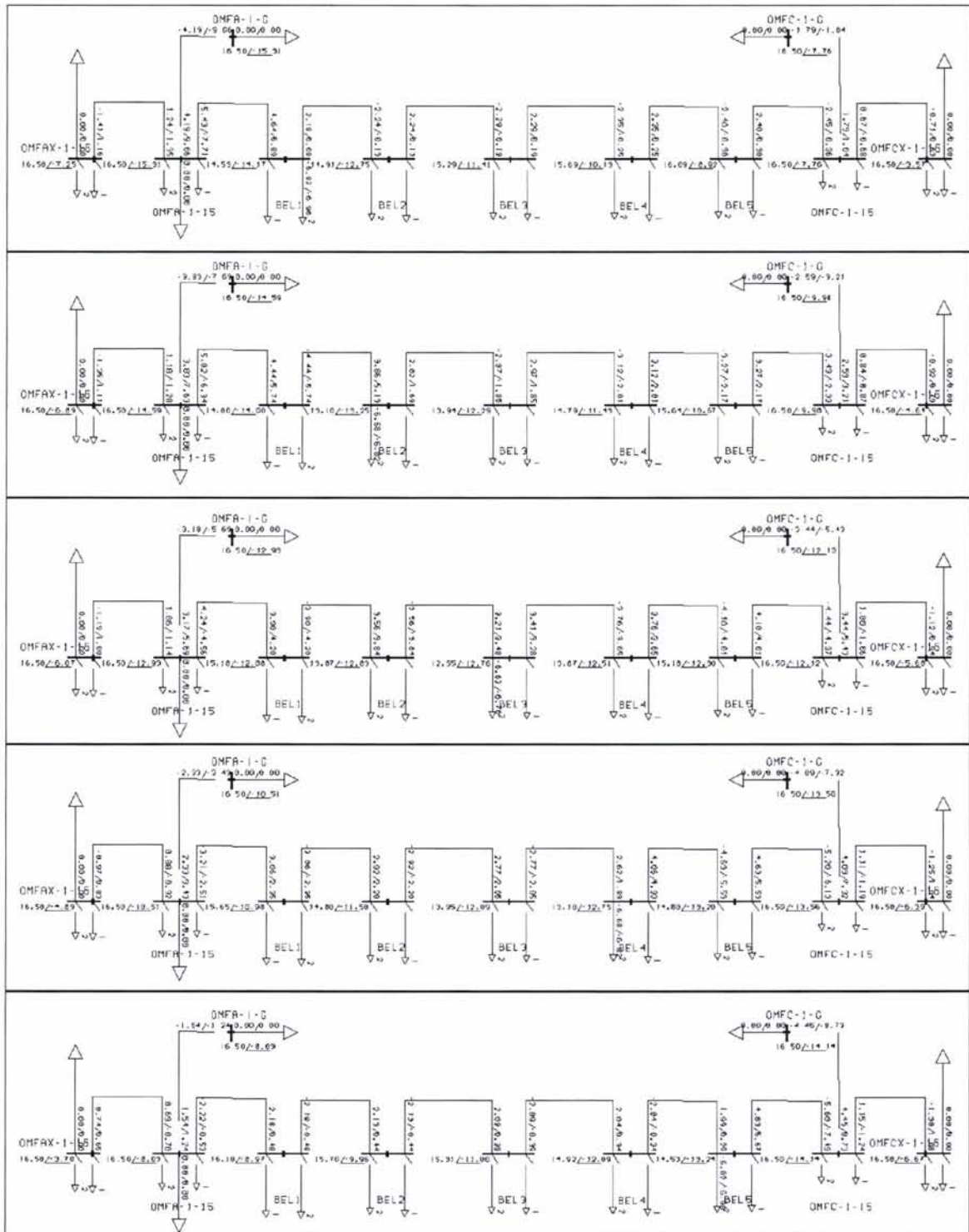
Figur 68 Spenningene og vinklene ved belastningen for å initialisere spenningsregulatorerne på motorene til å trekke 0 MVar hver og sette referansespenningen til 6,3 kV når lasten på generatorene er 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$. En ser tydelig hvorledes fasevinklene i det overliggende nettet er forskjellige i stasjonene A og C, men at spenningsvinklene på 15 kV-samleskinne er nesten like.



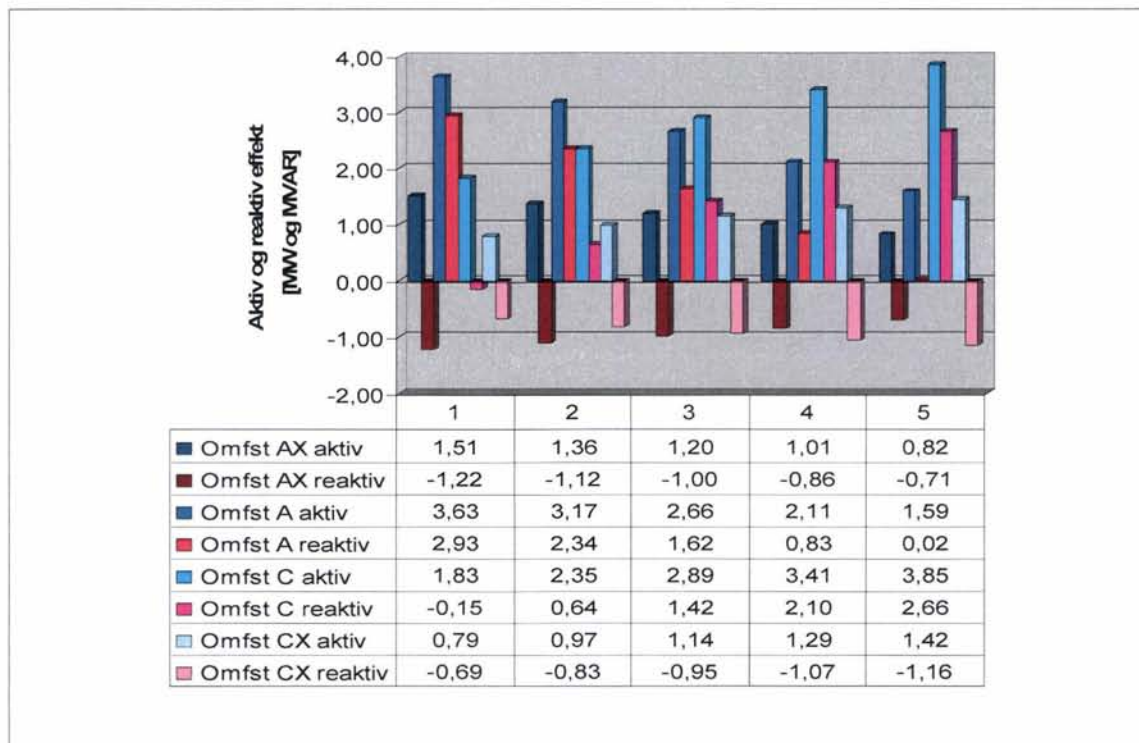
Figur 69 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning. Med et svakt overliggende nett til stasjon A og et sterkt overliggende nett til C gir det en effektoverføring på 60 kW fra C til A og 50 kVar fra A til C.



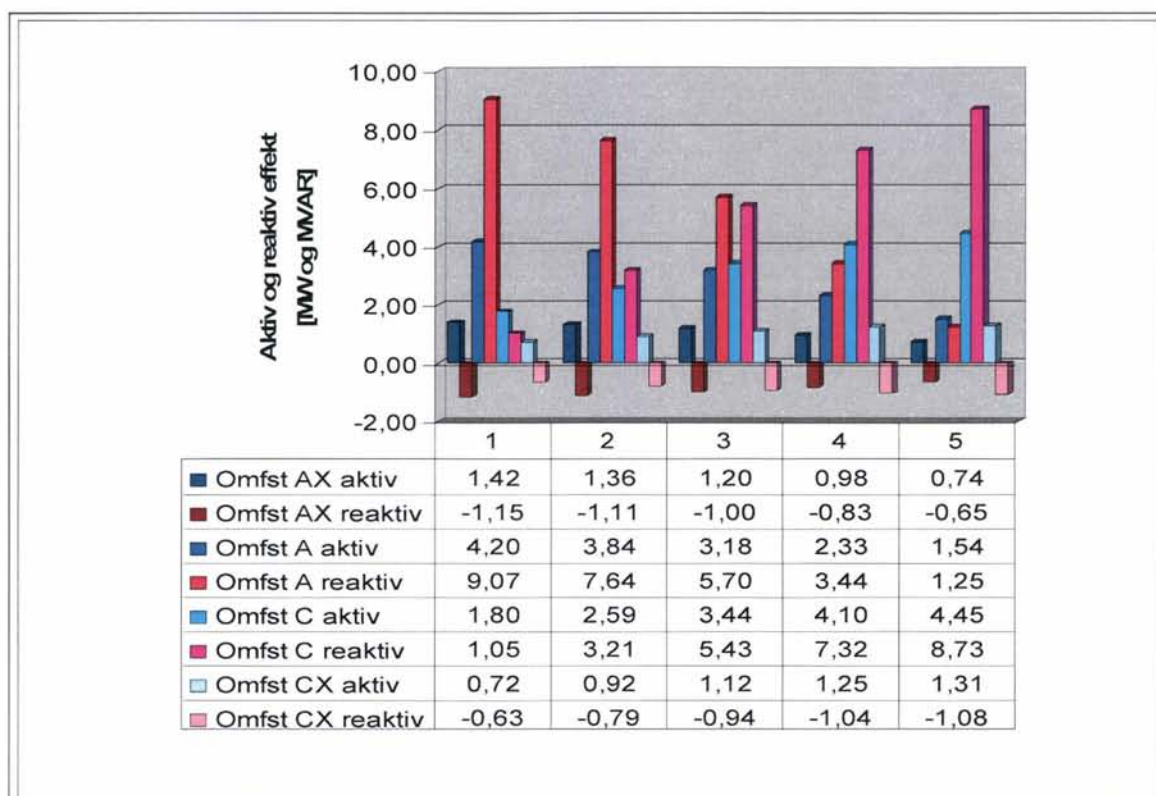
Figur 70 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW. Det er et svakt overliggende nett for stasjon A og et sterkt overliggende nett til stasjon B. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 71 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW. Det er et svakt overliggende nett for stasjon A og et sterkt overliggende nett ved stasjon B. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 72 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



Figur 73 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.1.11 Forsøk med en matestrekning der lasttuttaket er større enn omformerstasjonenes innsatte ytelse

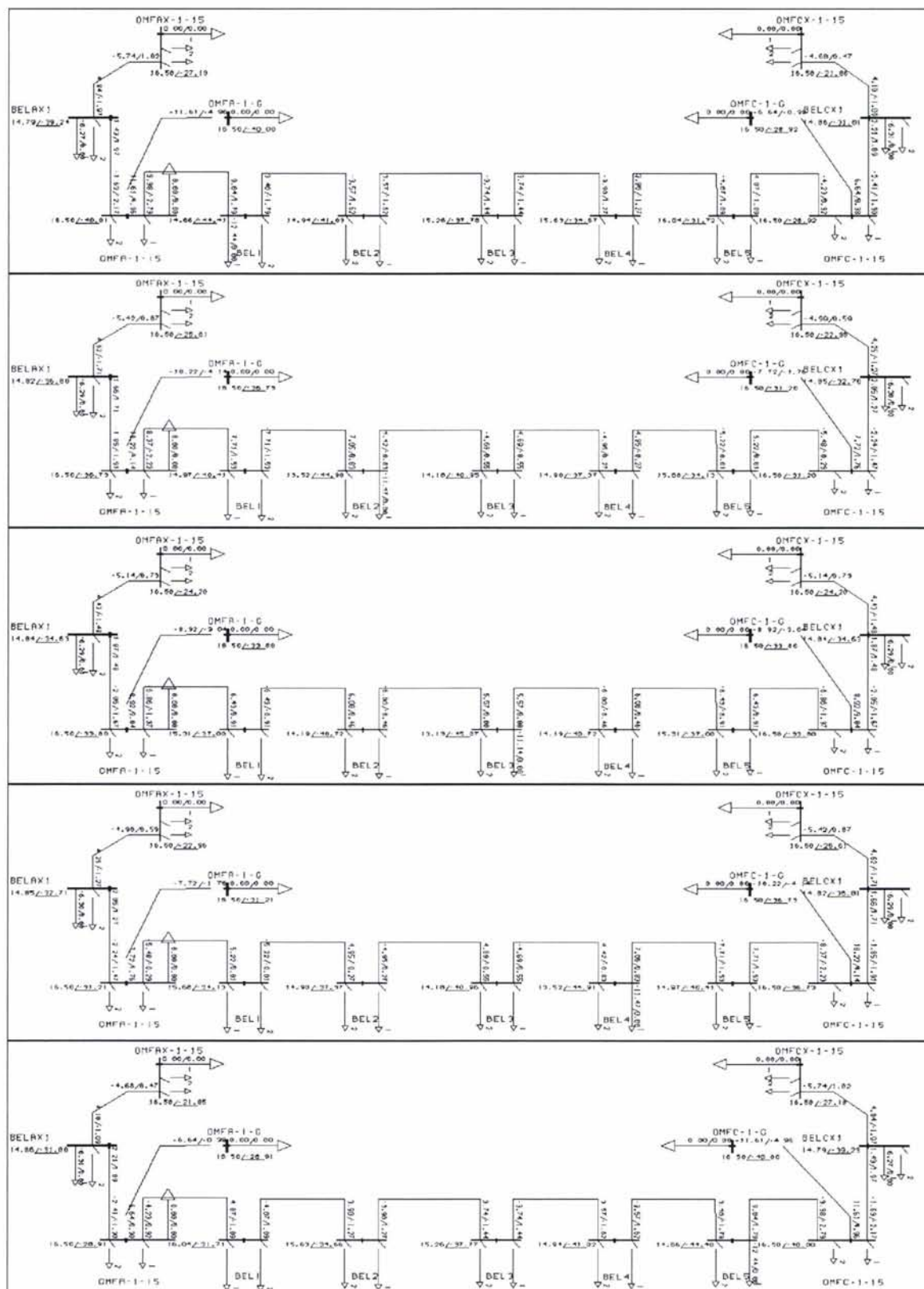
Med multiple lokomotiver, for eksempel E116, eller andre lokomotiver som trekker stor effekt, kan ytelsen komme til å overstige omformerstasjonenes ytelse. Installert effekt i E116 er 7,3 MW, og moderne fremtidige lokomotiver som BR189, klarer 6,4 MW. Når to lokomotiver koples sammen for å trekke en stor vekt, kan altså ytelsen bli rundt 12 til 14 MW, noe som mer enn den normalt innsatte ytelsen i omformerstasjoner (2 x 5,8 MVA). Imidlertid kan omformerstasjonene overbelastes, og det maksimale effektuttaket i 6 minutter er 16 MVA for 2 x 5,8 MVA (gitt av termiske begrensninger) og maksimalt 1250 A strøm i 2 sekunder (overstrømsinnstilling). Med en stiv spenning på 16,5 kV blir maksimalt 2-sekunders effektuttak 20,6 MVA. Maksimal belastning i en time er 11,6 MVA.

Hvis det er få tog med så stor ytelse på matestrekningen, vil samtidighetsfaktoren bli liten, men uansett må en kunne regne med at dette store effektopptaket er kortvarig selv fra bare ett tog. Det er interessant å se hvorledes effektfordelingen mellom omformerstasjoner skjer, og om det er fare for overbelastning om dette skjer. I så fall sier dette noe om begrensninger som må innføres med antall slike tog, begrensninger i høyeste tillatte effektopptak, og hvordan innstillingen av spenningsregulatorene kan gjøres for å unngå utfall.

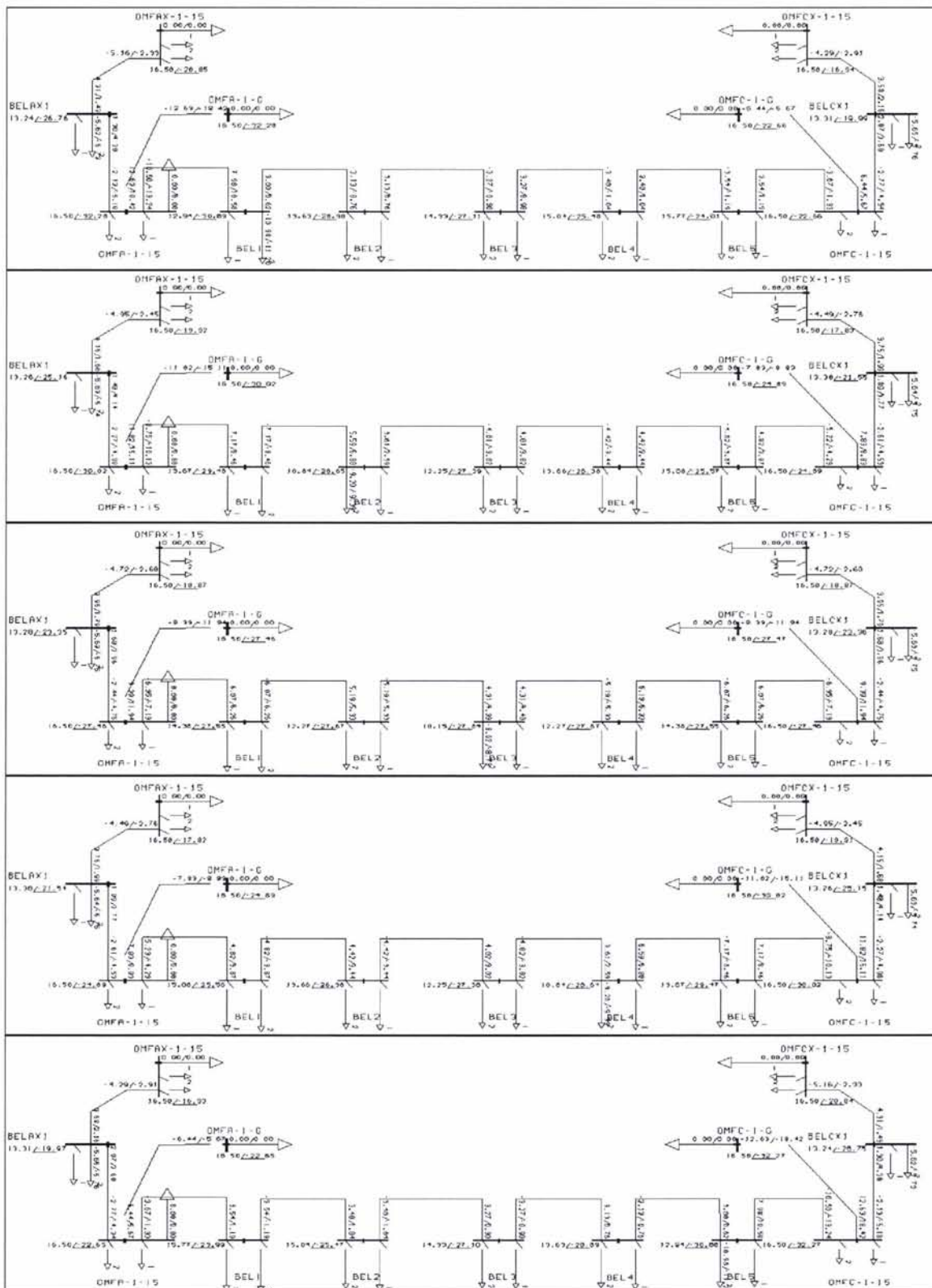
Nedenfor viser figur 74 en 80 km lang matestrekning mellom omformerstasjonene A og C med 2 x 5,8 MVA aggregater og et tog som trekker 14 MW med $\cos \varphi = 1,0$. For å undersøke innvirkningen av nabostasjoner ligger også stasjonene AX og CX 80 km unna i hver sin retning. Mellom matestrekningene AX – A og CX – C er det en last midt på strekningen som trekker 7,0 MW. Med en så stor belastning er spenningsavhengigheten for P og Q økt fra 0,2 til 1,0 (tilsvarende last med konstant strøm for redusert spenning) for å få simuleringen til å konvergere. Også i virkeligheten vil lokomotivene redusere effektopptaket når spenningen blir lav. Stasjonene A og B leverer effekt også til lasten på 7 MW, men hovedsakelig kommer effekten til disse fra stasjonene AX og CX. Dette gjelder selv om belastningen på 14 MW flyttes ut på midten av strekningen. Omformerstasjonene AX og CX lar påvirkes av plasseringen av lasten på 14 MW, men dette er ikke mye, rundt 1 MW fra den fjerneste plasseringen til den nærmeste. Figur 75 viser hvorledes forholdene endrer seg når belastningene også er reaktive med $\cos \varphi = 0,7$. Spenningen blir nå mye lavere og den samlede belastningen på omformerstasjonene blir meget stor.

Figur 76 og figur 77 viser effektfordelingen fra omformerstasjonene for å dekke belastningen for de tre belastningene. Ulempen med denne fremstillingen er at søylediagrammene nå viser levert effekt både til lasten som beveger seg, og til de på 7,0 MW som står i ro midt mellom AX – A og CX – C. For tilfellet med kun aktiv belastning blir ingen av omformerstasjonene overbelastet. Med en blandet belastning nær en omformerstasjon blir den reaktive leveransen stor og det er høyst sannsynlig at en 2 sekunders overbelastning medfører utkobling. Følgelig må eller bør det innføres effektbegrensning for multiple E116. En annen løsning kan være en fallende statikk i omformerstasjonene slik at den reaktive effekten fordeles jevnere mellom dem, men andre løsninger er også mulig². Lokomotiver som har en effektfaktor lik 1,0, kan muligens få trekke effekt på 14 MW uten å overbelaste omformerne. Men det blir nødvendig å vurdere ruteplanene og antallet slike tog med multiple lokomotiver som trafikkerer strekningen samtidig.

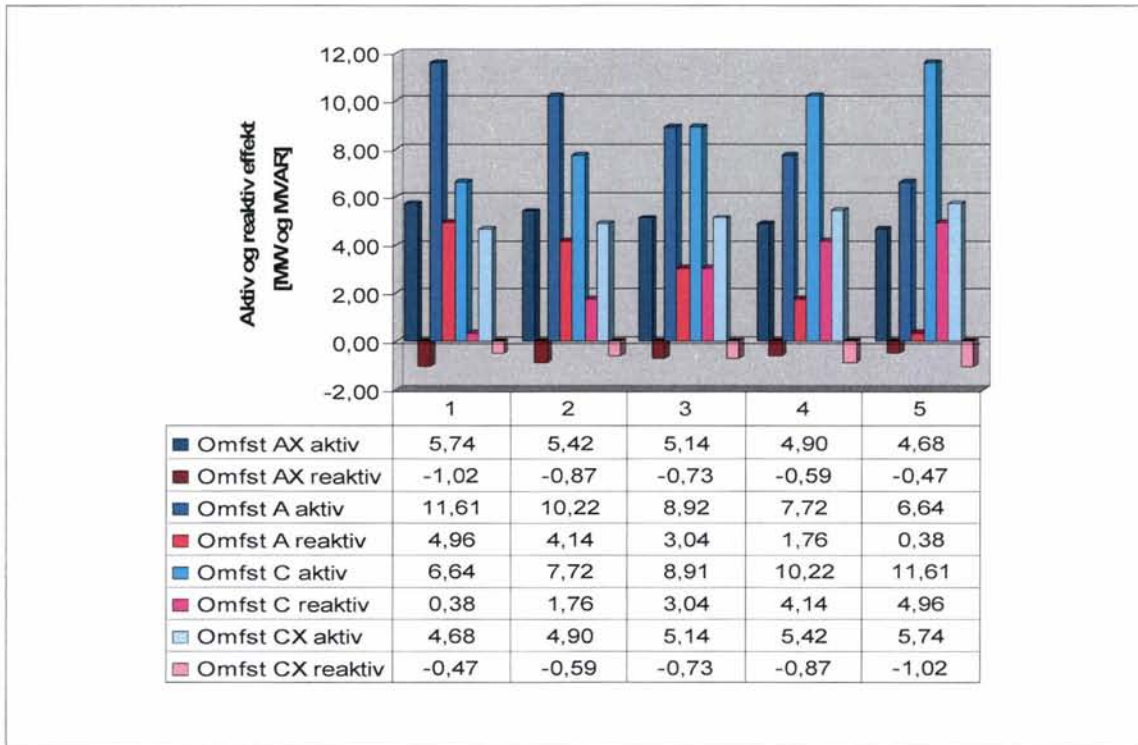
² Det er i tidligere arbeid sett på magnetisering som avhenger av omformerens oppnåede temperatur, der kritiske temperaturer gir begrensning av magnetiseringsstrømmen og dermed også spenningen. Se [4]



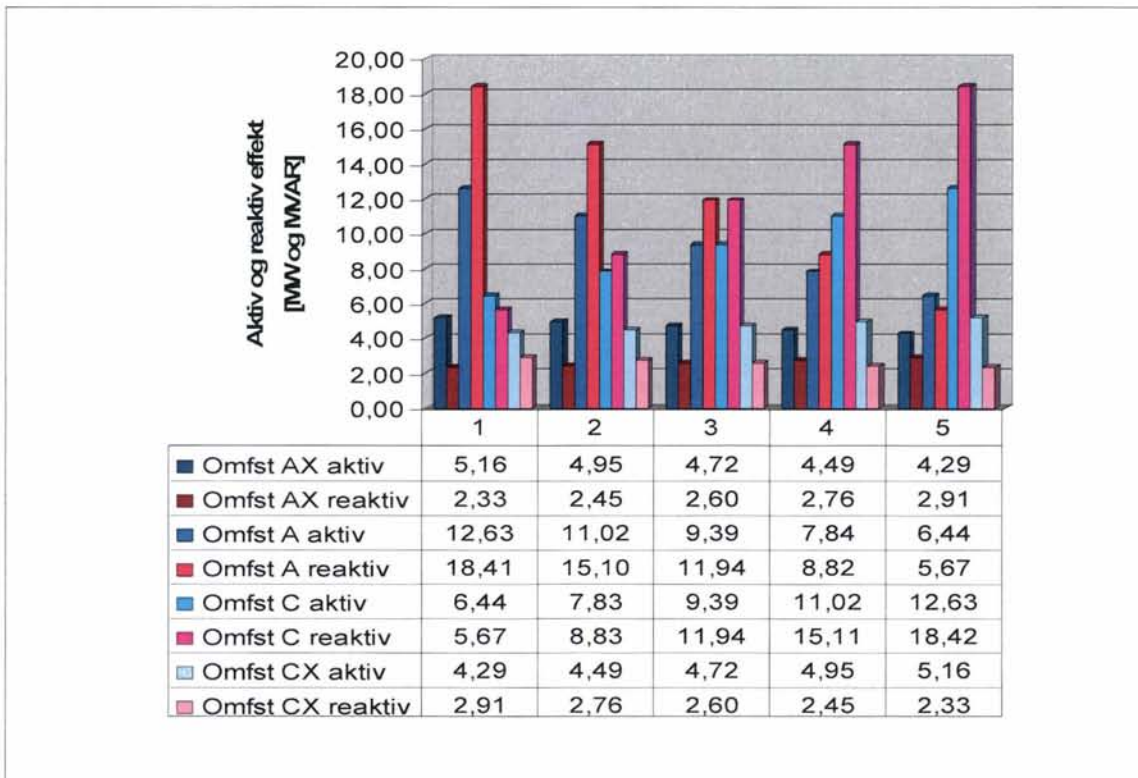
Figur 74 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW og der lasten mellom stasjonene A og C er større enn deres installerte ytelse. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 14 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 75 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW og der lasten mellom stasjonene A og C er større enn deres installerte ytelse. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 14 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 76 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



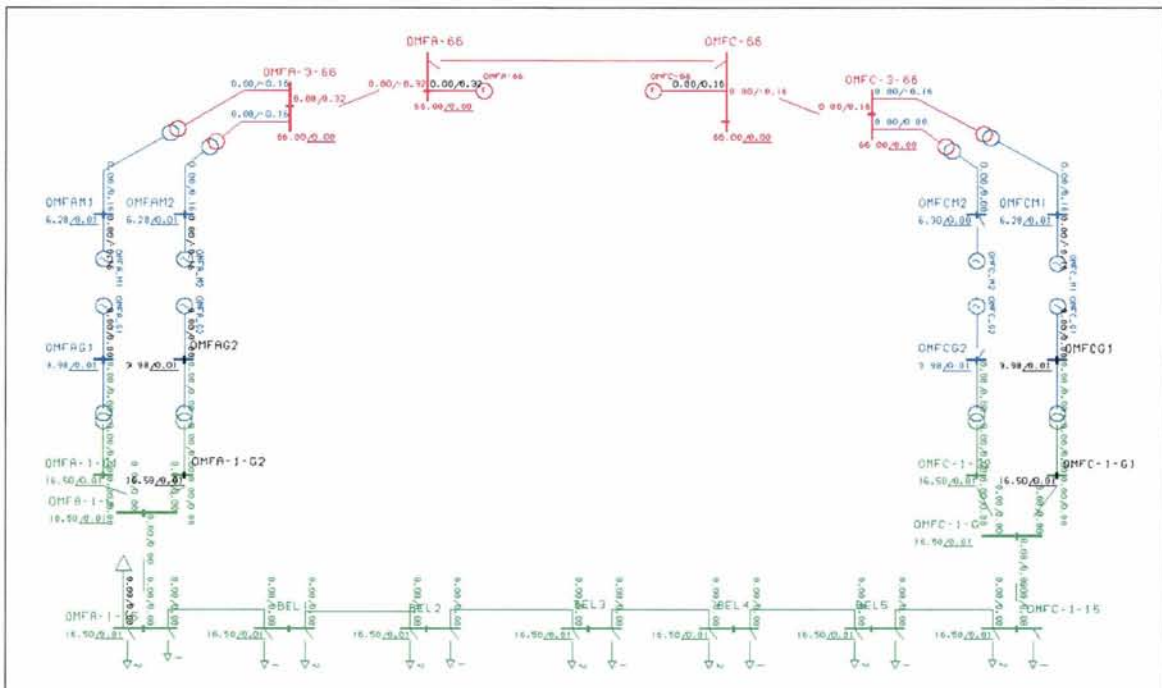
Figur 77 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.1.12 Forsøk med en matestrekning der en omformerstasjon får utfall av ett aggregat

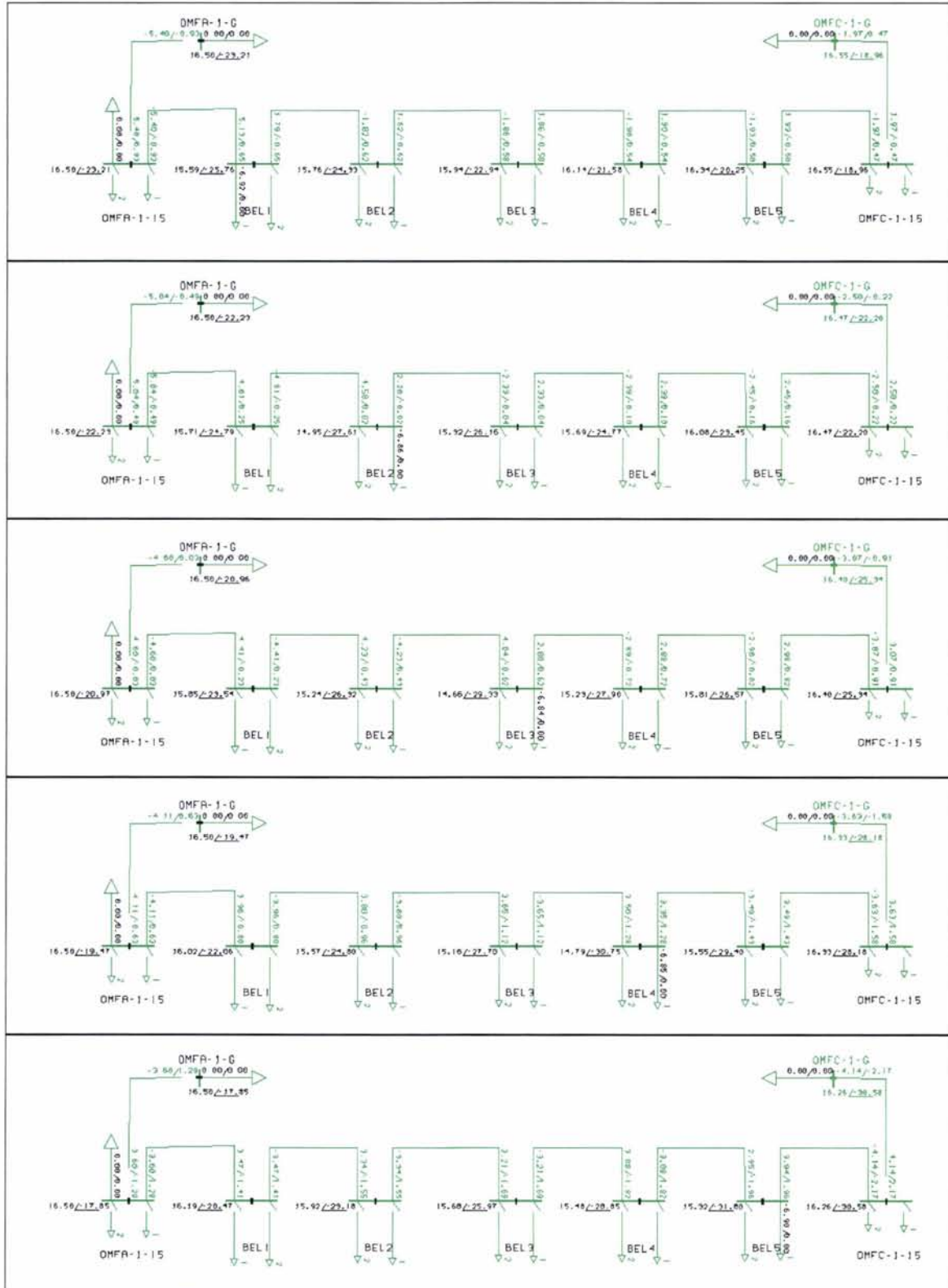
I avsnitt 2.1.2.6 så en at en omformerstasjon som får utfall av ett av sine to 5,8 MVA aggregater, får et stort fall på spenningsregulatorens statikk. Det blir også en svært stor endring av fasevinkelens dreining ved belastning. Begge disse forholdene gjør at en omformerstasjon som av en eller annen grunn mister ett av sine aggregater vil overføre mye av effektproduksjonen til nabostasjonen(e). Resultatene her sammenlignes med undersøkelsene i avsnitt 2.2.1.2 der alt var normalt.

Figur 78 viser fullstendig enlinjeskjema for hele modellen, der omformerstasjon C har fått aggregat nummer 2 utkoblet. Systemet går i tomgang. I figur 79 leverer stasjon A en forholdsvis stor del av effekten selv om lasten flyttes stadig nærmere stasjon B. Likeledes er spenningen lite påvirket, mens fasevinkelen er mye endret, og denne vrir stadig mer jo nærmere stasjon C belastningen kommer. Når BEL5 nærmest stasjon C ligger inne, er fasevinkelen så mye som $31,8^\circ$, mens den i simulering med normale forhold var $22,5^\circ$.

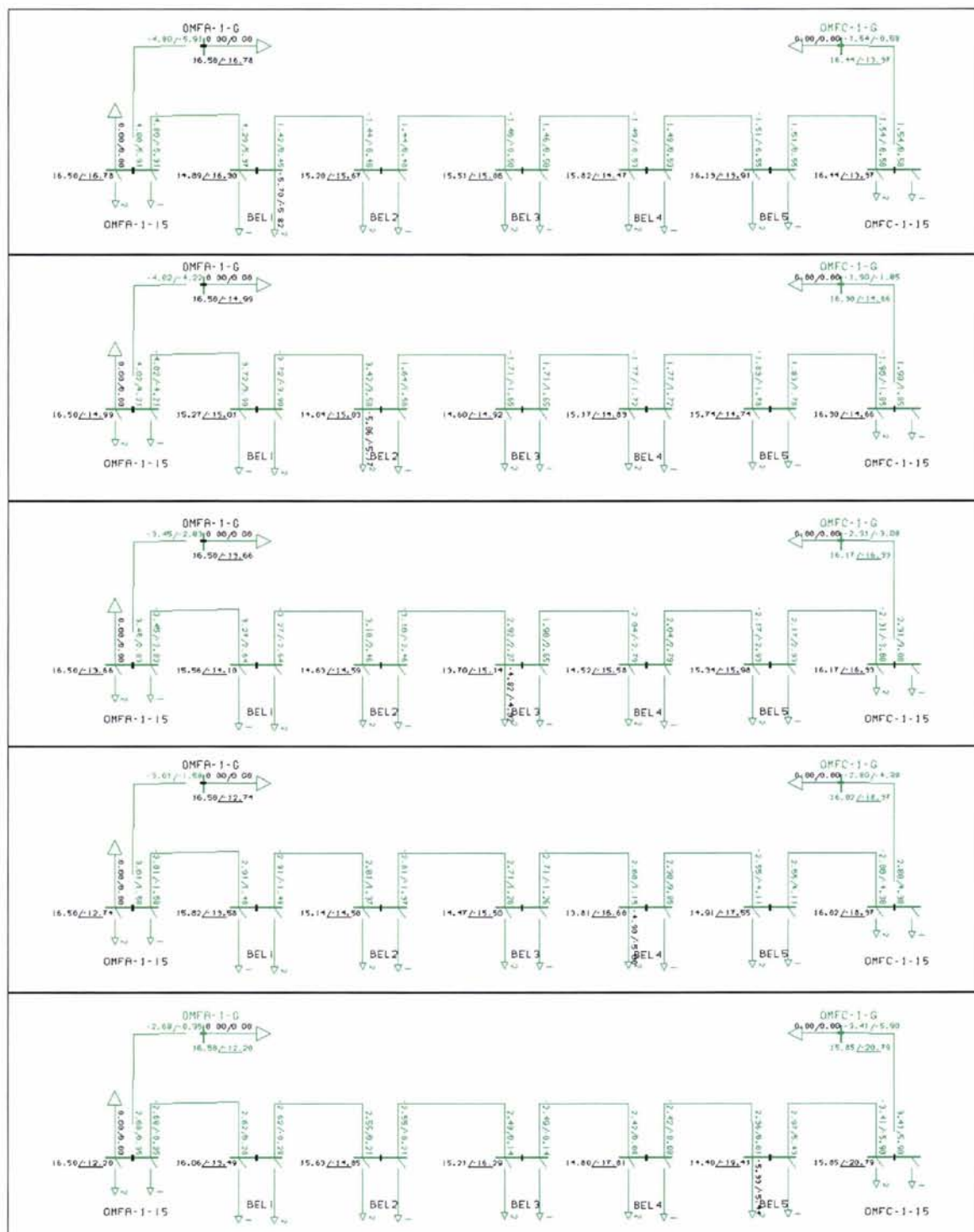
I figur 80 har en last som også trekker reaktiv effekt, og omformerstasjon A leverer mesteparten av aktiv og reaktiv effekt fra begge aggregatene. Den store endringen er at fasevinklene er mindre, se igjen tilfellet med BEL5 der vinkelen nå blir $19,4^\circ$ mot $31,8^\circ$ med aktiv belastning. Figur 81 og figur 82 viser effektfordelingen mellom omformerstasjonene og det er tydelig at det er stasjon A som påtar seg det meste av effektproduksjonen. Bare når lasten er kommet helt nært stasjon C blir fordelingen mer lik, bortsett fra i tilfellet med BEL 5 som trekker reaktiv effekt og mye av effektproduksjonen dekkes av stasjon C, se nederste bilde i figur 82.



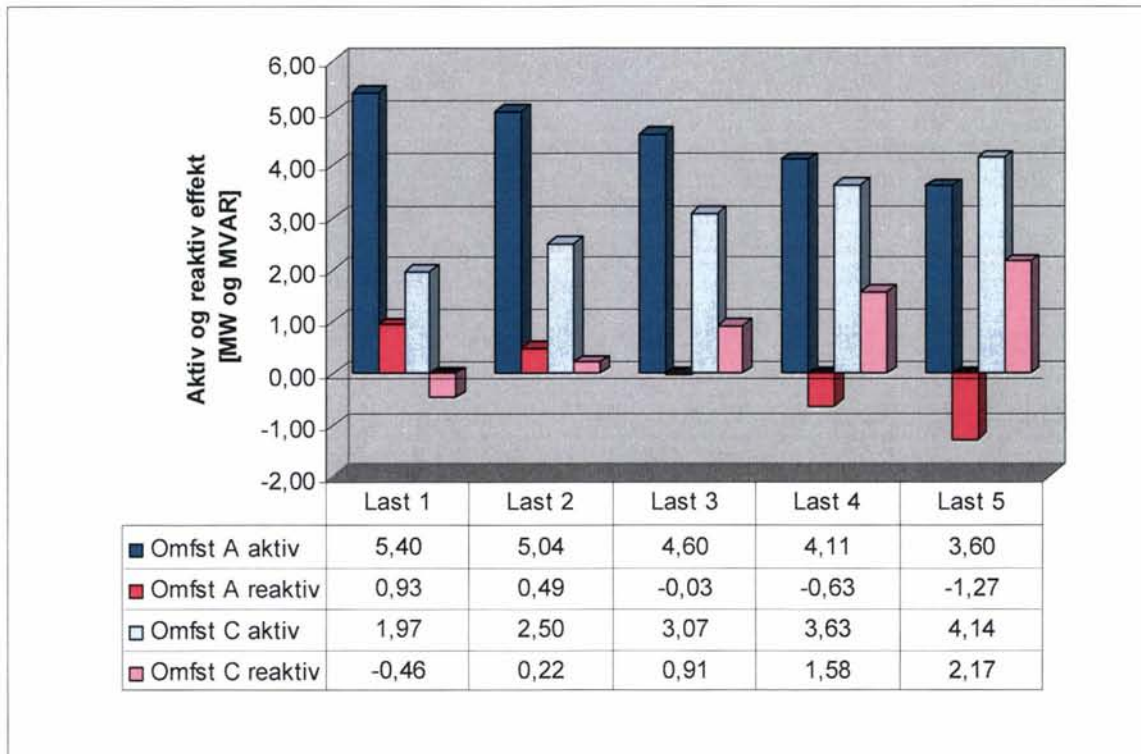
Figur 78 Spenningsene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning. Kun effekt for å dekke tomgangstapene trekkes fra overliggende nett til omformerne. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorens spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVAR hver. Omformer nr. 2 i C er utkoblet.



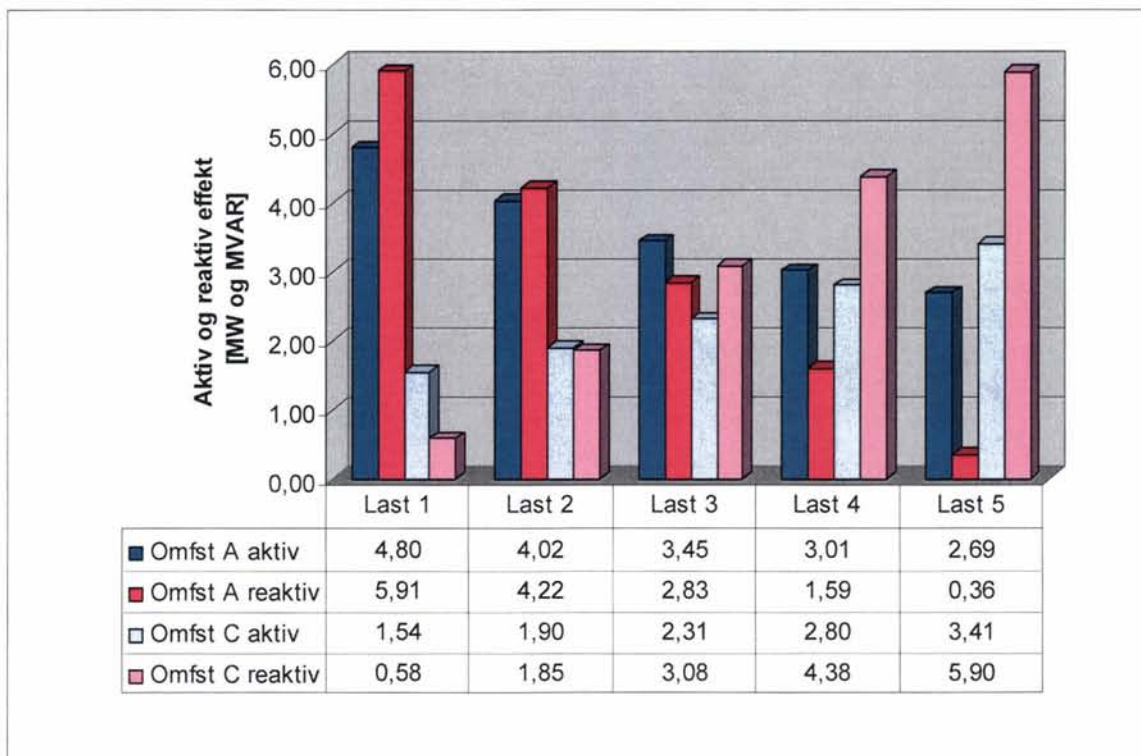
Figur 79 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med et stivt overliggende nett og utfall av det ene aggregatet i stasjon C. Spenningen på 15 kV-samleskinne i stasjon C blir da mye lavere i fullast. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Fasevinklene for overliggende nett er 0°. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 80 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW med uendelig sterkt overliggende nett og utfall av det ene aggregatet i stasjon C. Spenningen på 15 kV-samleskinne i stasjon C blir da mye lavere i fullast. Det er 80 km mellom hver av stasjonene. Fasevinklene for overliggende nett er 0°. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 2,0. Faktoren for spenningsavhengighet for lastene er økt for at simuleringen skal konvergere.



Figur 81 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



Figur 82 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjonene A og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.1.13 Oppsummering etter undersøkelser med en matestrekning mellom to omformerstasjoner på 80 km

Følgende forhold er observert for de 11 forsøkene:

- For en matestrekning med ideelt stive spenningskilder (eller i praksis svært store ytelser) vil kun impedansen i kontaktledningsnettet avgjøre effektfordelingen mellom stasjonene. Med roterende aggregater som har en ytelse tilpasset belastningen, vil effekten fordeles mellom stasjonene både avhengig av impedans i kontaktledningen og i aggregatene. Forsøkene med helt like stasjoner og normal innstilling av spenningsregulatoren viser en fordeling av effekten som er avhengig av avstanden mellom last og omformere i tillegg til og spenningsregulatorenes karakteristikk.
- Utfall av ett aggregat i en stasjon slik at det blir 2 x 5,8 MVA i den ene stasjonen og 5,8 MVA i den andre, viser en svært forskjellig lastfordeling. Stasjonen med ett aggregat påtar seg mindre aktiv effekt, men leverer mer reaktiv effekt. Ut fra dette kan en si omformerstørrelsen har stor betydning sammen med regulatorens innstilling og den elektriske avstanden.
- Forsøk med nabostasjoner der matestrekningen har en tilstøtende matestrekning med omformerstasjoner i endepunktene, kommer en stor del av effekten fra de to nabostasjonene. Ved kun aktiv belastning på 7 MW 13,3 km fra nærmeste stasjon kommer 1,4 MW fra nabostasjonen i avstand 93,3 km og 0,75 MW fra stasjonen i avstand 146,7 km. Når belastningen er midt på matestrekningen, kommer 1,1 MW fra nabostasjonene i 120 km avstand.
- Med en fallende statikk for omformerstasjonene på 4 % i full last fordeles den reaktive effekten litt annerledes mellom stasjonene: den fjerneste stasjonen leverer litt mer effekt. Men forskjellen i prosentpoeng er bare 4 for en last plassert 1/6 av matestrekningen fra nærmeste stasjon og 3 prosentpoeng for en last plassert 1/3 ut på strekningen. Det viser seg også at tapene på overføringen øker.
- Med ulike settpunkter for spenningsregulatoren i omformerstasjonen vil stasjonen med lavest spenning påta seg minst effekt, både aktiv og reaktiv. Også ulike fasevinkler påvirker lastfordelingen, og stasjonen som ligger etter, leverer mer reaktiv effekt, men mindre aktiv. Begge disse forholdene fører til utveksling av både aktiv og reaktiv effekt i tomgang.
- Ved en forskjell i fasevinklene i det overliggende nettet på 6° overføres det 130 kW og 120 kVAr mellom omformerstasjonene, og tapet i kontaktledningen blir ca. 10 kW. Ved en forskjell på 12° overføres det 260 kW og 240 kVAr mellom stasjonene, og tapene er fortsatt ca. 10 kW. Når vinkelforskjellen blir så mye som 18°, overføres det 390 kW og 950 kVAr i tomgang. Det er ikke store tap, men tapene i omformerstasjonene vil kunne bli mer betydningsfulle.
- Med forskjellig fasevinkel i det overliggende nettet blir effektfordelingen mellom stasjonene ujevn, men ikke veldig mye.
- Når forskjellen i fasevinkler er så mye som 18°, og belastningen midt på er rent aktiv, kommer 55 % av effekten fra den stasjonen som ligger foran, og 83 % av den reaktive effekten kommer fra den som ligger etter. Det bemerkes at den reaktive effektflyten i tallverdier uansett ikke er særlig stor.
- Forskjellige fasevinkler i det overliggende nettet med undersøkte forskjeller helt opp til 18° viser generelt liten ubalanse mellom effektfordelingen mellom de to stasjonene.

- Forsøk med et svakt og et sterkt nett viser noen forskjeller for effektfordelingen, men ikke store. Observasjoner av stasjoner med lang forsyningslinje (et svakt nett) som leverer mindre effekt enn antatt, må nok tilskrives flere forskjeller enn bare impedansen i nettet. Fasevinkel på grunn av store forskjeller i det overliggende nettet vil sannsynligvis være vel så betydningsfullt. På grunnlag av observasjonene er det grunn til å tvile på at de påstander som har versert om at Mjølfjell omformerstasjon er svak og legger lasten over på naboene. Verken målinger eller dokumenterte observasjoner er kjent.
- Det er undersøkt om det kan bli overbelastning når belastningen har mulighet til å trekke ut større effekt enn den installerte ytelsen i en enkelt av omformerstasjonene. Det er sett på en matestrekning med nabostasjoner og en last på hele 14 MW. Med $\cos \varphi = 1,0$ vil stasjonen nærmest lasten levere mest effekt, men nabostasjon(e) bidrar såpass mye at det ikke er fare for overbelastning. Imidlertid blir forholdene verre om belastningen har en effektfaktor så lavt som 0,7. Da er det sannsynlig at den nærmeste stasjonen snart faller ut.
- Det kan være en fordel om lokomotivføreren til multiple EL16 vet å redusere pådraget når det blir lav spenning. Det er bedre at lokomotivførere får denne advarselen enn at aggregatene kobler ut. Antallet slike tog bør begrenses, selv om forsøkene her egentlig ikke sier noe om dette.
- Forsøk med to omformerstasjoner med 2 x 5,8 MVA der det ene aggregatet er utkoblet, viser at effektfordelingen blir ujevn. Stasjonen med et gjenværende aggregat påtar seg mindre effekt, og faren for utfall av det gjenværende aggregatet blir mindre siden den andre omformerstasjonen tar en større del.

2.2.2 Undersøkelser for tilfellet med to matestrekninger på 40 km

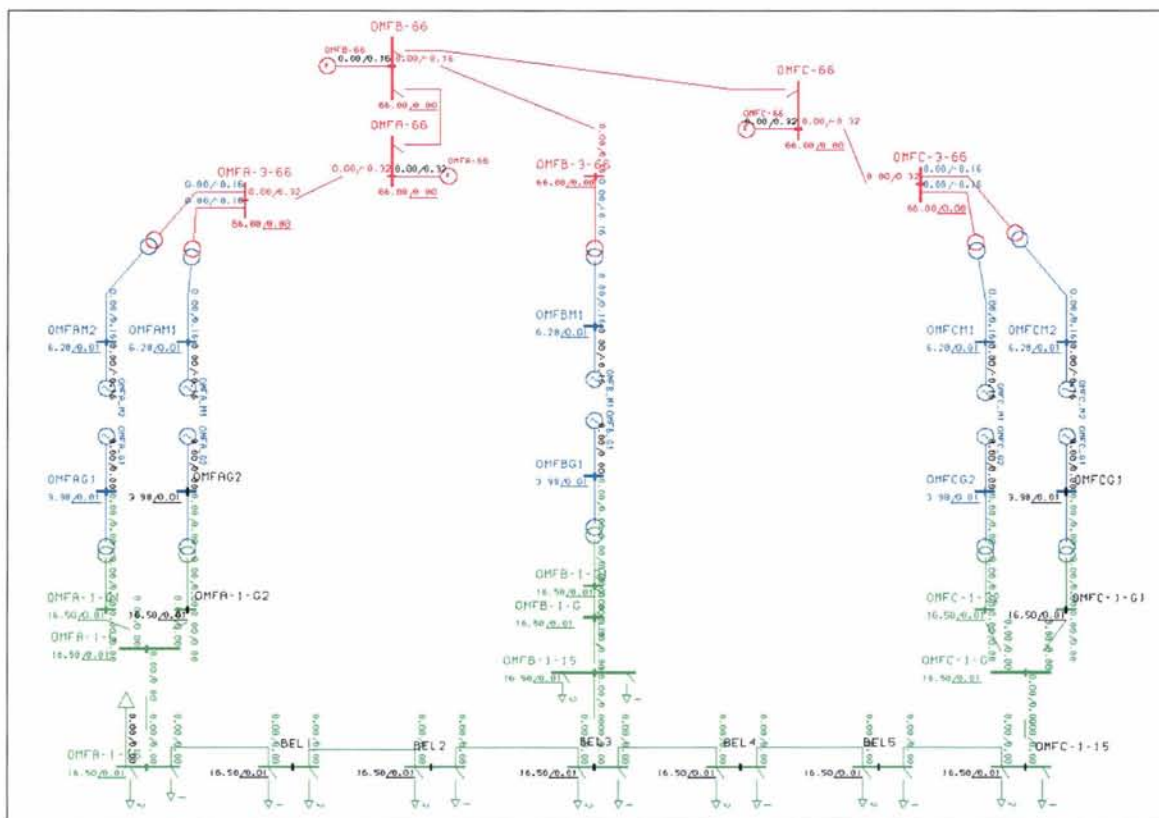
Undersøkelser gjøres på en strekning på 2 x 40 km med 2 x 5,8 MVA roterende aggregater i stasjonene på enden av matestrekningen og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon mellom disse. Lasten som suksessivt settes inn på de fem posisjonene er også her på 7 MW. Fremdeles er det 13,3 km mellom posisjonene der denne lasten settes inn, noe som gir noe ulike sammenligningsforhold ved at omformerstasjonen i midten får belastningen rett ved seg, mens de andre to får lasten 13,3 km unna på det nærmeste. En kunne valgt å sette inn seks posisjoner isteden slik at avstand mellom stasjoner og last blir jevn for alle steder, men det gir på den andre siden helt ulike sammenligningsforhold i forhold til det som er gjort i forrige avsnitt. Omformerstasjonens spenningsregulator for motorene initialiseres for denne effekten når det er 2 x 5,8 MVA aggregater og for 3,5 MW når det er ett aggregat på 5,8 MVA.

2.2.2.1 Forsøk der omformerstasjonen i midten er halvparten så stor som nabostasjonene og fasevinkelen i det overliggende nettet er lik

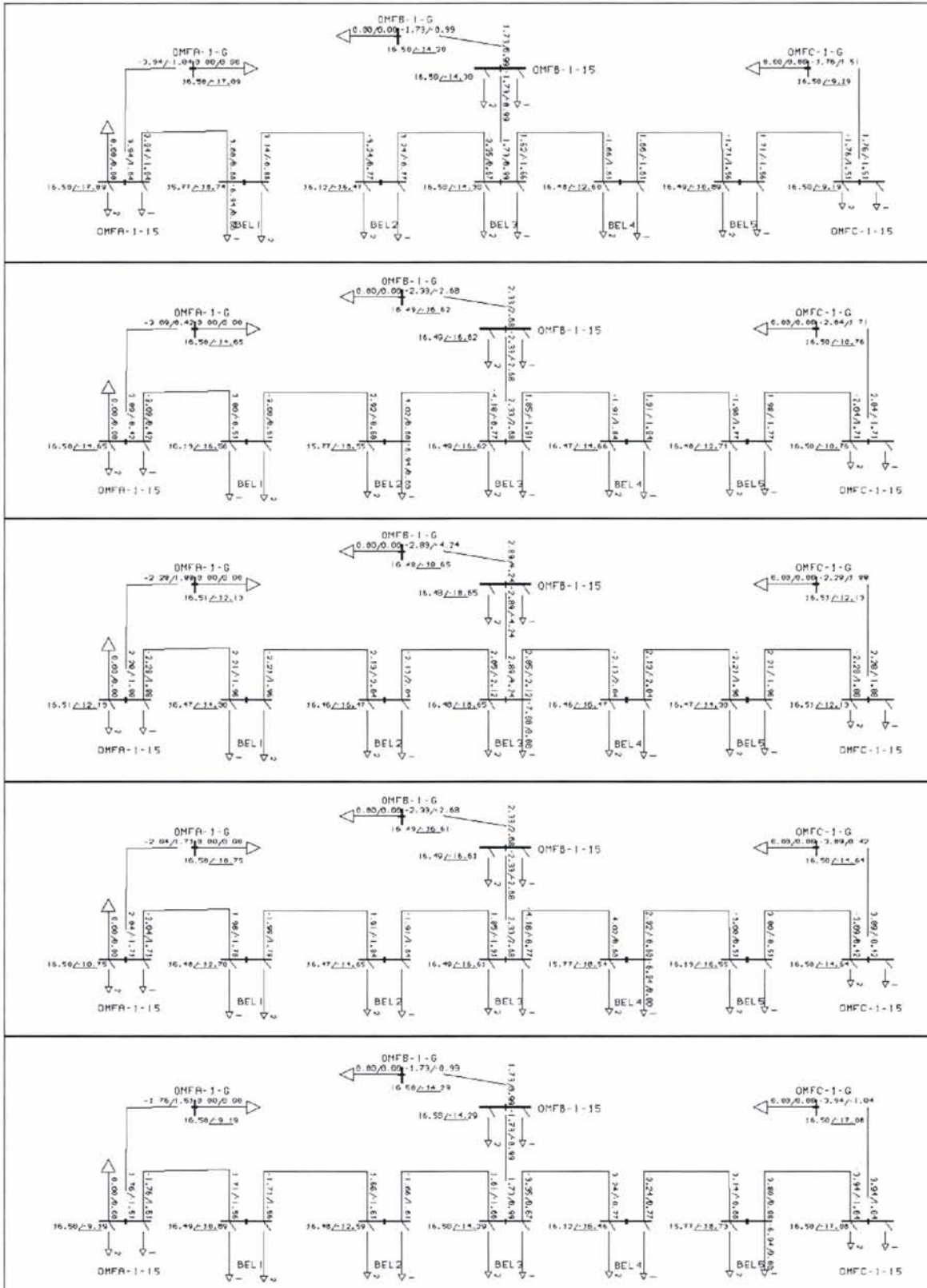
Figur 83 viser tilfellet med tre omformerstasjoner i tomgang når fasevinklene er like i det overliggende nettet. Kun noe reaktiv effekt trekkes av motorene fra det overliggende nettet. I figur 84 og figur 85 sees forholdene når de forskjellige belastningene i tur og orden legges inn, og spenningen er mye bedre enn i tilfellet med 80 km mellom omformerstasjonene, se avsnitt 2.2.1.2. Legg imidlertid merke til at sammenligningen er svikter noe for belastning 3 som kommer rett ved omformerstasjon B. I tidligere undersøkelser var det belastningene 1 og 5 som var nærmest henholdsvis stasjon A og C, begge i en avstand på 13,3 km, og det blir derfor en helt annen impedansmessig avstand når denne nå kommer rett ved en stasjon. Det blir dermed mer relevant å sammenligne belastningene 1 og 5 samt 2 og 4 som ligger nøyaktig like langt fra omformerstasjonene.

Tapene i kontaktledningen ser ut til å være størst når lasten legges ved posisjon BEL2 og BEL4. Med en rent aktiv belastning er tapene 520 kW, og med en blandet belastning er tapene 880 kW.

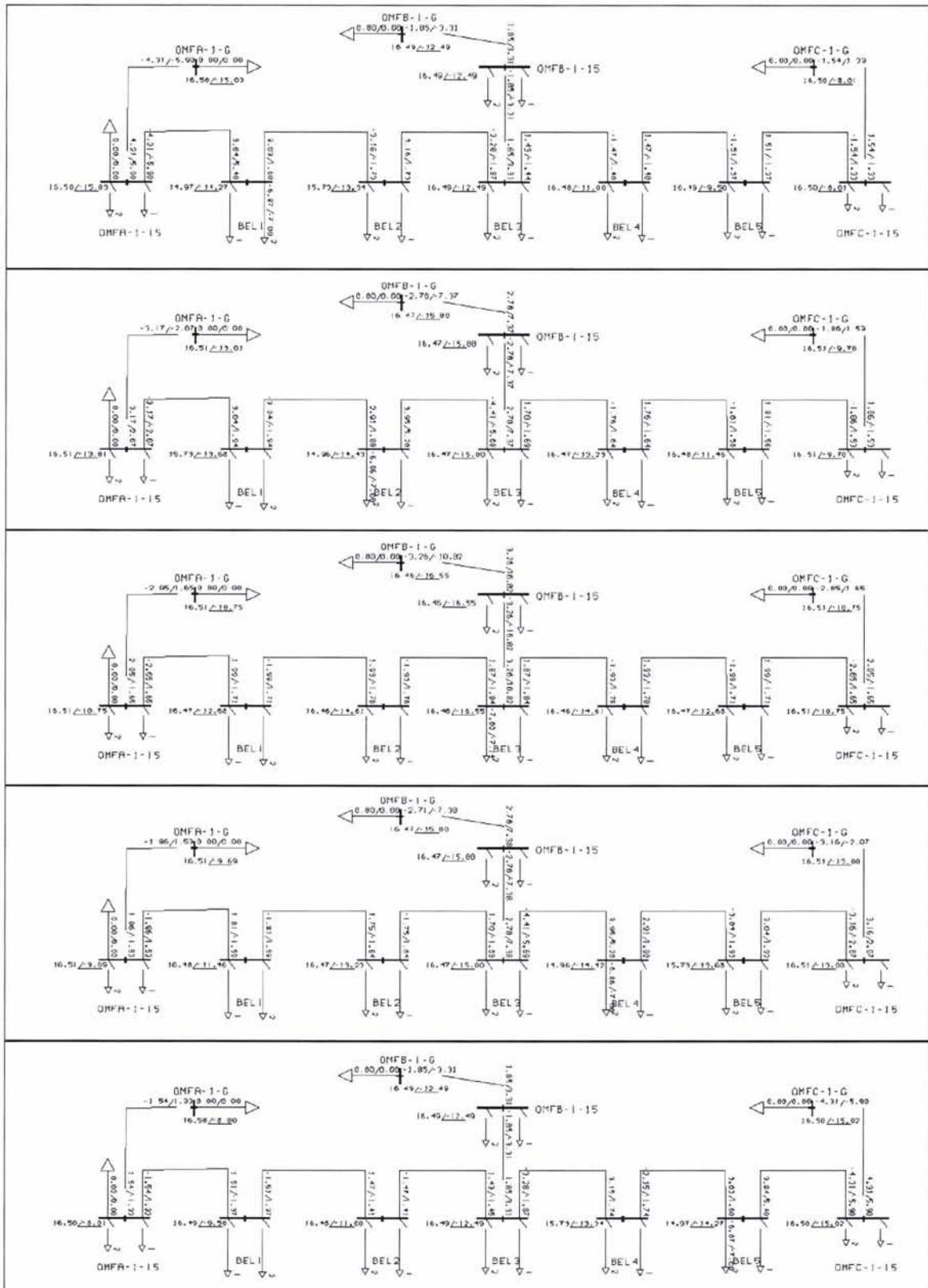
I figur 93 og figur 94 kan en se at stasjon B påtar seg langt mindre av aktiv belastning enn hva dens dobbelt så store naboer gjør. Imidlertid vil stasjon B hele tiden tendere mot å bidra med veldig mye reaktiv effekt. Når lasten ligger rett ved, gir den ut 11,30 MVA noe som vil gjøre den sårbar for overlast. Dette kan imidlertid rettes opp med reaktiv kompensering (fallende karakteristikk) for den lille omformerstasjonen (Stasjon B).



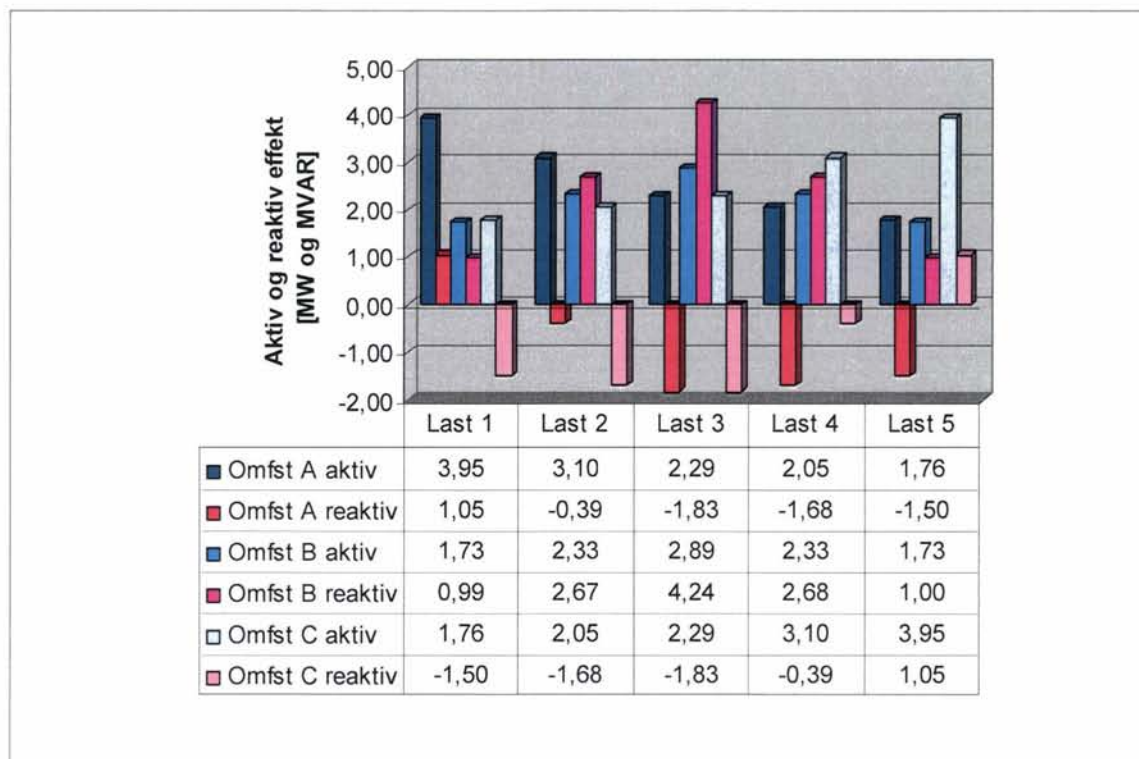
Figur 83 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



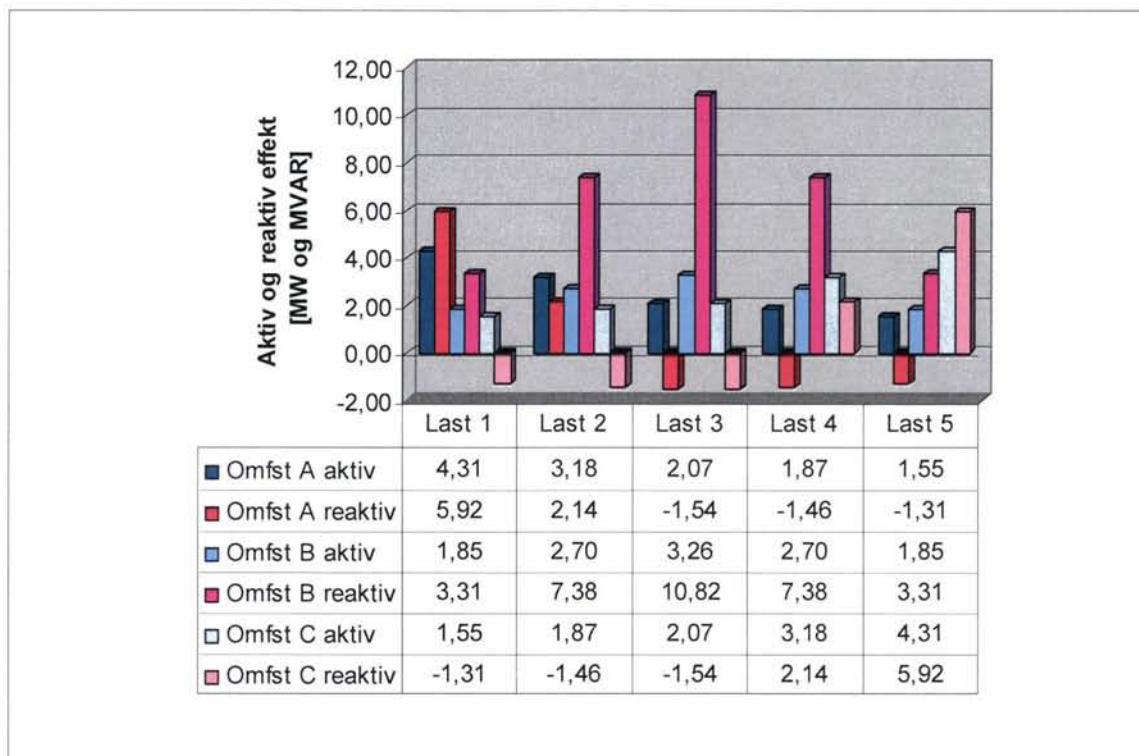
Figur 84 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det overliggende nettet er stift. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 85 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det overliggende nettet er stift. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 86 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



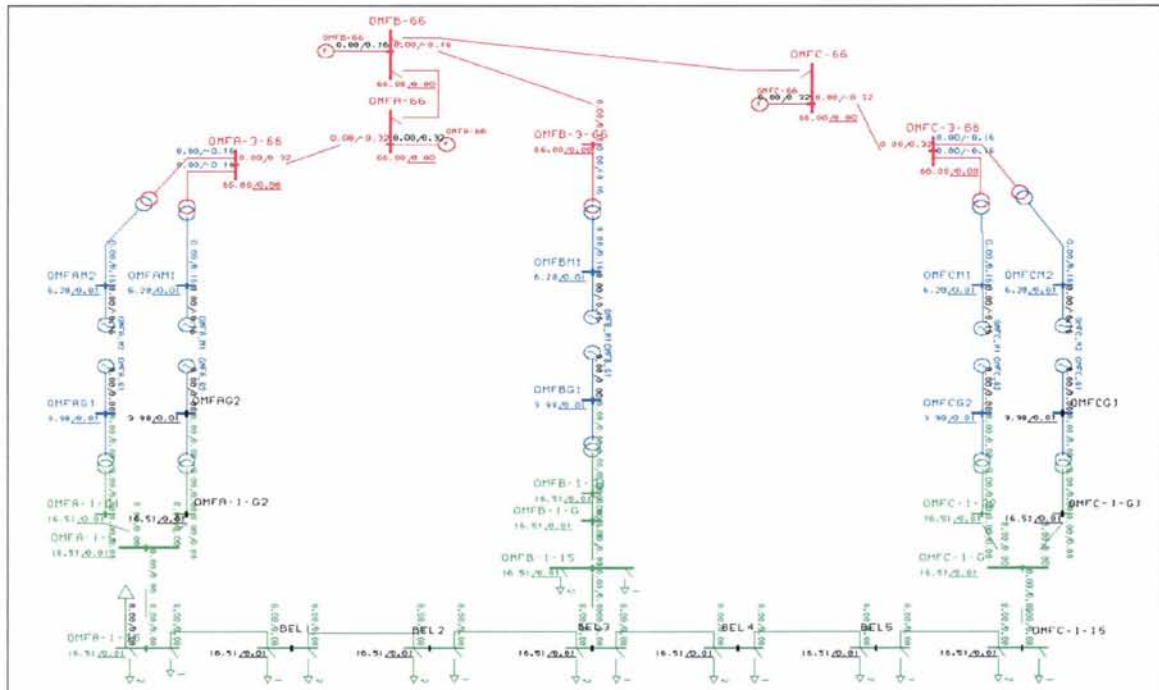
Figur 87 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.2.2 Forsøk med ulik størrelse på omformerne og en fallende statikk for spenningen

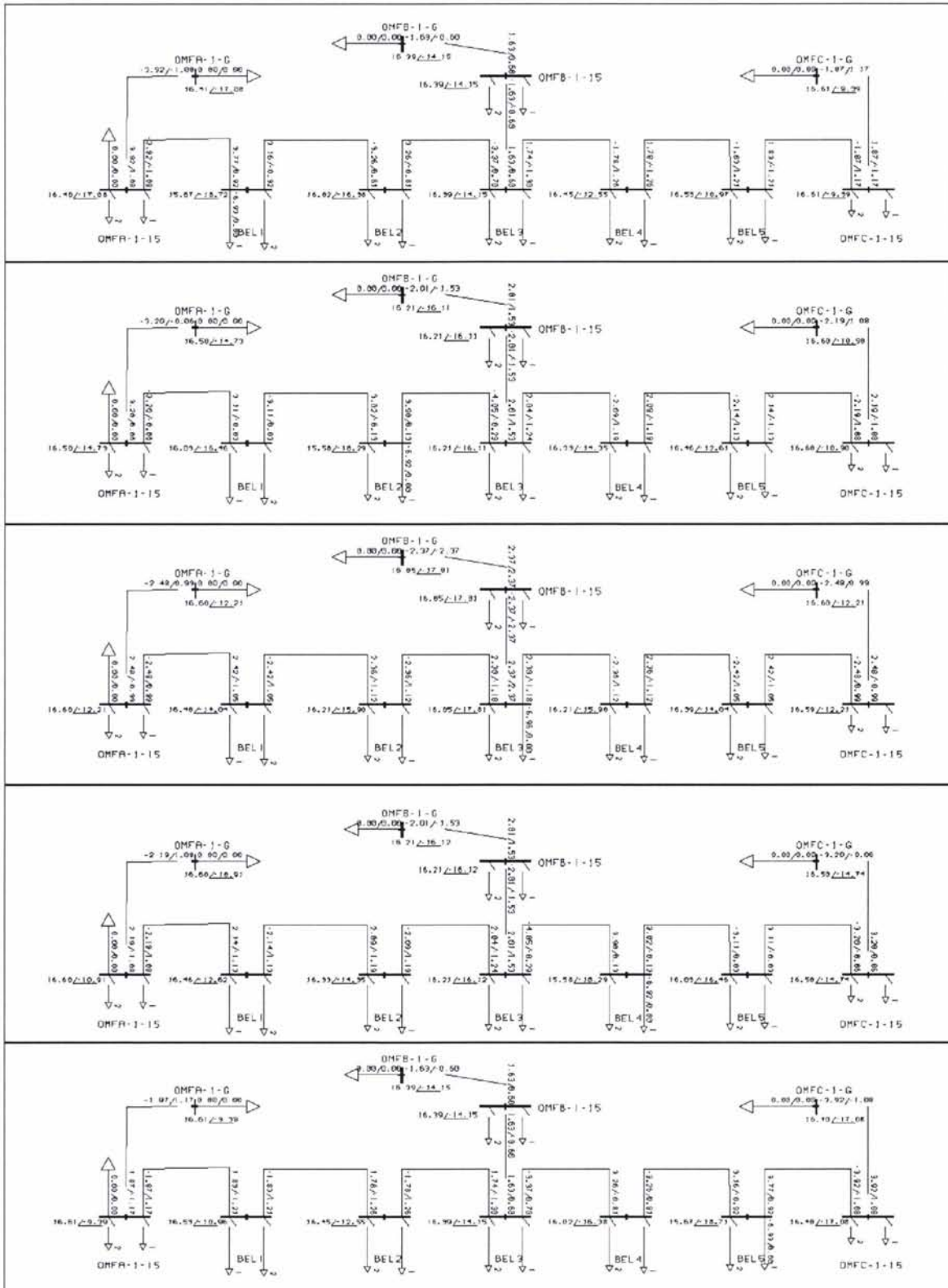
Det kan være interessant å se hvorledes forholdene endres når alle tre omformerstasjonene gis en fallende statikk på 4 %. Det er to grunner til dette; å bedre fordelingen av reaktiv effekt og å redusere belastningen på omformestasjonen med ett aggregat. I figur 88 er vist forholdene i tomgang. Det utveksles ingen effekt mellom stasjonene. Figur 89 viser forholdene når den rent aktive belastningen forflyttes. Selv om spenningen blir lavere ved 15 kV-samleskinnen, blir spenningen til lasten nesten uforandret i forhold til tilfellet med en flat statikk. Figur 90 viser at spenningen for lasten blir noe lavere enn i tilfellet med en flat statikk, men forskjellen er ikke stor.

Tapene i kontaktledningen når belastningen legges til posisjon BEL2 og BEL4, er 480 kW for en rent aktiv belastning og 480 kW for en blandet belastning. Det gir en forbedring fra tilfellet med en flat statikk der tapene var henholdsvis 520 kW for rent aktiv belastning og 880 kW for en blandet belastning.

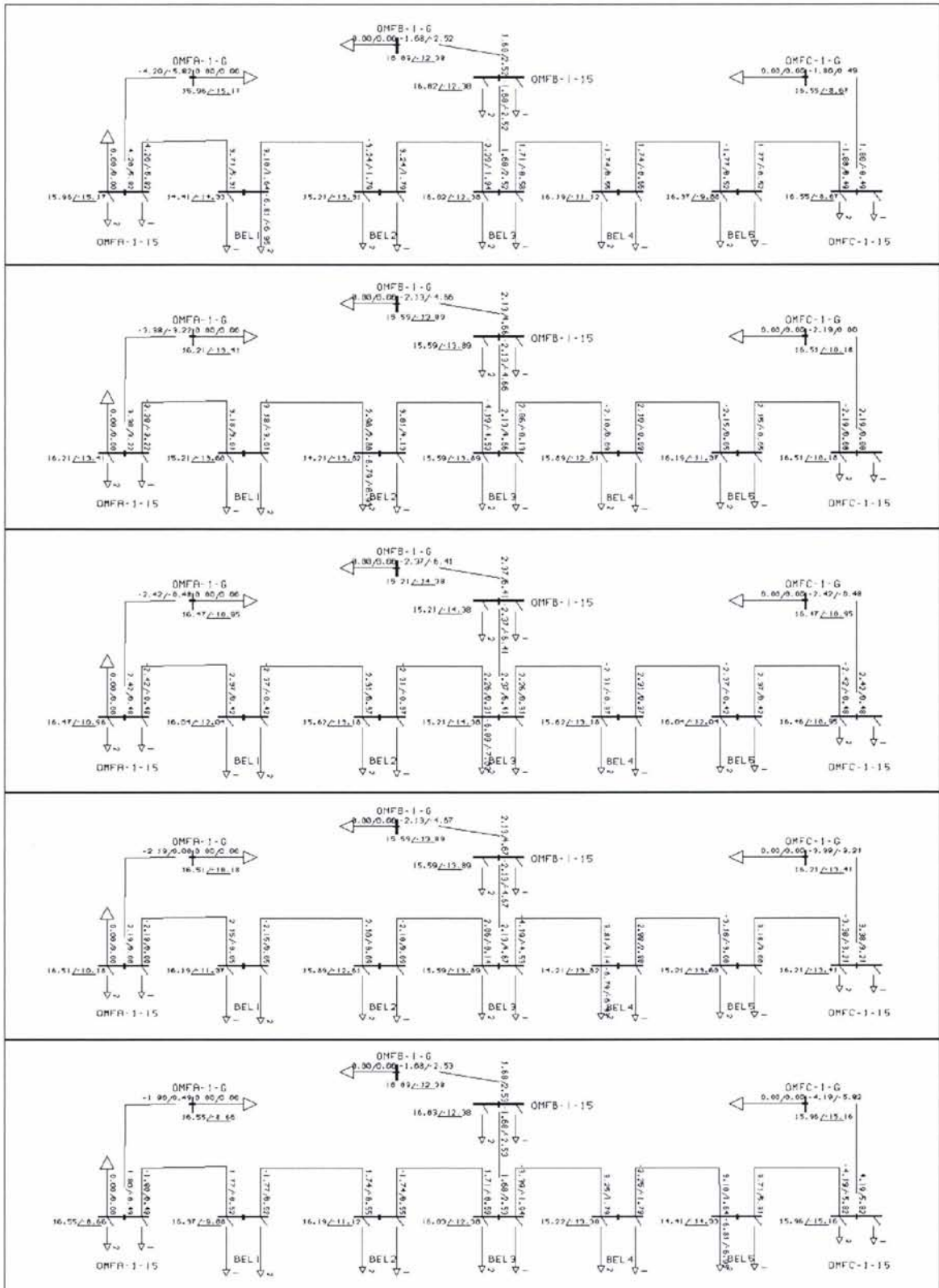
Figur 91 og figur 92 viser lastfordelingen med henholdsvis en rent aktiv og en blandet belastning. I tilfellet med en rent aktiv belastning er effektfordelingen jevnere, og det er en ganske vesentlig reduksjon av reaktiv effekttutveksling mellom stasjonene. Det samme er tilfelle med en belastning med blandet effekt, og nå er belastningen på omformerstasjon B også mindre. Tilsynelatende effekt fra omformer B når lasten ligger rett ved, blir 6,83 MVA, og det er en stor forskjell fra tilfellet med en flat statikk der belastningen var 11,30 MVA. Dette gjør at stasjon B ikke overbelastes. En fallende statikk synes å være gunstig i tilfellet med omformerstasjoner med ulik ytelse.



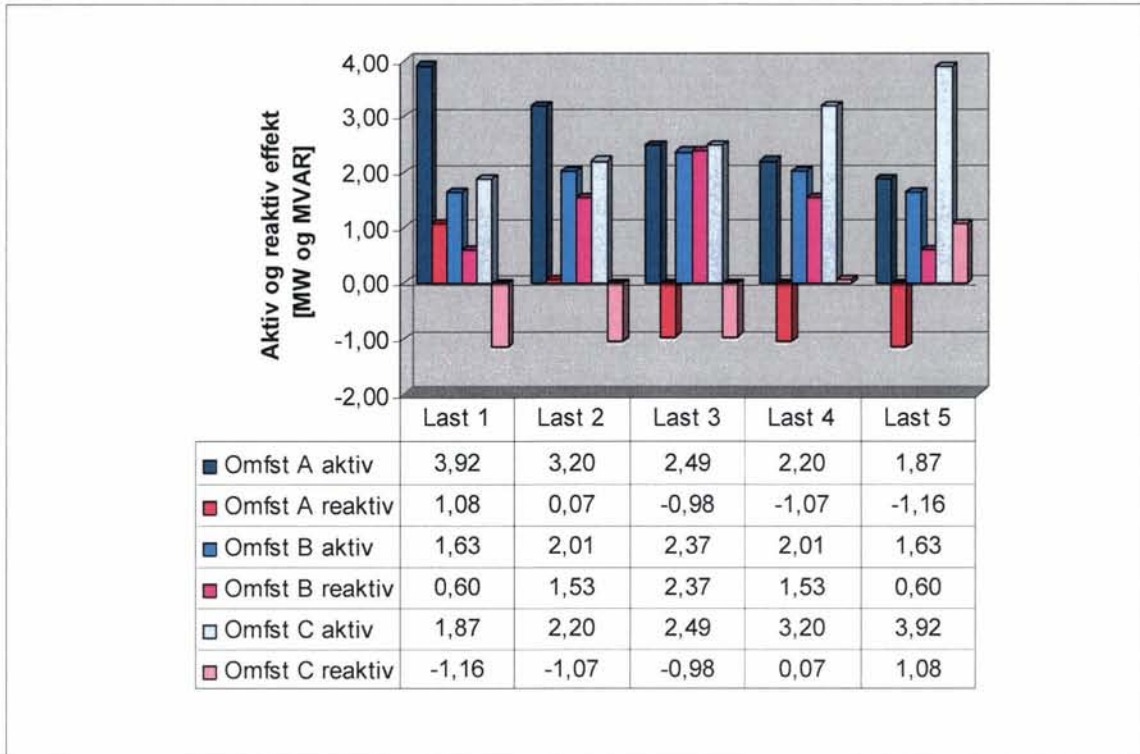
Figur 88 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er en fallende statikk på 4 % fra tomgang til fullast for spenningen. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



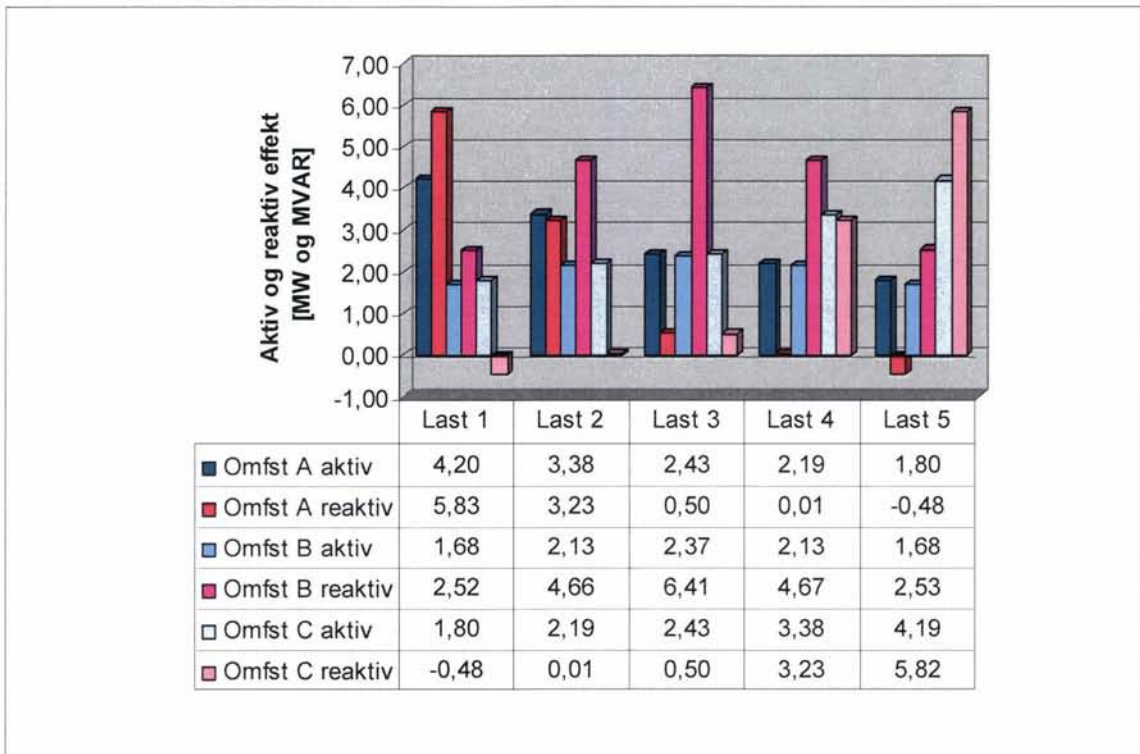
Figur 89 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er en fallende statikk på 4 % fra tomgang til fullast for spenningen. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW cos $\phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 90 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er en fallende statikk på 4 % fra tomgang til fullast for spenningen. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 91 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.

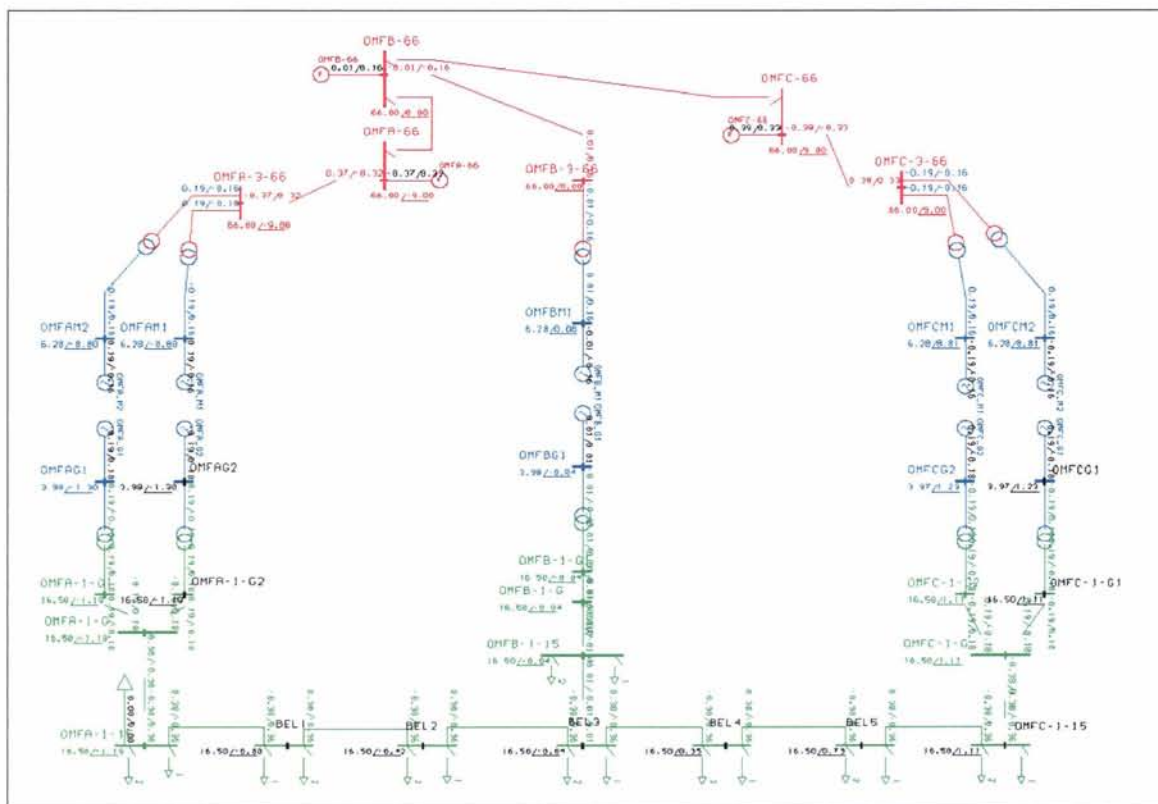


Figur 92 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

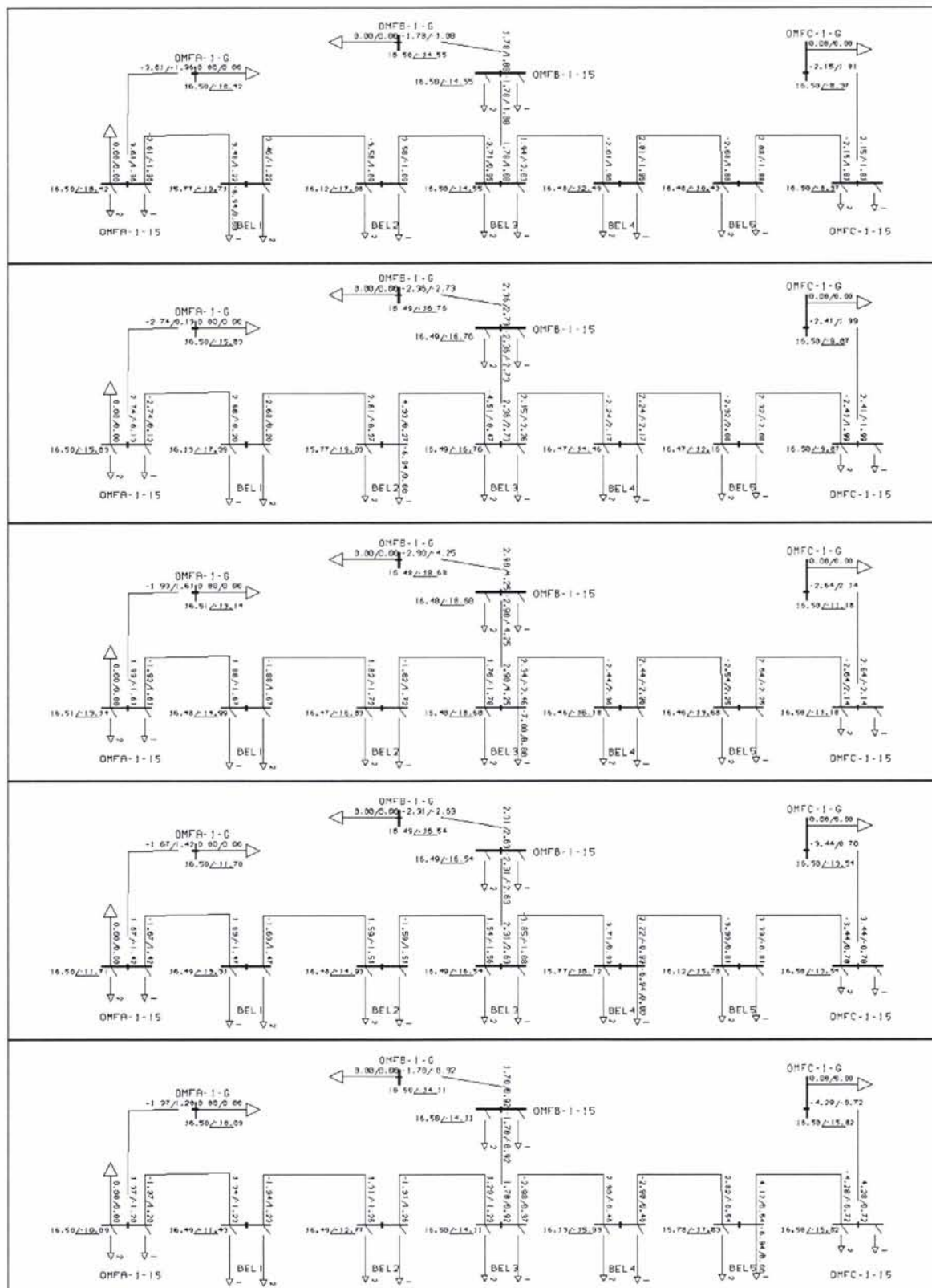
2.2.2.3 Forsøk med en matestrekning med tre omformerstasjoner der fasevinkelen i det overliggende nettet er $\delta_1 = -9^\circ$ $\delta_2 = 0^\circ$ $\delta_3 = 9^\circ$

Med fasevinkler i det overliggende nettet slik at omformerstasjon A sakter med -9° , B ligger nøytralt og C leder med 9° , oppstår det en lastflyt i tomgang på kontaktledningen på 380 kW fra stasjon C mot A og 360 kVAR som går fra A til C, se figur 93. Stasjon B ligger mellom disse vinklene og kan knapt sies å bidra til denne lastflyten i følge diagrammet. Sannsynligvis er det kun tap (viftetap) som forårsaker at denne ligger noe etter i fasevinkel på enfasesiden og at dette får den til å gi et lite bidrag til effektflyten mot nabo stasjonene.

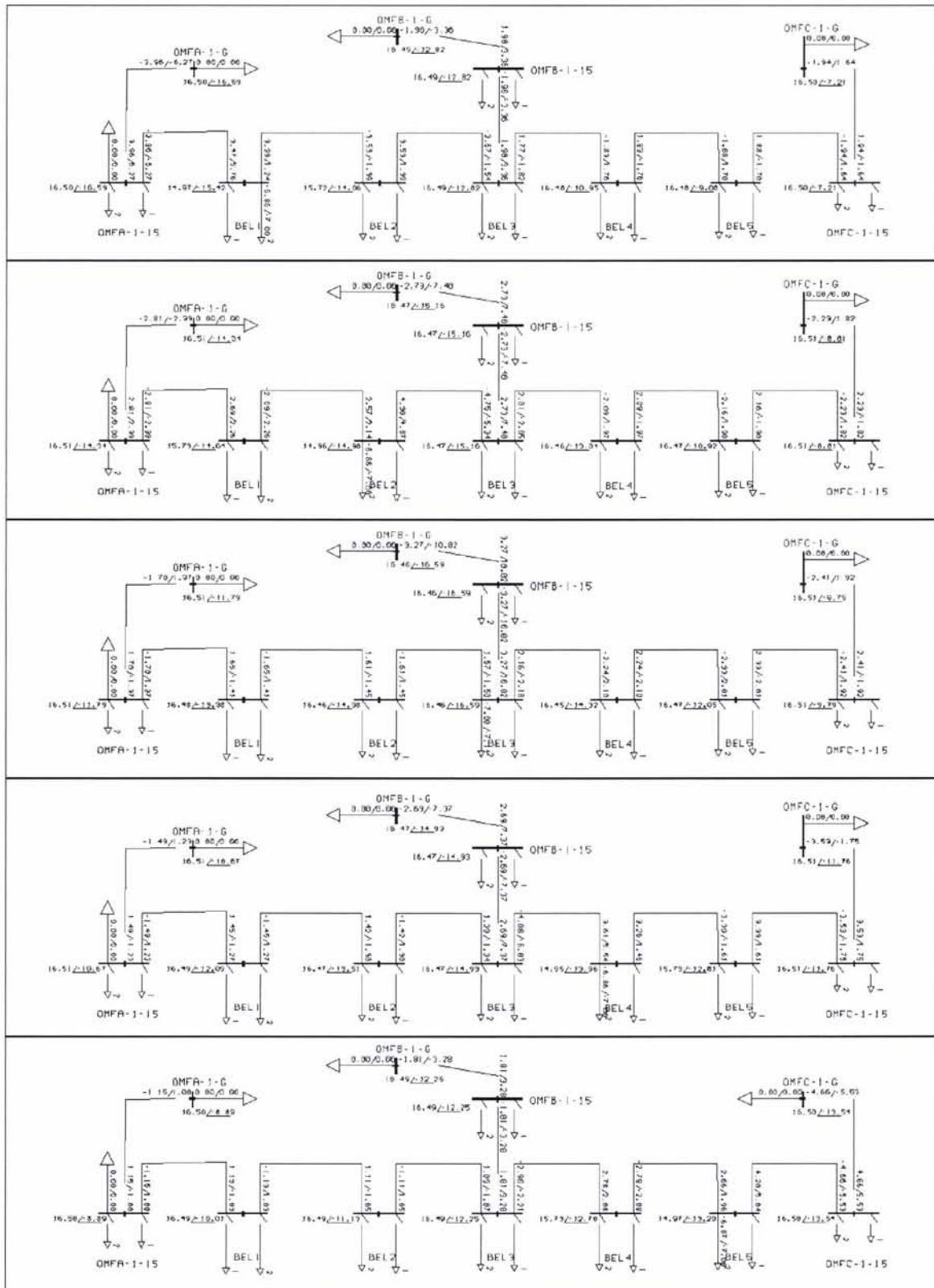
Spenningene og vinklene når belastningen flyttes, er vist i figur 94 og figur 95 for last med henholdsvis $\cos \varphi = 1,0$ og $\cos \varphi = 0,7$. Det er små endringer i forhold til tidligere undersøkelser uten fasevinkler i det overliggende nettet, se avsnitt 2.2.2.1. For kun aktive belastninger viser effektfordelingen mellom omformerstasjonene i figur 96 at de store stasjonene A og C bidrar med mer aktiv effekt enn stasjon B; også når lasten er nærmest stasjon B. For aktiv og reaktiv belastning bidrar stasjon C enda mer ved en blandet belastning. Stasjon B leverer mye reaktiv effekt når lasten står rett ved, noe tidligere forsøk har vist. Det ser ut til at stasjon B mest sannsynlig vil falle ut for overlast for en blandet belastning nær ved. Generelt synes det som om den stasjonen som leder (A i forhold til B og C og B i forhold til A) bidrar med mest aktiv effekt, mens den som sakter relativt til andre stasjoner leverer mest reaktiv effekt.



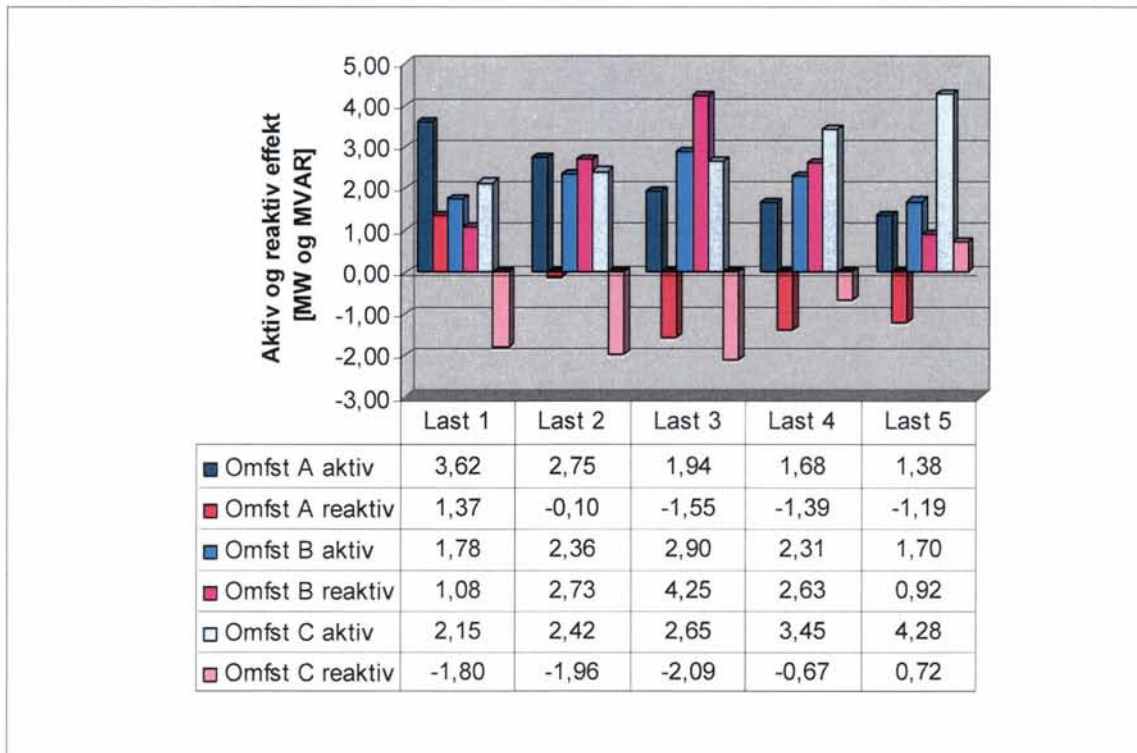
Figur 93 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er en sanking i det overliggende nettet til stasjonene med en 9°s økning fra A til B til C. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



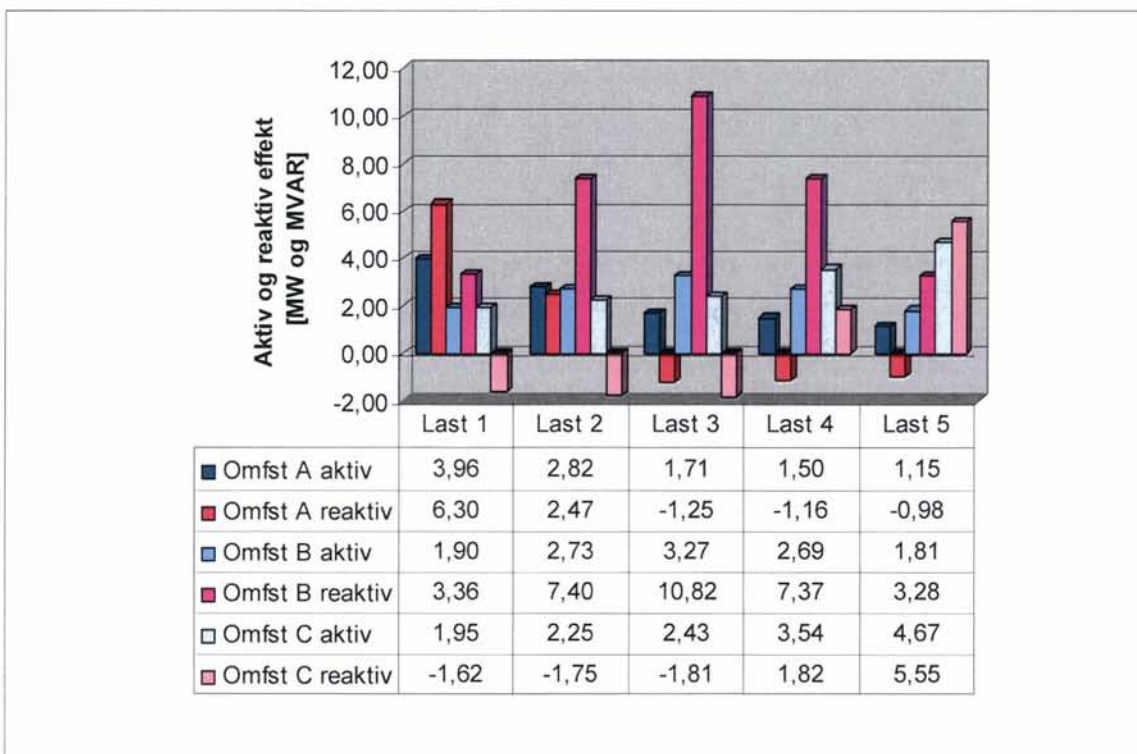
Figur 94 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det overliggende nettet er stivt med forskjellige fasevinkler, stasjon A med -9° , B med 0° og C med 9° . Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 95 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det overliggende nettet er stift med forskjellige fasevinkler, stasjon A med -9° , B med 0° og C med 9° . Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 96 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.

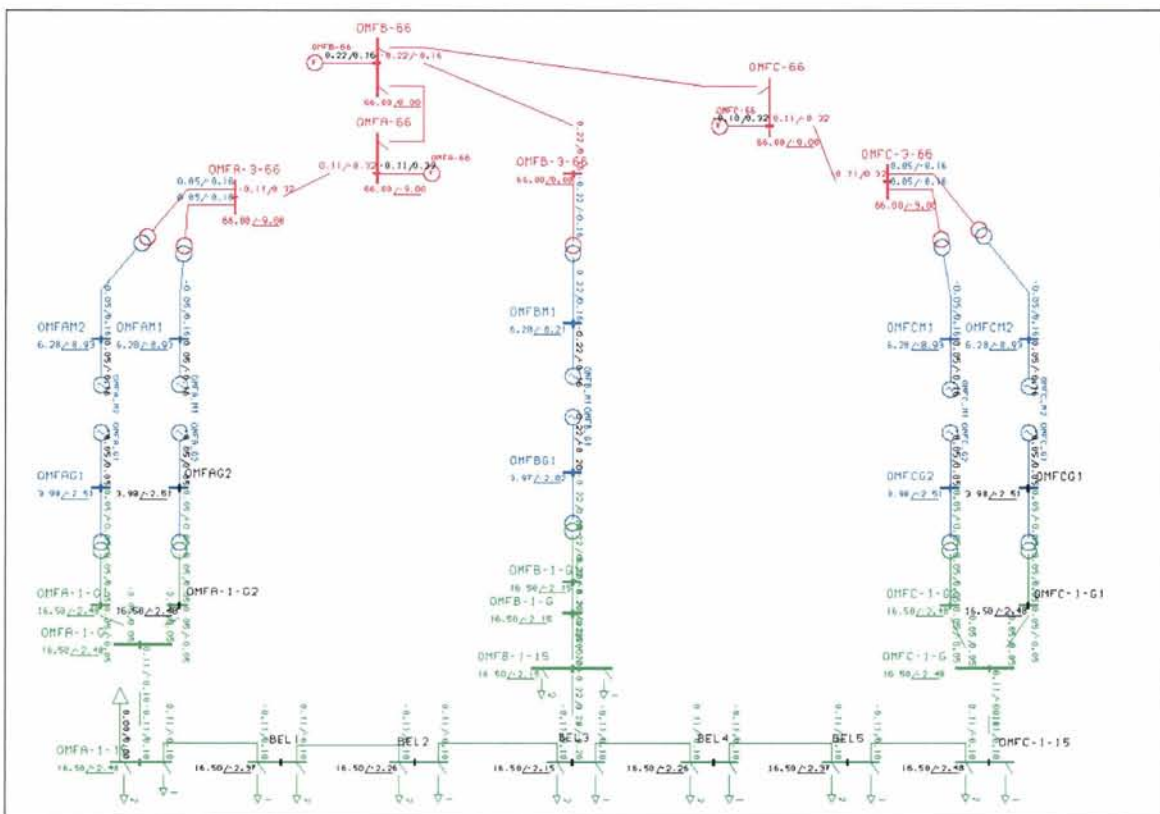


Figur 97 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

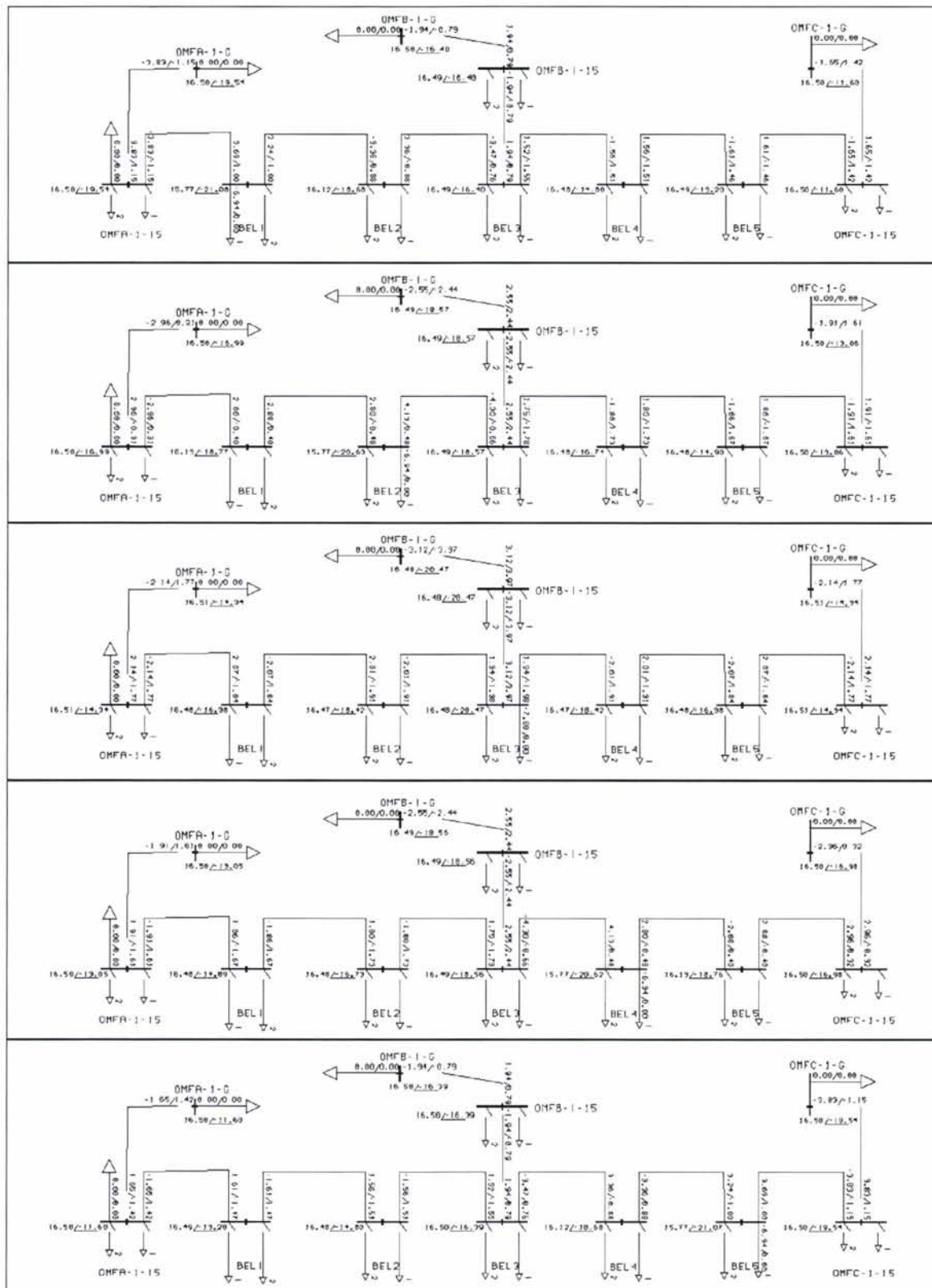
2.2.2.4 Forsøk med en matestrekning med tre omformerstasjoner der fasevinkelen i det overliggende nettet er $\delta_1 = -9^\circ$ $\delta_2 = 0^\circ$ $\delta_3 = -9^\circ$

Med fasevinkler i det overliggende nettet slik at omformerstasjon A og C sakker med -9° , og B leder, oppstår det en lastflyt i tomgang på kontaktledningen på 110 kW fra stasjon B mot A og C, og 100 kVAr fra A og C mot B, se figur 98. Det er aktiv effekt som flyter fra stasjonen som leder til dem som sakker, og en reaktiv effekt går i den motsatte retningen. Av diagrammet ser det ikke ut til at denne lastflyten bidrar med noe tap, men så er effektene oppgitt i MW og MVar, og det er heller ikke mer en to desimaler. Tapene kan dermed være et tall under 10 på hver av de to halve strekningene. Dette er ikke mye, da typiske tomgangstap i omformerne er større.

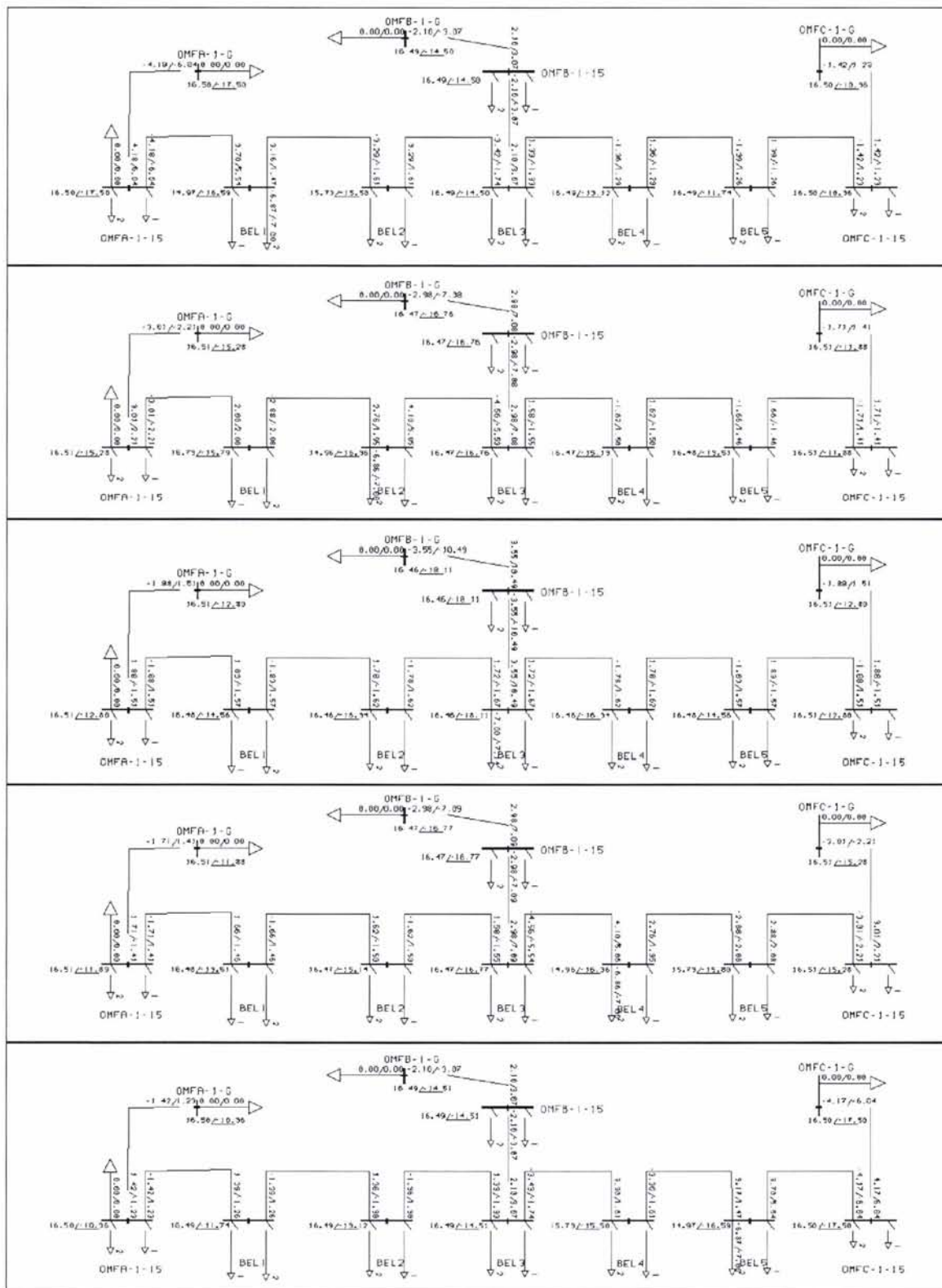
Figur 99 og figur 100 viser effektflyten når lasten flyttes mellom de fem posisjonene og når det sammenlignes med tilfellet uten forskjell i fasevinkler er forskjellene små. Tendensen er at det er omformerstasjon B som leverer noe mer aktiv og noe mindre reaktiv effekt. Søylediagrammene i figur 101 og figur 102 viser effektfordelingen mellom de tre stasjonene.



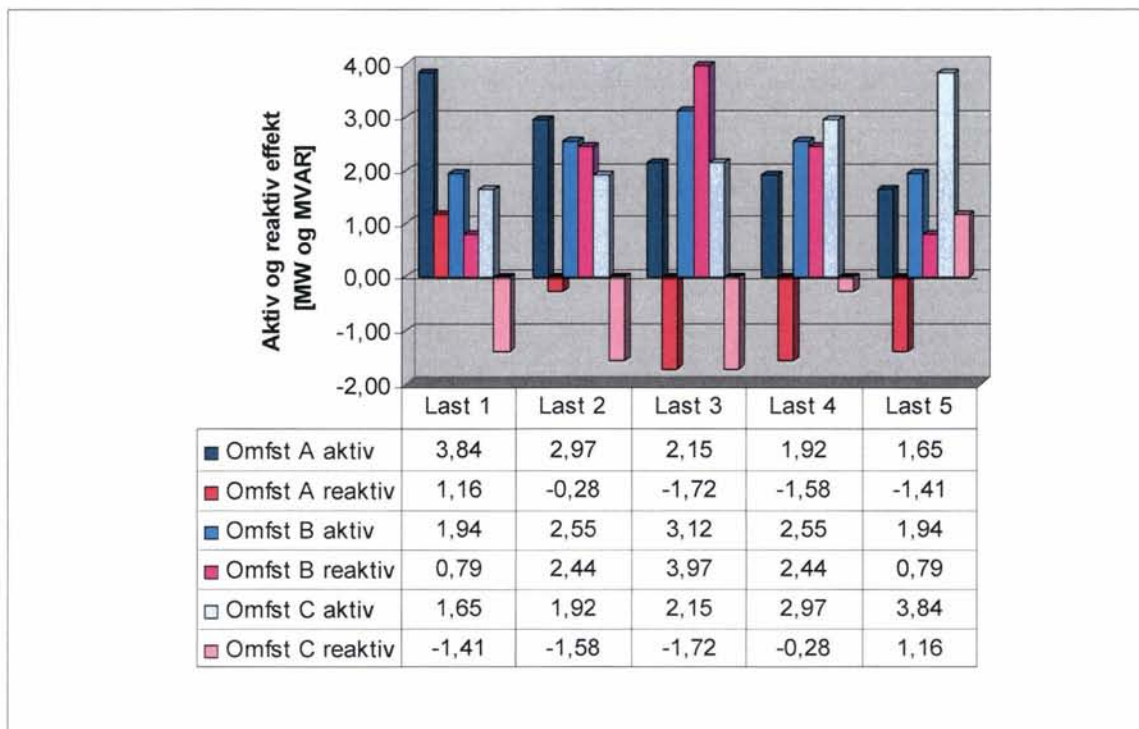
Figur 98 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er sakking i det overliggende nettet til stasjon A og B og en ledende fasevinkel for stasjon C. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



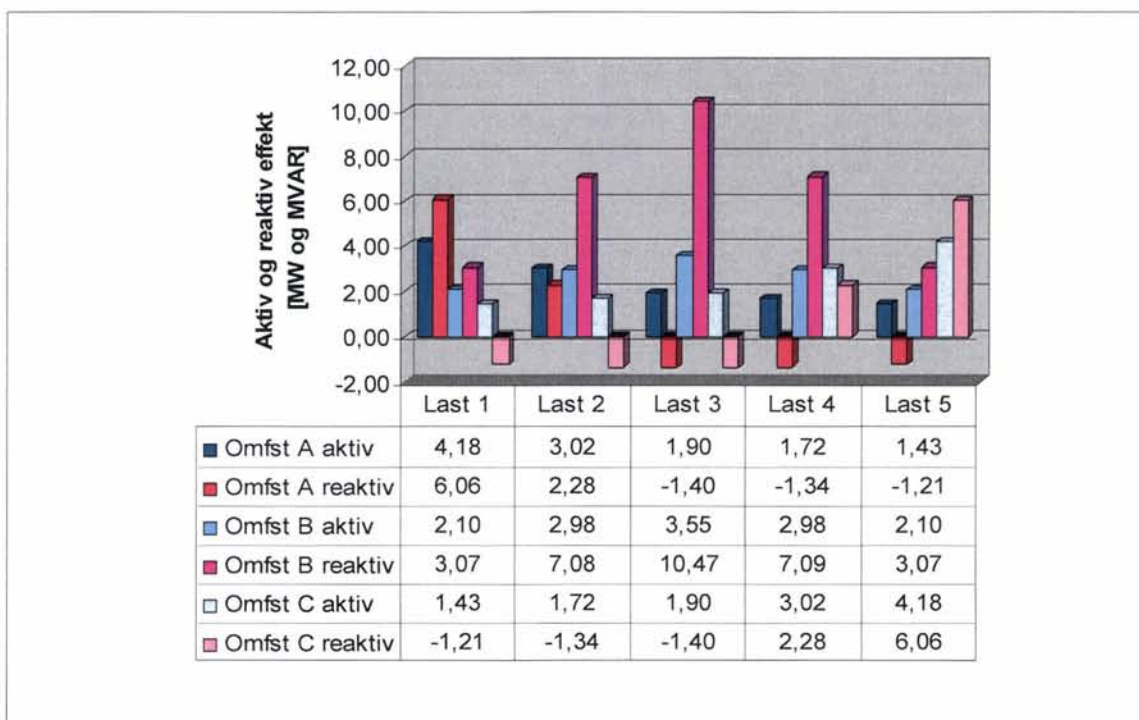
Figur 99 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det overliggende nettet er stift med forskjellige fasevinkler, stasjon A med -9° , B med 0° og C med -9° . Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 100 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det overliggende nettet er stift med forskjellige fasevinkler, stasjon A med -9°, B med 0° og C med -9°. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



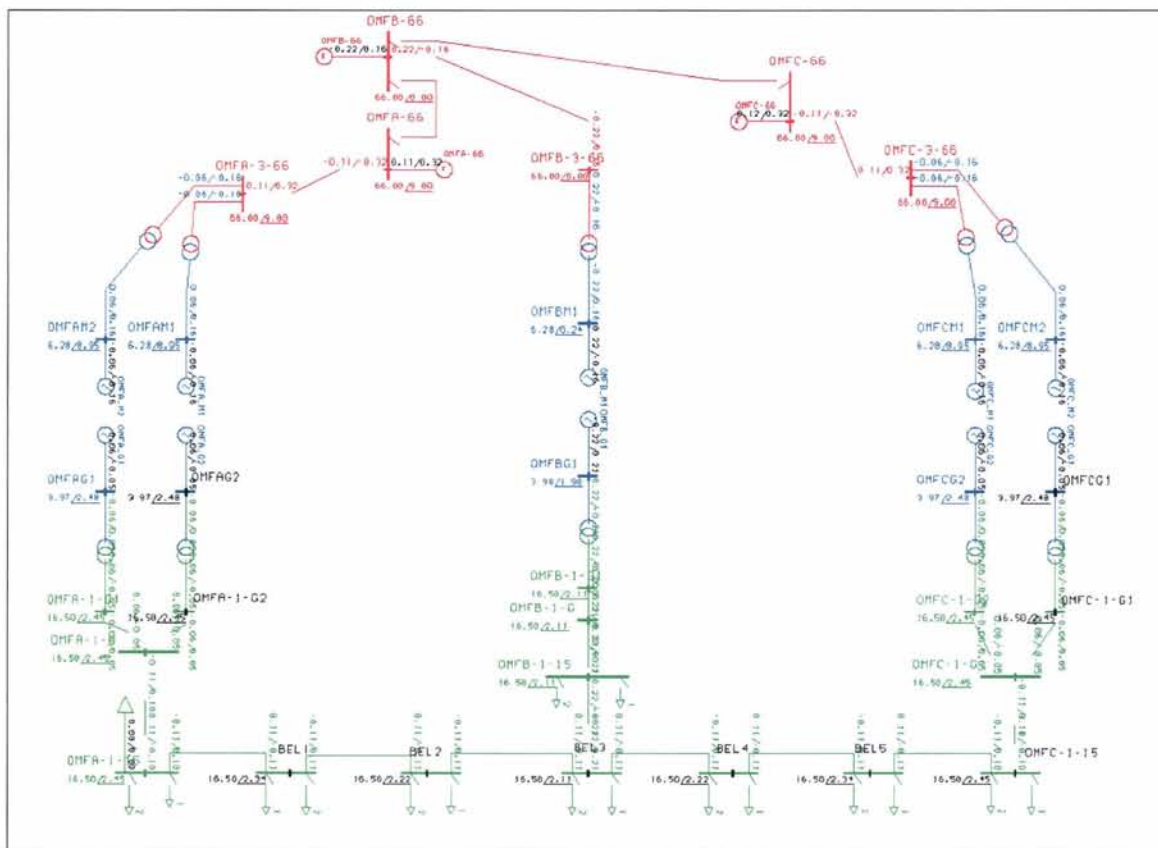
Figur 101 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



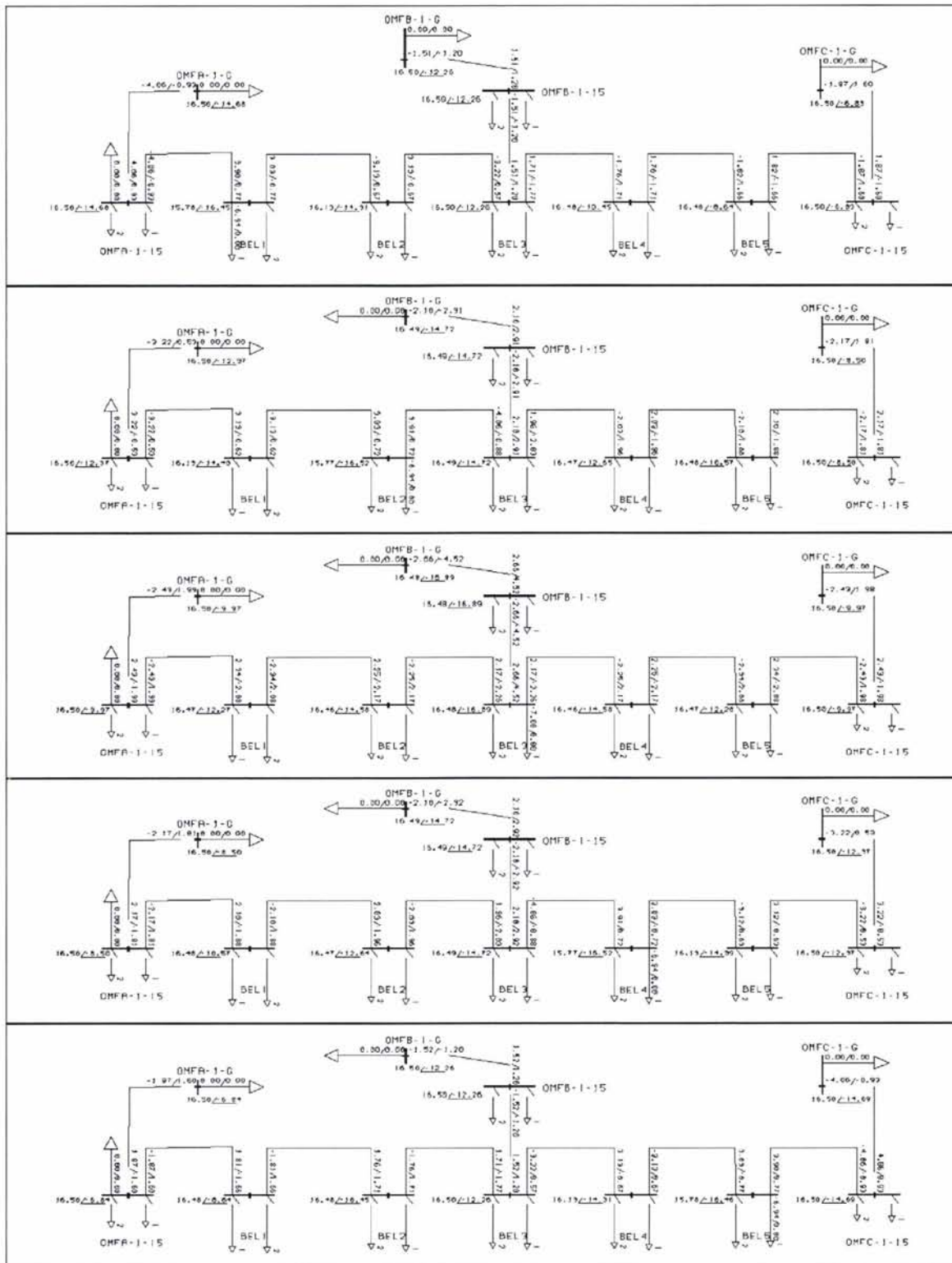
Figur 102 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.2.5 Forsøk med en matestrekning med tre omformerstasjoner der fasevinkelen i det overliggende nettet er $\delta_1 = 9^\circ$ $\delta_2 = 0^\circ$ $\delta_3 = 9^\circ$

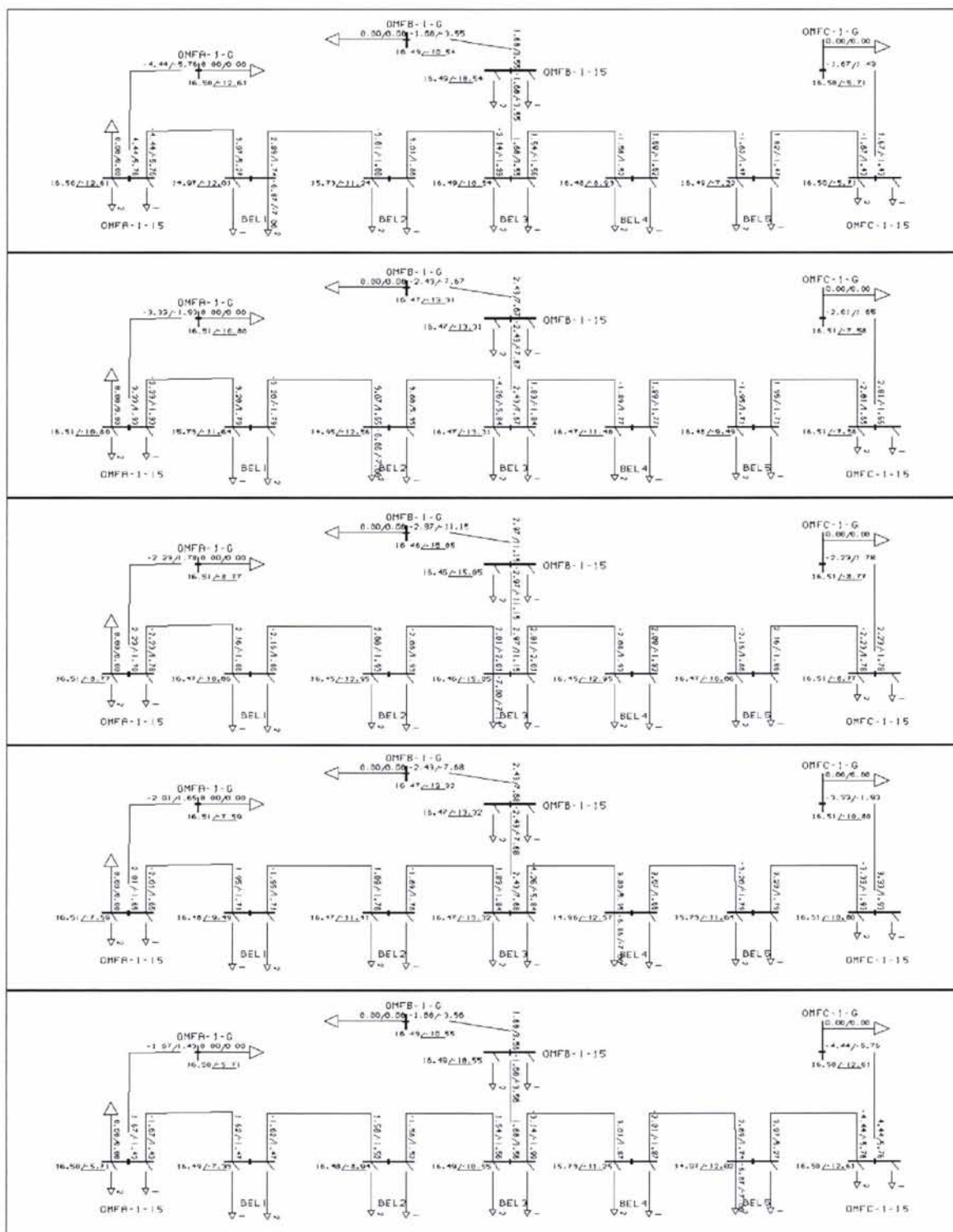
I dette forsøket lar en omformer A og C ligge 9° foran stasjon B, og som ventet blir forholdene nå det omvendte av tilfellet der B lå 9° etter A og C. Figur 103 viser forholdene i tomgang, og det er 110 kW som kommer inn til stasjon B i begge retningene, og det er 110 kVAr som leveres ut fra stasjon B til både A og C. Av lastflytdiagrammene i figur 104 og figur 105 og søylediagrammene i figur 106 og figur 107 for lastfordelingen er det små forskjeller små sammenlignet med tilfellet uten fasevinkler i det overliggende nettet. Tendensen er at omformerstasjon B leverer noe mindre aktiv og noe mer reaktiv effekt. Den reaktive effekten øker imidlertid mest, og en situasjon der B som har minst ytelse, også sakter, gir desto større sannsynlighet for en overbelastning.



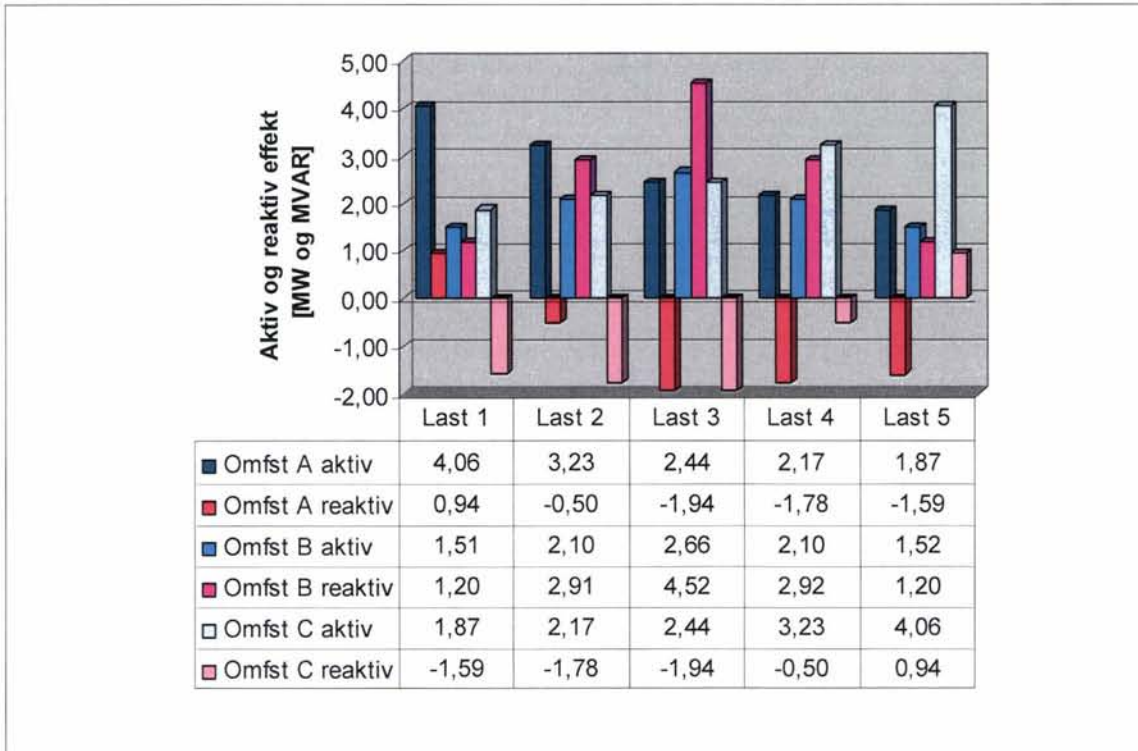
Figur 103 Spenningsene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er sanking i det overliggende nettet til stasjon A og B og en ledende fasevinkel for stasjon C. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



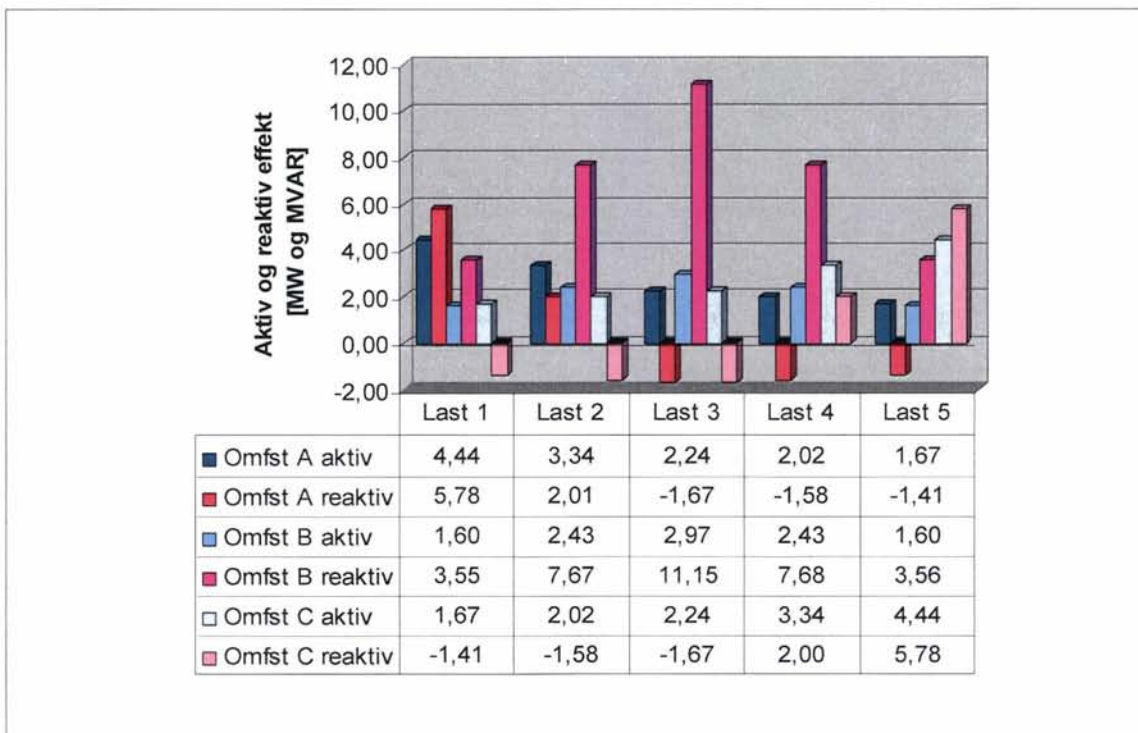
Figur 104 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det overliggende nettet er stift med forskjellige fasevinkler, stasjon A med 9°, B med 0° og C med 9°. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 105 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det overliggende nettet er stift med forskjellige fasevinkler, stasjon A med 9°, B med 0° og C med 9°. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 106 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.

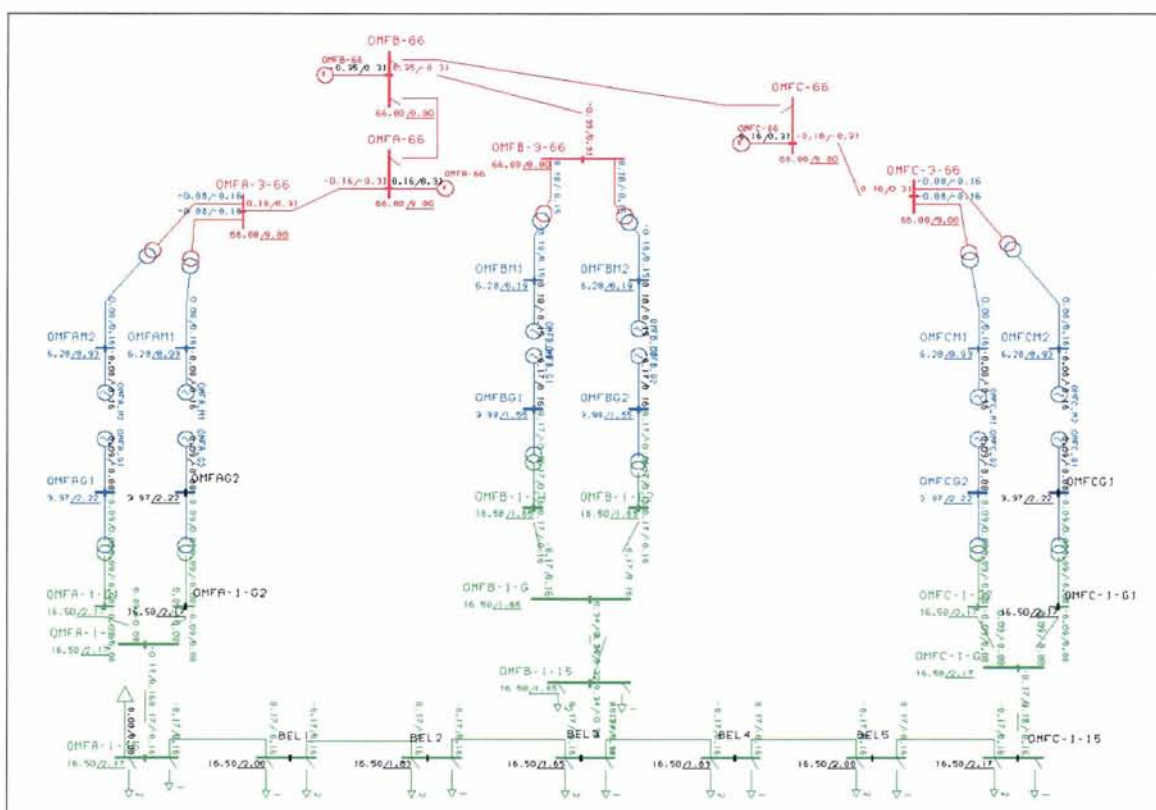


Figur 107 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

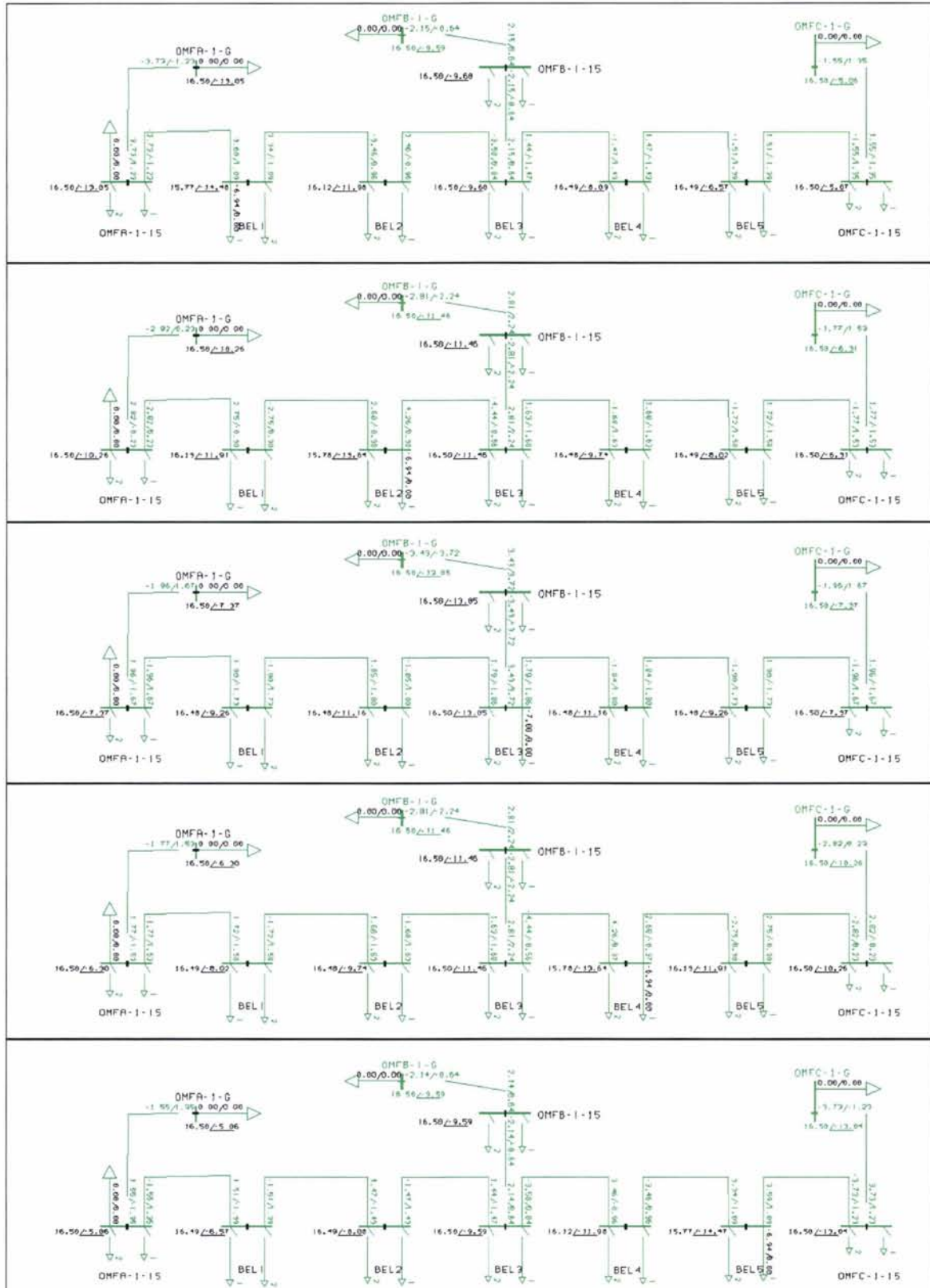
2.2.2.6 Forsøk med en matestrekning med tre like omformerstasjoner der fasevinkelen i det overliggende nettet er $\delta_1 = 9^\circ$ $\delta_2 = 0^\circ$ $\delta_3 = 9^\circ$

Settes det inn to omformeraggregater i stasjon B slik at alle blir på $2 \times 5,8$ MVA og stasjon B ligger 9° etter A og C, blir effektflyten i tomgang større, men en unngår den store belastningen på stasjon B og faren for overbelastning. Figur 108 viser at effektflyten nå øker til 170 kW inn til stasjon B fra A og C, mens det er en reaktiv effekt på 160 kVAr som går ut fra B mot nabostasjonene. Selv om effektutvekslingen i tomgang har økt, er det fremdeles så lave tap at de ikke kommer frem av analysen, men det antas et tap under 10 kW på hver halvstrekning.

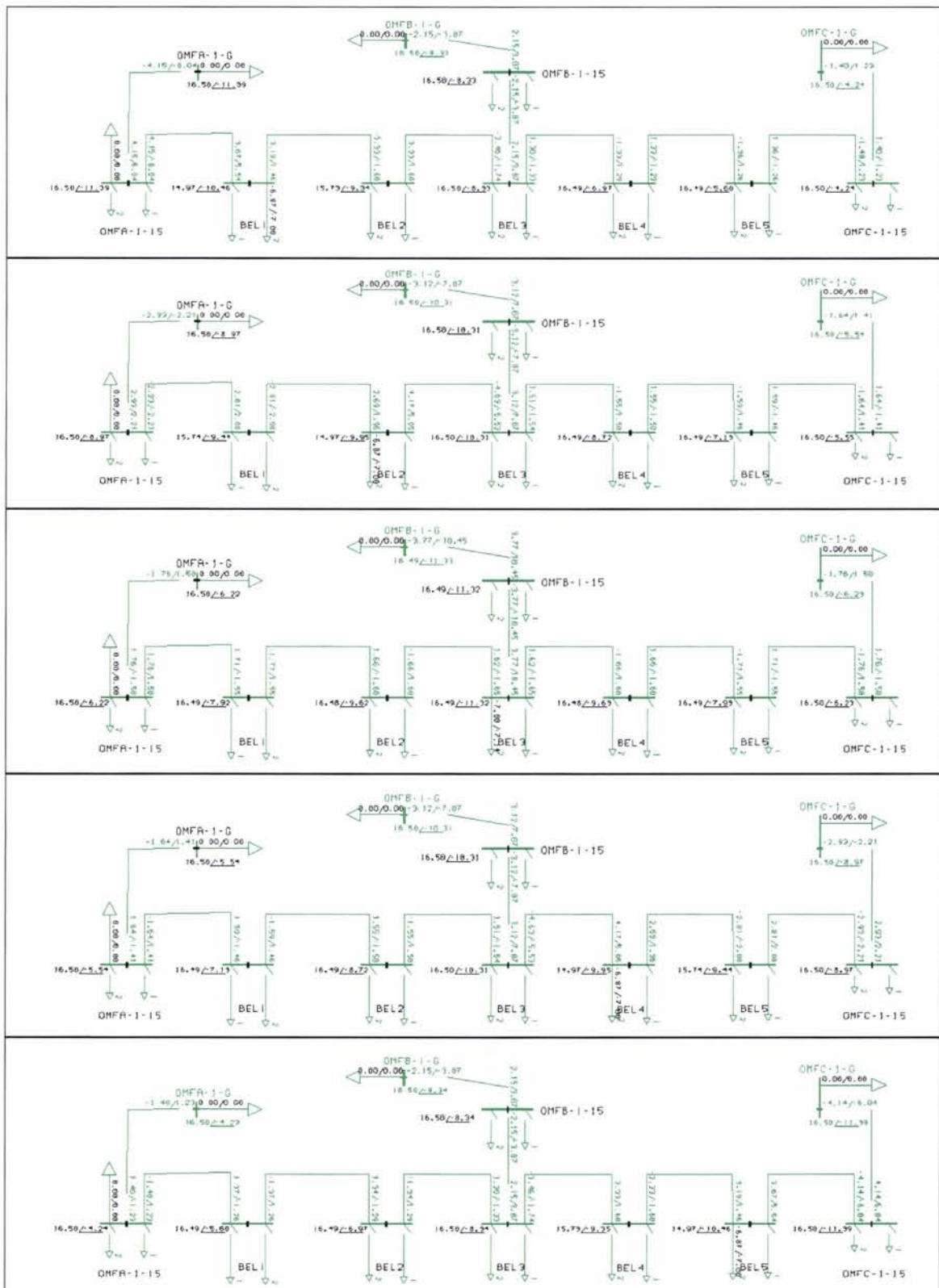
Diagrammene for lastflyten i figur 109 og figur 110 og søylediagrammene for effektfordelingen i figur 111 og figur 112 viser en mye jevnere lastflyt når omformerstasjonene er like stor. Tendensen er at omformerstasjon B som ligger etter i fasevinkel, leverer noe mindre aktiv og noe mer reaktiv effekt enn i tilfellet uten forskjellige fasevinkler i det overliggende nettet. Sammenlignet med de andre stasjonene er det også nå B som leverer mest reaktiv effekt, unntatt når lasten står helt nær stasjon A og B (ved henholdsvis BEL1 og BEL5). Forskjellen i fasevinkler har tydeligvis mye å si for den reaktive effektfordelingen selv når alle andre forhold er like. Med to omformere i stasjon B er det nå ikke lenger fare for overbelastning.



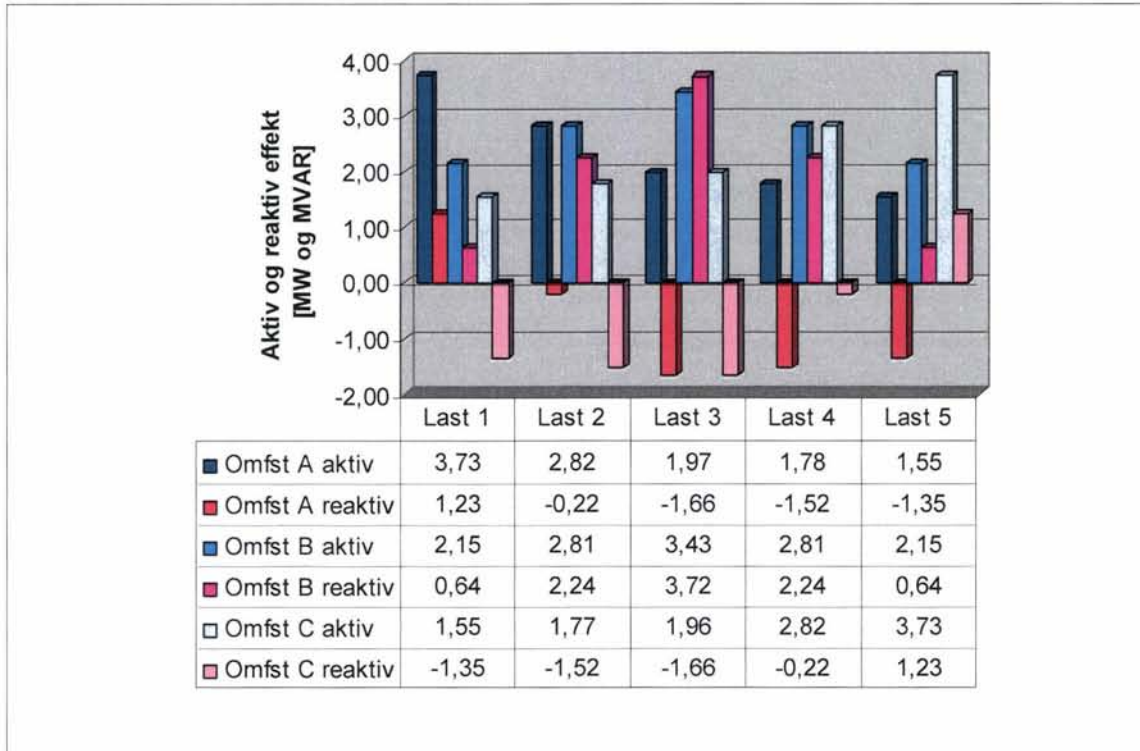
Figur 108 Spenningene og vinkler i tomgang på en 80 km lang matestrekning med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på $2 \times 5,8$ MW i stasjon A, B og C. Det er sanking i det overliggende nettet til stasjon C med 9° . Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



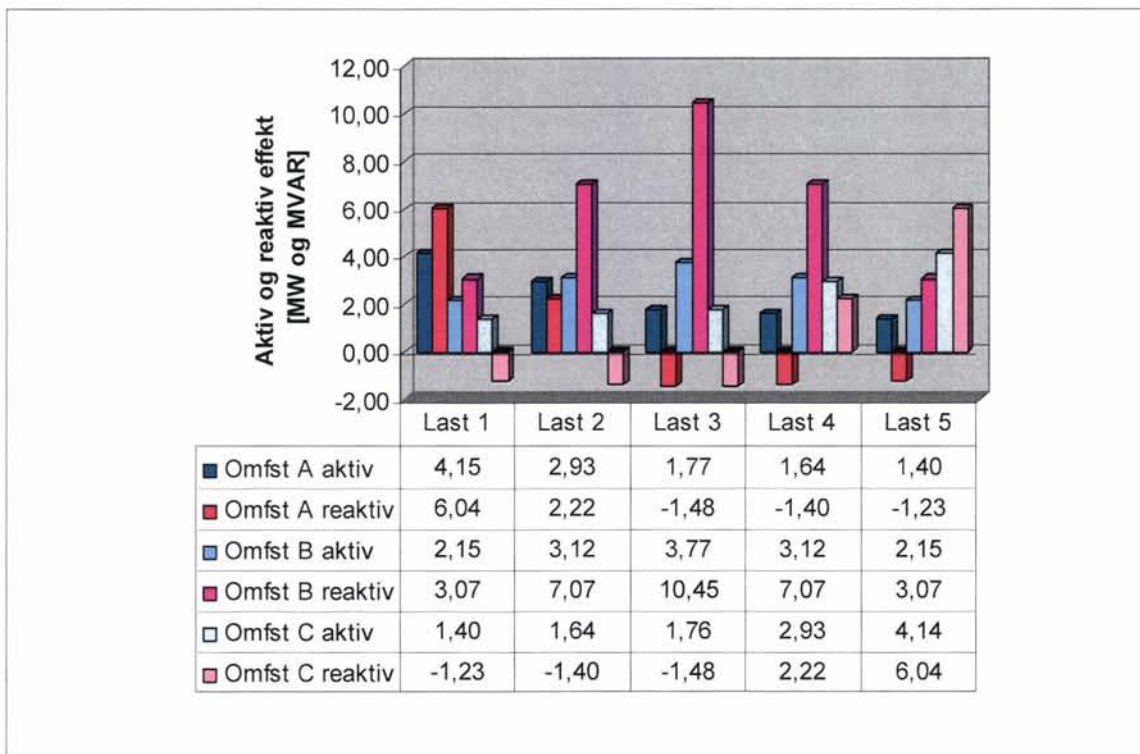
Figur 109 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre like omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i hver stasjon. Det overliggende nettet er stift med forskjellige fasevinkler, stasjon A med 9°, B med 0° og C med 9°. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 110 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre like omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i hver stasjon. Det overliggende nettet er stift med forskjellige fasevinkler, stasjon A med 9°, B med 0° og C med 9°. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 111 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belastning på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



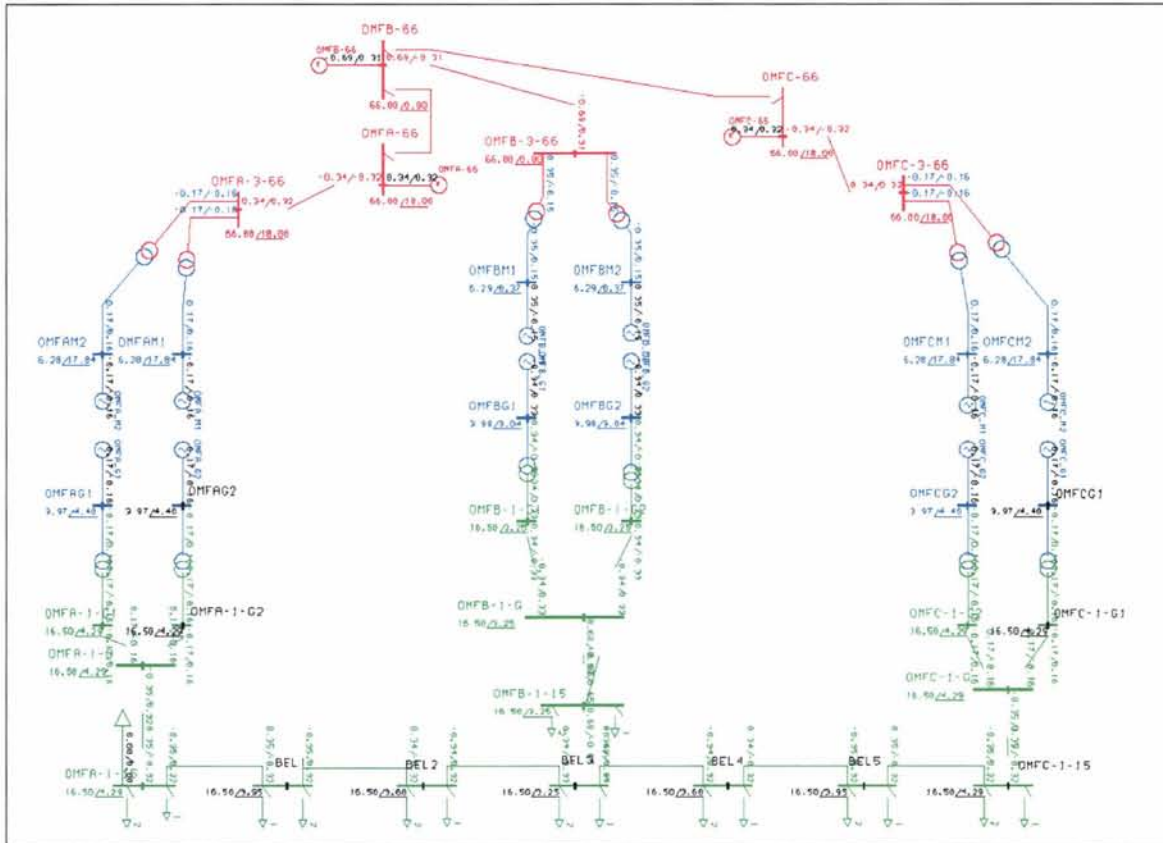
Figur 112 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belastning på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.2.7 Forsøk med en matestrekning med tre like omformerstasjoner der fasevinkelen i det overliggende nettet er $\delta_1 = 18^\circ$ $\delta_2 = 0^\circ$ $\delta_3 = 18^\circ$

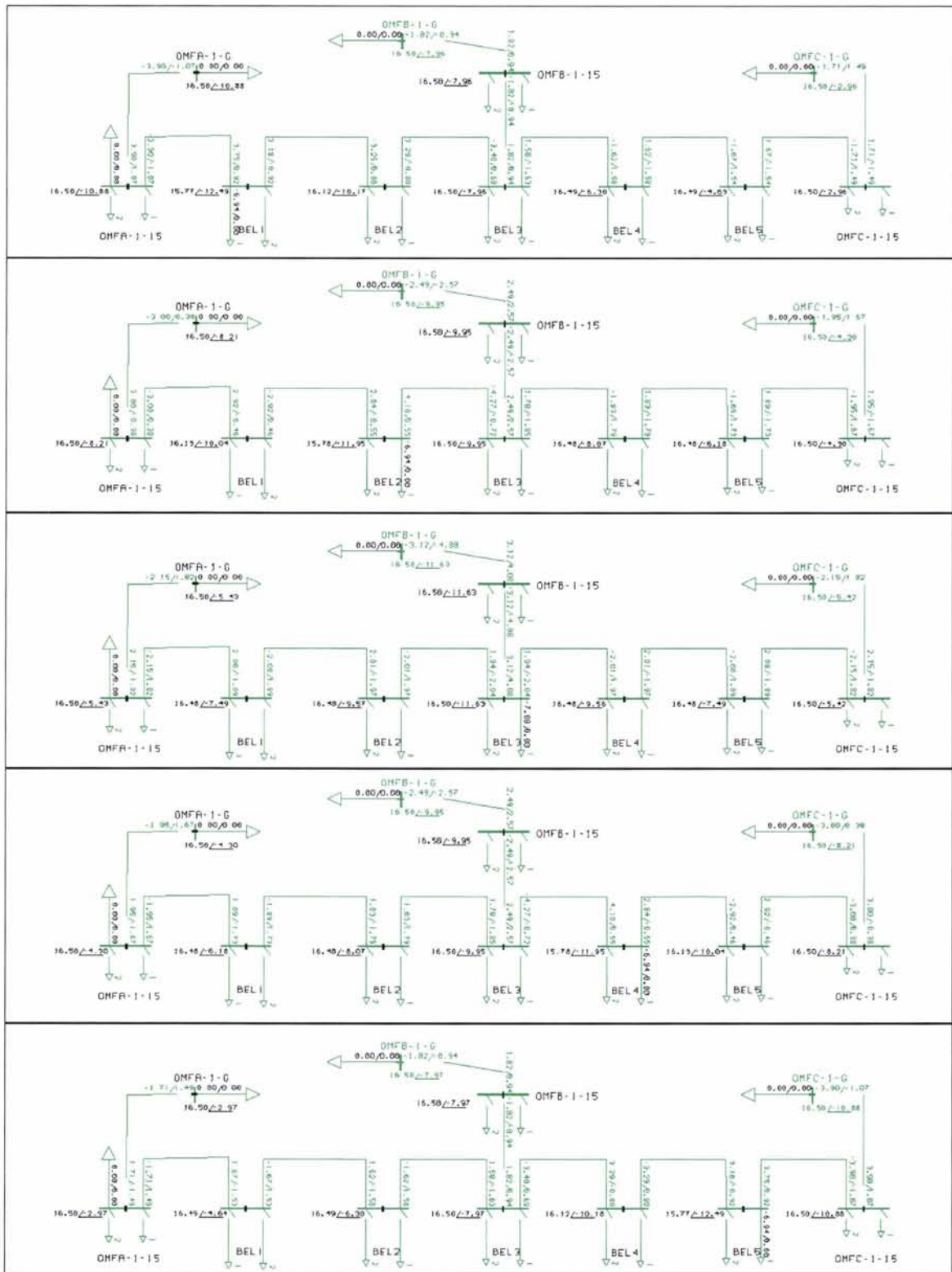
Et nytt forsøk med så store forskjeller i overliggende nett som 18° , er utført for å etterprøve forhold som ligner på dem i Leivoll, der det er store effekter som flyter mellom omformerstasjonene. Stasjon B ligger fremdeles etter i fasevinkel, og med 18° på trefasesiden blir det 6° på enfasesiden. Figur 113 viser at den aktive effektflyten er økt til ca. 350 kW fra stasjon A og C mot B, mens det går ca. 330 kVAR fra stasjon B i mot nabostasjonene. Følgen er at det leveres ca. 690 kW til det overliggende nettet fra stasjon B. De elektriske tapene synes å være økt til rundt 20 kW, men på grunn av avrunding kan de både være større eller mindre, dette er uansett ikke mye.

Diagrammene for lastflyten i figur 114 og figur 115 og søylediagrammene for lastfordelingen i figur 116 og figur 117 viser tydelig at omformerstasjon B som ligger etter i fasevinkel, leverer noe mindre aktiv og noe mer reaktiv effekt enn i tilfellet uten forskjellige fasevinkler i det overliggende nettet. Det er store reaktive effektmengder som leveres mellom stasjonene, men ikke så mye verre enn i tilfellet uten fasevinkler. Generelt synes det å være store reaktive effektutvekslinger mellom stasjoner som står nært hverandre. Sammenlign for eksempel med situasjonen uten fasevinkler og 80 km mellom omformerne i avsnitt 2.2.1.2 der det var mye mindre reaktiv effekt som ble utvekslet mellom stasjonene. Det er mulig at en fallende statikk kunne ha bedret denne situasjonen.

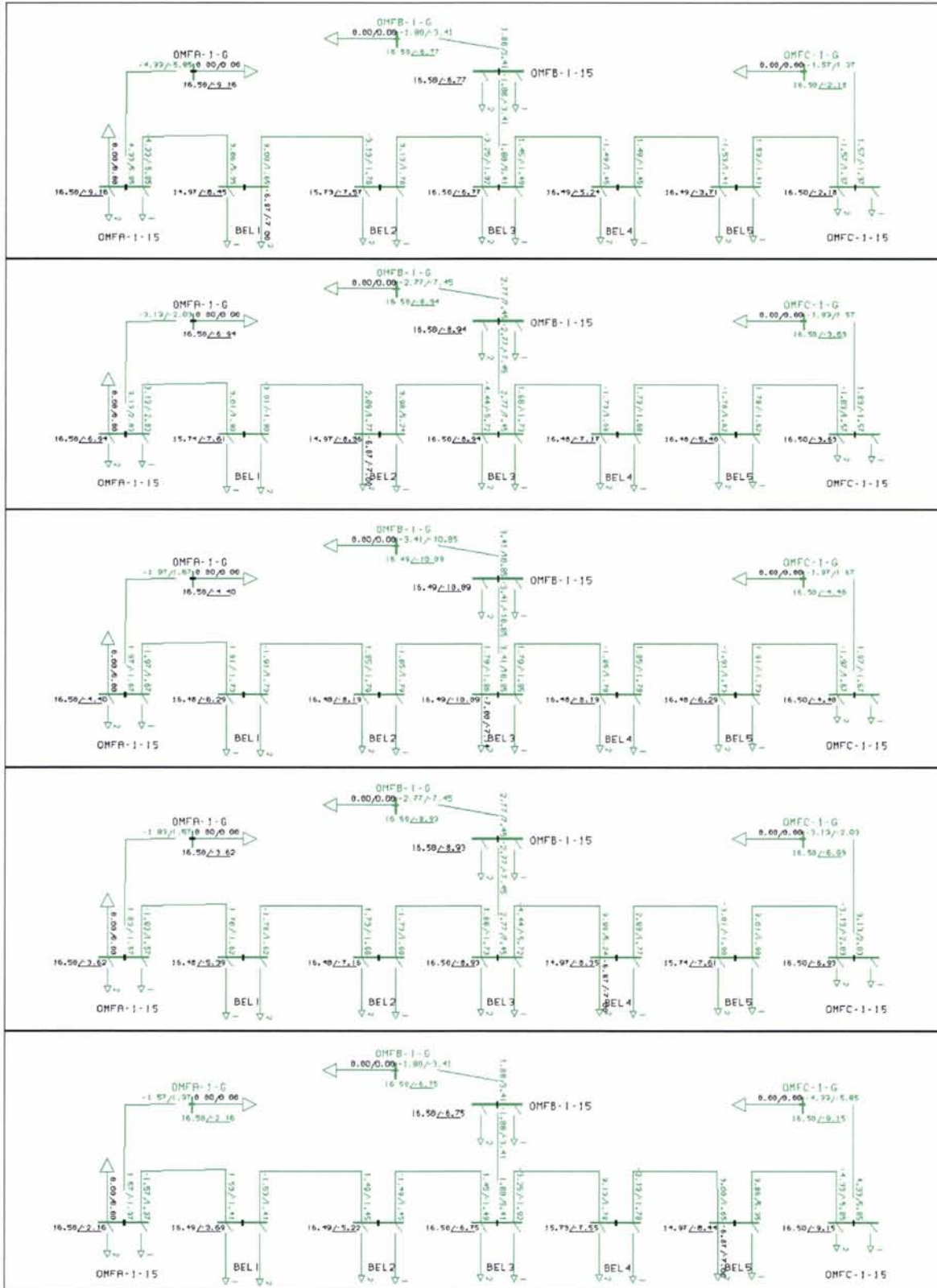
Det er et merkelig at effektutvekslingen med så store fasevinkler ikke er større enn den er. Dette samsvarer dårlig med de observasjoner som Bane Energi gjør når det gjelder stor effektutveksling mellom omformerne. Egne undersøkelser av fasevinkler i det overliggende nettet må imidlertid gjøres for å finne ut hvor store vinklene i det overliggende nettet egentlig er, se kapittel 3.2.1.



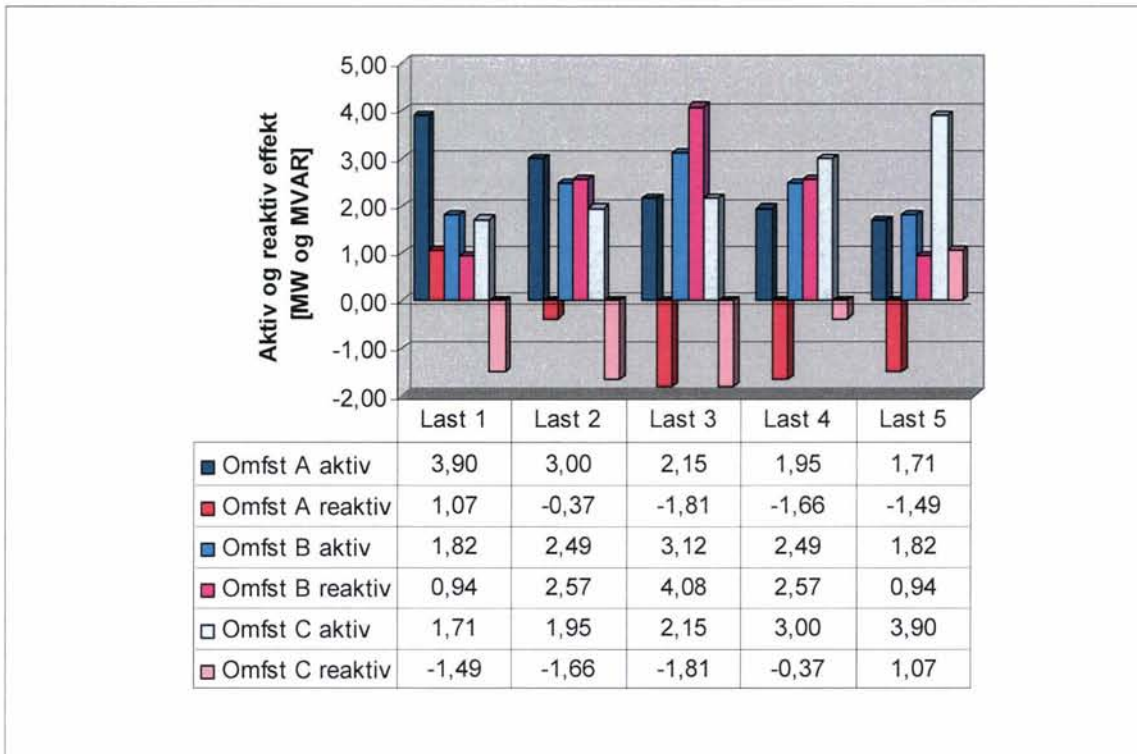
Figur 113 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A, B og C. Det er sanking i det overliggende nettet til stasjon C med 18°. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \phi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



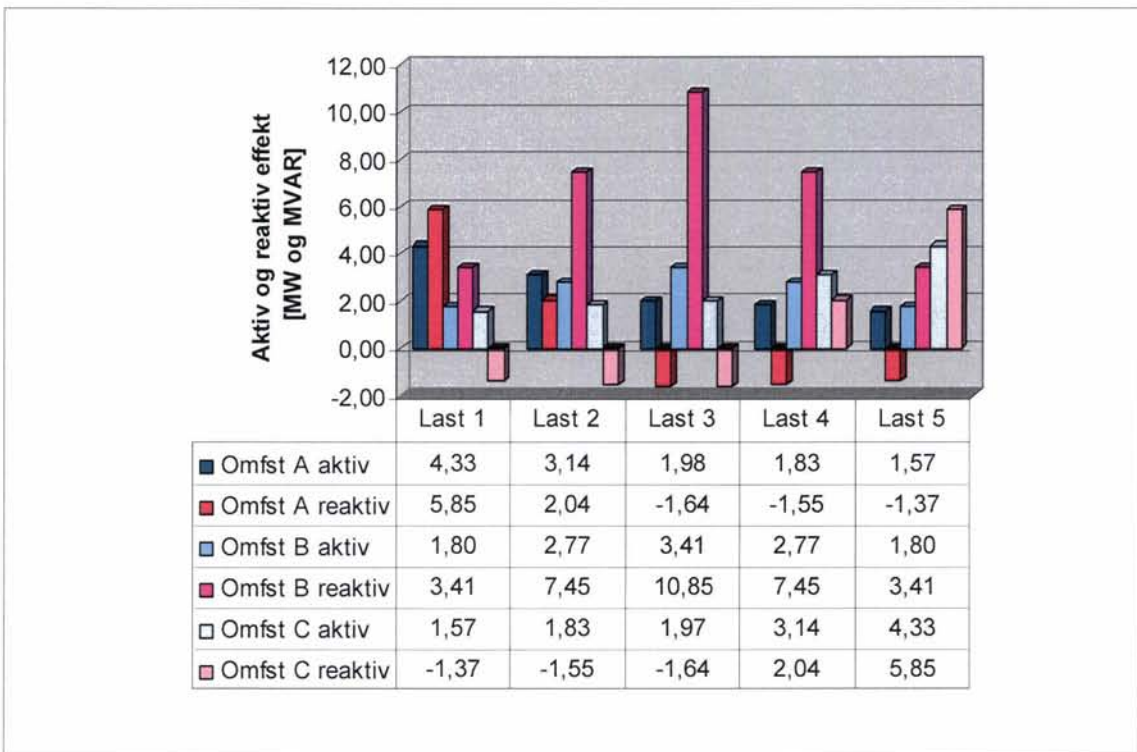
Figur 114 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre like omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i hver stasjon. Det overliggende nettet er stift med forskjellige fasevinkler, stasjon A med 18°, B med 0° og C med 18°. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 115 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre like omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i hver stasjon. Det overliggende nettet er stift med forskjellige fasevinkler, stasjon A med 18°, B med 0° og C med 18°. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 116 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



Figur 117 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.2.8 Forsøk med en matestreking der lastuttaket er større enn omformerstasjonenes innsatte ytelse

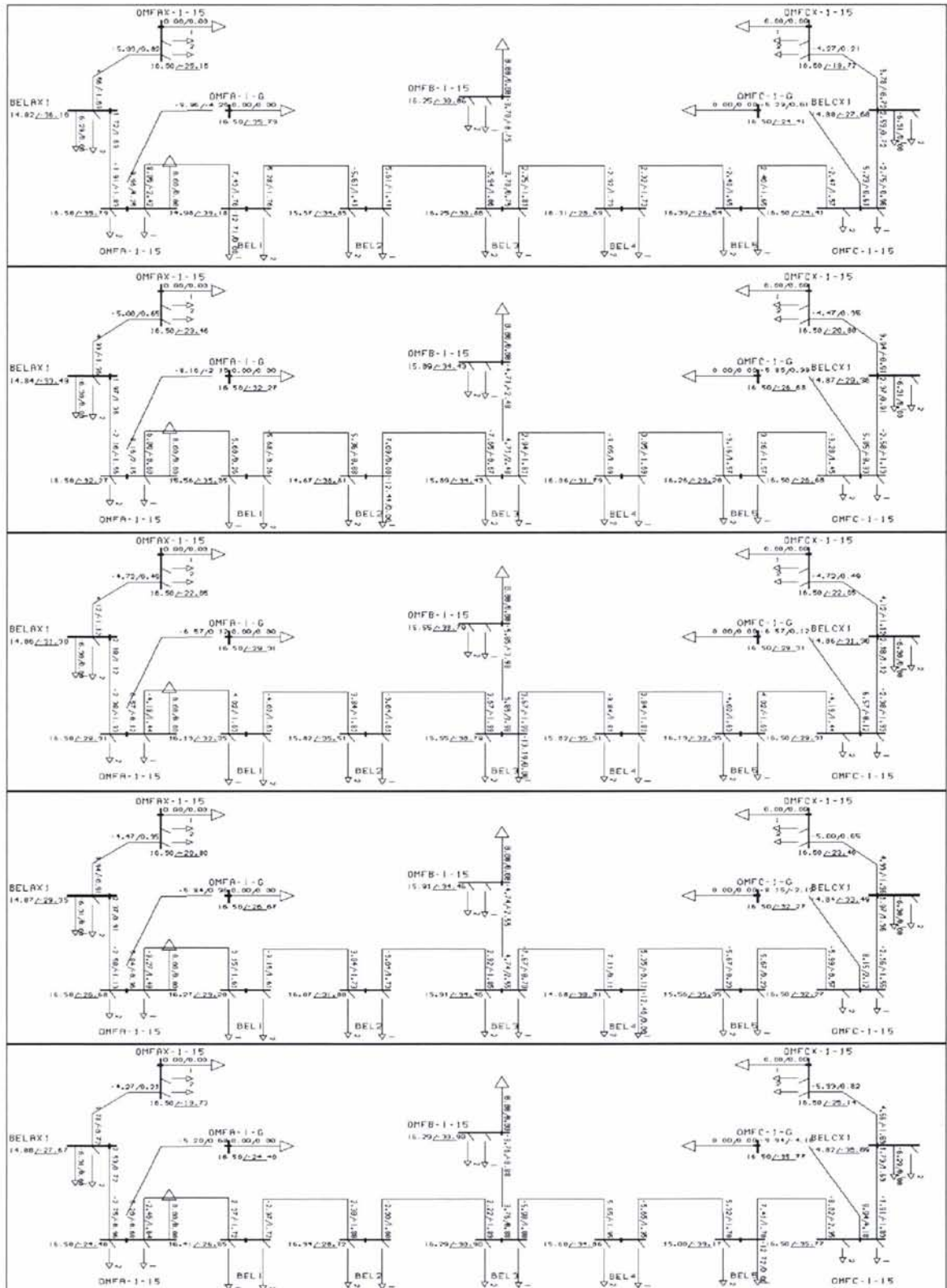
Analysene i avsnitt 2.2.1.11 gjøres på nytt, med en omformerstasjon B med ett aggregat på 5,8 MVA, midt mellom stasjon A og C. Hensikten er å undersøke om et tog med så stor ytelse som 14 MW fører til overbelastning av en stasjon med bare ett aggregat. Dette er et aktuelt problem for tunge godstog på strekninger der omformerstasjoner har bare ett aggregat. Dette kan gjelde spesielt Rudshøgda og Otta med aggregater på kun 3,1 MVA og som har både en fallende statikk og et lavere settpunkt³ for spenningen enn de andre stasjonene. Her skal det undersøkes et tilfelle der alle tre omformerstasjonene har flat statikk og samme settpunkt.

Figur 118 viser effektfordelingen når belastningen på 14 MW forflyttes mellom omformerstasjonene. Spenningen blir noe lav, og dette medfører redusert effekttopptaket (proporsjonalitet mellom spenning og effekt settes også her til 1,0), men spenningen blir naturligvis ikke så lav som i avsnitt 2.2.1.11 med 80 km mellom omformerstasjonene. Omformerstasjon B, med bare ett aggregat, bidrar mye til effektleveringen også om belastningen er fjernt fra denne. Tydeligvis er også belastningen ved de fjerne stasjonene AX og CX påvirket, selv om disse ikke bidrar direkte til annet enn belastningen på egen matestreking. Effekten som leveres fra disse, endrer seg med rundt 1 MW når belastningen flytter seg på den analyserte matestrekingen.

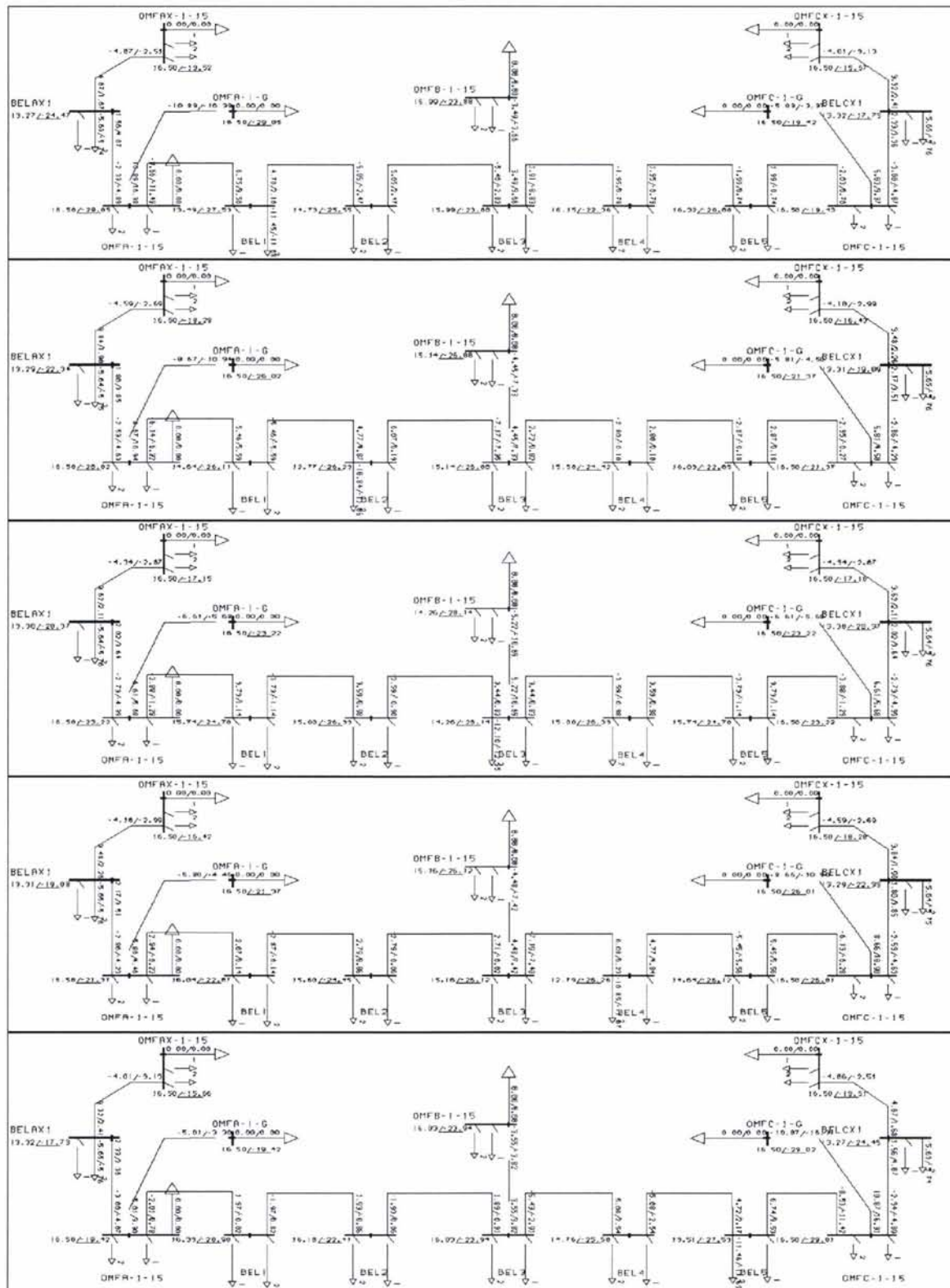
Figur 119 viser at omformerstasjon B leverer svært mye reaktiv effekt til den bevegelige lasten når effektfaktoren er på $\cos \varphi = 0,7$. Omformerstasjonen greier ikke å opprettholde spenningen på 16,5 kV ved samleskinnen.

Fordelingen av aktiv og reaktiv effekt er vist i figur 120 og figur 121 for både en aktiv last og for en blandet last. For aktiv last er den største belastning på omformerstasjon B på 7,1 MVA, og dette er innenfor grensen for dens 6-minuttersverdi på 8 MVA. For en blandet belastning blir den totale leverte effekten fra B imidlertid 11,9 MVA, som betyr at den vil falle ut for overlast. Marginene for utfall av stasjonen med ett aggregat er liten eller oversteget, og det krever relevante tiltak. Enten må togene med multiple lokomotiver gies pådragsbegrensning, eller så må disse stasjonene få en fallende statikk eller både en fallende statikk og redusert spenning. Det siste vil imidlertid lett kunne føre til en ugunstig effektflyt. Ett ekstra aggregat kan også være en løsning.

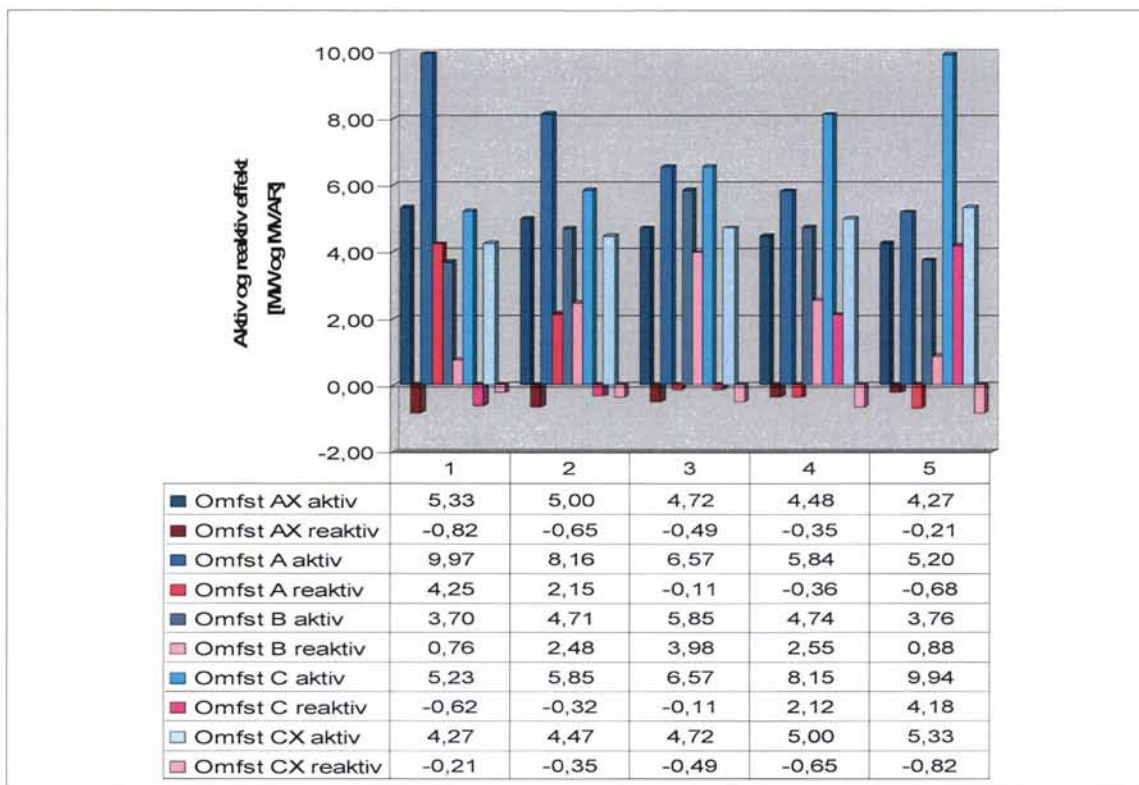
³ Det kan ikke bekreftes ut fra dagens dokumentasjon at settpunktet for spenningen i Rudshøgda og Otta omformere er stilt lavere enn det som er vanlig. For å få bekreftet at så er tilfelle må noen inn i stasjonene for å undersøke dette.



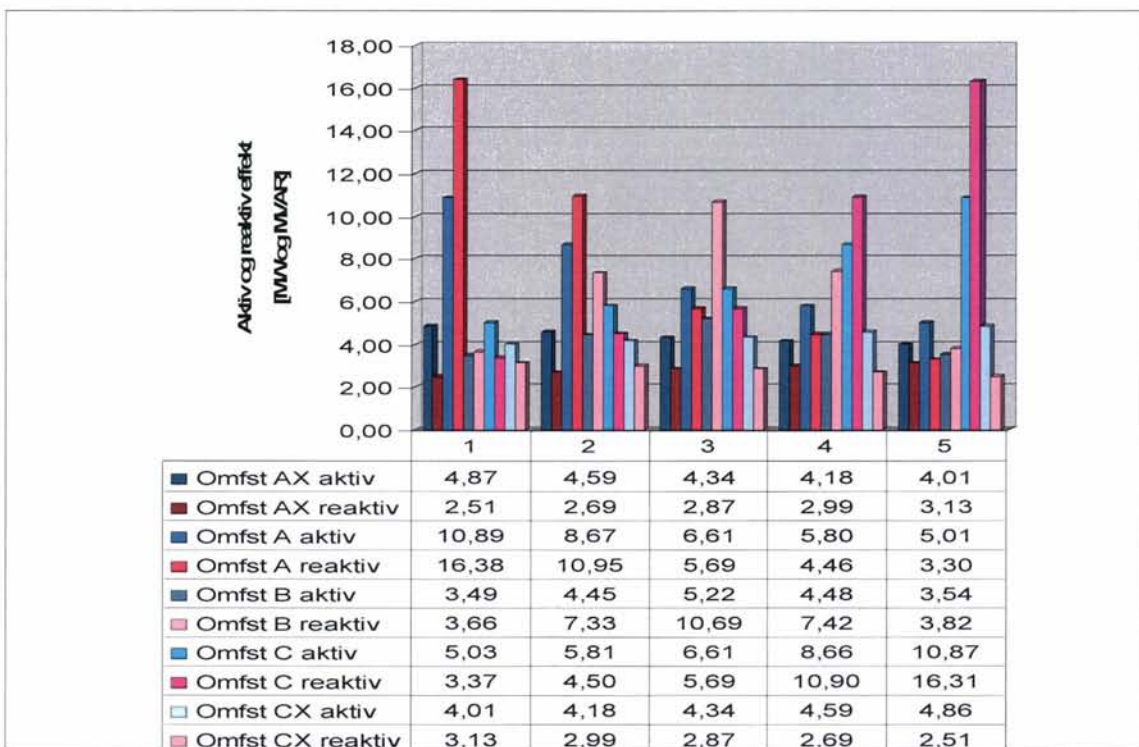
Figur 118 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre like omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i hver. Det overliggende nettet er stift med like fasevinkler og større last enn installert ytelse i stasjonene. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 14 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 119 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre like omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i hver. Det overliggende nettet er stift med like fasevinkler og større last enn installert ytelse i stasjonene. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 14 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 120 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 14 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



Figur 121 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon A, B og C. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.2.2.9 Oppsummering etter undersøkelser med en matestrekning mellom to omformerstasjoner på 40 km

Følgende forhold er observert for de 9 forsøkene:

- Med 40 km mellom omformerstasjonene og ulik ytelse oppstår det en ujevn belastningsgrad for stasjonene, og lastflyten blir heller ikke jevn.
- I tilfellet med én omformerstasjon på 5,8 MVA mellom to naboer med 2 x 5,8 MVA oppstår det en ujevn fordeling mellom dem, og den minste omformerer leverer svært mye reaktiv effekt. Mye av den reaktive effekten utveksles mellom omformerne og utvikler elektriske tap.
- Stasjonen med ett aggregat på 5,8 MVA har en tendens til å levere ut så mye reaktiv effekt at den lett kan overbelastes, dette gjelder om belastningen trekker reaktiv effekt.
- For tilfellet med én stasjon med 5,8 MVA og to naboer på 2 x 5,8 MVA viser det seg at en fallende statikk for alle spenningsregulatorene gir en jevnere effektfordeling mellom stasjonene og mindre tap.
- Fra avsnitt 2.2.1.5 så en at lavere settpunkt for spenningsregulatoren for en stasjon gjør at denne påtar seg mindre effekt, både aktiv og reaktiv. Selv om dette ikke er forsøkt her vil det nok gi mindre fare for overbelastning av stasjonen med ett aggregat. Lavere settpunkt gir også uønsket effektflyt i tomgang.
- Med forskjellige fasevinkler i overliggende nett oppstår effektflyt som er slik at den som leder leverer aktiv effekt mot den som sakker og reaktiv effekt går i motsatt retning i tomgang. Generelt ser det ut til at med belastning på matestrekningen, er det stasjonen som leder som bidrar med mest aktiv effekt, mens den som sakker relativt til andre stasjoner, leverer mest reaktiv effekt.
- Dette gir enda større problemer med en stasjon med mindre ytelse mellom kraftige naboer, ved at den som sakker, levere enda mer reaktiv effekt, og at den dermed lettere kan overbelastes.
- Med en fasevinkel på 9° i det overliggende nettet blir ikke disse tendensene særlig store.
- Med en fasevinkelforskjell på 18° gir det ikke store forandringer i effektflyten. Derimot gir en blandet belastning med $\cos \varphi = 0,7$ stor variasjon i den reaktive effektflyten selv uten forskjellig i fasevinkler.
- Med en belastning på matestrekningen som er større enn en enkelt omformers installerte ytelse, blir det ikke fare for overbelastning så lenge belastningen er rent aktiv. Selv ikke en omformer med bare ett aggregat på 5,8 MVA vil falle ut. Men for en blandet belastning vil den minste stasjonen på 5,8 MVA kunne falle for overlast.

2.3 Undersøkelser for tilfeller med AT-system og 120 km mellom omformerstasjonene

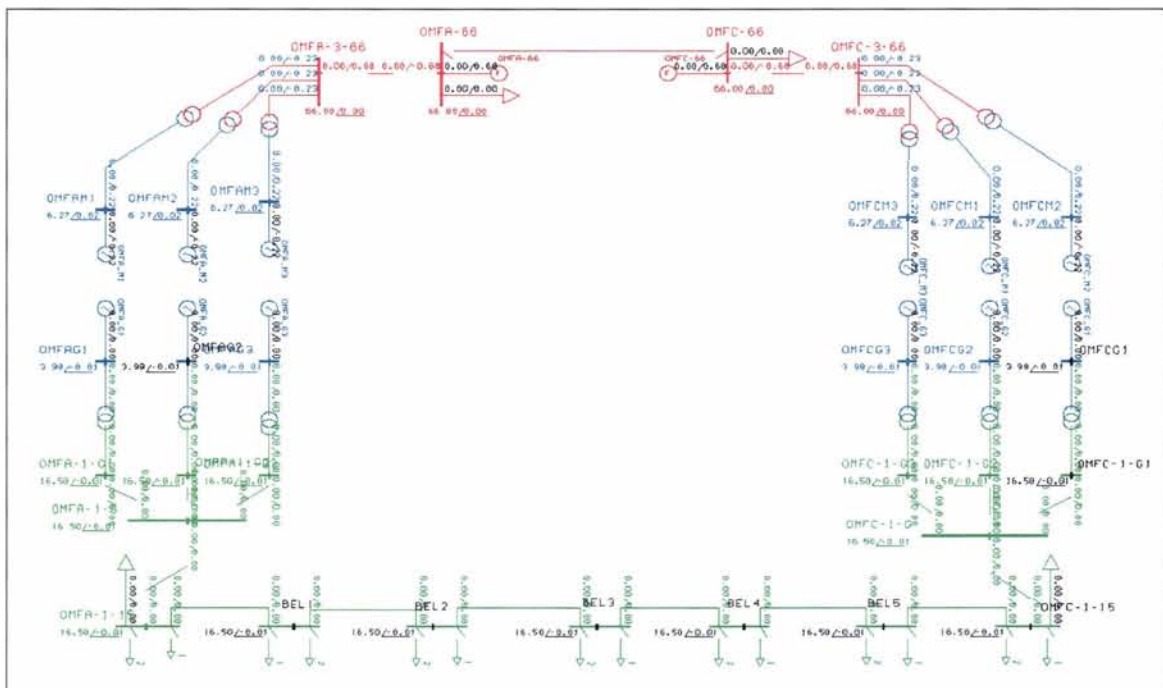
Innstilling av spenningsregulatorer kan bli spesielt viktig for AT-systemet på grunn av en lav overføringsimpedans og store effektoverføringer mellom omformerstasjoner ved ulike fasevinkler i det overliggende nettet. Alle forsøkene har en matestrekning på 120 km og omformerstasjoner på begge de tilstøtende matestrekningene. Forsøket blir noe mer sammensatt, men til gjengjeld får en analysert lastfordelingen i et system der impedansen på strekningen er svært mye lavere enn i et konvensjonelt kl-anlegg. I alle de fire omformerstasjonene er det 3 x 5,8 MVA omformeraggregater slik som tiltenkt og funnet tilstrekkelig i tidligere arbeid, se [9]. Belastningen som flyttes, vil i alle forsøkene være på 14 MW, og dette kan illustrere ett multipel lokomotiv med som (oftest kortvarig) trekker svært

stor effekt. Det simuleres også med belastning der $\cos \varphi = 0,7$. Spenningsavhengigheten for aktiv og reaktiv effekt settes også her til 0,2.

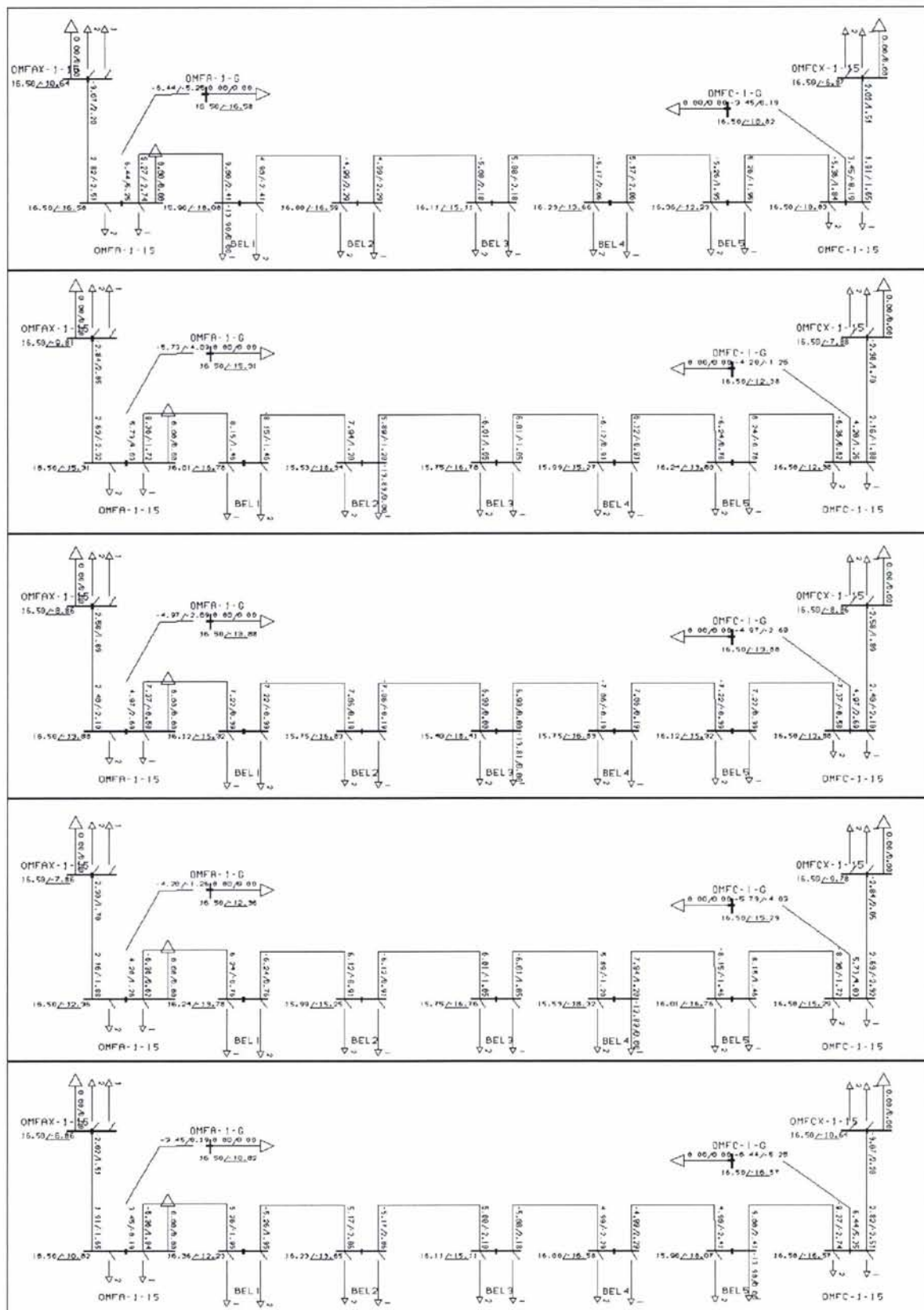
2.3.1.1 Forsøk med en matestrekning med en flat statikk og fire omformerstasjoner

Det enkleste tilfellet er en matestrekning på 120 km med de sedvanlige fem belastningene som flyttes, her med 20 km mellom hver. Det er ingen relative fasevinkler i det overliggende nettet, og det er en flat statikk. Alle aggregater er i drift, men med såpas lav trafikk som bare ett tog, kunne det egentlig vært bare ett eller to aggregater i hver stasjon. Figur 122 viser lastflyten i tomgang. Det flyter ingen effekt i systemet annet enn reaktiv effekt inn til motorene.

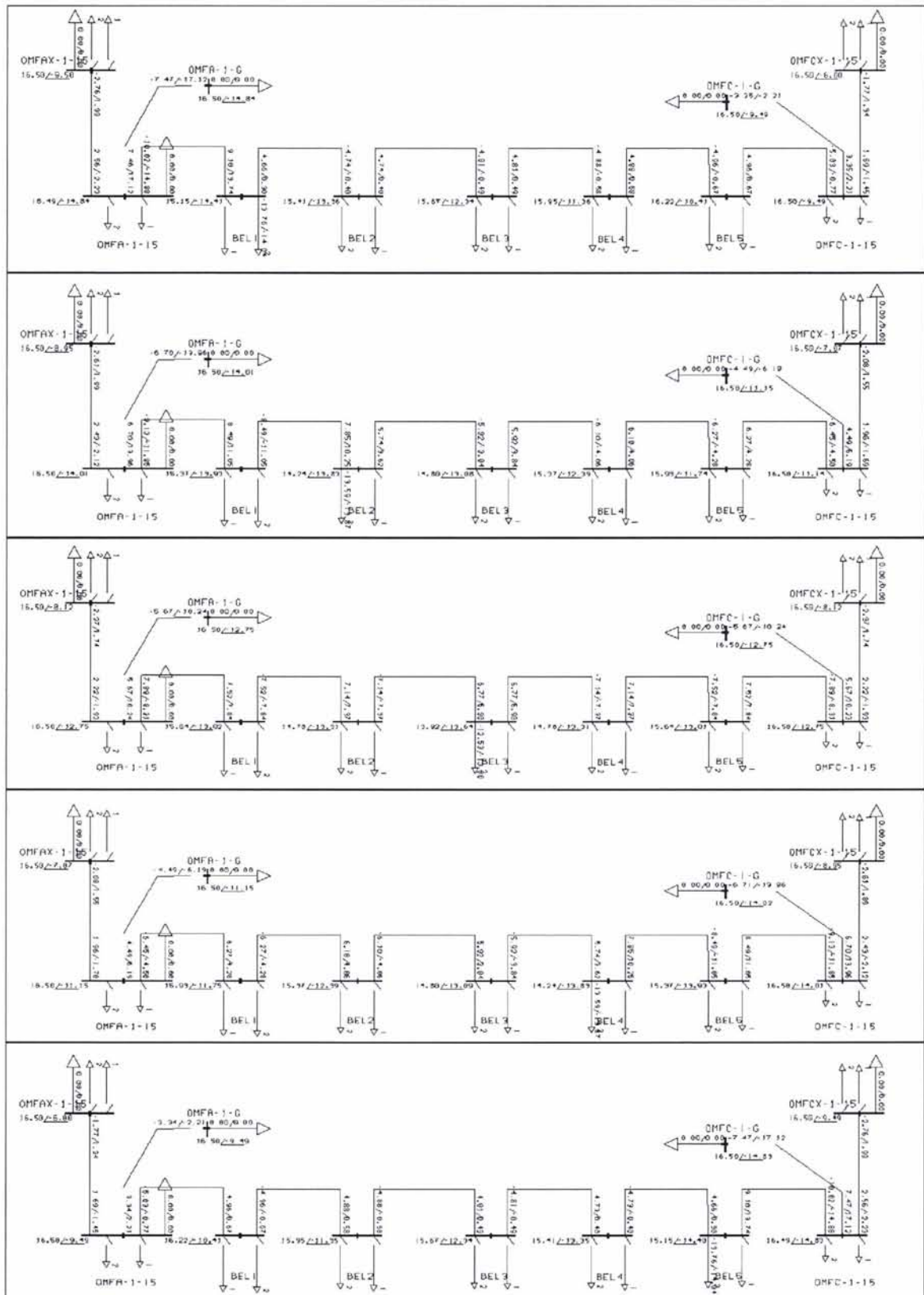
Figur 123 og figur 124 viser lastflyten for tilfellet med både aktiv og blandet belastning. Sammenlignes med tilsvarende simuleringer med konvensjonelt system, for eksempel avsnitt 2.2.1.3 med en last som trekker 7 MW eller 2.2.1.11 med last på 14 MW, vil spenningen til lasten nå være svært mye bedre. Med kun en aktiv belastning på 14 MW var spenningen helt ned mot 13,1 kV i et konvensjonelt system, men nå blir den 14,5 kV. Med en blandet belastning var den 10,2 kV, mens den nå blir 13,9 kV. En annen forskjell er at effektflyten nå i større grad kommer fra nabostasjonene, og at den nærmeste omformerstasjonen leverer mindre effekt. Dette er for så vidt en naturlig konsekvens av lavere impedans på strekingen, men en større omformerytelse betyr også noe. Dessuten er det nå en større reaktiv effekt som flyter i nettet. Søylediagrammene for effektleveransen i figur 125 og figur 126 viser tydelig at omformerne fordeler den aktive effekten bedre mellom seg, men at det også er mye reaktiv effekt som flyter mellom omformerne. Dette er i høyeste grad uheldig, og forsøk med en fallende spenningsstatikk vil vise om dette kan bedres.



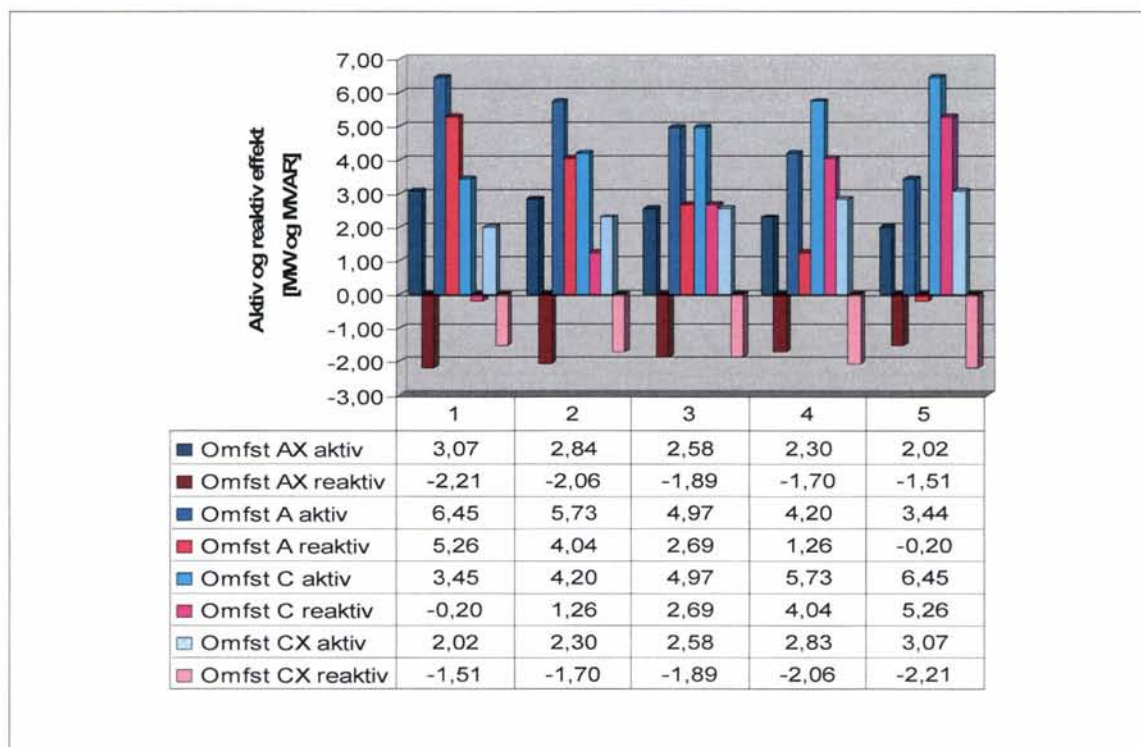
Figur 122 Spenningene og vinklene i tomgang for tilfellet med en 120 km lang matestrekning med omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



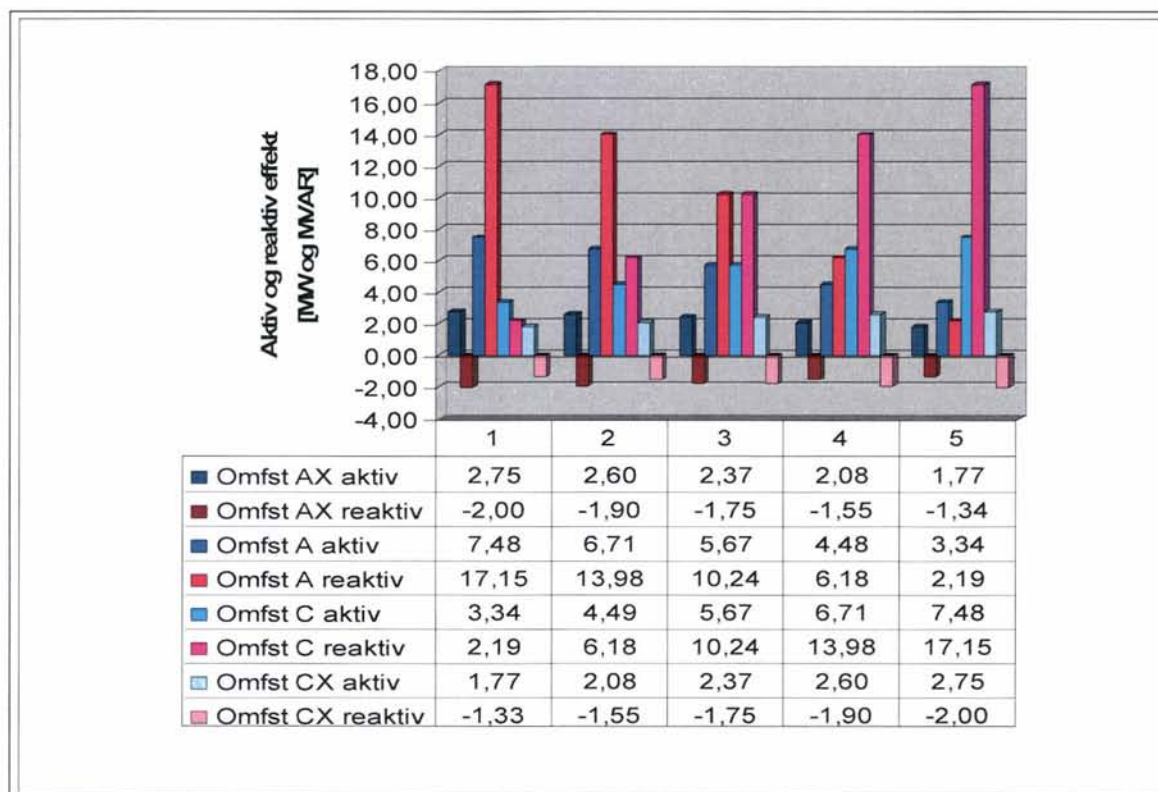
Figur 123 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 124 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med to omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW i stasjon A og C. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 125 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



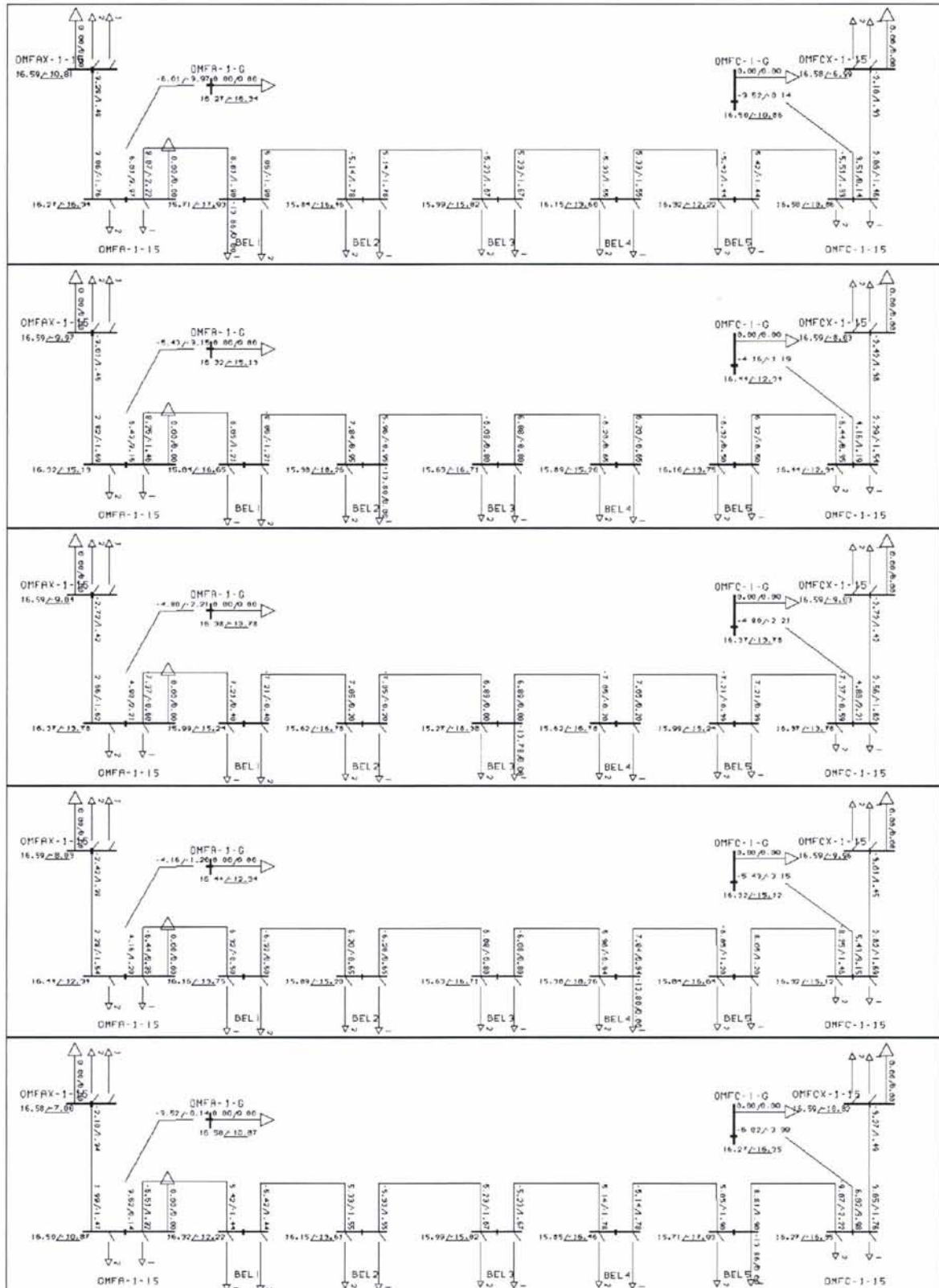
Figur 126 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.3.1.2 Forsøk med en lastflyt på matestrekning og fallende statikk

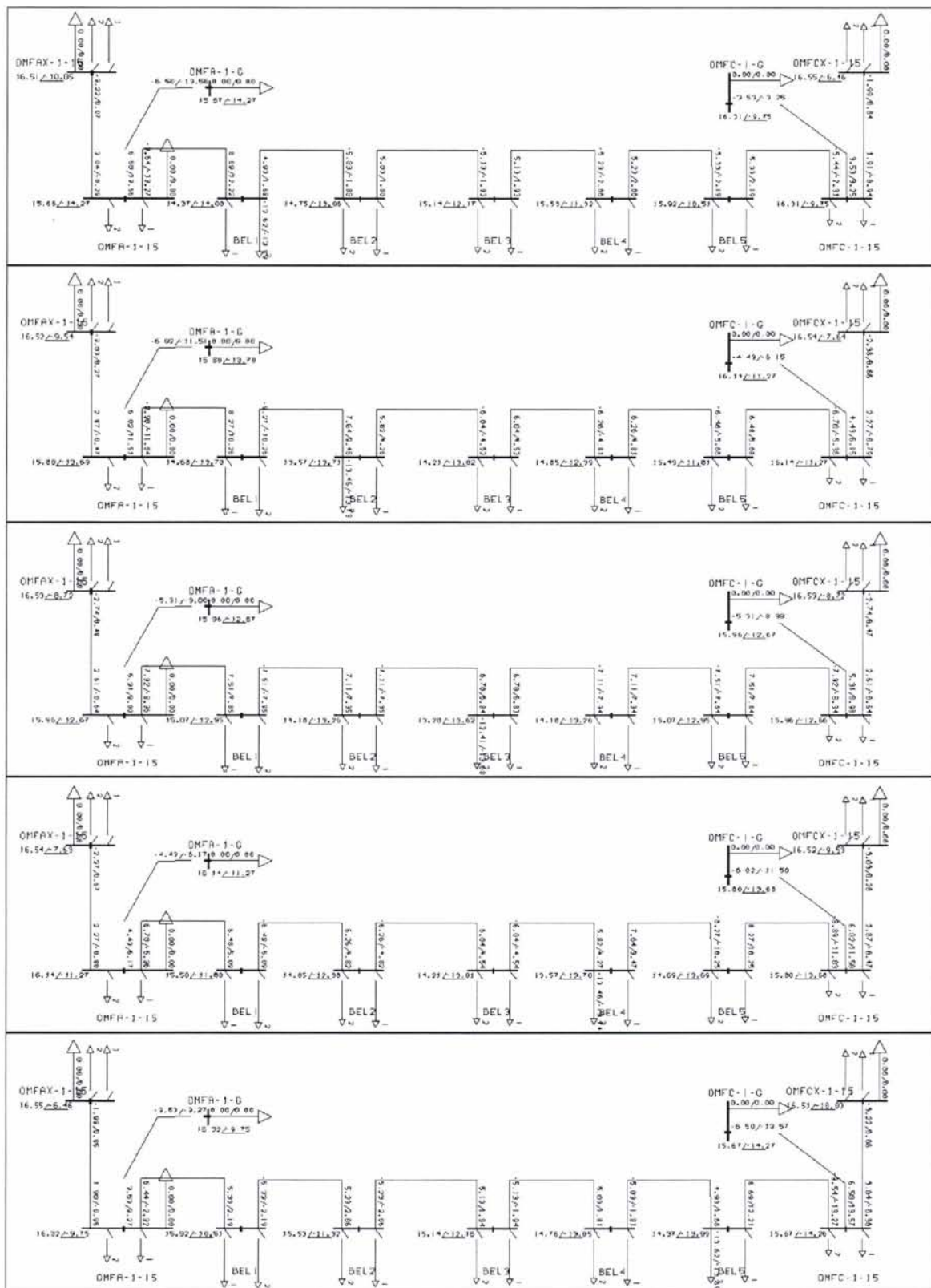
Analysene i forrige avsnitt er gjentatt, men nå med en fallende spenningsstatikk på 4 % ved full last. Figur 127 og figur 128 viser resultatet med kun en aktiv og med en blandet belastning. Den reaktive effektflyten mellom omformerne er nå blitt mindre sammenlignet med situasjonen for en flat statikk. Når lasten er rent aktiv og ligger rett ved stasjon A, er det nå 1,48 MVAR som utveksles mellom AX og A, mot tidligere 2,51 MVAR. Det er nå 1,93⁴ MVAR som mates inn til stasjon CX, og som først og fremst kommer fra stasjon A. Det er besynderlig (påfallende) at så mye reaktiv effekt utveksles over 240 km, og det enda til med en fallende statikk for å begrense reaktiv effekt. Når lasten er reaktiv, er det faktisk mindre reaktiv effekt som utveksles mellom de fjerne stasjonene.

Figur 129 og figur 130 viser tydelig fra hvilke omformerstasjoner effekten kommer fra, og at det er mye reaktiv effekt som flyter mellom stasjonene (søylar over og under x-aksen).

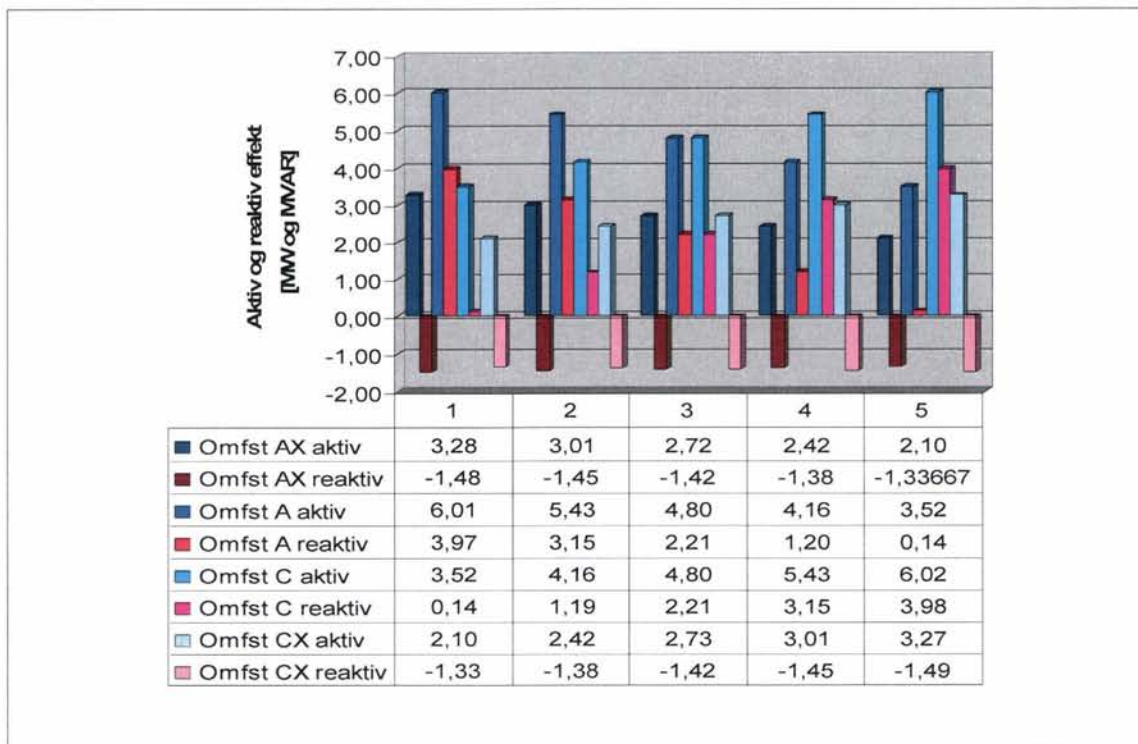
⁴ Ved 1,93 MVAR reaktiv effekt inn, og 4 % statikk, skulle spenningen ved samleskinnen ha økt til ca. 16,72 kV, men simuleringen viser kun 16,58 kV. Dette kan være en svakhet med modellen, eller eventuelt unøyaktigheter ved innstilling av regulatoren.



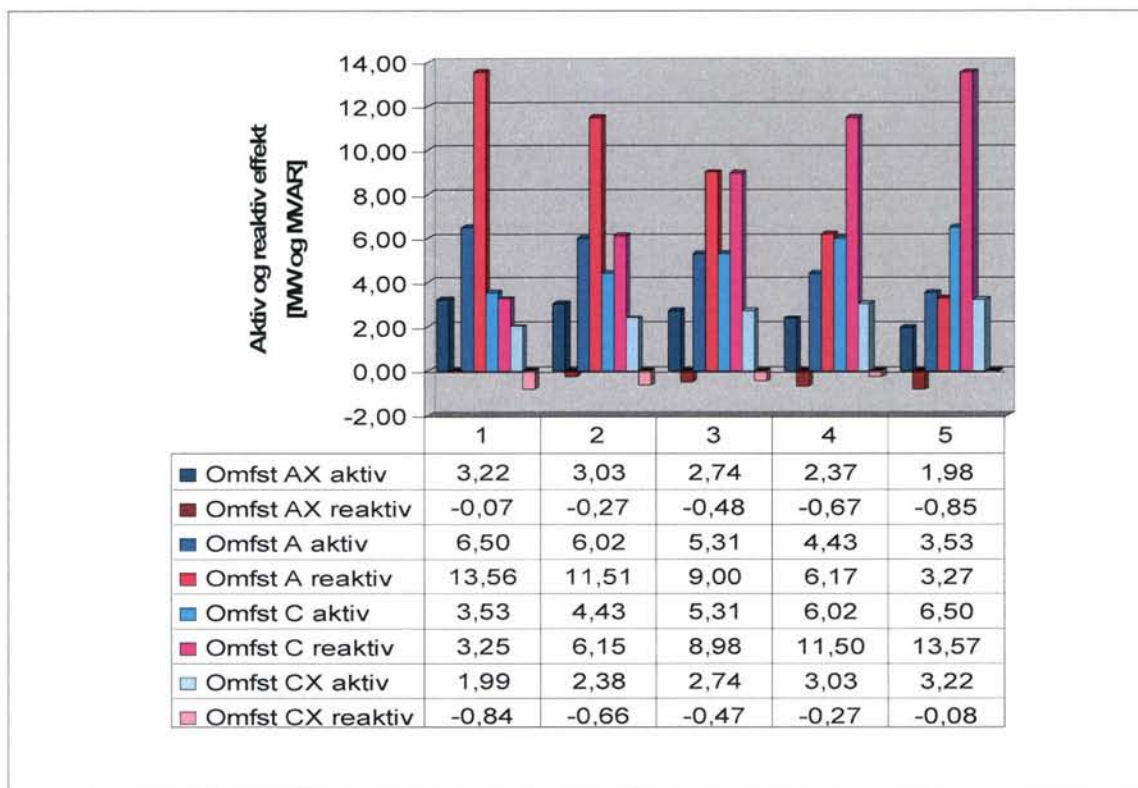
Figur 127 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og en matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Det er en fallende statikk. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 128 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og en matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Det er en fallende statikk. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 129 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvareer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.

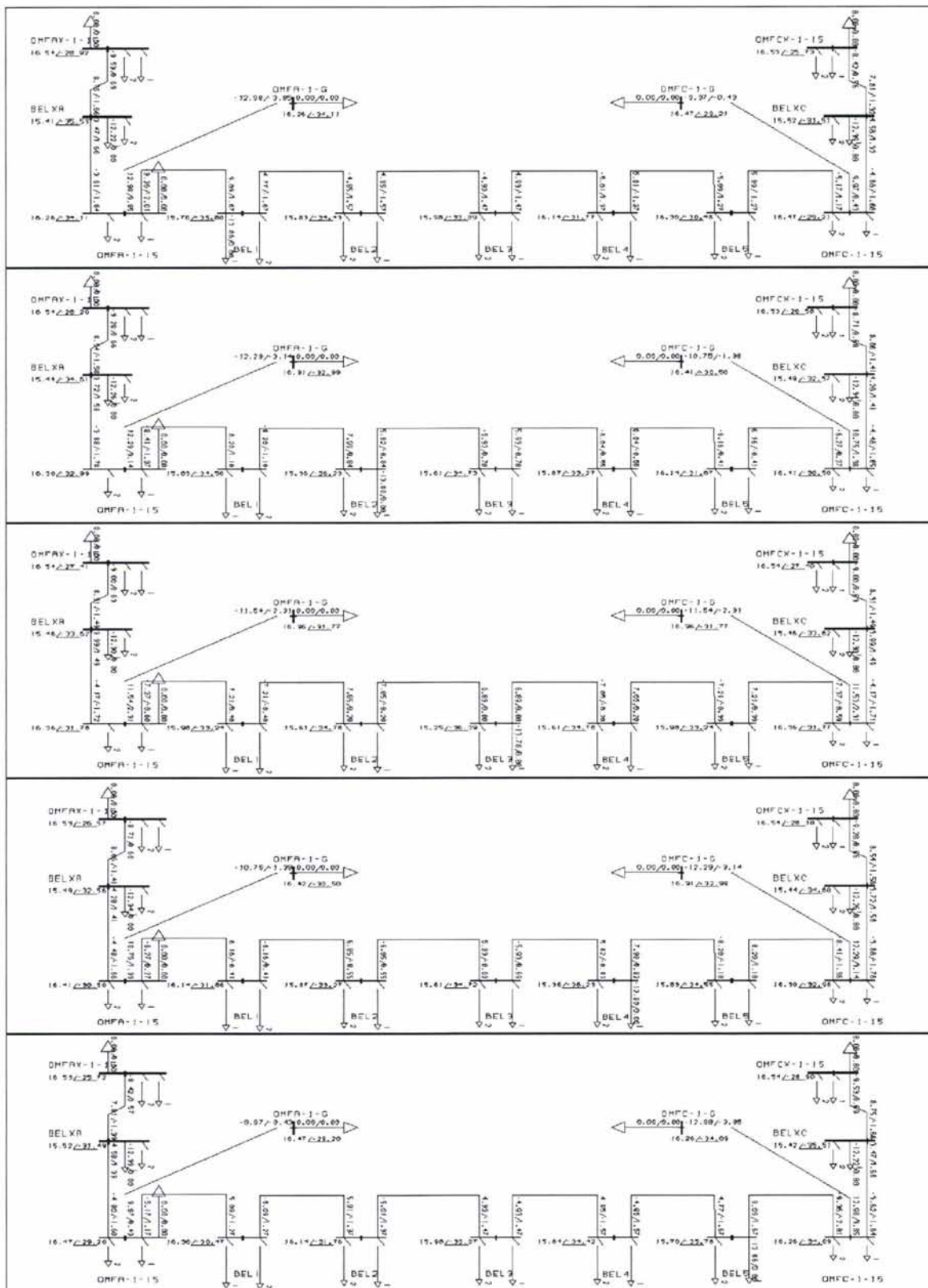


Figur 130 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvareer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

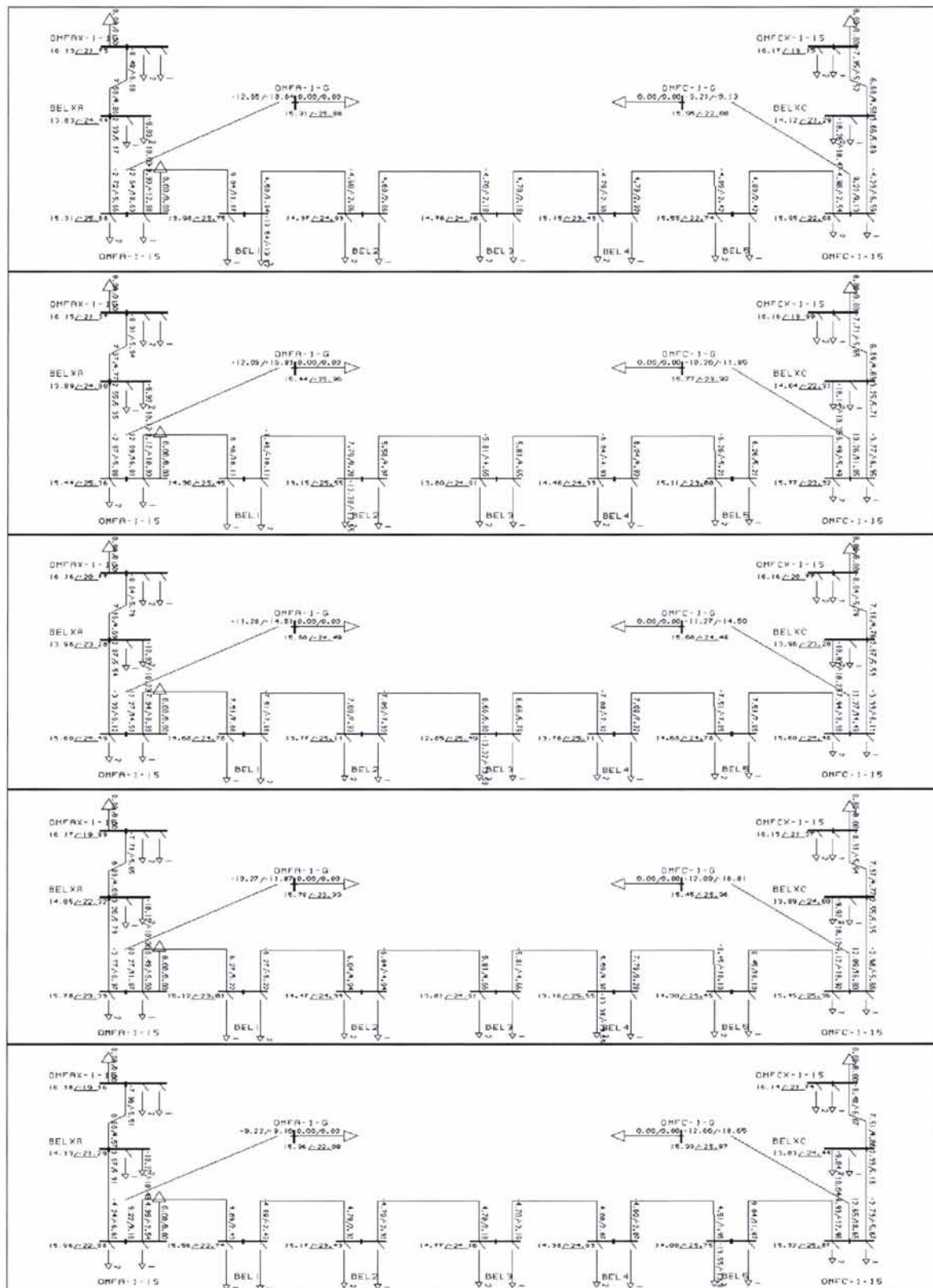
2.3.1.3 Forsøk med en matestrekning med last på nabostrekningen og omformerstasjonene har en fallende statikk

I forrige avsnitt 2.3.1.1 var det en større reaktiv effektflyt mellom omformerne AX og A og mellom C og CX (men ikke mellom A og C). I avsnitt 2.3.1.2 ble denne effektutvekslingen betydelig redusert med en fallende statikk for spenningsregulatorene. Det spesielle med matestrekningene mellom stasjonene AX og A og mellom C og CX var at det ikke var noen belastning på disse slik som mellom A og C. Vil denne effektutvekslingen forsvinne dersom det er en belastning på hver av disse strekningene? Forsøket gjentaes med akkurat de samme forutsetningene, men med en belastning på 14 MW midt mellom AX og A og én belastning på 14 MW mellom CX og C. Figur 131 og figur 132 viser effektflyten når lasten flyttes på matestrekningen A til C, mens de to belastningene på nabostrekningene står stille. Som forventet leverer omformerstasjonene A og C mer effekt siden disse skal mate i to retninger, men fremdels er det noe reaktiv effekt som uteksles mellom nabostasjonene nå lasten er rent aktiv. I søylediagrammene kommer dette enda bedre frem, se figur 133 og figur 134.

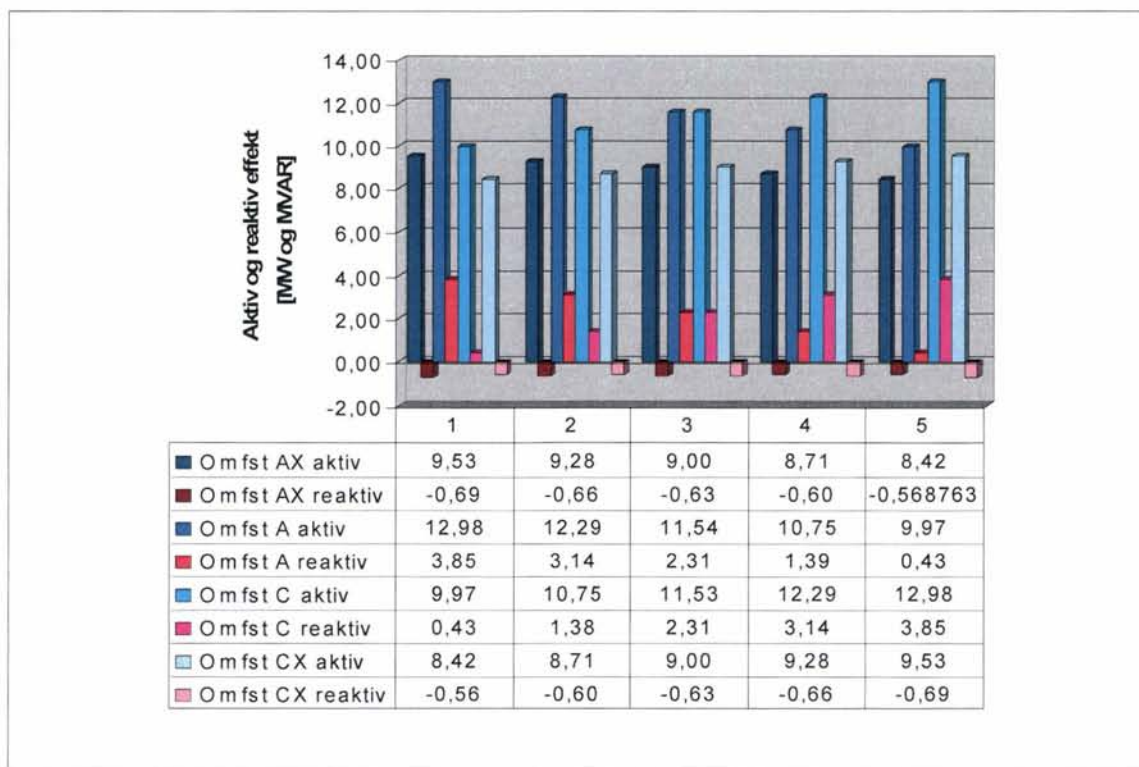
Av dette ser det ikke ut til at denne reaktive effektflyten mellom stasjonene kommer til å forsvinne helt, selv med belastning på alle matestrekningene. Det blir ikke noe særlig bedre om det er en jevn belastning (i praksis jevn togtrafikk) og en fallende statikk. Dette tyder på et fenomen som må påregnes å oppstå mellom den aller siste omformerstasjonen på en bane og den nest siste.



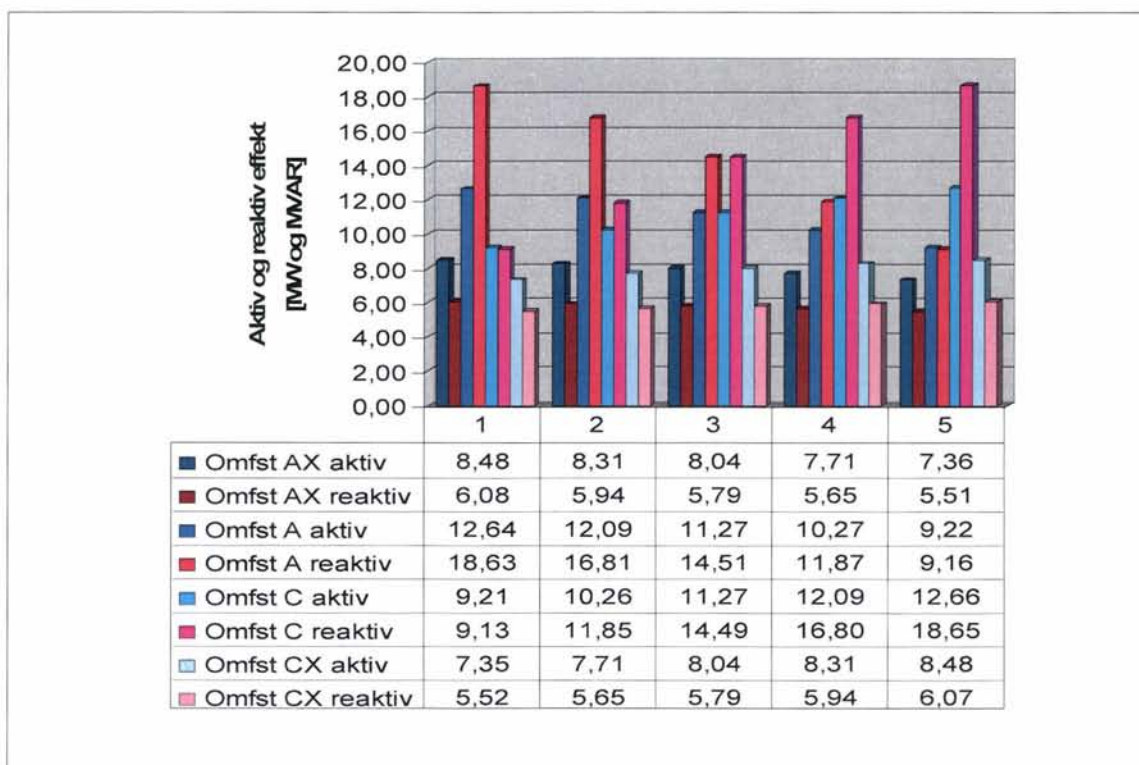
Figur 131 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Det er en fallende statikk og last også på nabostrekningene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 132 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Det er en fallende statikk og last også på nabostrekningene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 133 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



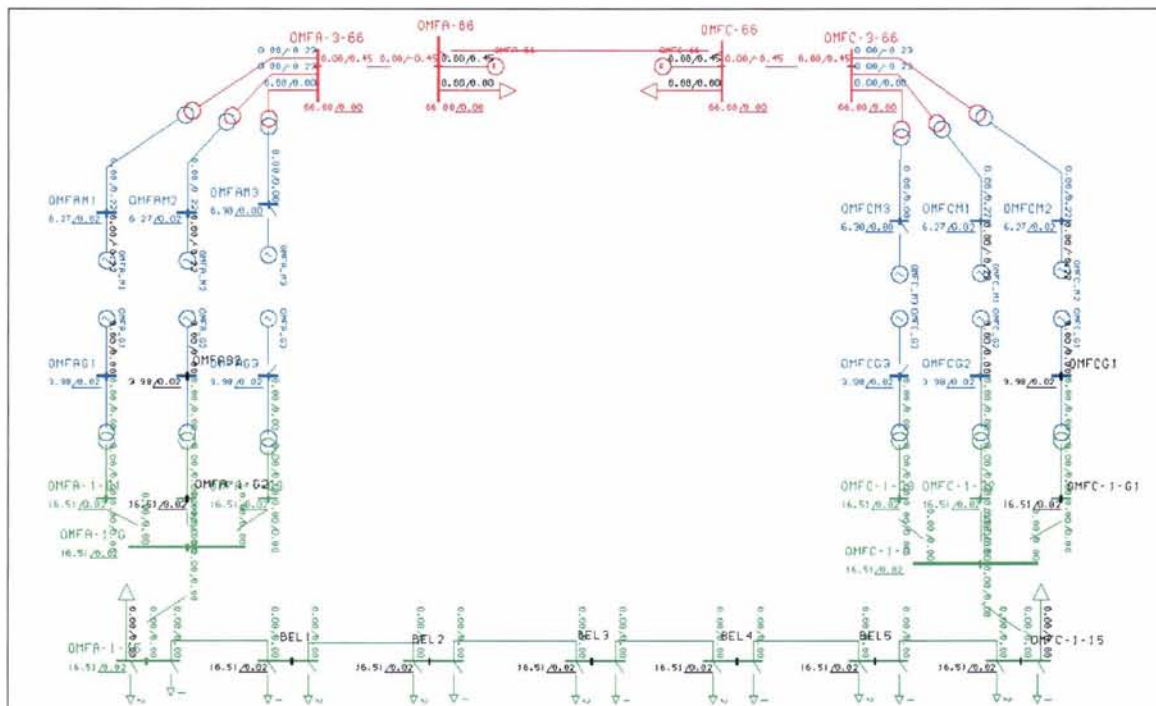
Figur 134 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.3.1.4 Forsøk med en lastflyt på en matestrekning med omformerstasjoner der antall aggregater med omformere i drift er redusert og fallende statikk

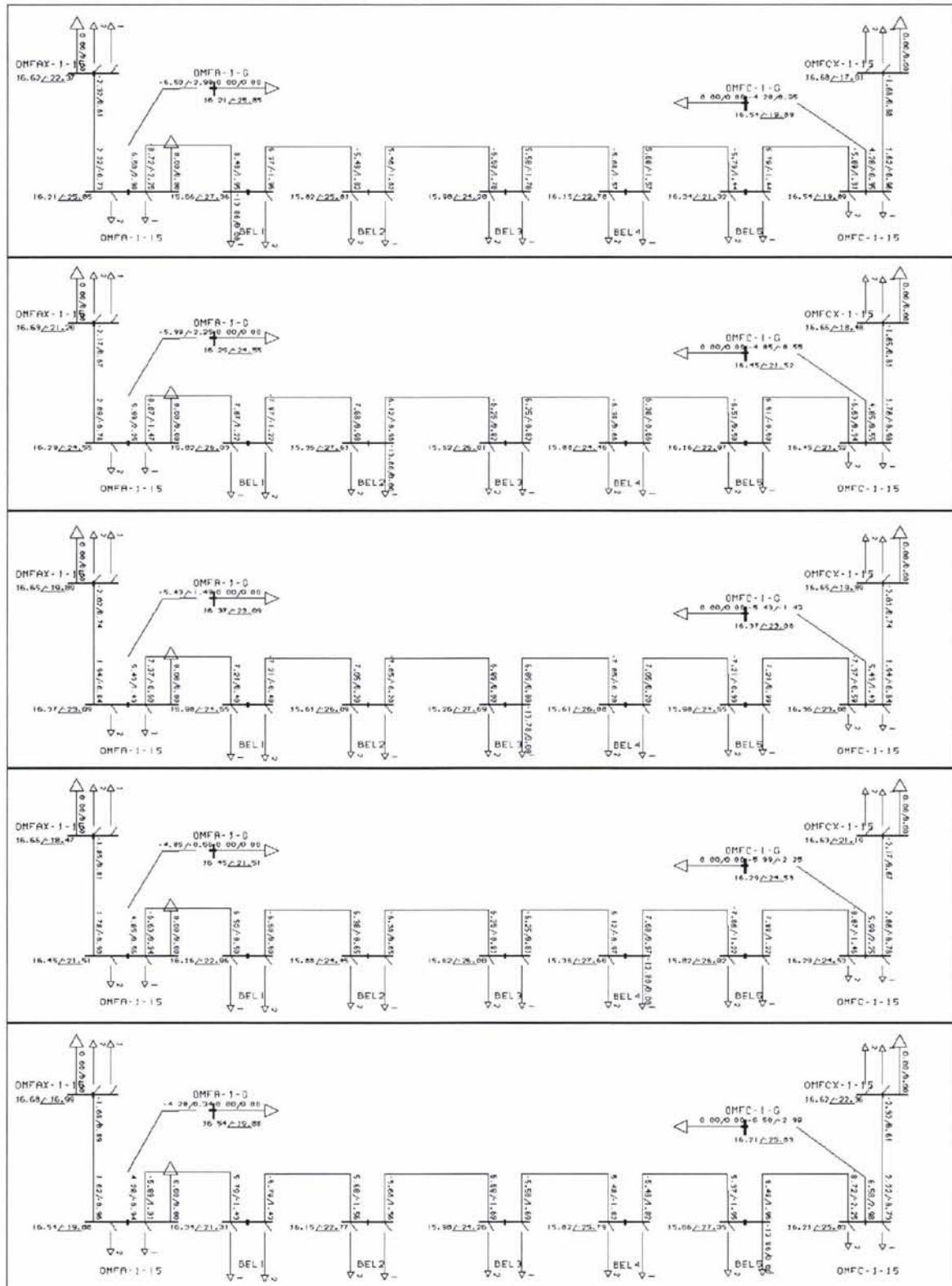
Fra forsøket med en fallende statikk i avsnitt 2.3.1.2 er det gunstig at med AT-system bør det være anslagsvis 4 % fallende statikk for å redusere den reaktive effektutvekslingen mellom omformerstasjonene. Betydningen av antall aggregater for lastflyten i drift skal undersøkes og 2 x 5,8 MVA er antakelig et passende antall aggregater i drift for stasjon A og C når lasten er 14 MW, men det er mulig at enda færre kunne vært aktuelt siden effektfordelingen mellom stasjonene er stor, og siden et tog bare meget kortvarig vil trekke så stor effekt. I stasjon AX og CX frakobles ett aggregat i hver stasjon. Situasjonen er vist i figur 135 nedenfor, men forbindelsene videre til stasjonene AX og CX er utelatt i figuren.

Figur 136 og figur 137 viser effektfordelingen med halvparten så mange aggregater i drift. Med kun aktiv belastning i posisjon BEL1 og BEL5 kommer det kun 0,61 MVar fra stasjon AX, henholdsvis fra stasjon CX, mens det med alle aggregatene i drift var 1,48 MVar. Dette var effekt som ble tatt fra henholdsvis stasjon AX og CX. En annen forskjell er at for en belastning som er både aktiv og reaktiv, øker det reaktive effektbidraget fra stasjon AX og BX når lasten er i henholdsvis posisjon BEL1 og BEL5. Nå hjelper stasjon AX og CX til med å dekke effektbehovet.

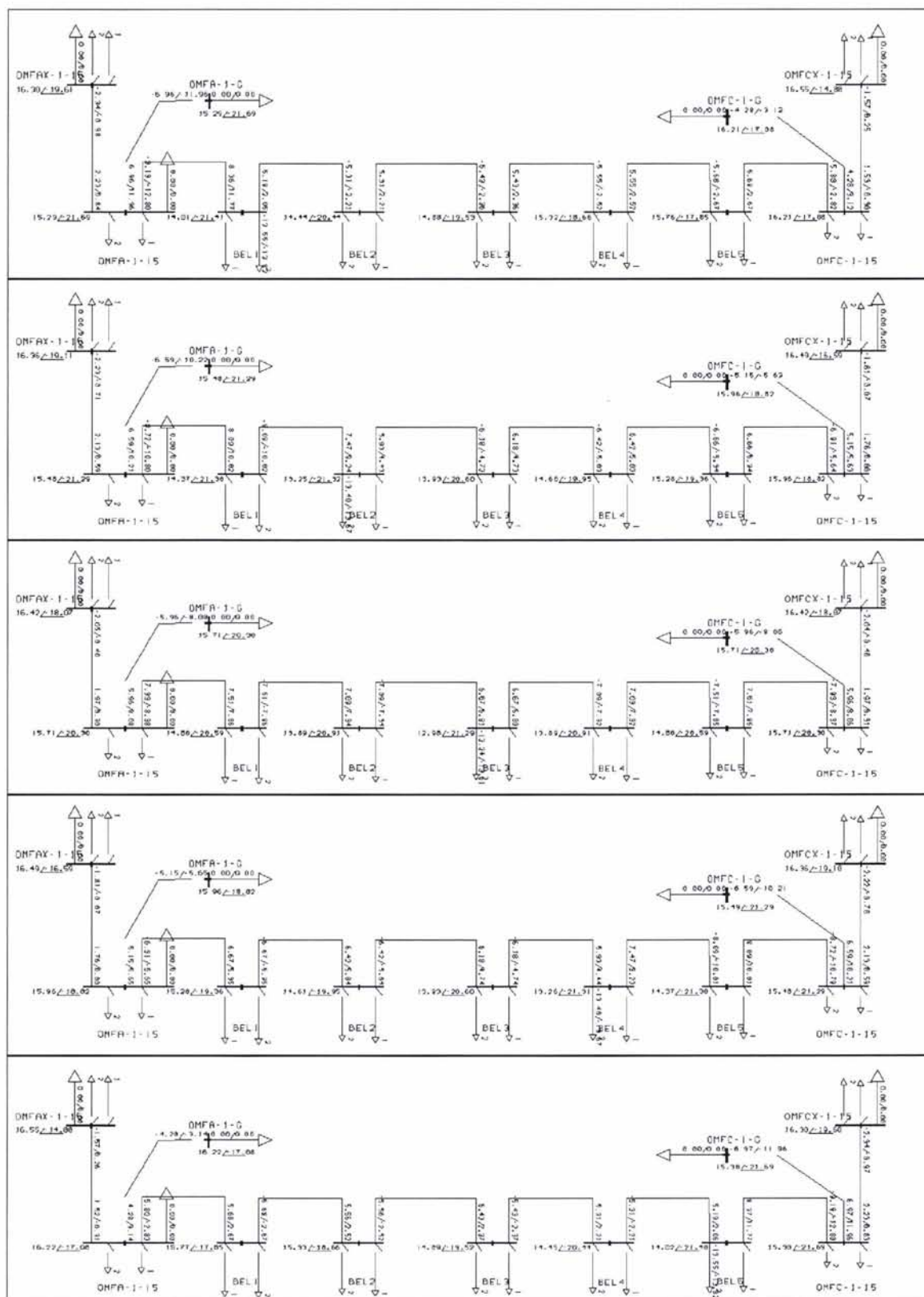
Figur 136 og figur 137 viser søylediagrammer for effektfordelingen med en redusert reaktiv effektutveksling mellom omformerstasjonene. Likeledes bidrar stasjon AX og CX mindre til dekningen av den aktive effekten til lasten. Dette er som forventet, og det synes som om effektflyten i AT-system i stor grad kan optimaliseres ved hjelp av en fallende statikk og antall omformerenheter i drift.



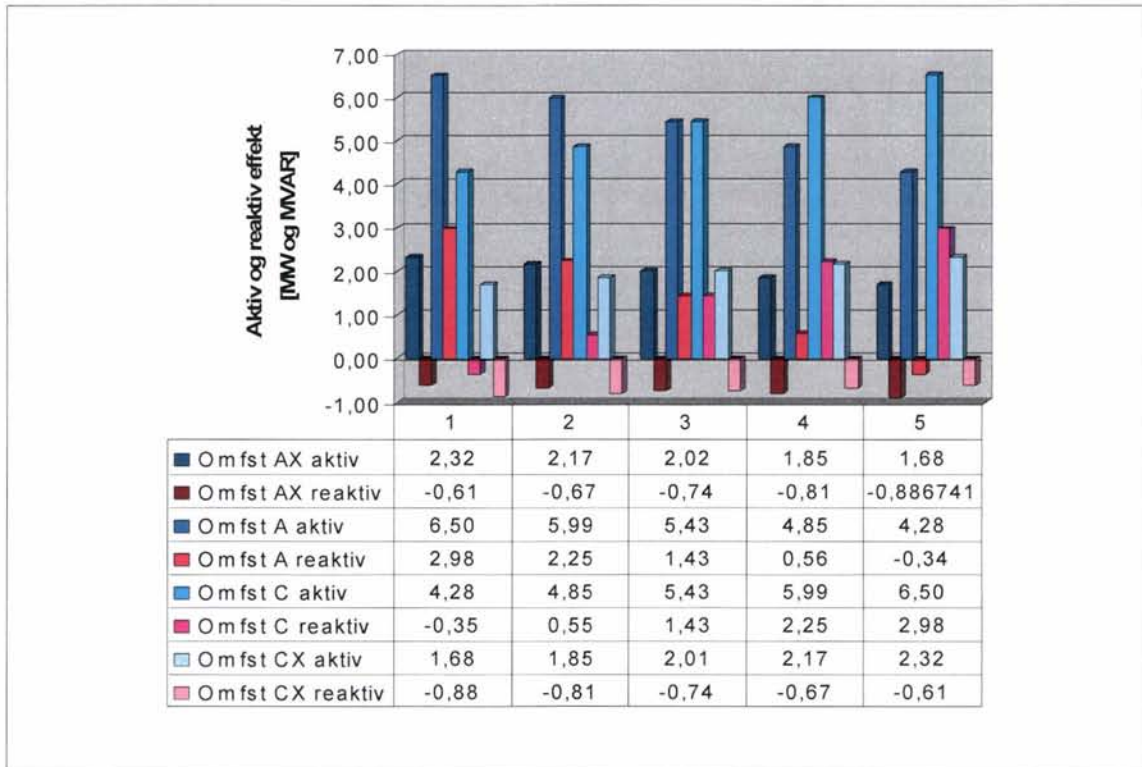
Figur 135 Spenningene og vinklene i tomgang for tilfellet med en 120 km lang matestrekning med omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW, men der ett aggregat i hver stasjon er koblet ut. Det er en fallende statikk. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorens spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \phi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



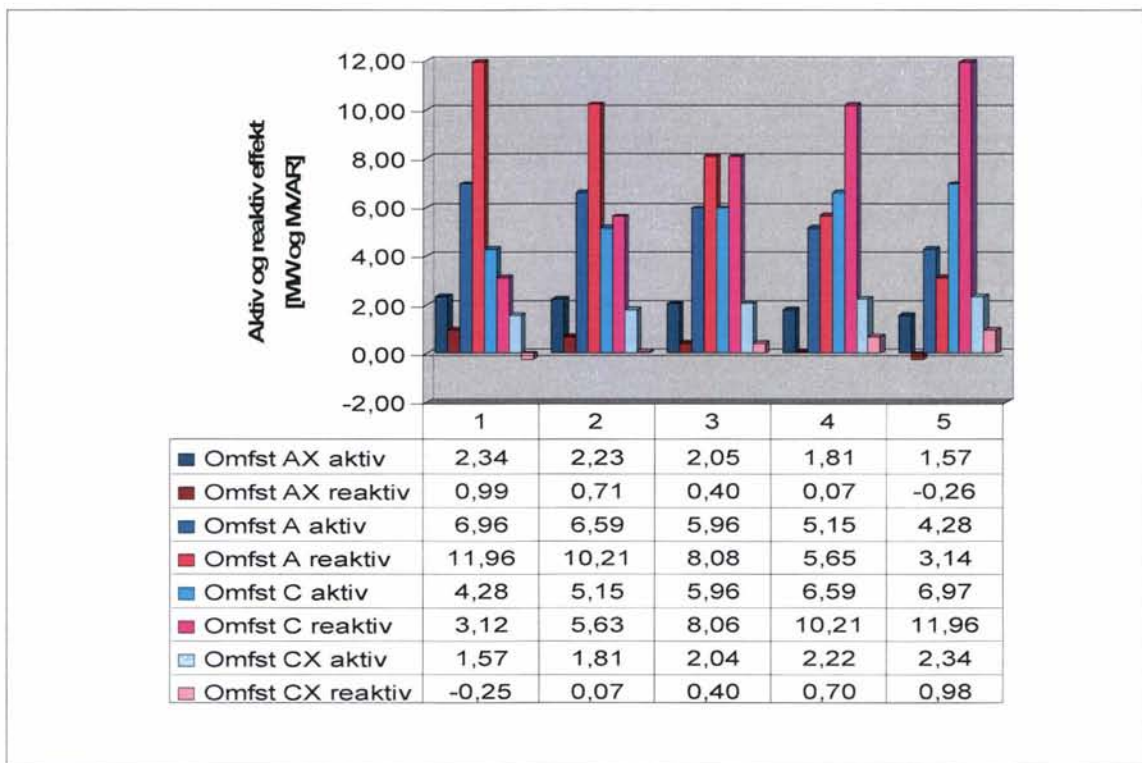
Figur 136 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Det er en fallende statikk og utkobling av ett av tre aggregater i hver stasjon. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 137 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Det er en fallende statikk og utkobling av ett av tre aggregater i hver stasjon. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 138 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



Figur 139 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

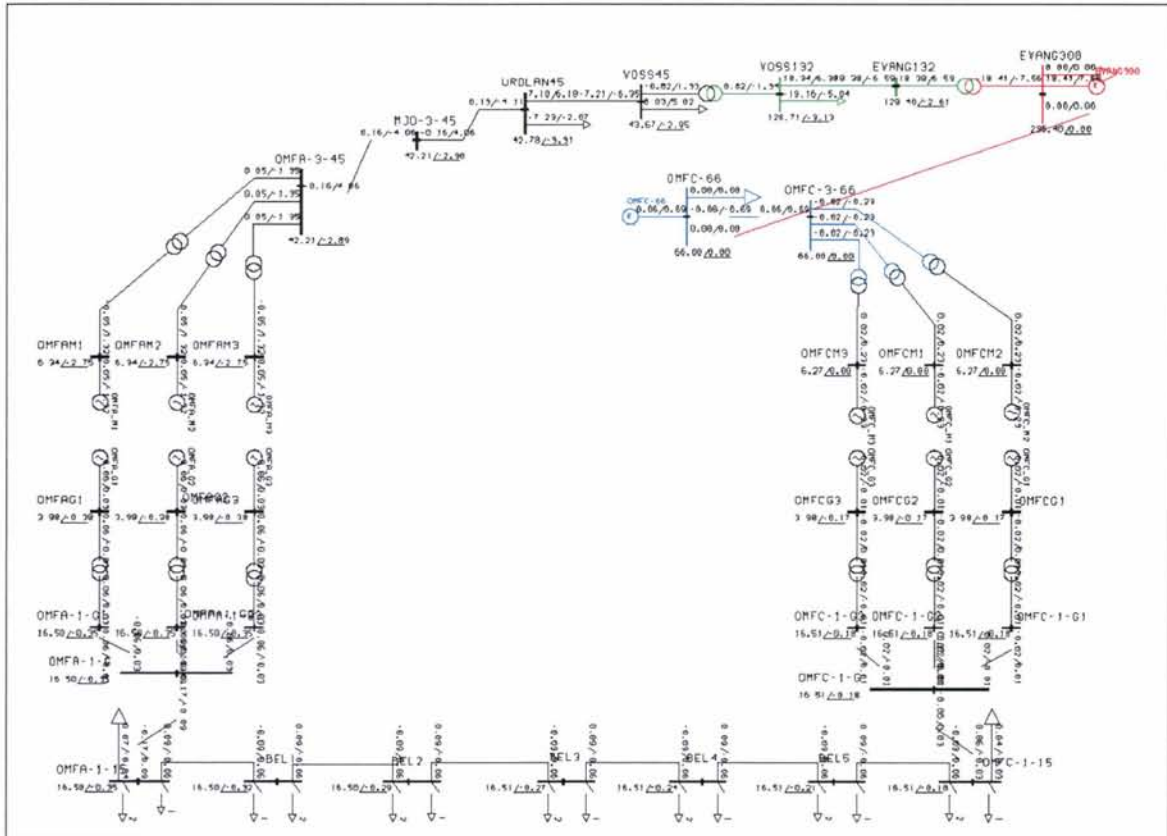
2.3.1.5 Forsøk med en matestrekning med en omformerstasjon med et svakt overliggende nett, flere laster og en uvanlig stor belastning

Med store omformerstasjoner og AT-system, og med 120 km mellom dem, kan en undre seg over om forsyningen til stasjonene rundt er tilstrekkelig. Dette gjelder både på steder der en planlegger å etablere nye, og på dagens eksisterende steder der det er et svakt nett. Hva som er "svakt nett" i denne sammenheng er ikke trivielt, en ting er spenningen og fasevinkelen ved et stort lastuttak, et annet spørsmål er fare for ustabilitet som kan oppstå mellom omformere og det overliggende nettet. Her brukes det igjen det overliggende nettet til Mjølfjell omformerstasjon, og det settes denne gangen inn en belastning på 28 MW, som er nær opp mot maksimal ytelse for en stasjon med 3 x 5,8 MVA. Det inkluderes nabostasjoner i en avstand på 120 km på hver side, og på de tilstøtende matestrekningene settes det inn en last på 14 MW.

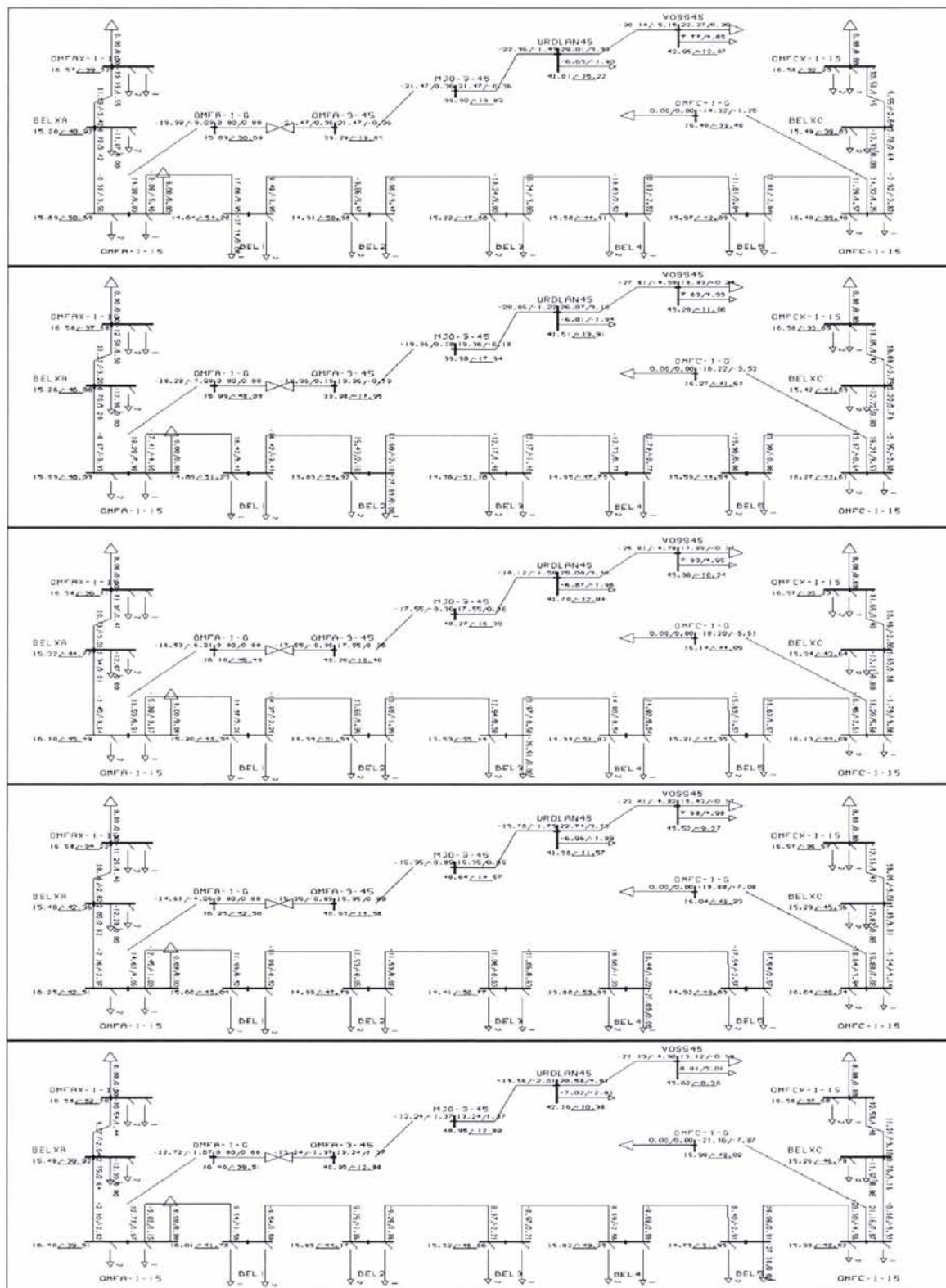
Figur 140 viser situasjonen i tomgang. Det trekkes så mye som 1,32 MVAR til hver av motorene i stasjon A som er tilknyttet et svakt overliggende nett. For en innstilling av spenningsregulatoren for motorene tilpasset en last i tomgang på 14 MW (halvparten av lasten som senere skal legges inn på matestrekningen) måtte transformatorene trinnes veldig høyt for å gi omtrent 6,3 kV på motorenes samleskinne (og nær ingen reaktiv effekt). Når så denne lasten fjernes, vil spenningsregulatoren bestrebe og opprettholde spenningen fra den opprinnelige lastflyten (i OPTPOW), og da må den ta opp mye reaktiv effekt, mens dagens spenningsregulatorer i tillegg vil forsøke å holde $\cos \varphi = 1,0$.

Figur 141 viser forholdene når denne store lasten forflyttes langs med de fem posisjonene. I disse enlinjeskjemaene er det forsøkt å inkludere en del av det overliggende nettet. Ved posisjon 3 (midt på) blir spenningen 13,5 kV, og det er ca. 1 MW mer som forsynes fra den siden hvor omformere er forbundet med et sterkt nett. For fasevinklene er det ikke særlig store forskjellene mellom posisjonene, men som tidligere kommentert, blir disse vinklene "fordelt" mellom stasjonene selv om spenningsvinklene er svært forskjellige i det overliggende nettet. Spenningsfallet og fasevinkelens dreining i det svake overliggende nettet er stor, i tomgang var fasevinkelen $-2,89^\circ$, og med lasten i posisjon 1 blir den $-19,84^\circ$. Med en last som er både aktiv og reaktiv, blir spenningen meget lav, og antakelig er denne lasten i største laget i forhold til overføringsevnen. For å få simuleringen til å konvergere var det nødvendig å øke faktoren for spenningsavhengighet for aktiv og reaktiv effekt fra 0,2 til 1. Figur 142 viser forholdene med denne store blandede belastningen.

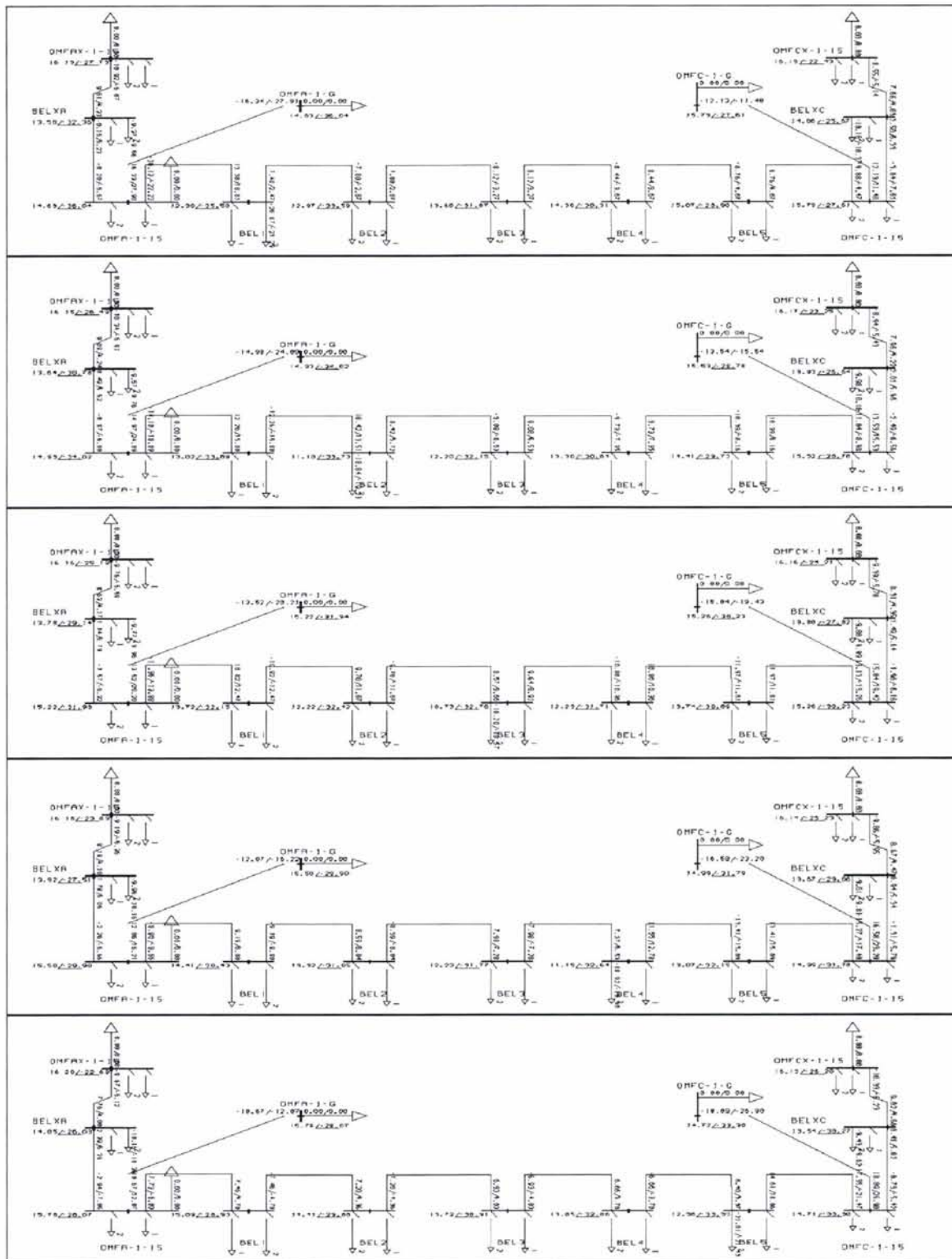
Søylediagrammene i figur 143 og figur 144 viser hvorledes effekten fordeles seg mellom omformerstasjonene, og selv om omformer A er tilknyttet et overliggende nett som sannsynligvis ikke har overføringskapasitet til en så stor belastning, synes lastfordelingen å bli rimelig lik. Denne undersøkelsen avdekker imidlertid ikke hvorvidt omformeren med det svake nettet kan føre til at det blir for store innsvingningsforløp ved hurtige og store lastpåslag eller -avslag.



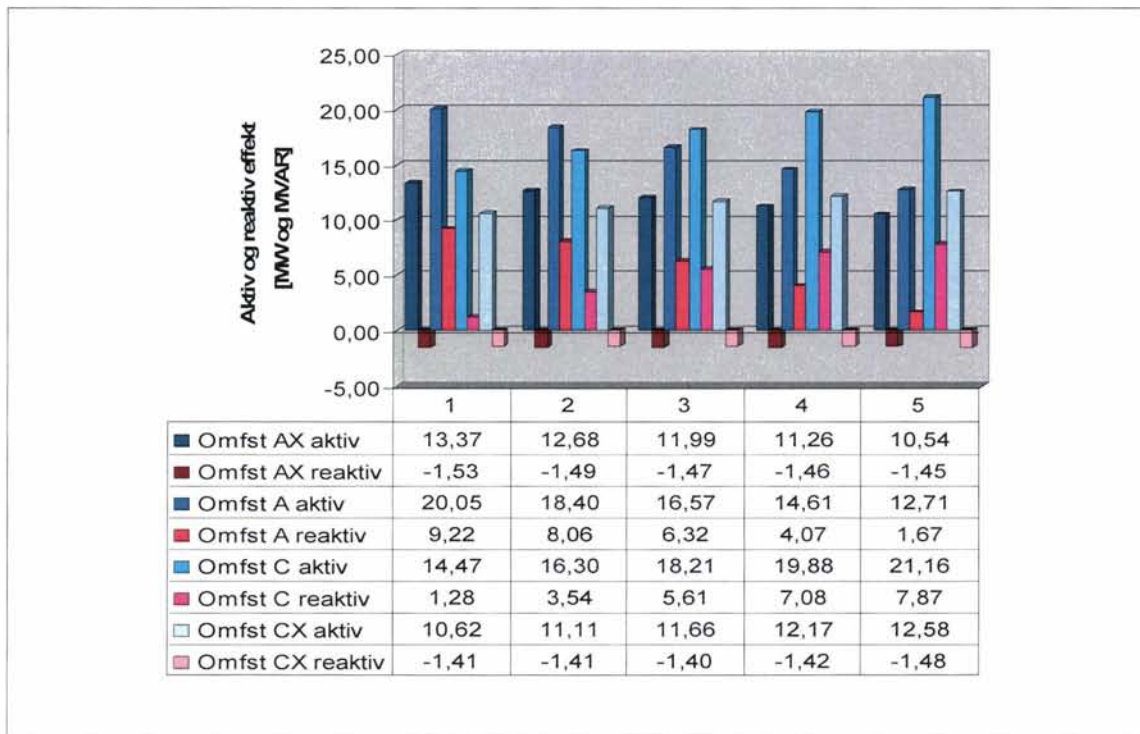
Figur 140 Spenningene og vinklene i tomgang for tilfellet med en 120 km lang matestrekning med omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Det er et svakt overliggende nett for stasjon A og nabostasjonene. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



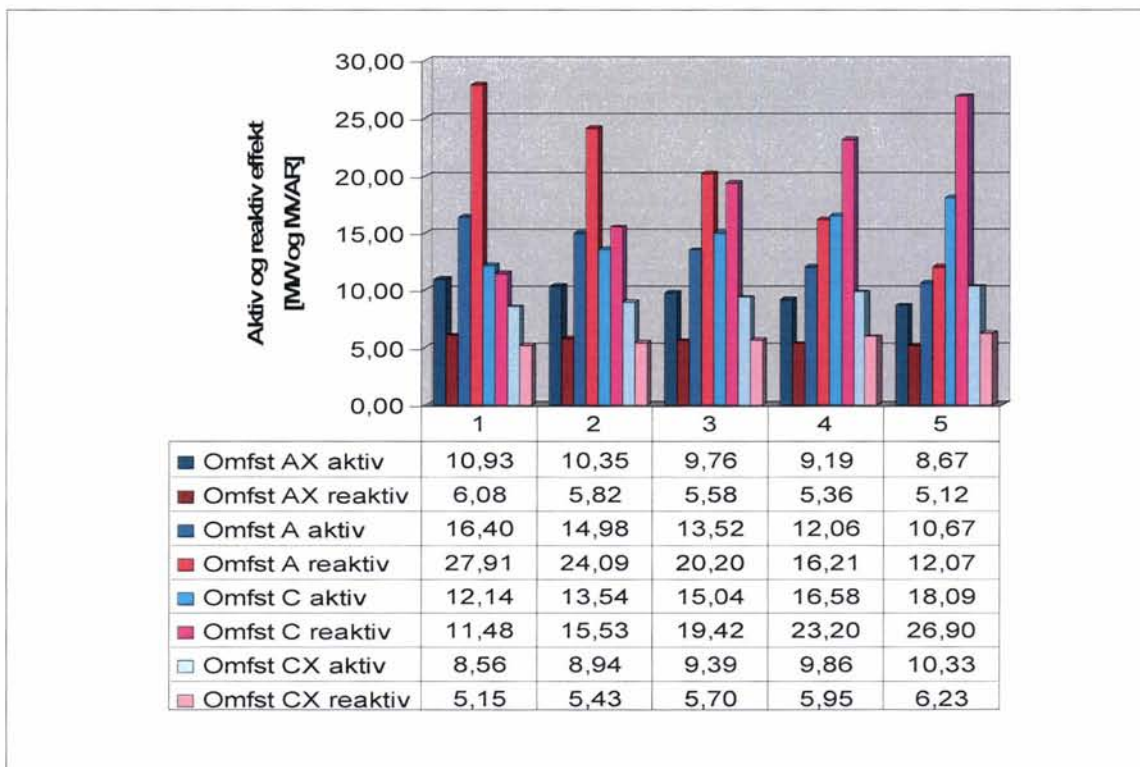
Figur 141 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og en matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Stasjon A har et svakt overliggende nett som for Mjølfjellet, og det er en belastning på 28 MW mellom stasjonene A og C og 14 MW på nabostrekningene. Det er en fallende statikk. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 1,0.



Figur 142 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og en matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Stasjon A har et svakt overliggende nett som for Mjølfjellet, og det er en belastning på 28 MW mellom stasjonene A og C og 14 MW på nabostrekningene. Det er en fallende statikk. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \phi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 1,0.



Figur 143 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belastning på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



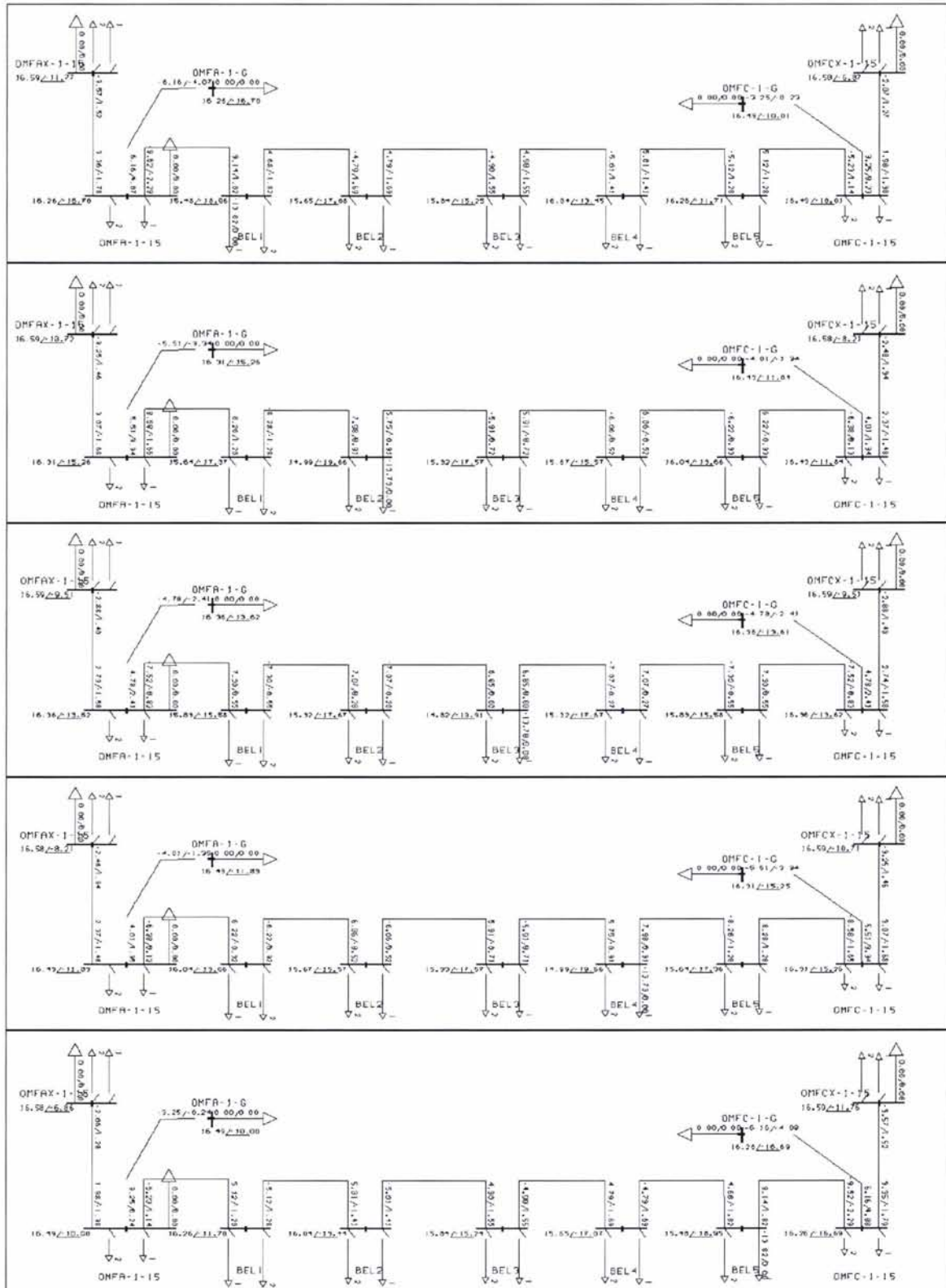
Figur 144 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belastning på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.3.1.6 Forsøk med en uvanlig lang matestrekning

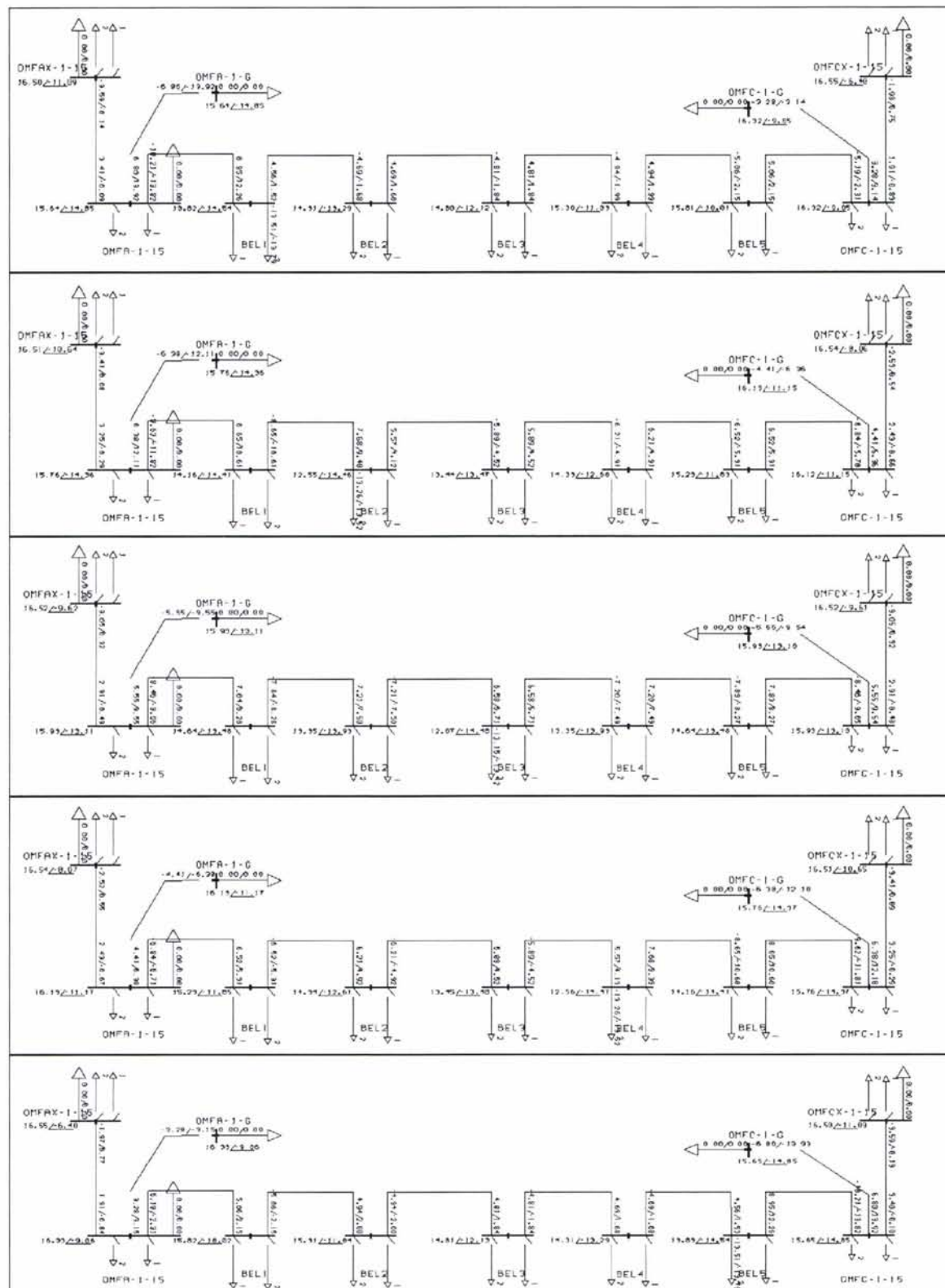
Ved elektrifisering av for eksempel Nordlandsbanen kan en få problemer med lange banestrekninger der tilknyttingene (Nord-Trøndelag og Saltfjellet) til den overliggende kraftforsyningen kan bli meget vanskelig. Med 120 km mellom omformerstasjonene må en sannsynligvis få bygget en del trefase høyspentlinjer. Det er ønskelig å undersøke en uvanlig lang matestrekning og se på utvekslingen av effekt mellom nabostasjonene. Foregående undersøkelser har så langt indikert at AT-system gir store fordeler med fordelingen av effekt mellom nabostasjoner. En vil her se på en matestrekning på 160 km og med nabostasjoner AX og CX i en avstand på 100 km. Dette gir en total strekning på 360 km, og like lang som for de øvrige undersøkelsene, dermed er sammenligningsgrunnlaget med forsøket i avsnitt 2.3.1.2 rimelig godt. Dessuten viser dette et konsept der en ekstra lang matestrekning styrkes ved at nabostasjonene til denne settes nærmere.

Figur 145 og figur 146 viser lastflyten når lasten forflyttes de fem posisjonene mellom omformerstasjonene A og C som i dette tilfellet gir 26,67 km mellom hver. Effektfordelingen er veldig lik med situasjonen med 120 km mellom hver stasjon. Det er størst forskjell for spenningen når lasten er midt på, og med kun aktiv belastning blir spenningen 14,82 kV. I det opprinnelige forsøket med 120 km mellom stasjonene var det 15,27 kV. Denne spenningsforskjellen er liten, men i tilfellet med en blandet last blir spenningen nå 12,07 kV mot tidligere 13,28 kV. Spenningen blir uakseptabel lav om slike lokomotiver som E116 gies tillatelse til å kjøre i multippel uten effektbegrensning. Dessuten er det fare for å overbelaste kontaktledningen siden strømuttaket kan bli stort, med en "ensidig" mating fra et AT-system med seksjonert kontaktledningsanlegg. Søylediagrammene viser enda bedre hvor forbausende likt lastfordelingen blir mellom omformerstasjonene som i tilfellet med like lange matestrekninger, se figur 147 og figur 148. Selv for posisjon 1 og 5 vil den mest fjerntliggende stasjonen hjelpe til med ca. 2 MW, mens den som ligger på andre enden av den samme matestrekningen gir ca. 3,3 MW. Det er omtrent like mye reaktiv effekt som utveksles mellom stasjonene.

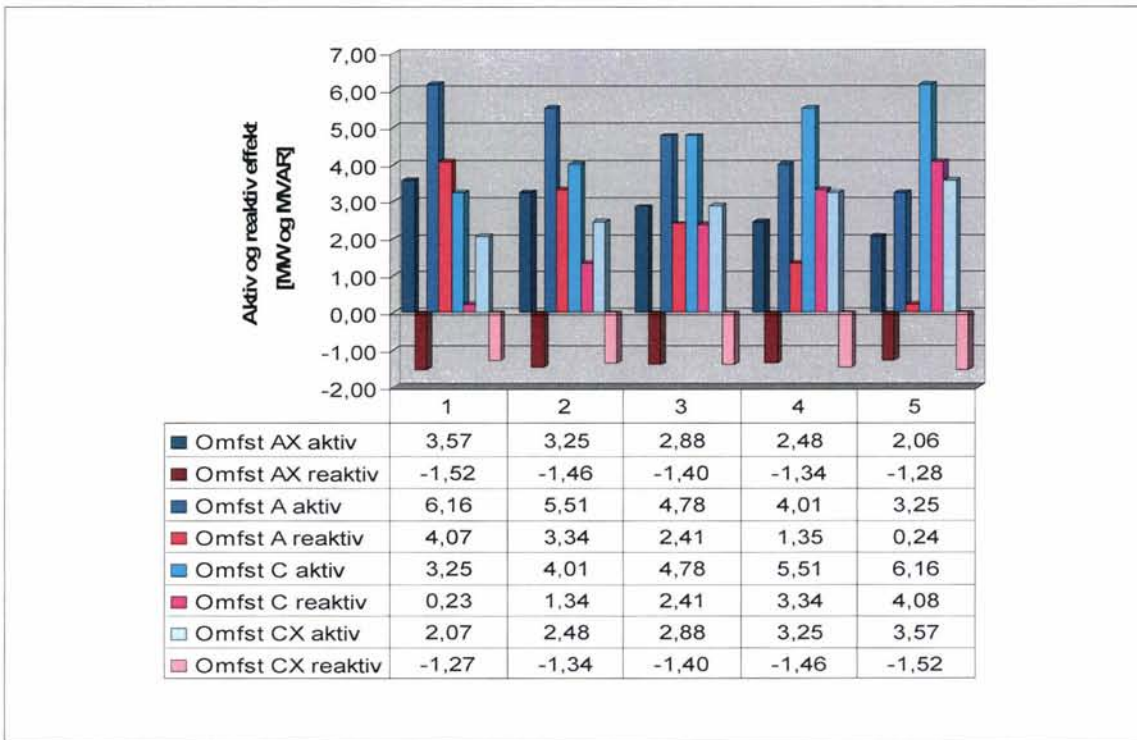
Det er nok mulig med en lengre matestrekning enn 120 km, men spenningen for tog som trekker mye reaktiv effekt, blir for lav. Imidlertid er det mange andre forhold som spiller inn, for eksempel om det er flere tog inne på en lang matestrekning, og faren for samtidighet av flere store effektuttak som dermed gir en lav spenning. Dessuten vil unormale driftsituasjoner ofte forsterke problemene.



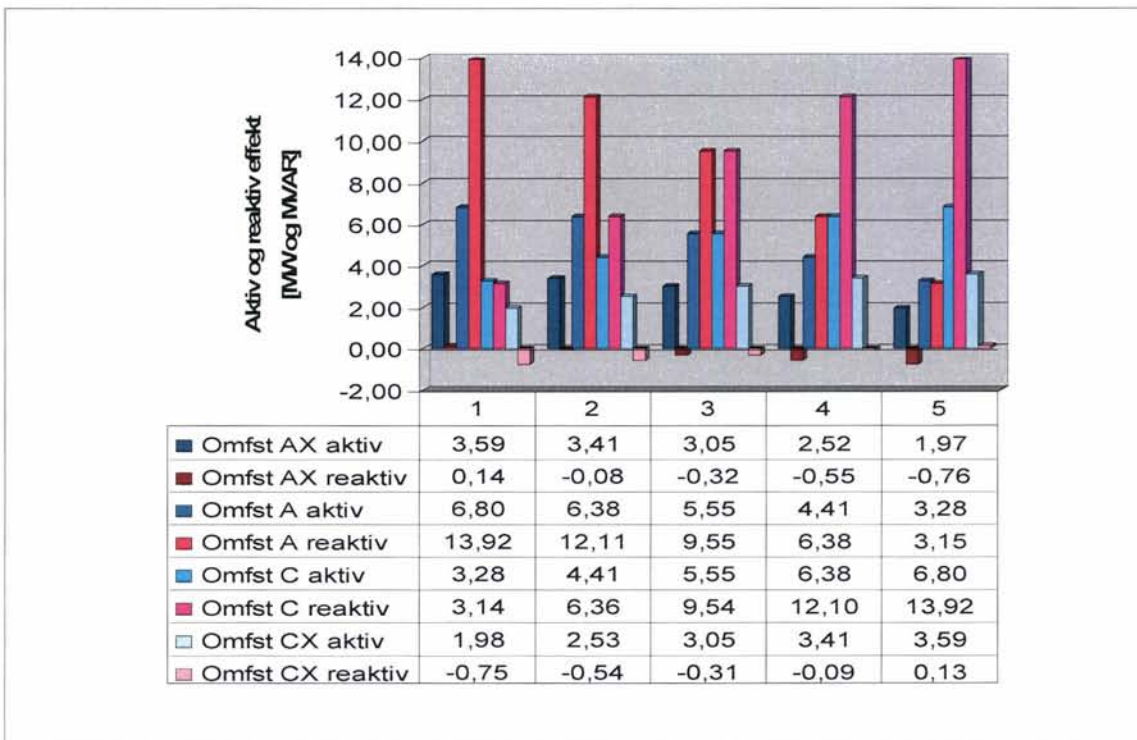
Figur 145 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Matestrekningen mellom stasjon A og C er 160 km, og tilstøtende strekninger er 100 km. Det er en fallende statikk. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 146 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Matestrekningen mellom stasjon A og C er 160 km, og tilstøtende strekninger er 100 km. Det er en fallende statikk. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 147 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



Figur 148 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

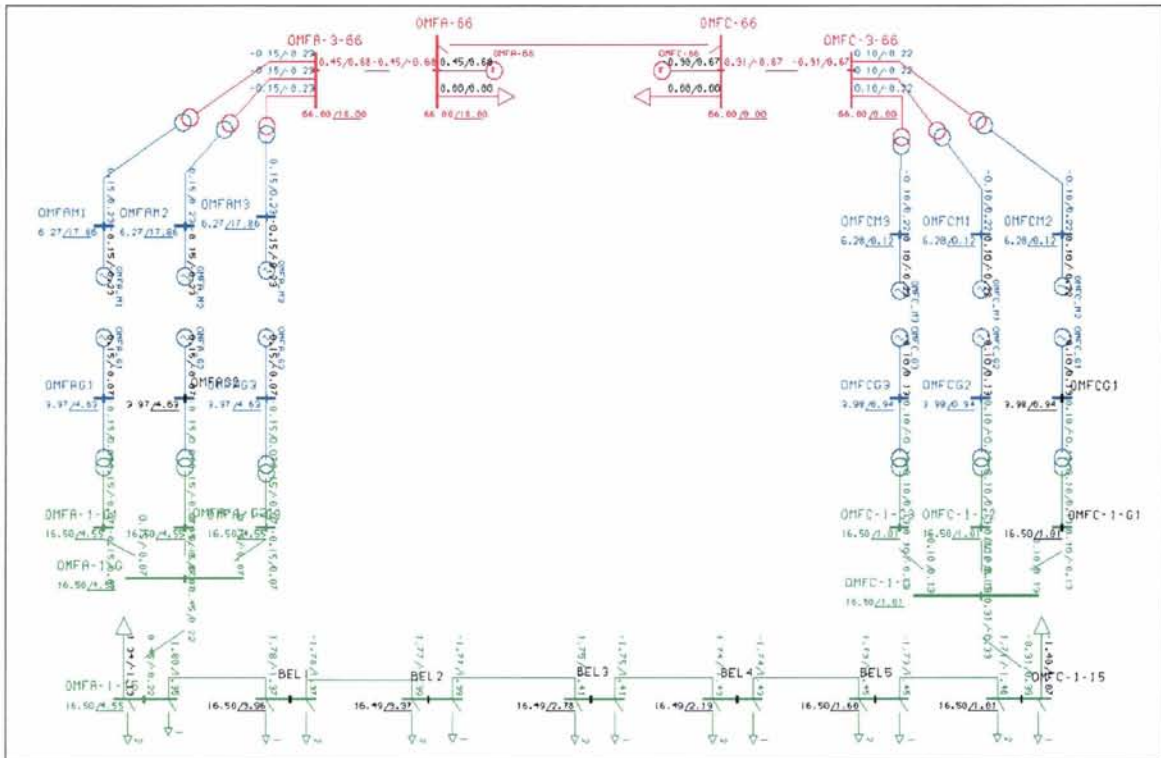
2.3.1.7 Forsøk med en lastflyt på en matestrekning med forskjellige fasevinkler i frt overliggende nettet $\delta_{AX} = -36^\circ$ $\delta_A = -18^\circ$ $\delta_C = 0^\circ$ og $\delta_{CX} = 18^\circ$

Fasevinkler i det overliggende nettet vil ha betydning for effektoverføringen mellom stasjonene, og det gjøres her en undersøkelse med noe som antas å være veldig store fasevinkler.

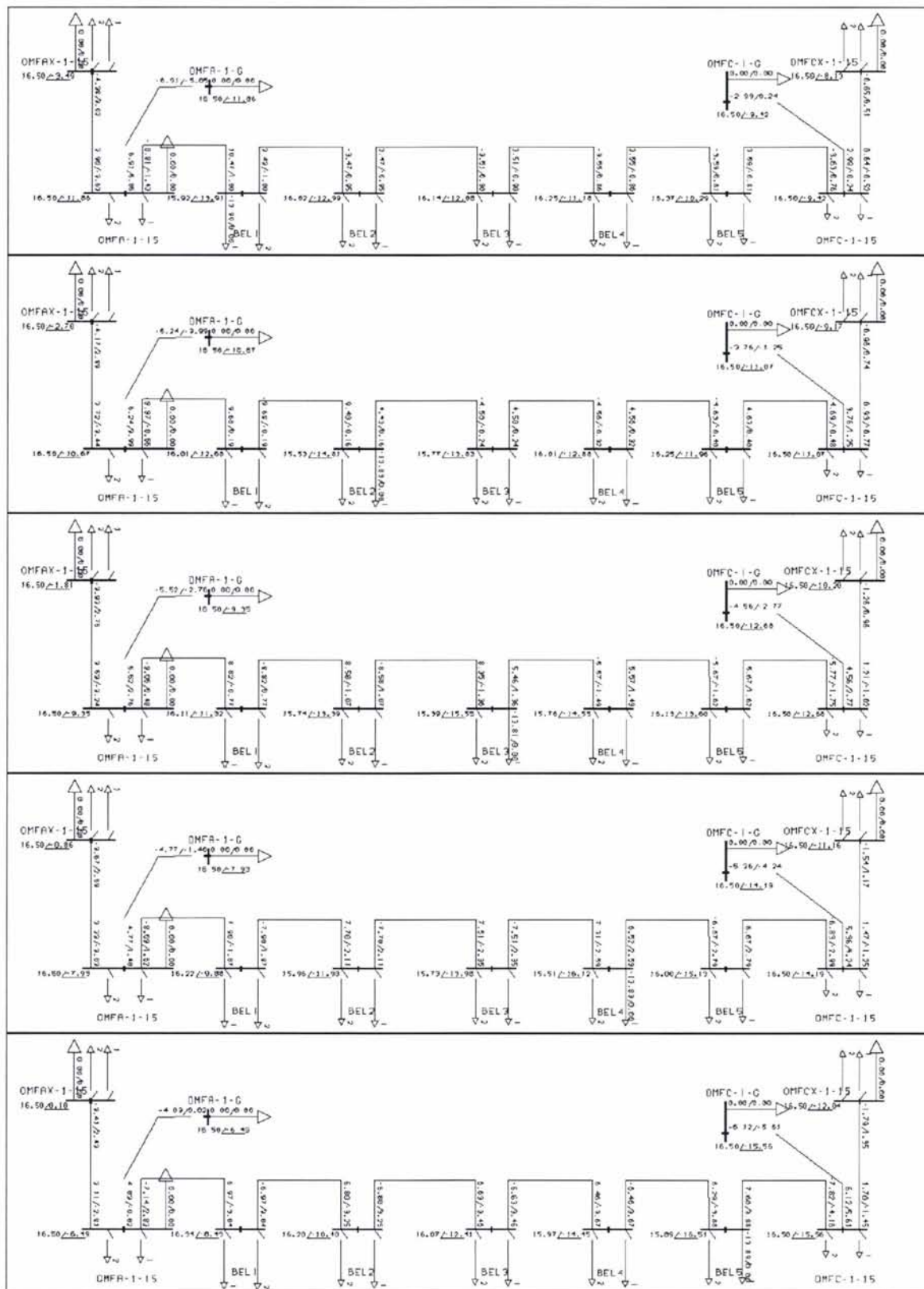
Vinkelforskjellen er valgt til hele 18° mellom hver av de fire omformerstasjonene. På enfasesiden tilsvarer dette en forskjell på 6° på enfasesiden. I første runde undersøkes det med en flat statikk, og dernest undersøkes det om en fallende statikk vil forbedre forholdene.

Figur 149 viser at denne forskjellen gir en meget stor effektflyt på kontaktledningen i tomgang, med hele 1,80 MW som mates ut fra samleskinnen ved stasjon A mot C, men legg merke til at 0,45 MW leveres fra stasjon A mens de resterende 1,35 MW kommer fra stasjon AX. I tillegg er det 1,35 MVAR som kommer inn til samleskinnen i stasjon A og 1,13 MVAR går videre til stasjon AX. Denne effektflyten gir et elektrisk tap på ca. 34 kW på den 120 km lange matestrekingen. Dette er forholdsvis lite, og tomgangstapene i alle autotransformatorene og tapene ved omforming i stasjonene vil være mye større. Legg også merke til at effektflyten ved hver stasjon ikke er lik, noe som skyldes at effekt tapes på veg mellom stasjonene fra venstre mot høyre.

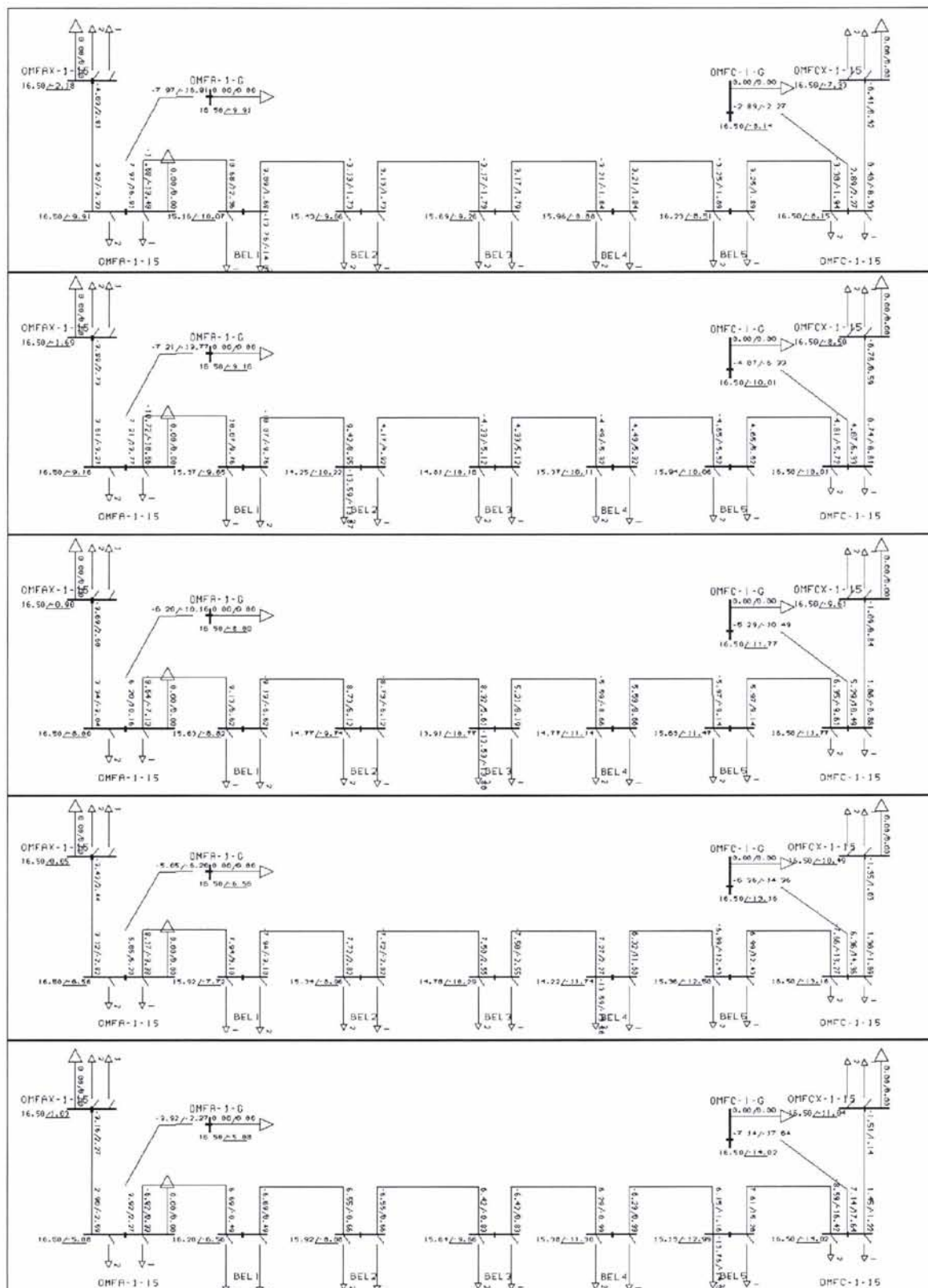
Når lasten er plassert i posisjon BEL1 viser figur 150 og figur 151 at det utveksles mye mer reaktiv effekt mellom stasjon AX og A. I tilfellet uten fasevinkler i det overliggende nettet, se 2.3.1.1, var reaktiv effekt fra AX til A med en aktiv belastning på 2,20 MVAR mens den nå har økt til 3,02 MVAR. Med en blandet last blir denne effektutvekslingen 2,81 MVAR, mot tidligere 1,99 MVAR. En annen endring er at omformerstasjonene som ligger foran med fasevinkel (C og CX), bidrar mindre med både aktiv og reaktiv effekt for alle posisjoner for lasten (dette gjelder for C i mindre grad enn CX). Figur 152 og figur 153 illustrerer søylediagrammene for denne usymmetriske effektfordelingen mellom omformerstasjonene.



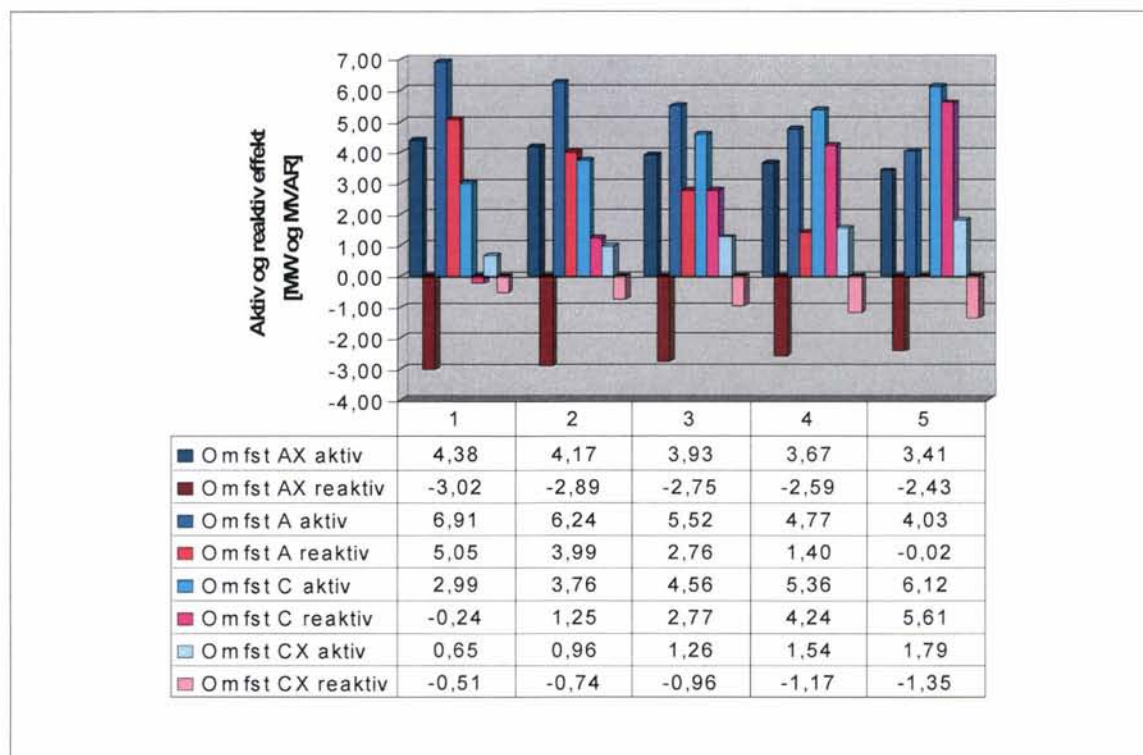
Figur 149 Spenningene og vinklene i tomgang for tilfellet med en 120 km lang matestrekning med omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW og forskjellige fasevinkler slik at det suksessivt er 18° vinkelforskjell. Det er en flat statikk. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



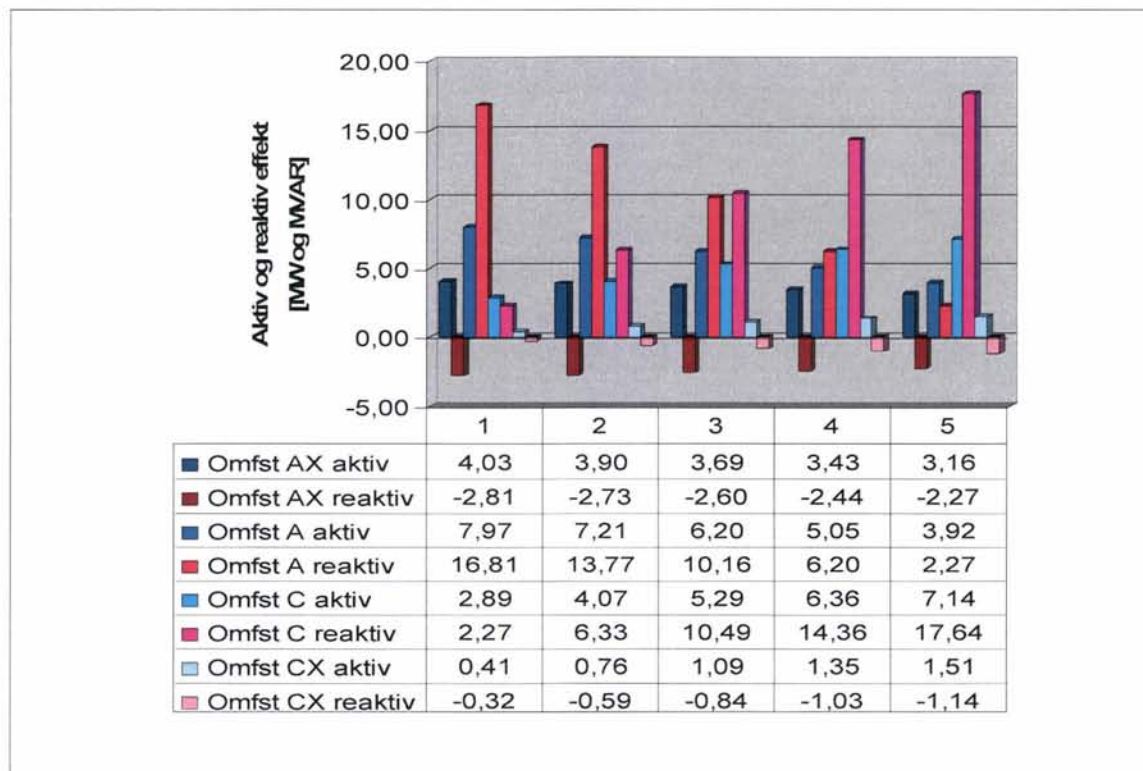
Figur 150 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Forskjellene mellom fasevinkelen i det overliggende nettet for hver omformer er 18°. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 151 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Forskjellene mellom fasevinkelen i det overliggende nettet for hver omformer er 18°. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \phi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 152 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.

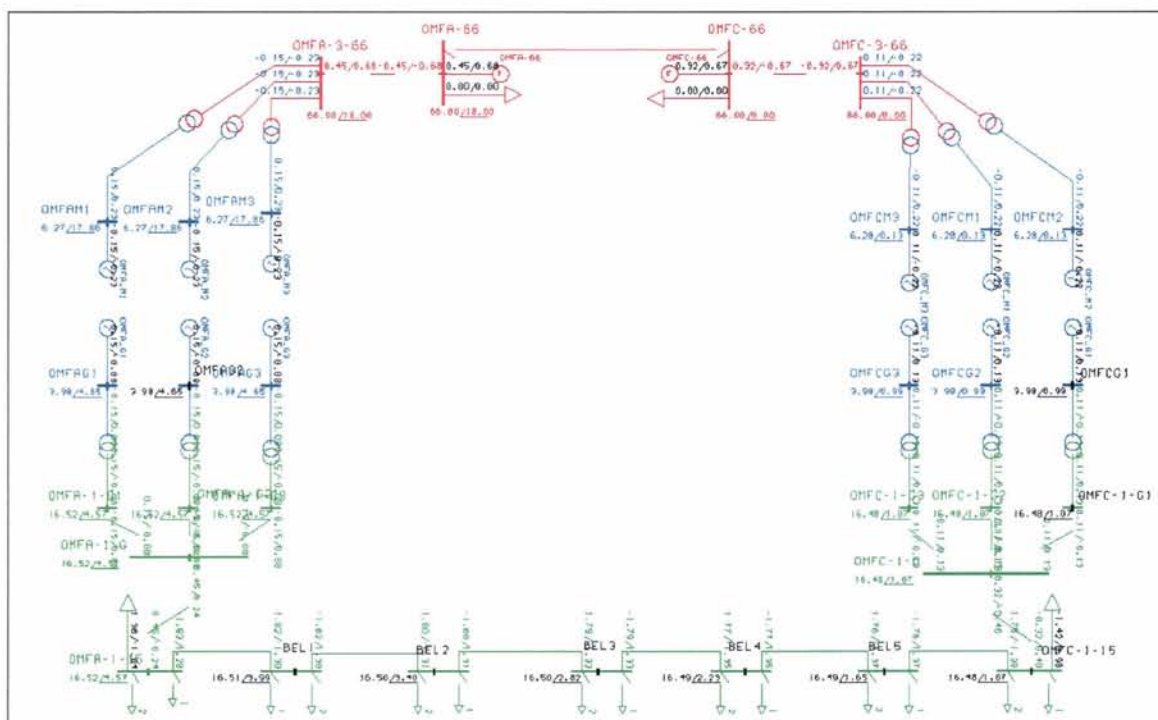


Figur 153 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

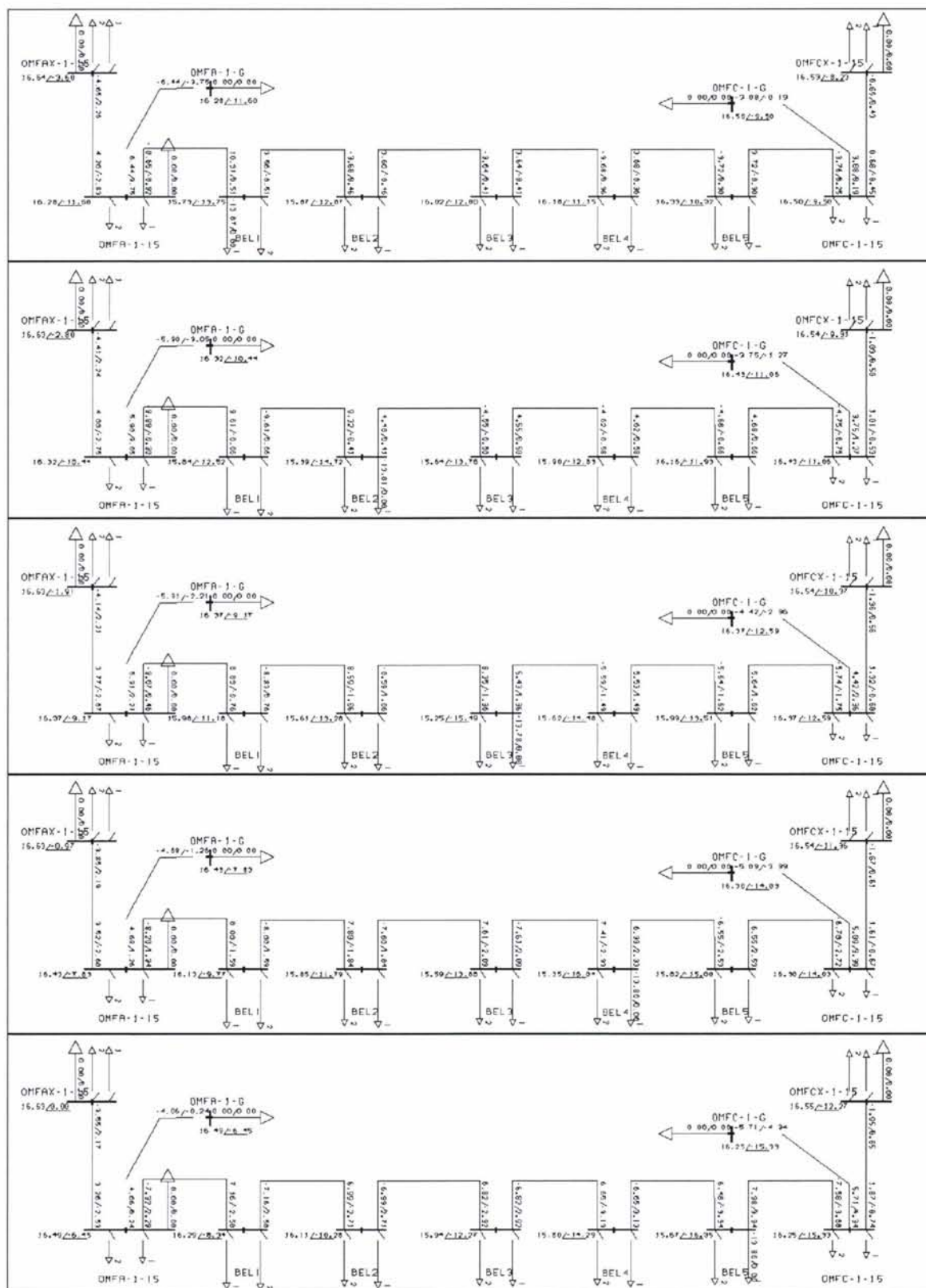
2.3.1.8 Forsøk med en lastflyt på en matestrekning med forskjellige fasevinkler i det overliggende nettet $\delta_{AX} = -36^\circ$ $\delta_A = -18^\circ$ $\delta_C = 0^\circ$ $\delta_{CX} = 18^\circ$ og en fallende statikk

I dette forsøket skal en se om fallende statikk alene kan rette opp noe av den usymmetriske lastflyten som oppstod med forskjellige fasevinkler i det overliggende nettet. Derfor benyttes samme situasjon som i avsnitt 2.3.1.7 med bare fallende statikk med 4 % fra tomgang til fullast som eneste endring. Figur 154 viser effektflyten i tomgang, og det er nå noe mer aktiv effekt og mindre reaktiv effekt som utveksles mellom stasjonene. Det var en effektflyt på 1,80 MW fra stasjon A mot C og 1,46 MVar fra C mot A, mens dette nå er endret til 1,83 MW og 1,39 MVar.

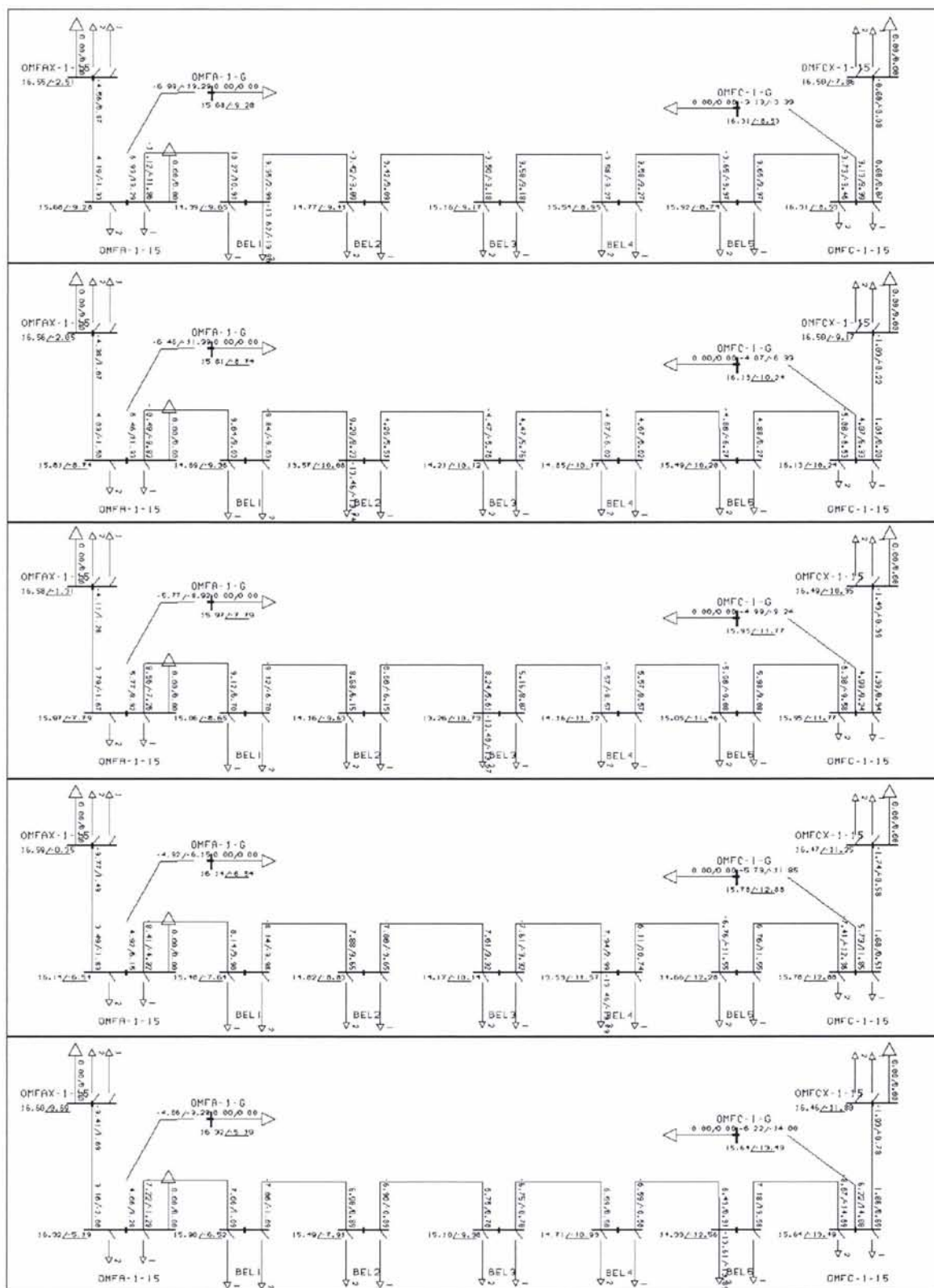
Figur 155 og figur 156 viser effektflyten og det er nå mindre reaktiv effekt som flyter i systemet, samt at omformerne utveksler mindre reaktiv effekt. Størst er forbedringen for posisjon BEL5 med en aktiv belastning: Tidligere var det 1,35 MVar som ble levert fra CX til C, mens det nå er redusert til 0,65 MVar. Fortsatt bidrar stasjon AX med mye reaktiv effekt for alle posisjoner for lasten, men dette forholdet er forbedret med en fallende statikk. Søylediagrammene i Figur 157 og figur 158 viser tydelig denne effektfordelingen og den oppnådde forbedringen. En reduksjon av antallet omformeraggregater i drift ved tomgang og forskjellige fasevinkler ville redusert denne ugunstige reaktive effektutvekslingen ytterligere.



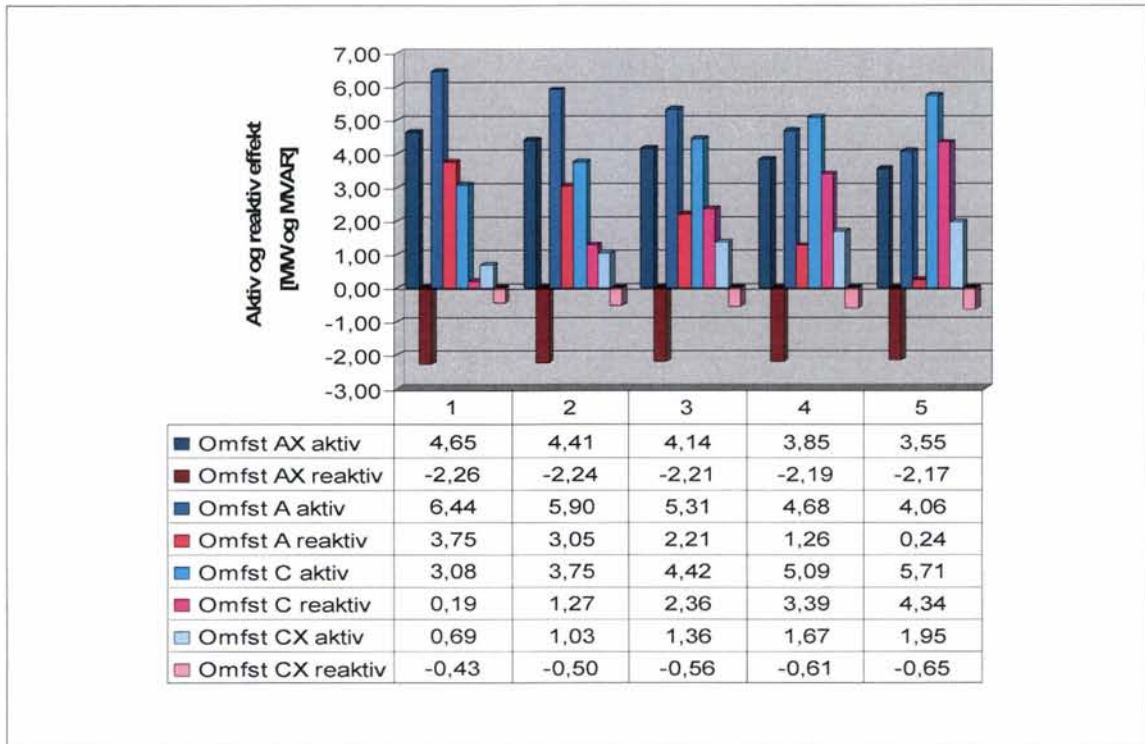
Figur 154 Spenningene og vinklene i tomgang for tilfellet med en 120 km lang matestrekning med omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW og forskjellige fasevinkler slik at det suksessivt er 18° vinkelforskjell. Det er en fallende statikk. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



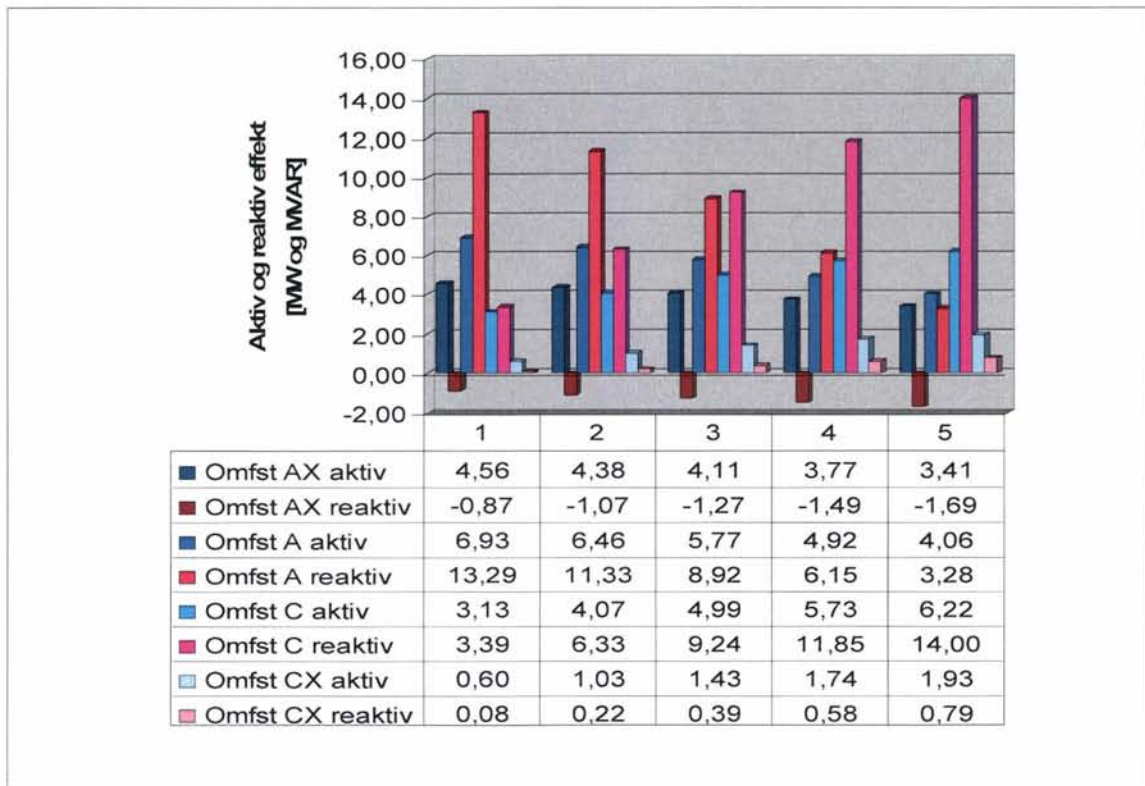
Figur 155 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og en matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Forskjellene mellom fasevinkelen i det overliggende nettet for hver omformer er 18°. Det er en fallende statikk. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 156 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og en matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Forskjellene mellom fasevinkelen i det overliggende nettet for hver omformer er 18°. Det er en fallende statikk. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \phi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



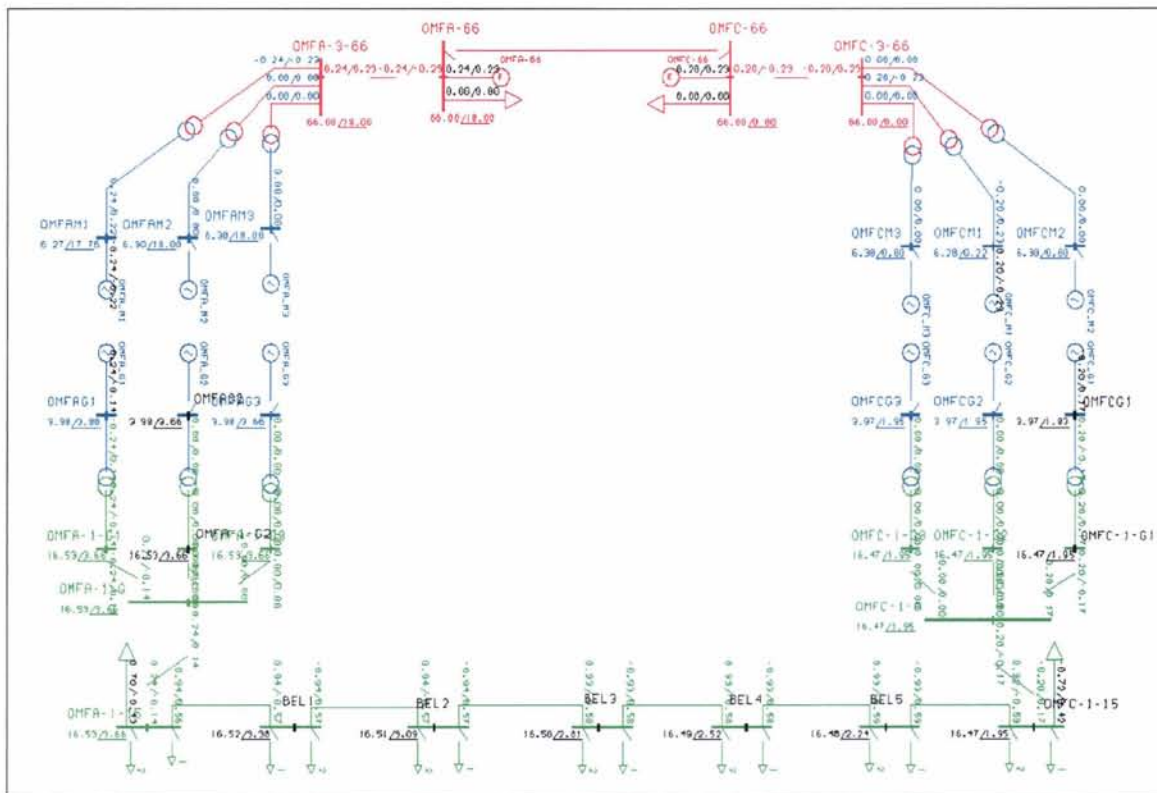
Figur 157 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



Figur 158 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.3.1.9 Forsøk med en lastflyt i tomgang for nett med ulike fasevinkler $\delta_{AX} = -36^\circ$ $\delta_A = -18^\circ$ $\delta_C = 0^\circ$ og $\delta_{CX} = 18^\circ$, en fallende statikk og færre innkoblede aggregater

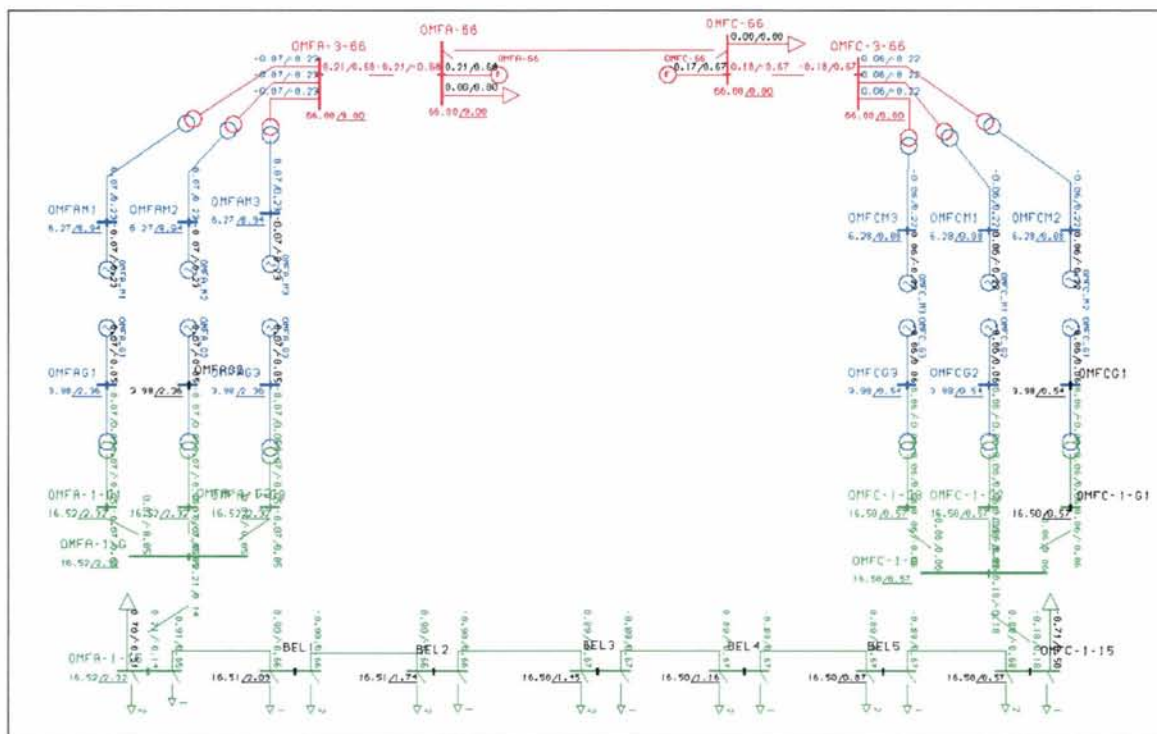
Forskjellige fasevinkler i det overliggende nettet synes å gi utveksling av aktiv og reaktiv effekt mellom omformerstasjonene og medfører tap. Her utføres undersøkelser for tomgangstilfellet. Figur 159 viser lastflyten for den undersøkte matestrekningen når antallet innkoblede omformerenheter er redusert fra totalt tolv til bare fire, og en ser at mellom stasjonene A og C flyter det nå 0,90 MW og i motsatt retning 0,59 MVar. De elektriske tapene på strekningen er ca. 20 kW. Tidligere med alle omformere innkoblet og en fallende statikk, se avsnitt 2.3.1.7, var denne effektflyten 2,06 MW fra A til C og 1,68 MVar fra C til A. Tapene var da ca. 110 kW. Der er en stor forbedring ved å la færre aggregater være i drift.



Figur 159 Spenningene og vinklene i tomgang for tilfellet med en 120 km lang matestrekning med omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW og forskjellige fasevinkler slik at det suksessivt er 18° vinkelforskjell. Det er en fallende statikk og utkobling av to av tre aggregater i hver stasjon. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.

2.3.1.10 Forsøk med en lastflyt i tomgang for nett med ulike fasevinkler $\delta_{AX} = -18^\circ$ $\delta_A = -9^\circ$ $\delta_C = 0^\circ$ og $\delta_{CX} = 9^\circ$ og en fallende statikk

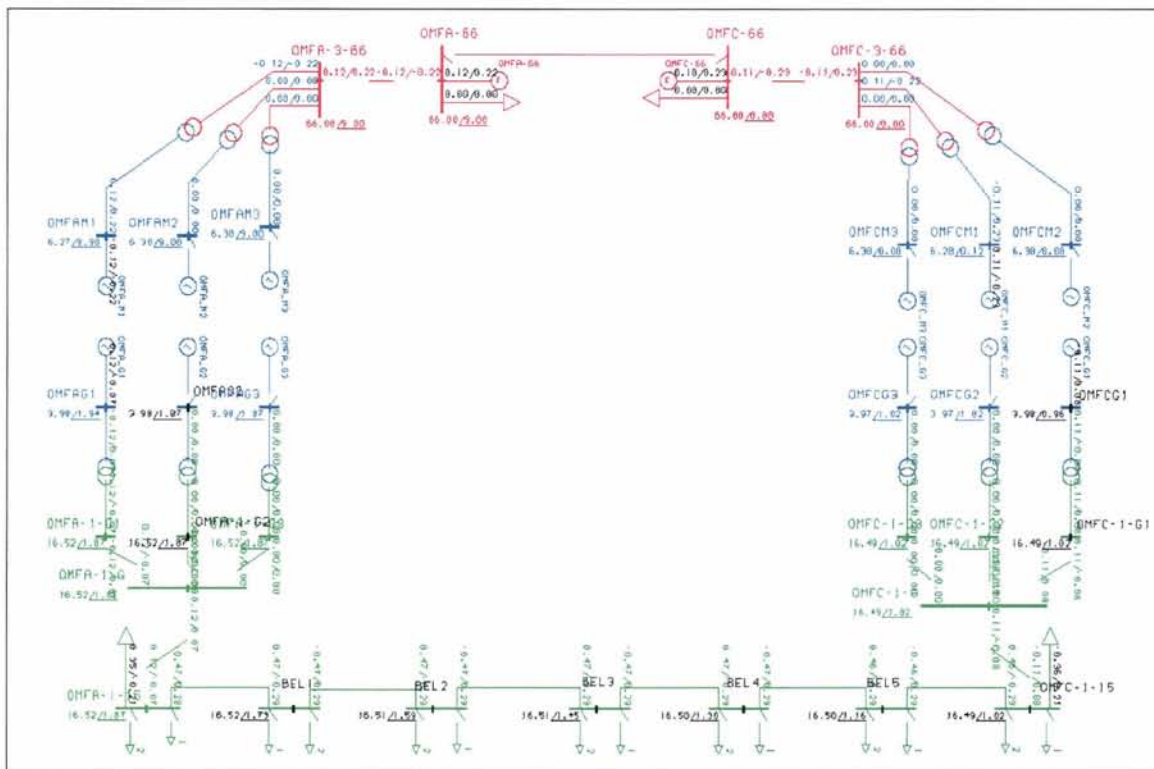
En forskjell på 18° mellom omformerstasjonene er sannsynligvis mye. Her reduseres vinkelforskjellen til halvparten. Med bare 9° i forskjell, en fallende statikk og alle aggregater inne, viser figur 160 at lastflyten nå er 0,91 MW fra A til C og 0,68 MVar i motsatt retning. Dette er en betydelig reduksjon fra tilfellet med 18° i relative vinkelforskjell, se avsnitt 2.3.1.8, der denne effektflyten var omtrent det dobbelte. Tapene på matestrekningen ser ut til å bli ca. 30 kW.



Figur 160 Spenningene og vinklene i tomgang for tilfellet med en 120 km lang matestrekning med omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW og forskjellige fasevinkler slik at det suksessivt er 9° vinkelforskjell. Det er en fallende statikk. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.

2.3.1.11 Forsøk med en lastflyt i tomgang for nett med ulike fasevinkler $\delta_{AX} = -18^\circ$, $\delta_A = -9^\circ$, $\delta_C = 0^\circ$ og $\delta_{CX} = 9^\circ$, en fallende statikk og færre innkoblede aggregater

Det er samme forhold som i forrige avsnitt, men det er bare ett aggregat innkoblet i hver stasjon. Figur 161 viser nå en effektutveksling på 0,47 MW fra stasjon A til C og 0,29 MVar i motsatt retning. De elektriske tapene er ca. 20 kW, noe som er en ytterligere forbedring i forhold til forrige avsnitt der alle aggregatene var i drift.



Figur 161 Spenningsene og vinklene i tomgang for tilfellet med en 120 km lang matestrekning med omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW og forskjellige fasevinkler slik at det suksessivt er 9° vinkelforskjell. Det er en fallende statikk og utkobling av to av tre aggregater i hver stasjon. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.

2.3.1.12 Oppsummering etter undersøkelser med en matestrekning med AT-system

Følgende forhold er observert for de elleve forsøkene:

- Selv om avstanden mellom omformerstasjoner med AT-system økes i forhold til konvensjonelt system til 120 km, er impedansen så mye mindre at effektfordelingen mellom omformerstasjonene forbedres mye. Spenningen blir også bedre.
- En ulempe med AT-system er utvekslingen av reaktiv effekt mellom omformerstasjonene selv når en belastning er meget langt unna. Dette kan bøtes på med en fallende statikk for spenningsregulatorene. Dessuten vil jevn belastning på matestrekningene også redusere dette. Dette er nok mest tydelig mellom den aller siste og den nest siste omformerstasjonen på en strekning.
- Et annet problem med AT-system er at den lave impedansen gir en stor overføring av effekt i tomgang om det er forskjellige fasevinklene i det overliggende nettet. Dette fører også til en usymmetrisk belastning av omformerstasjonene ved trafikk, det vil si at stasjoner som ligger etter, påtar seg mer av effektproduksjonen. Dette gjelder både aktiv og reaktiv effekt, og resultatet blir elektriske tap. Også en fallende statikk i omformerstasjonene vil hjelpe på dette problemet.
- Med et svakt overliggende nett for en stasjon ser det ikke ut til at effektfordelingen mellom sterke og svake stasjoner blir mye påvirket.

- Det kan være mulig å la en matestrekning være uvanlig lang om dette kompenseres ved å redusere de tilstøtende nabostrekningene. Mange forhold spiller inn, og trafikksimuleringer må i så tilfelle gjøres for å avdekke de stedlige forholdene.
- I tilfellet med forskjellige fasevinkler i det overliggende nettet ved henholdsvis tomgang og med trafikk, kan en reduksjon av antallet omformere i drift redusere effektutvekslingen mye. Antallet omformere i drift reduseres til det som til en hver tid er nødvendig.
- Selv om en matestrekning blir vesentlig lengre enn 120 km, blir effektfordelingen mellom de fire omformerstasjonene omtrent den samme om avstanden til nabostasjonene gjøres tilsvarende kortere.

2.4 Undersøkelser for avbøtende tiltak

Det ble i det innledende kapittelet, se avsnitt 1.1 nevnt fire punkter som spesielt skal undersøkes, og dette var:

- Leivoll omformerstasjon som leverer effekt til det overliggende nettet,
- Mjølfjell som gir for lite effekt i forhold til størrelsen,
- generelt problemet med små stasjoner med store nabostasjoner og
- En fornuftig innstilling av spenningsregulatorene.

Når det gjelder Mjølfjell omformerstasjon, blir det ikke gjort noen forsøk med tiltak siden det ikke foreligger målinger eller dokumenterte observasjoner som kan underbygge problemene. Undersøkelsene i denne rapporten har heller ikke påvist mulige uønskede situasjoner ved denne stasjonen.

For små omformerstasjoner mellom større, vil tiltakene her være de samme som for stasjoner i en avstand på 40 km og med fasevinkelforskjeller i det overliggende nettet. For AT-system ser det ut til at en fallende statikk løser de fleste problemer, men det kan være interessant å se hva som skjer med lastflyten om det settes inn reaktorer. Kun disse forholdene blir testet her.

2.4.1 Forsøk med avbøtende tiltak for omformerstasjoner med 40 km avstand og store faseforskjeller dem

Omformerstasjon som har en overliggende forsyning som ligger 18° etter i fasevinkel, undersøkes med tanke på forbedringstiltak. Det er 40 km til nabostasjonene som i de fleste undersøkelsene her er større enn stasjonen i midten. Stasjonen i midten har enten 5,8 eller $2 \times 5,8$ MVA, og de andre stasjonene har $2 \times 5,8$ MVA i alle forsøkene. Noen av tiltakene vil kunne være aktuelle selv om det var den i midten som lå foran med sin fasevinkel, men da blir tiltaket med "motsatt fortegn", det vil si at det brukes en seriekondensator isteden for seriereaktor eller undermagnetisering istedenfor overmagnetisering etc.

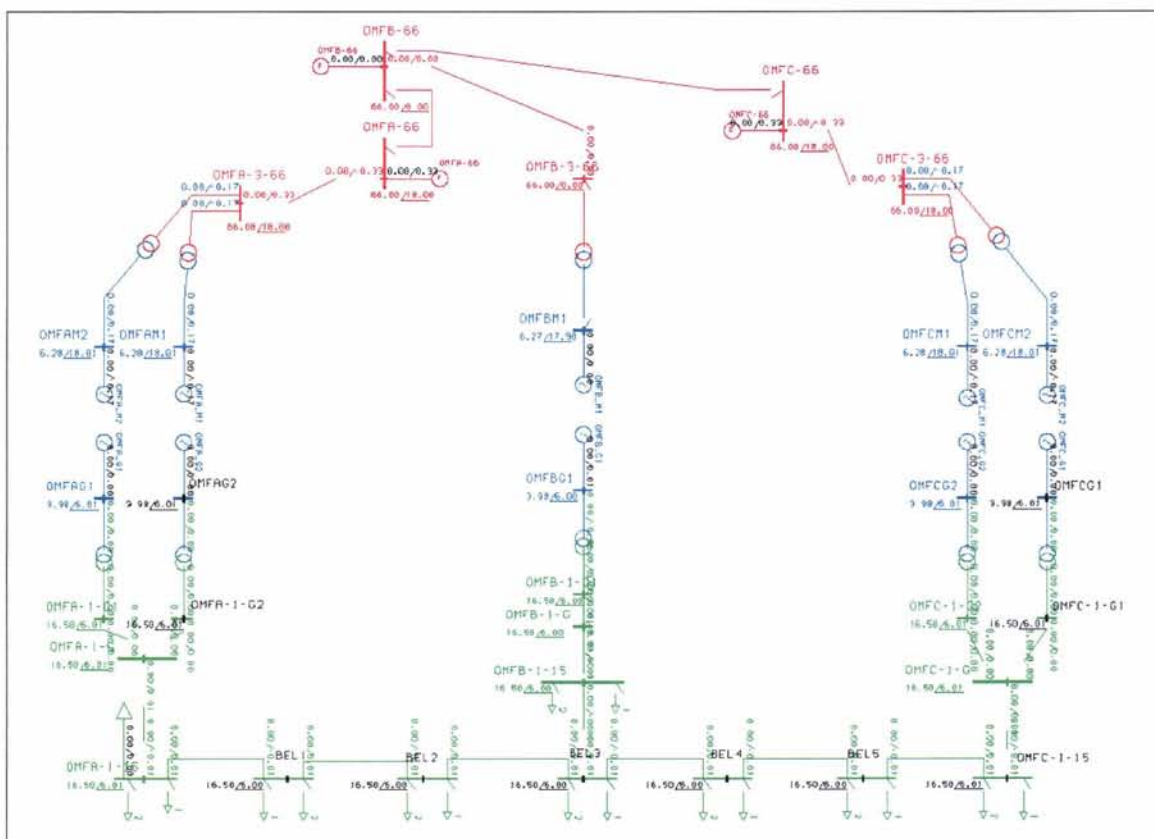
Det er to spesielle forhold relatert til en stasjon med 40 km avstand til sine nabostasjoner der det er forskjellige fasevinkler i det overliggende nettet. Det første er stor effektutveksling i tomgang. Det andre er at denne stasjonen ikke trenger mer enn ett aggregat ut fra det aktuelle effektbehovet på matestrekningen, men det er også store reaktive effektuttak som gjør det nødvendig for å forhindre utfall av dette.

Forsøk med overmagnetiserte motorer hadde en viss effekt på fasevinkelen ved belastningen, men de tiltakene som eventuelt skal kunne bøte på dette problemet, må gi mye større vinkeldreining. Problemstillingen er ikke fulgt opp i det videre.

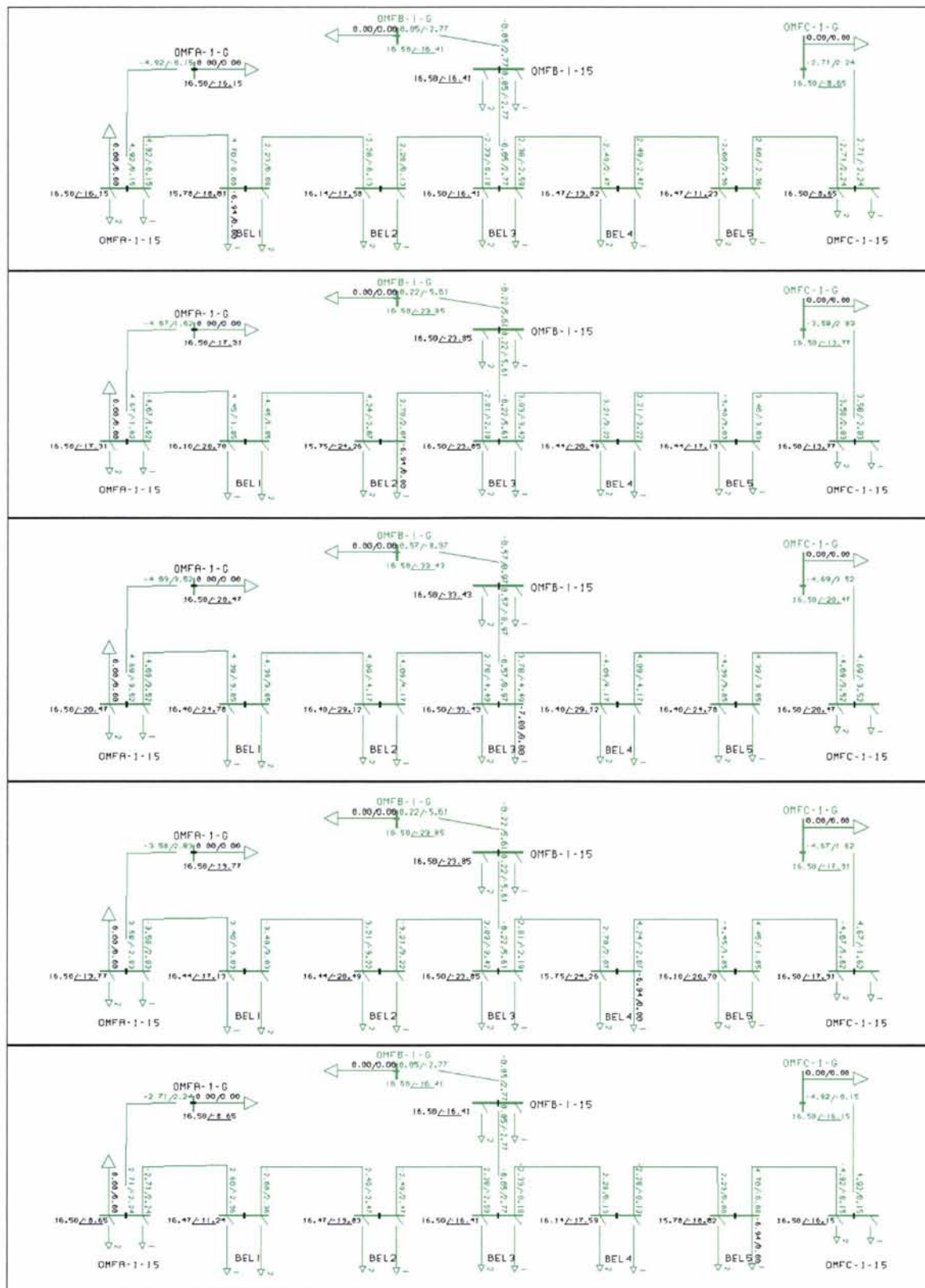
2.4.1.1 Forsøk med å la aggregatet i omformerstasjon B gå i mekanisk tomgang

Ved å la aggregatet(ene) i omformerstasjon B gå i mekanisk tomgang, fåes ikke en situasjon der dette utveksler effekt med de andre stasjonene på grunn av ulike fasevinkler. Aggregatet vil kun bidra med å holde spenningen midt på matestrekningen oppe ved å mate ut en reaktiv effekt. Stasjonen virker med andre ord som en roterende fasekompensator. Figur 162 viser situasjonen i tomgang, og det er nå ideelt ingen effekt (ca. 10 kVAR) på kontaktledningen. I virkeligheten vil det flyte noe aktiv- og reaktiv effekt for å dekke tomgangs-, vifte- og andre tap i aggregatet i stasjon B.

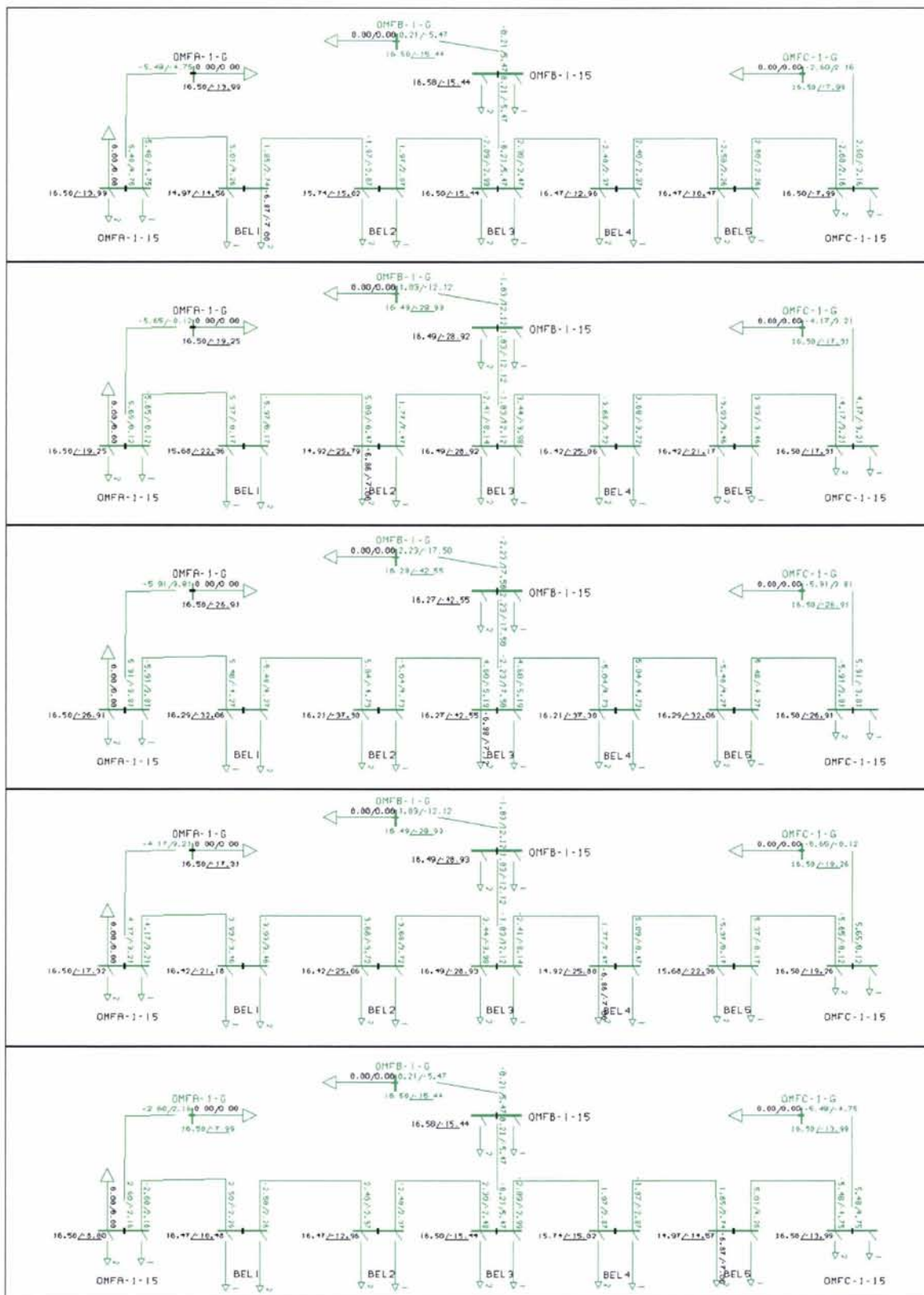
Når lasten flytter seg på matestrekningen, viser figur 173 og figur 174 hvorledes stasjon B bidrar til å mate ut en reaktiv effekt og holde spenningen oppe. Figur 176 og figur 177 viser søylediagrammene for de samme størrelsene. Det er fare for overbelastning når lasten trekker en stor effekt rett utenfor omformereren. Spesielt i tilfellet med både aktiv og reaktiv belastning vil stasjon B komme til å levere svært mye reaktiv effekt, og den vil i praksis bli overbelastet lenge før det trekkes så stor effekt som i simuleringen. En fallende statikk kan kunne bøte på dette. Denne løsningen kan også være aktuell for stasjoner med avvikende fasevinkler, men for stasjoner som er betydelig mindre enn sine nabostasjoner, kan det bli overbelastning på grunn av en ugunstig lastfordeling.



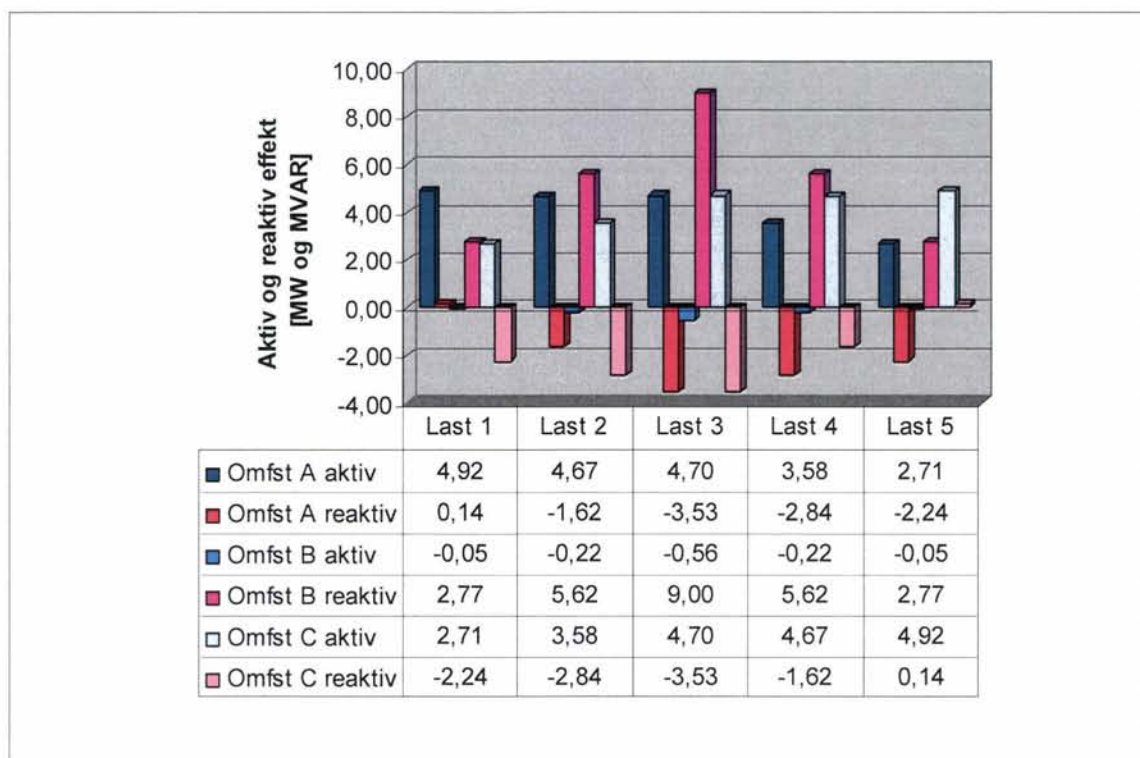
Figur 162 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er et stivt overliggende nett der stasjon B sakter med 18°, men motoren er koblet ut. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



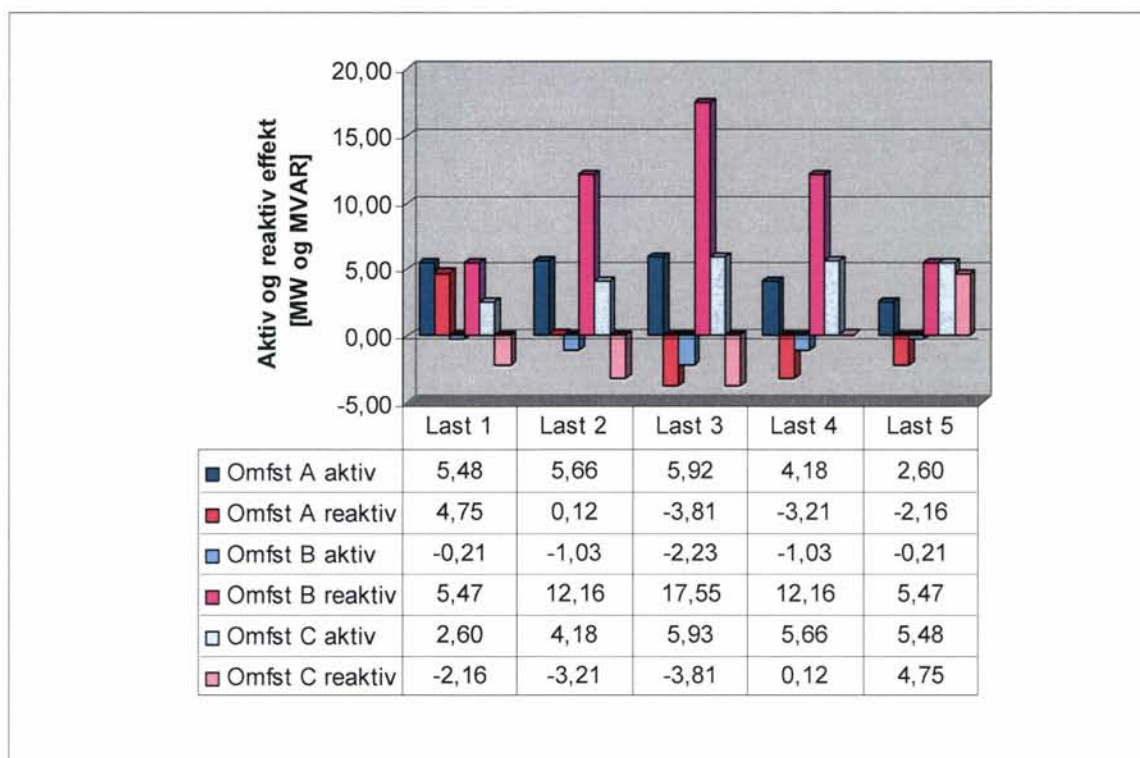
Figur 163 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er et stivt sterkt overliggende nett der stasjon B sacker med 18°, men motoren er koblet ut. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 164 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er et stift overliggende nett der stasjon B sakter med 18°, men motoren er koblet ut. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



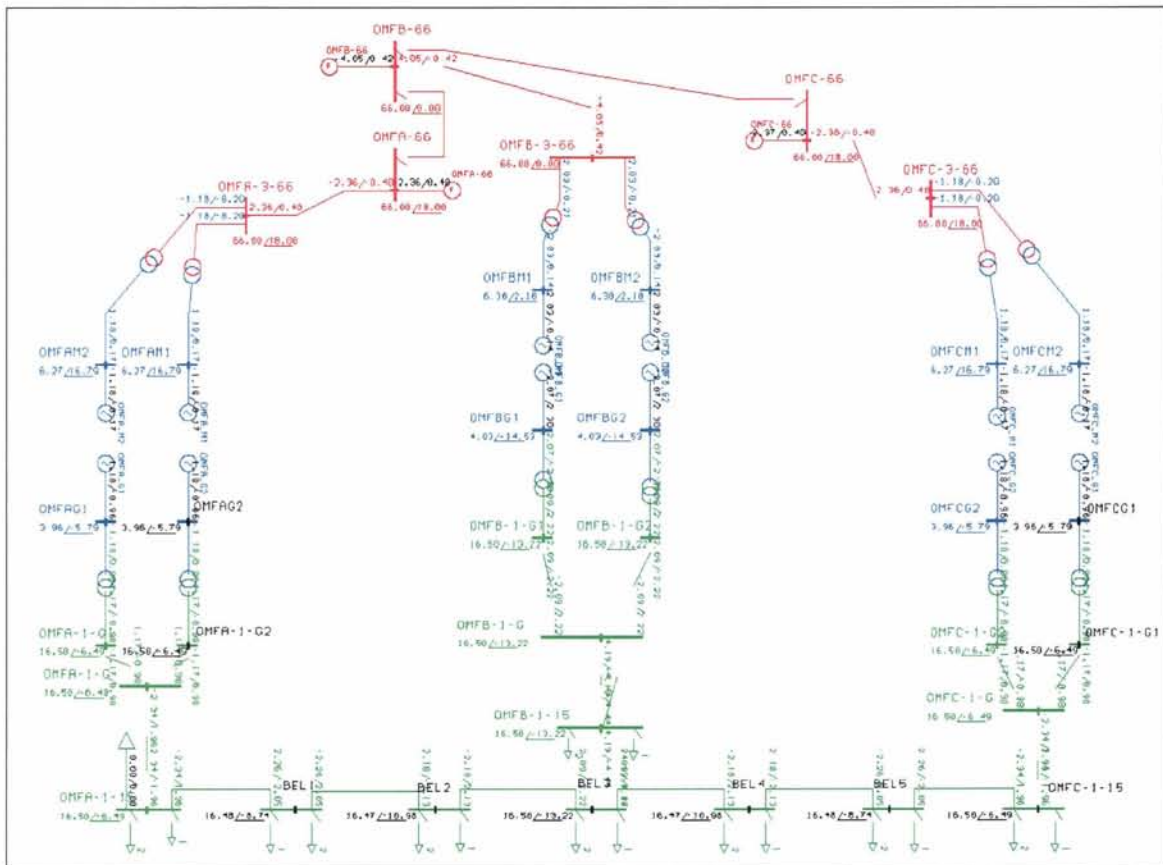
Figur 165 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



Figur 166 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.4.1.2 Forsøk med innfasing som gir en permanent fasevinkel

Figur 167 viser effektflyten i tomgang når omformeraggregatene i stasjon B er lagt inn med 30° faseforskyving forover. Dette er gjort ved å sette vinkelen CTETA til 30° i modellen (på enfasesiden) for roterende omformere. I praksis gjøres dette ved at en ved innfasing av aggregatene kobler inn mot det overliggende nettet med en poldeling foran. Som en ser oppstår det også nå stor effektflyt mellom omformerne, og dette ville bare vært et brukbart tiltak om forskjellen i fasevinkelen mellom stasjonene virkelig var ca. 30°, men det er ikke tilfellet her.

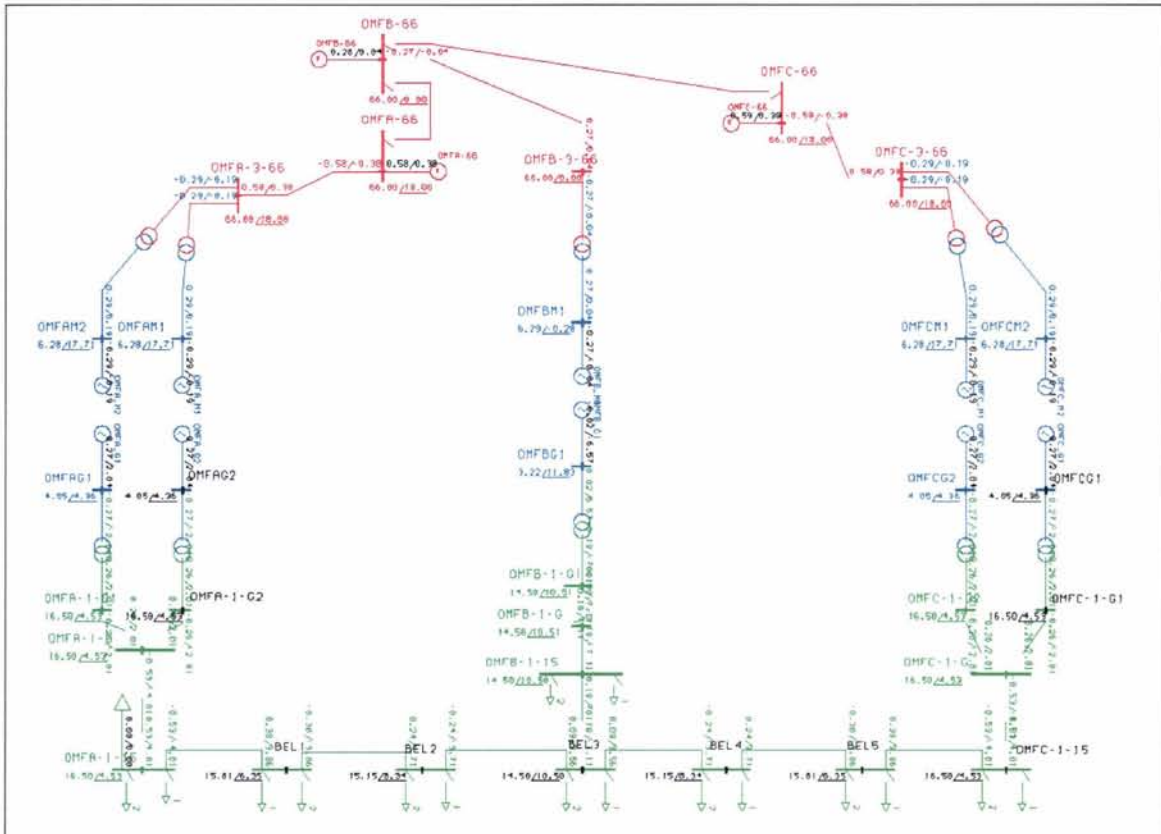


Figur 167 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er et stivt overliggende nett der stasjon B sakter med 18°, men motoren er koblet inn slik at den gir en permanent fasevridning på 30°. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.

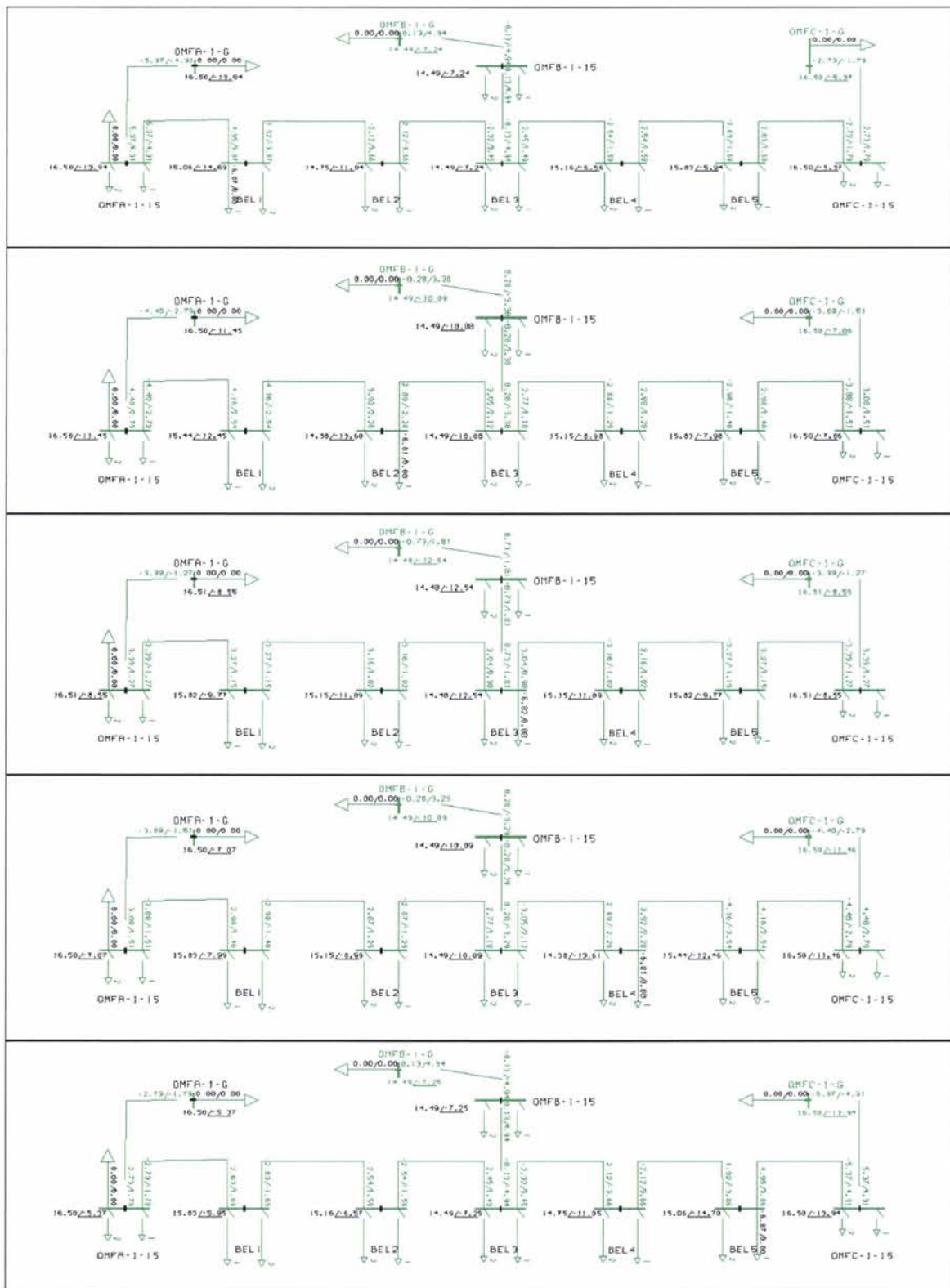
2.4.1.3 Forsøk med en lavere spenning for omformer B

I dette forsøket reduseres spenningen på 15 kV-samleskinnen ved omformer B så mye at denne ikke leverer effekt til trefasenettet, men ved en spenning helt ned til 14,5 kV leveres det fremdeles noe effekt, se figur 168. Dette er 2 kV lavere spenning enn det som er normalt, og en ytterligere reduksjon er ikke mulig uten at spenningen blir for lav for togene. Med denne innstillingen bidrar stasjonen nesten ikke med aktiv effekt, og spenningen bør nok stilles en del opp for å få et kompromiss mellom effektflyten i tomgang og en aktiv effektproduksjon. Ytterligere tester vil imidlertid vise hvor mye lenger ned en eventuelt kan gå. Uansett er den aktive effekten levert til det overliggende trefasenettet er redusert mye i forhold til tidligere, se avsnitt 2.2.2.7.

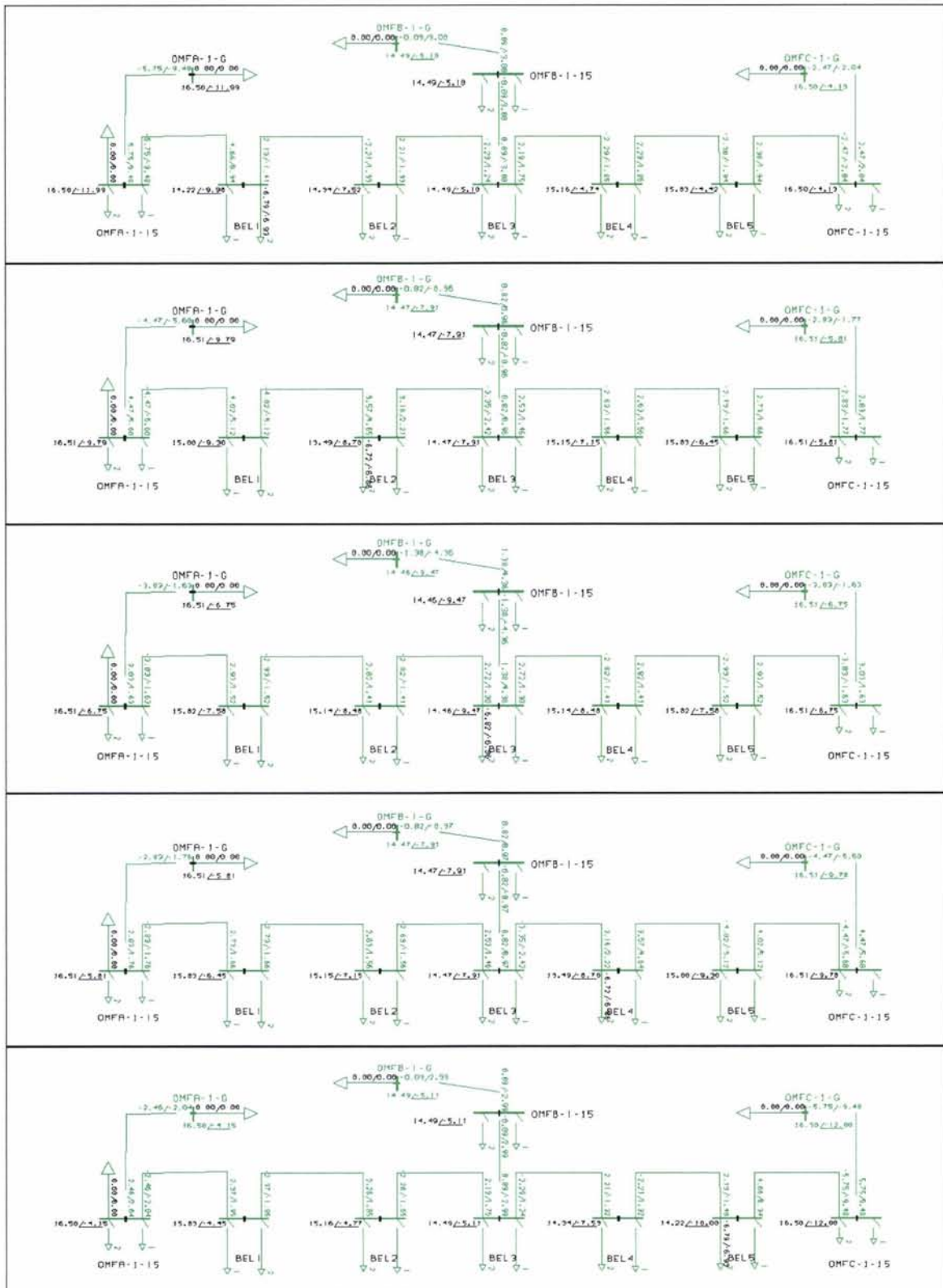
Figur 169 og figur 170 viser effektfordelingen mellom omformerne, og det leveres uvanlig lite aktiv effekt fra stasjon B, men desto mer reaktiv effekt utveksles mellom stasjonene. Spesielt for tilfellet med rent aktiv belastning utveksler stasjonene mye reaktiv effekt. Likeledes blir ikke spenningen lavere enn det som tillates, og spenningen for stasjon B kunne vært justert enda lavere. Imidlertid vil en lavere spenning gå på bekostning av levert aktiv effekt. Søylediagrammene viser også tydelig hvorledes effektfordelingen mellom omformerstasjonene skjer, se figur 171 og figur 172. Stasjon B leverer lite aktiv effekt og med en rent aktiv last i posisjon 1 og 5 mottar den faktisk effekt.



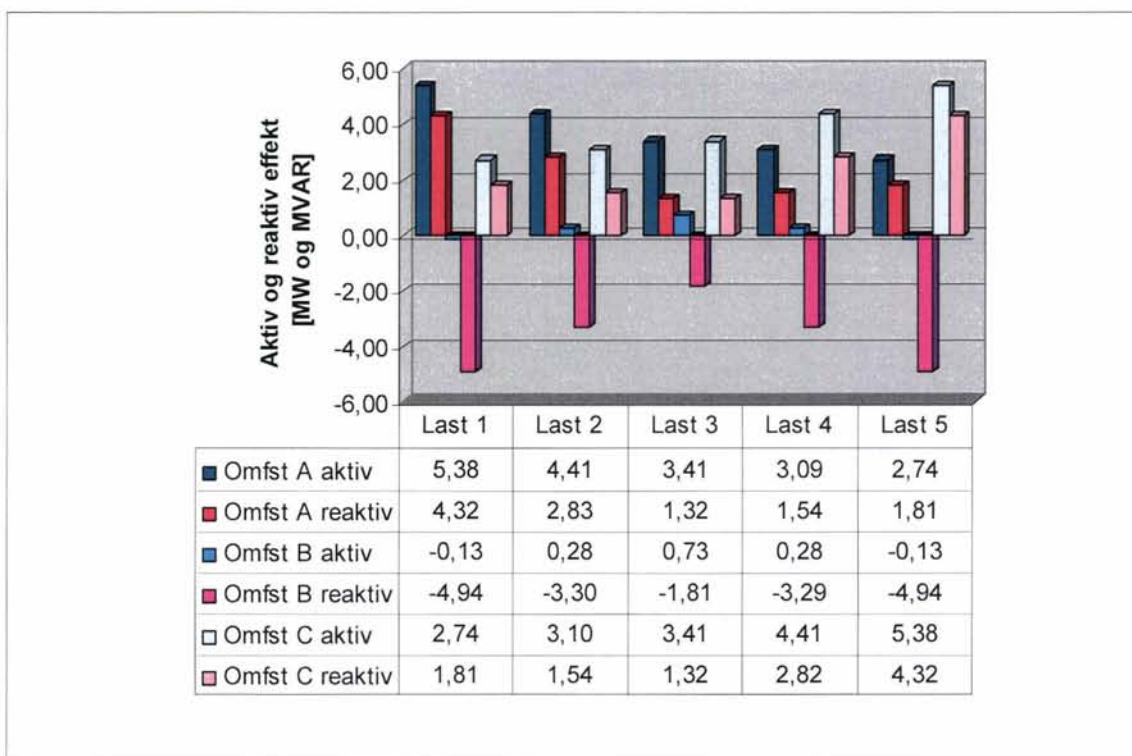
Figur 168 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er et stivt overliggende nett der stasjon B sakter med 18° , men stasjon B er stilt inn for å gi 14,5 kV på 15 kV-samleskinne. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \phi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



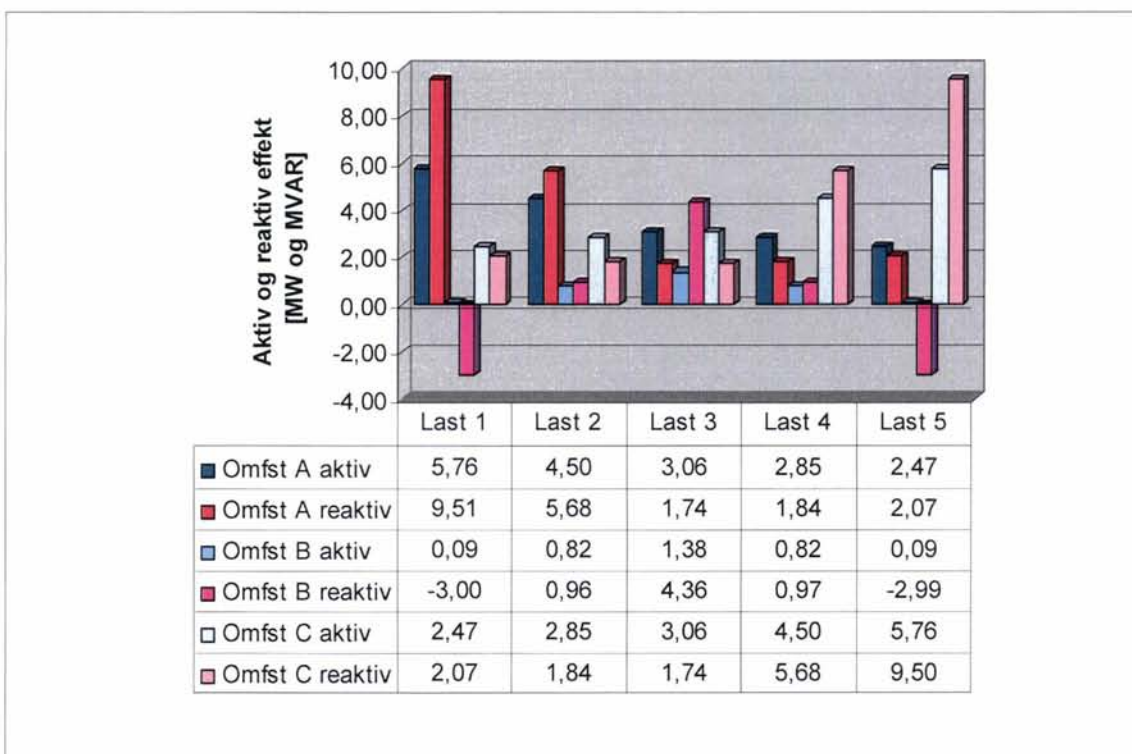
Figur 169 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er et stivt overliggende nett der stasjon B sakter med 18°, men er stilt ned til å bare gi 14,5 kV. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 170 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er et stivt overliggende nett der stasjon B sakter med 18°, men er stilt ned til å bare gi 14,5 kV. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 171 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.

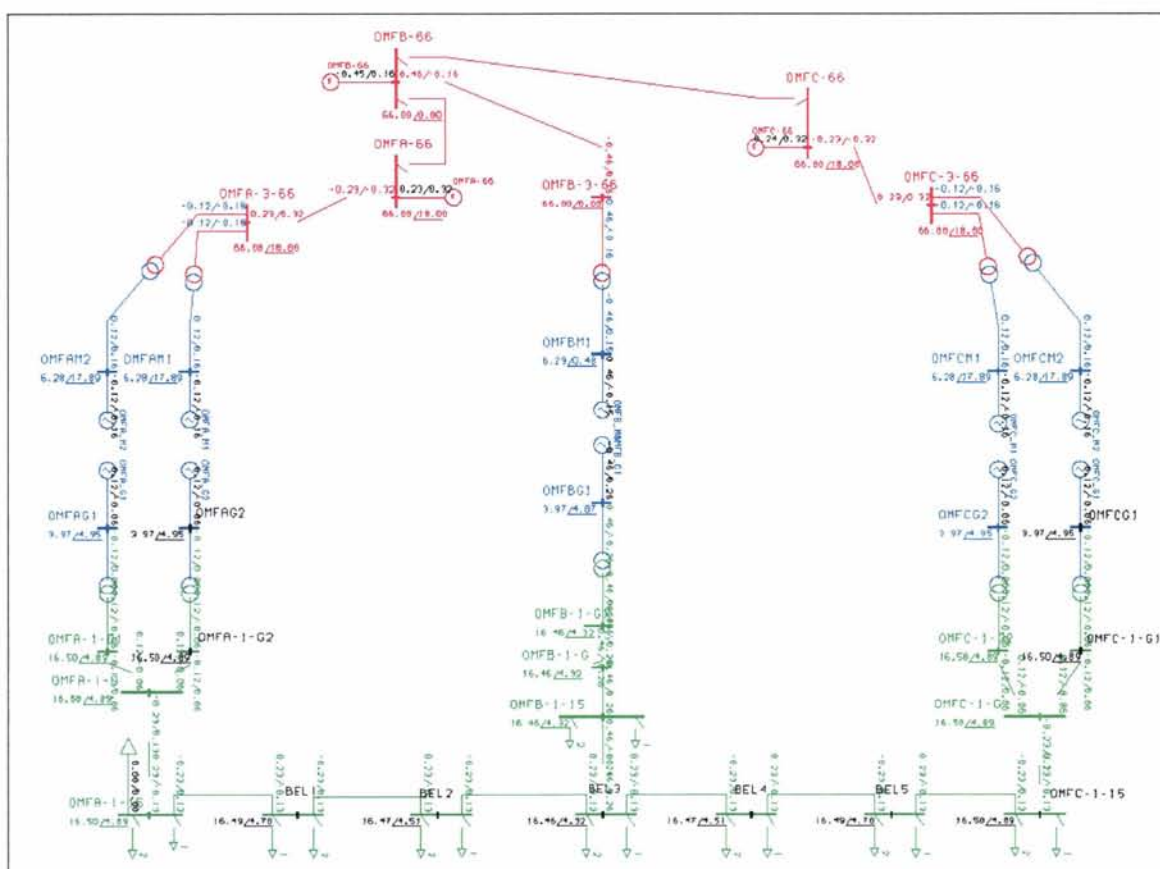


Figur 172 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

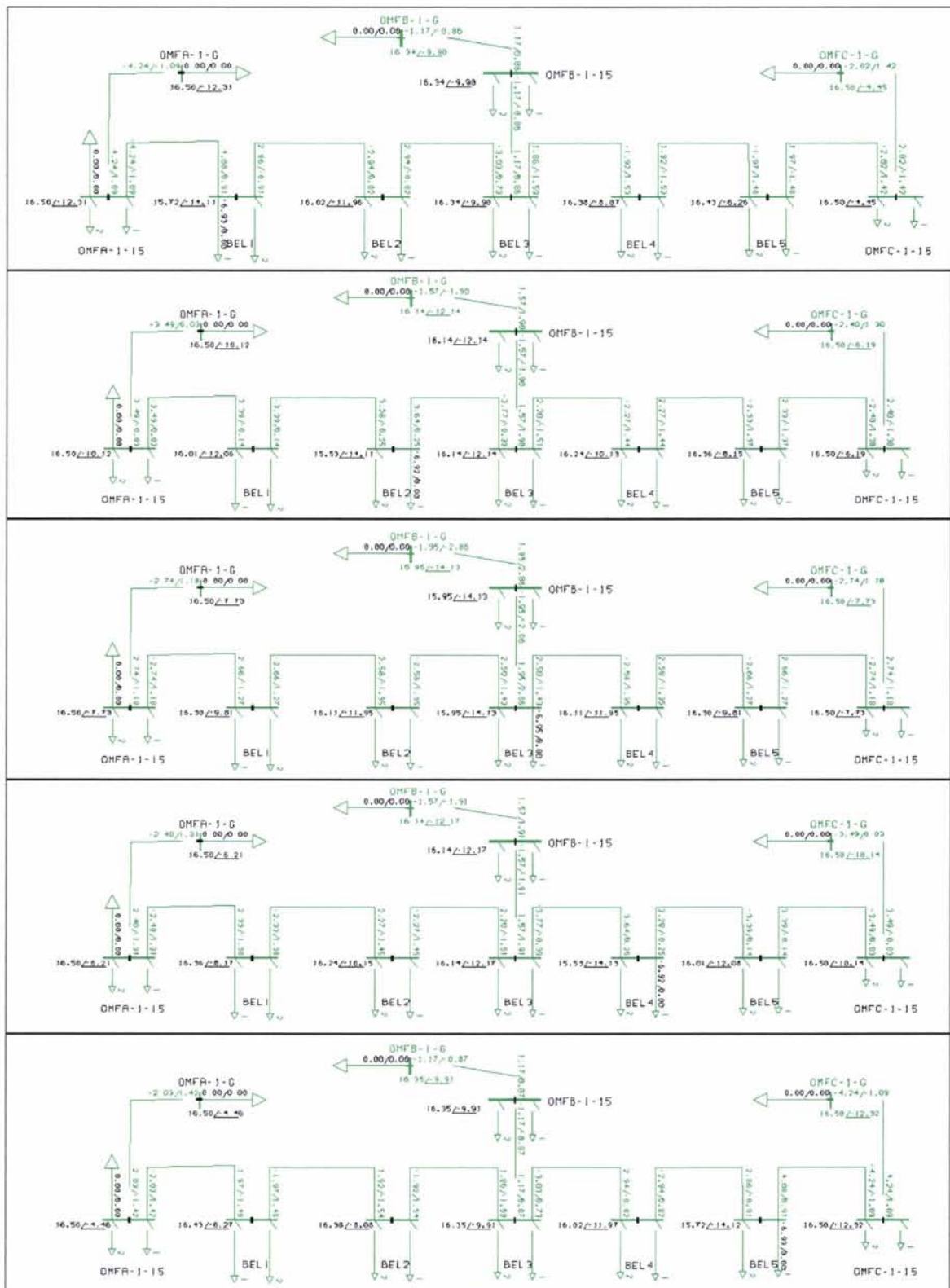
2.4.1.4 Forsøk med en matestrekning der omformerstasjon på midten har spenningsregulatorer med en fallende statikk

Det undersøkes om en fallende statikk i omformerstasjon B vil føre til at stasjonen vil føre til mindre reaktiv effektproduksjon. Med ett aggregat i en stasjon mellom to større undersøkes faren for utfall ved overlast når denne produserer mye reaktiv effekt. Figur 173 viser at stasjon B i tomgang leverer mye aktiv effekt til det overliggende nettet. Sammenlignet med situasjonen uten tiltak, se avsnitt 2.2.2.7, med to aggregater i stasjon B, ble det levert 0,69 MW til overliggende nett. Når effekten levert til overliggende nett her er 0,46 MW er nok den primære grunnen til reduksjonen at bare ett aggregat ligger inne i stasjon B, mens betydningen av en fallende statikk her er mindre.

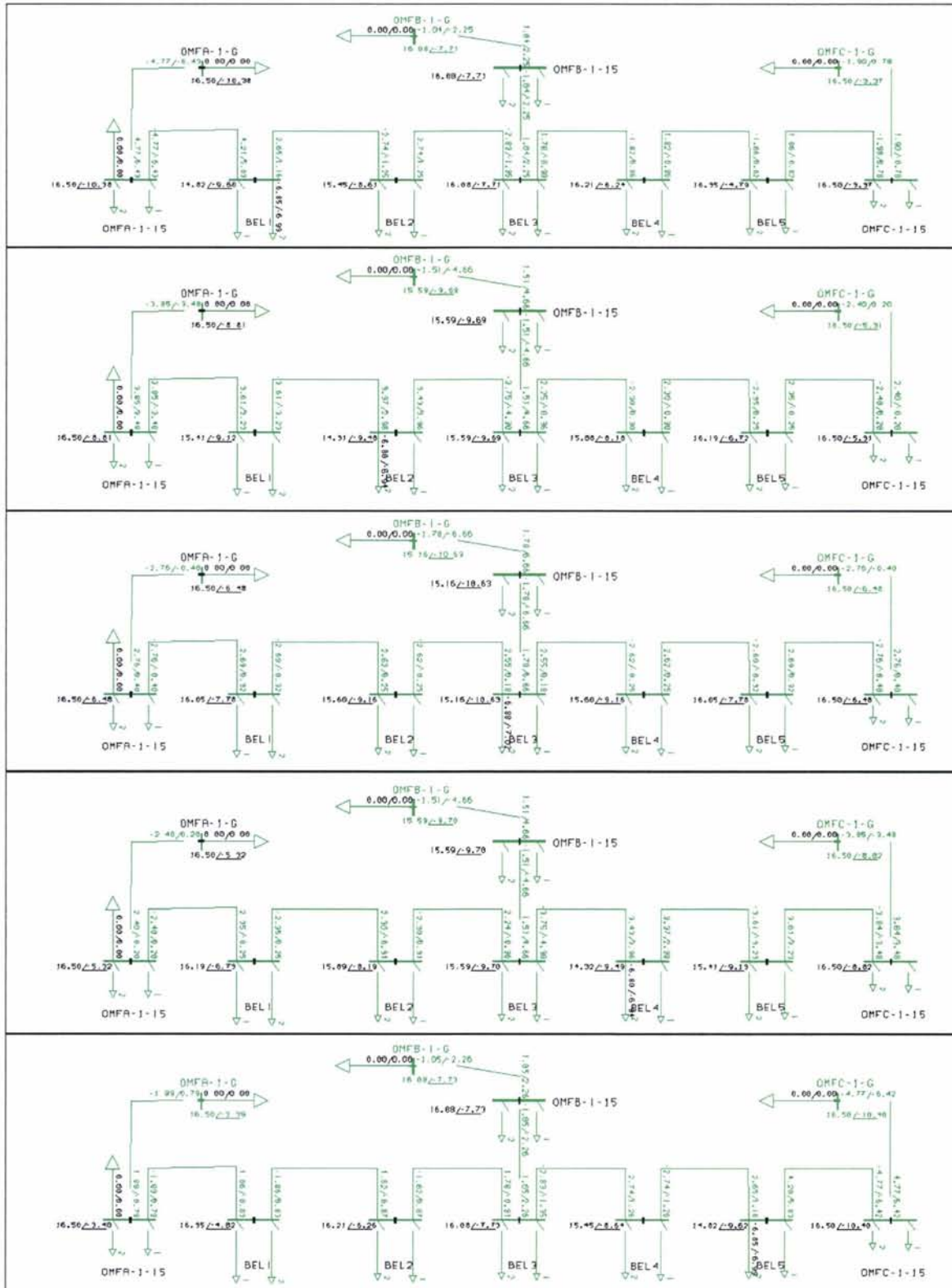
Figur 174 og figur 175 viser effektflyten med en fallende statikk, og stasjon B bidrar nå med så lite reaktiv effekt at det ikke er fare for utfall av det ene aggregatet. Selv med en last som trekker 7 MW med $\cos \varphi = 0,7$ rett utenfor stasjonen trekkes det ikke mer enn 6,9 MVA, og det er en viss margin (14 %) mot 6-minuttersverdien på 8 MVA. Spenningen er også akseptabel. Ved å se på søylediagrammene i figur 154 og figur 155 synes det som om stasjon B fremdeles leverer mye reaktiv effekt, og at dette er effekt som utveksles mellom omformerne. Men likevel ikke mer effekt enn at faren for overlast og utfall av aggregatet er eliminert.



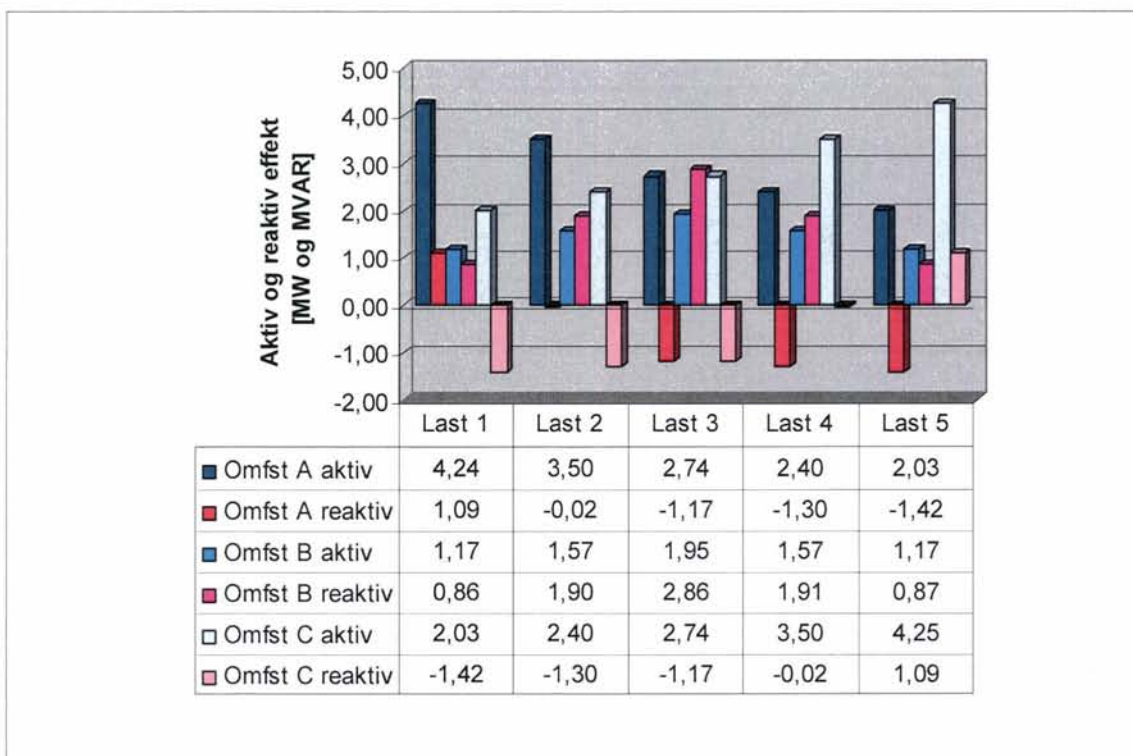
Figur 173 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Et stivt overliggende nett der stasjon B sakter med 18°, men stasjon B er stilt inn med en fallende statikk. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



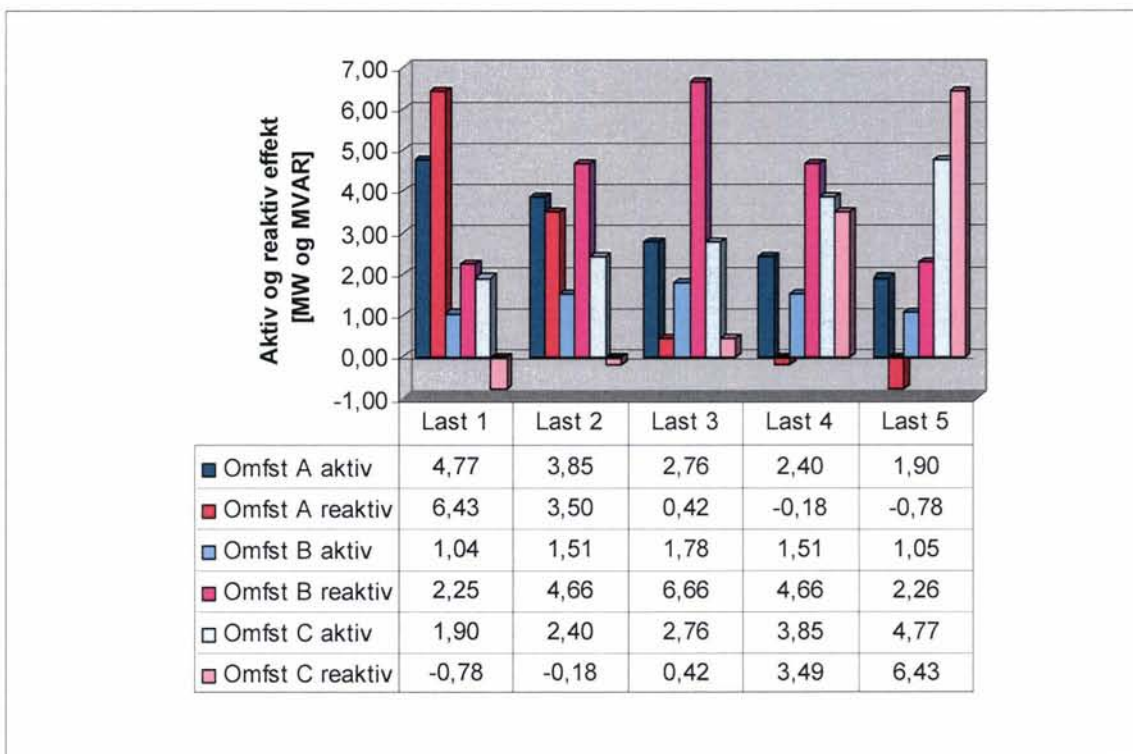
Figur 174 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er et stivt overliggende nett der stasjon B sakter med 18° har en fallende statikk. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 175 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er et stivt overliggende nett der stasjon B sacker med 18°, men er stilt ned til å bare gi 14,5 kV. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \phi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 176 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.

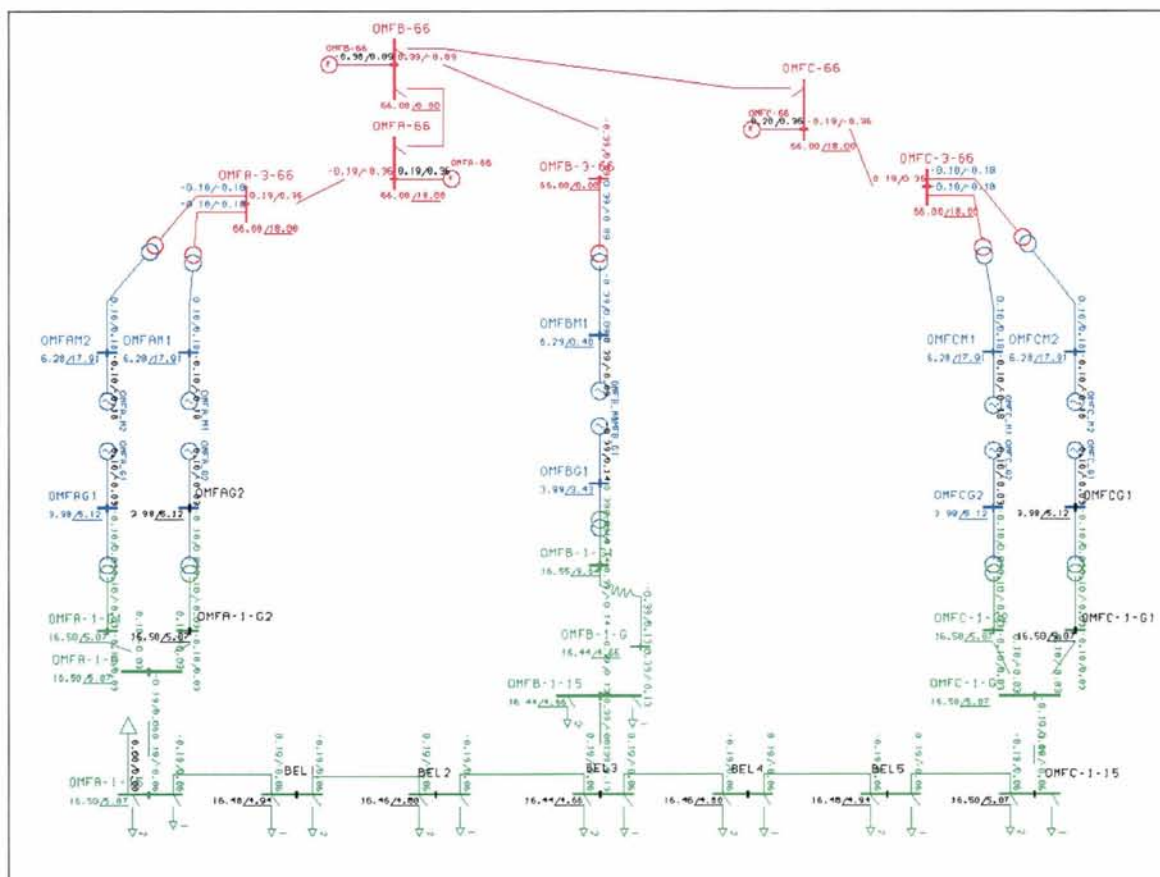


Figur 177 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

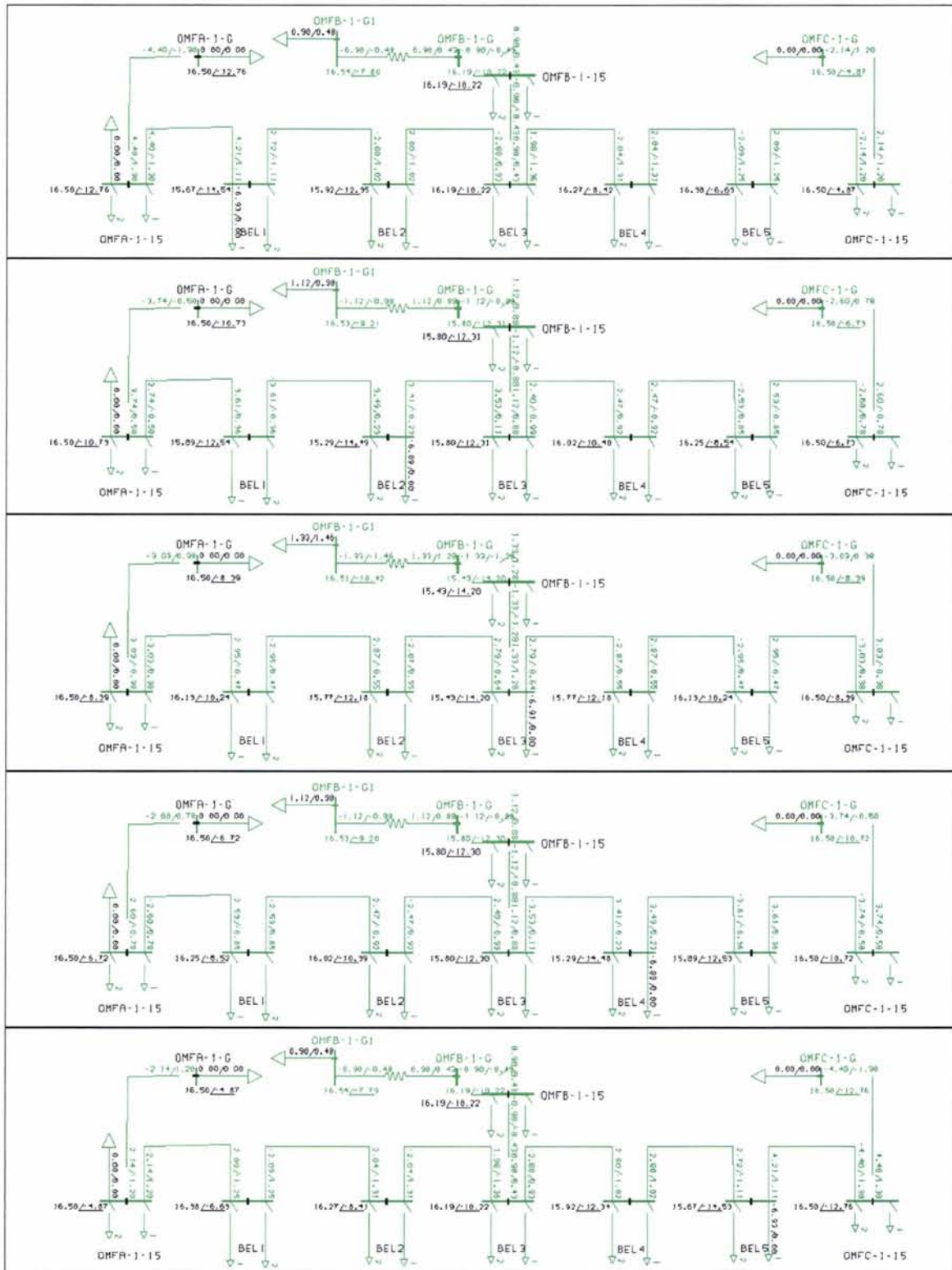
2.4.1.5 Forsøk med en reaktor for fasekompensering

Det er utført et arbeid ved Kungliga Tekniska Högskolan [6] for å se på forbedring av lastflyten i banestrømforsyning med store forskjeller i fasevinkler mellom stasjonene. Det foreslås at en reaktor med mange trinn settes inn, og at en setter inn en reaktor med stor ytelse i tomgang og reduserer etter hvert som belastningen øker. Med 18° fasevinkel etter nabostasjonene og en liten last trengs det en reaktor på svært mange ohm i stasjon B. Selv for en last på 3,5 MW trengs det 25Ω for å kompensere for fasevinkelen, og 7 MW krever $12,6 \Omega$. Her testes samme reaktorstørrelse i tomgang og med belastning, og det velges en verdi på $12,6 \Omega$.

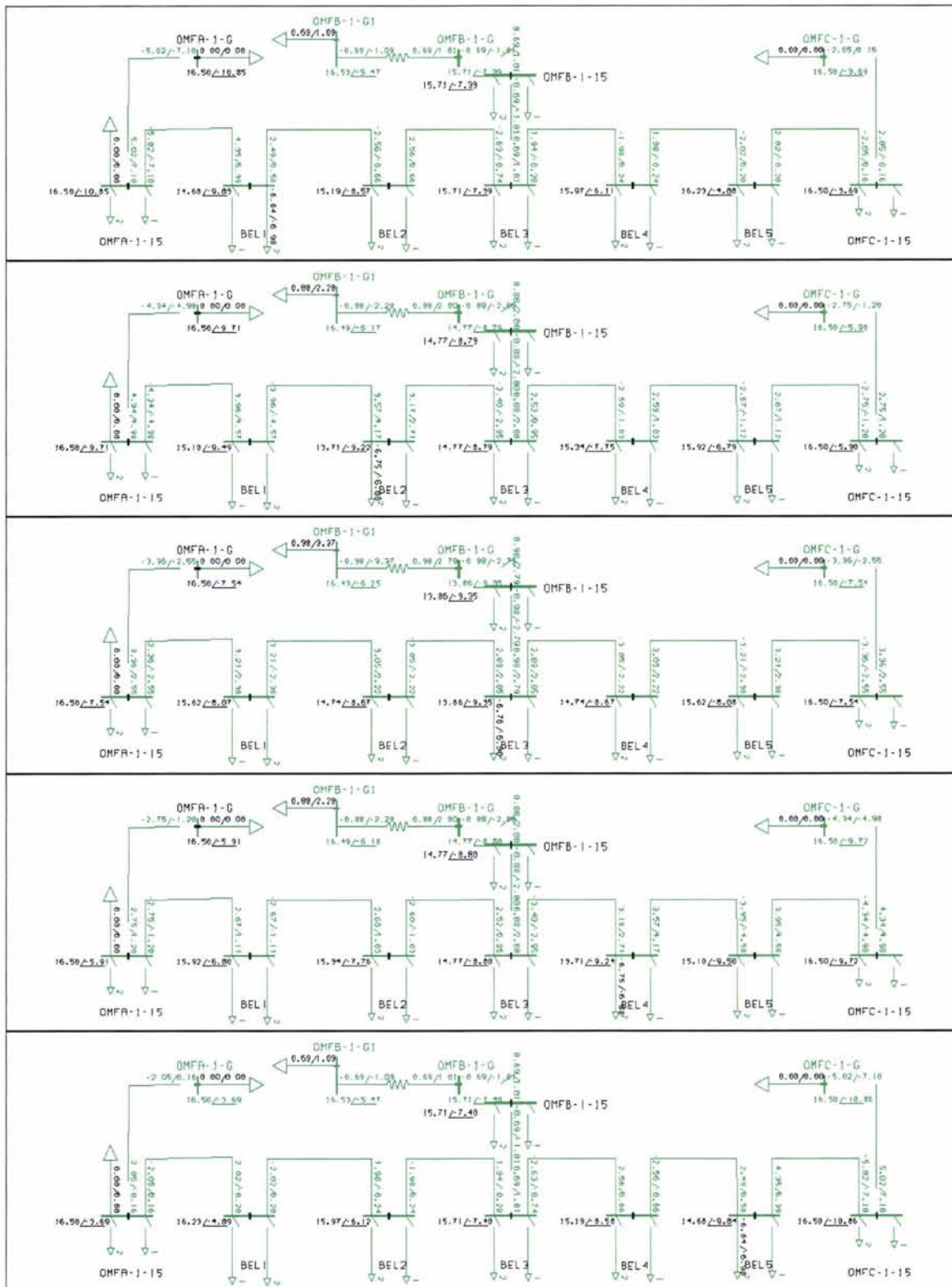
Med denne reaktoren og i tomgang viser figur 178 en stor effektflyt fra omformer A og C til B, og skulle en helt ha hindret denne effektflyten, måtte reaktoren ha vært mye større. Figur 179 og figur 180 viser effektflyten når lasten forflyttes mellom de fem posisjonene, og det er nå mye mindre reaktiv effekt som leveres fra omformer B. Stasjon B bidrar nokså jevnt med å produsere reaktiv effekt, men i tilfellet med en fallende statikk leverte den mer aktiv effekt, se avsnitt 2.4.1.4. Imidlertid kan forholdene både ved tomgang og forskjellig belastningsgrad bli bedre ved optimalisering og automatisk trinnkobling for en stor reaktor med flere trinn.



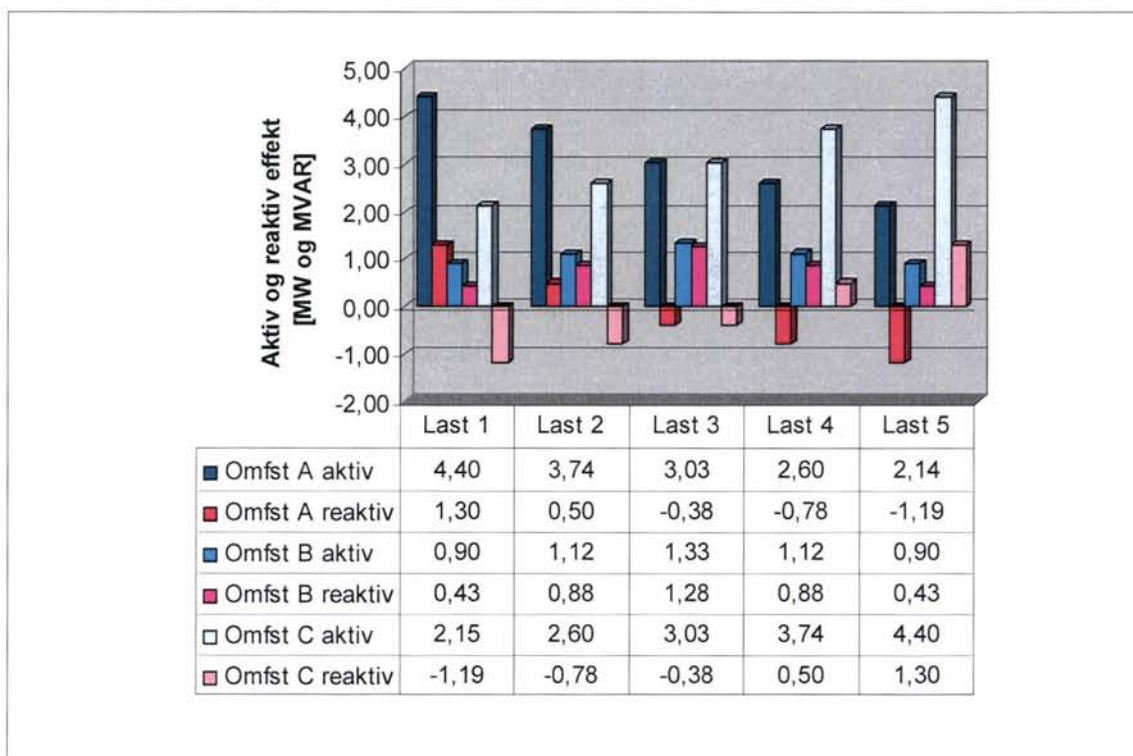
Figur 178 Spenningene og vinklene i tomgang på en 80 km lang matestrekning med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på $2 \times 5,8$ MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er et stivt overliggende nett der stasjon B sakter med 18° , men har en reaktor for fasekompensering. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorenes spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



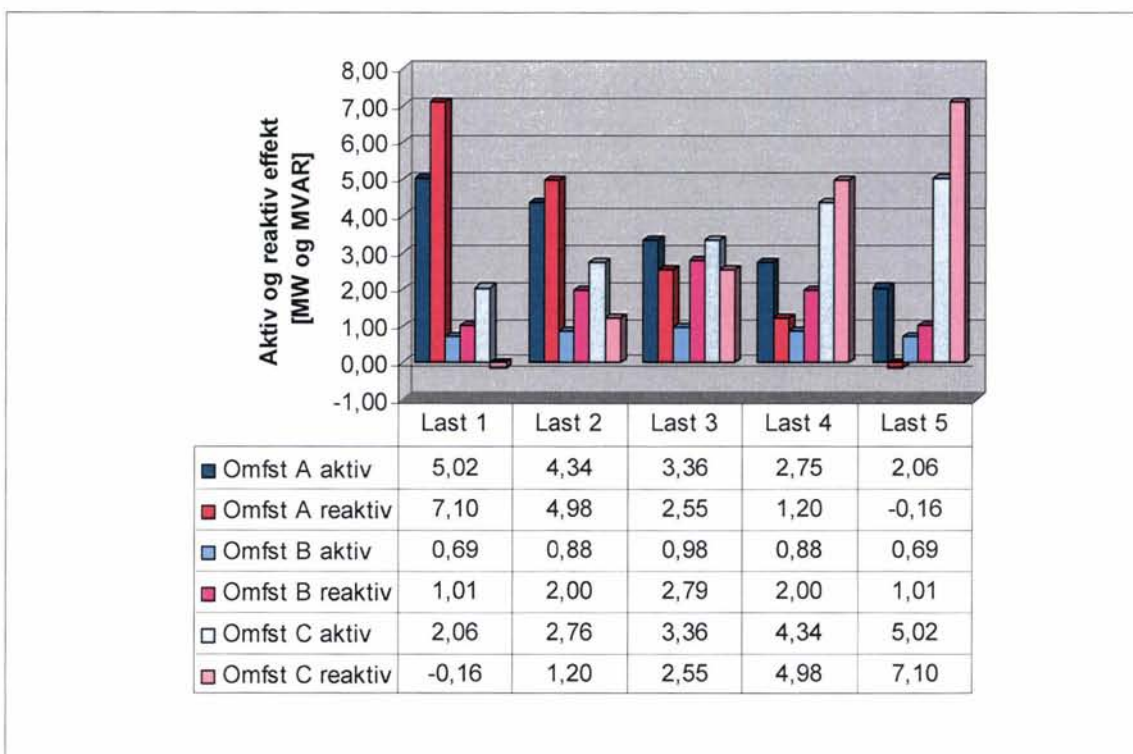
Figur 179 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er et stivt overliggende nett der stasjon B sakter med 18°, men har en reaktor for fasekompensering. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 180 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med tre omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 2 x 5,8 MW i stasjon A og C og med ett aggregat på 5,8 MVA i stasjon B. Det er et stivt overliggende nett der stasjon B sakter med 18°, men har en reaktor for fasekompensering. Det er 40 km mellom hver av stasjonene. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 181 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



Figur 182 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og fortegn er negative opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

2.4.2 Forsøk med avbøtende tiltak for AT-system, omformerstasjoner i avstander på 120 km og med store relative faseforskjeller

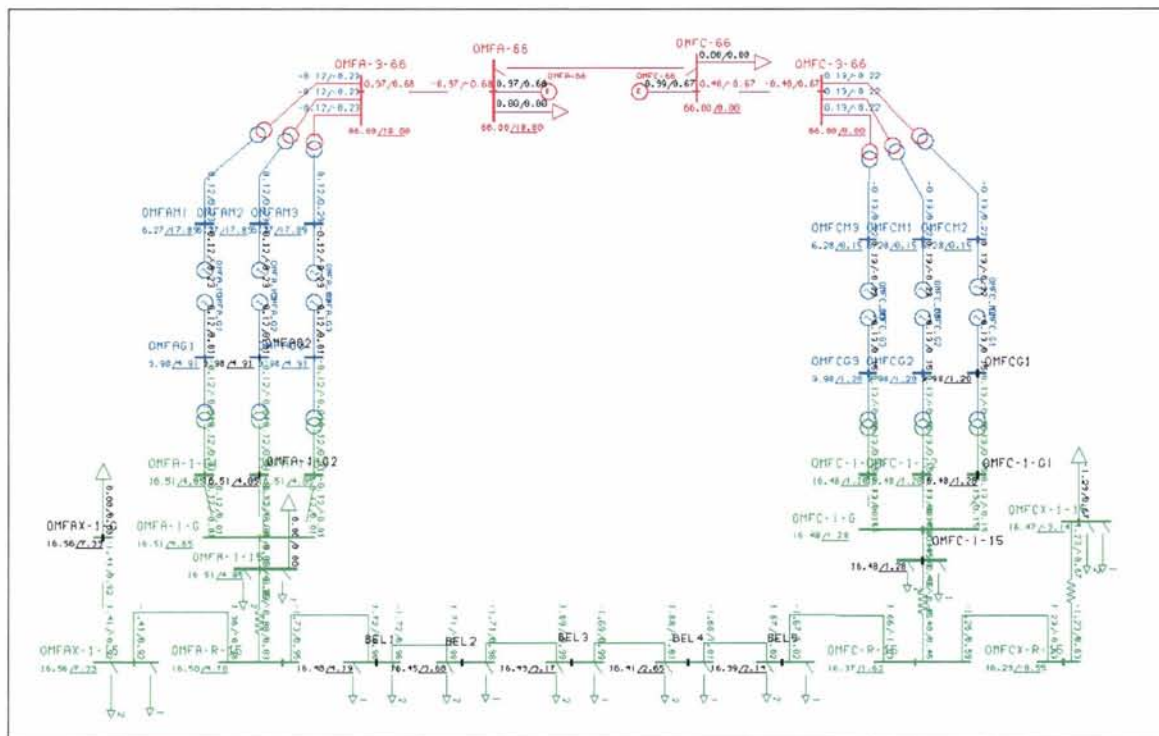
2.4.2.1 Forsøk med reaktorer for fasekompensering

Forskjellige fasevinkler i overliggende nett kan som forklart i avsnitt 2.4.1.5 kompenseres med reaktorer. Med ulike fasevinkler mellom alle omformerstasjonene kan den stasjonen som ligger lengst frem, være uten reaktor, og så settes det inn stadig større reaktor dess større fasevinkelen blir. Det sier seg selv at med mange stasjoner etter hverandre og med store forskjeller i fasevinkel, må reaktorene bli større og større, og da kan det gå på bekostning av spenningen. Det vil si at reaktoren blir så stor at spenningsfallet over den fører til lav spenning ut på kontaktledningsnettet. Imidlertid er det mulig at noen av stasjonene utstyres med en seriekondensator istedenfor en reaktor. Dette kan medføre omfattende tiltak og en kompleks optimalisering.

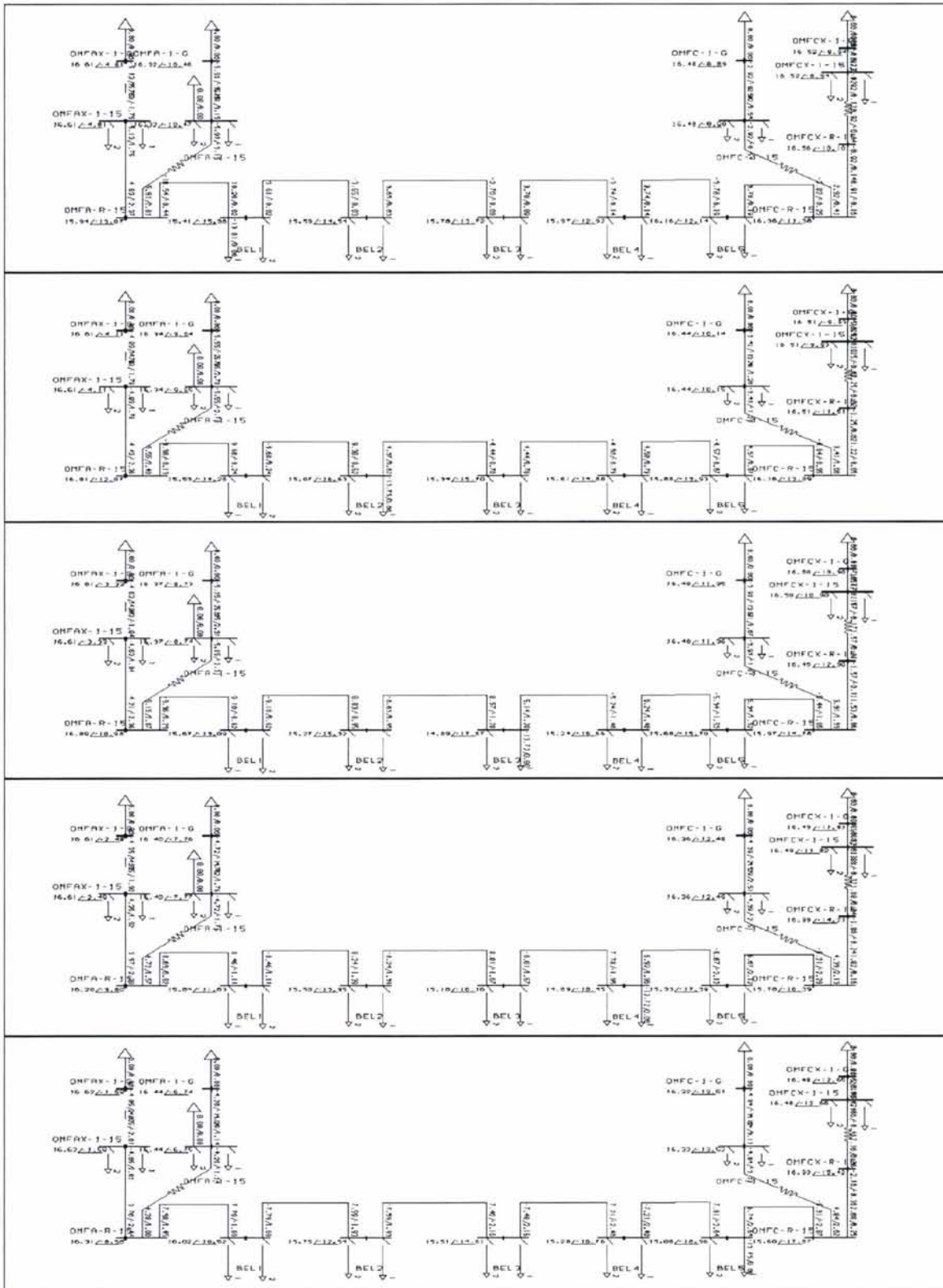
Her forutsettes de samme fasevinklene og ellers like forhold som i avsnitt 2.3.1.8, med fasevinkel -36° for stasjon XA, -18° for stasjon A, 0° for stasjon C og 18° for stasjon CX. Det er en fallende statikk for omformerstasjonene.

Figur 183 viser lastflyten når det er satt inn reaktor som gir 2Ω ved utgangen på omformerstasjon A, 4Ω ved C og 6Ω ved CX. I tomgang må reaktorene være svært mye større enn dette for å begrense tomgangseffekten til null. Tilstanden i tomgang er ikke undersøkt, men det krever reaktorer med mange trinn og stor ytelse. Likeledes kreves det automatikk for å tilpasse ytelsen under belastning.

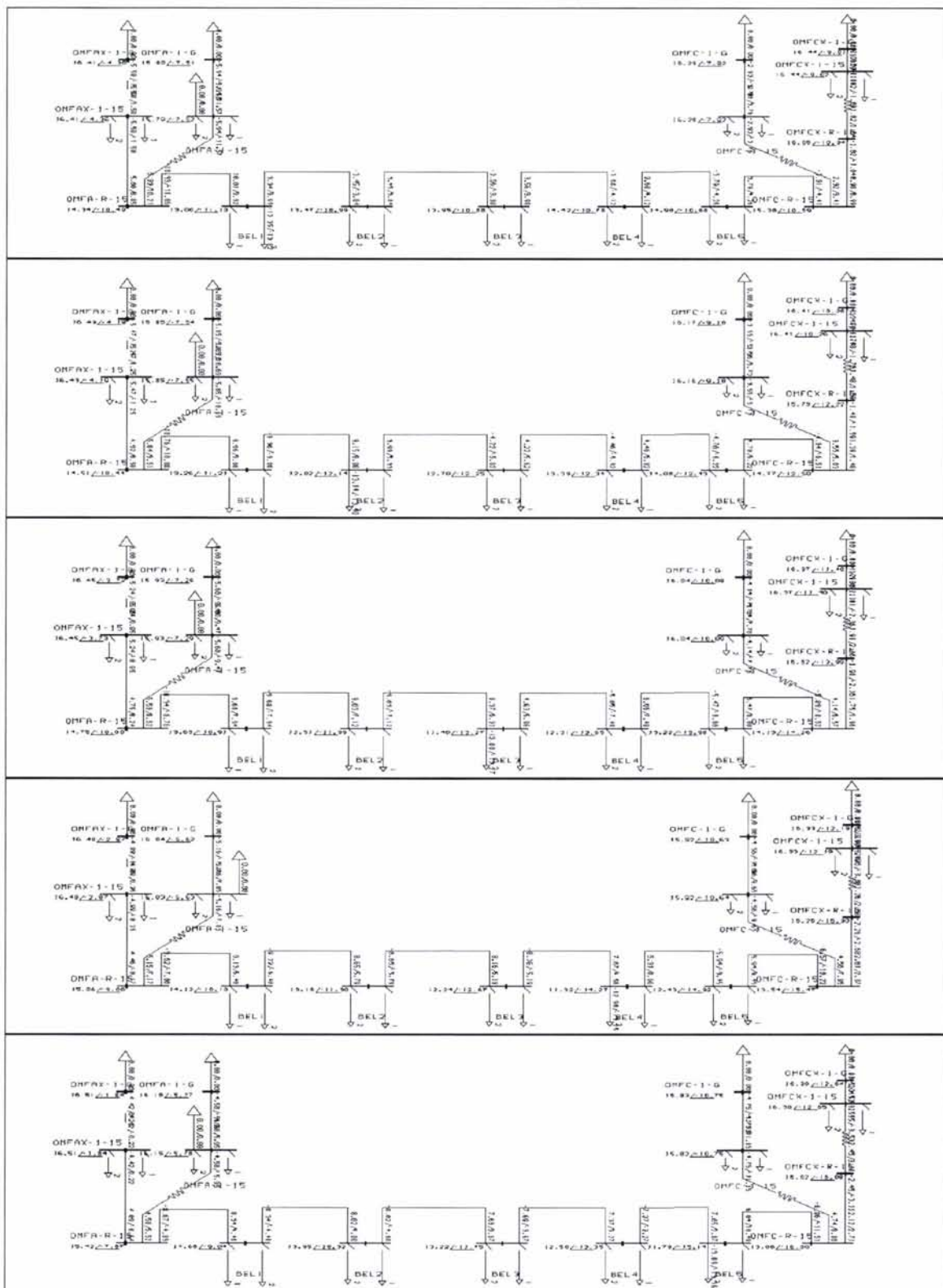
Figur 184 og figur 185 viser lastflyten når belastningen flyttes bortover. Det blir en jevnere lastflyt siden stasjon CX leverer mer effekt, men stasjon C bidrar mindre nå enn i tilfellet uten reaktorer, se avsnitt 2.3.1.8. Det synes som om reaktorene har en gunstig effekt, men at det ikke er helt optimalt. Et mer tilpasset valg av reaktorstørrelser kan utvilsomt forbedre forholdene ytterligere. Figur 186 og figur 187 viser søylediagrammene for lastfordelingen som forenkler sammenligningen til andre forsøk.



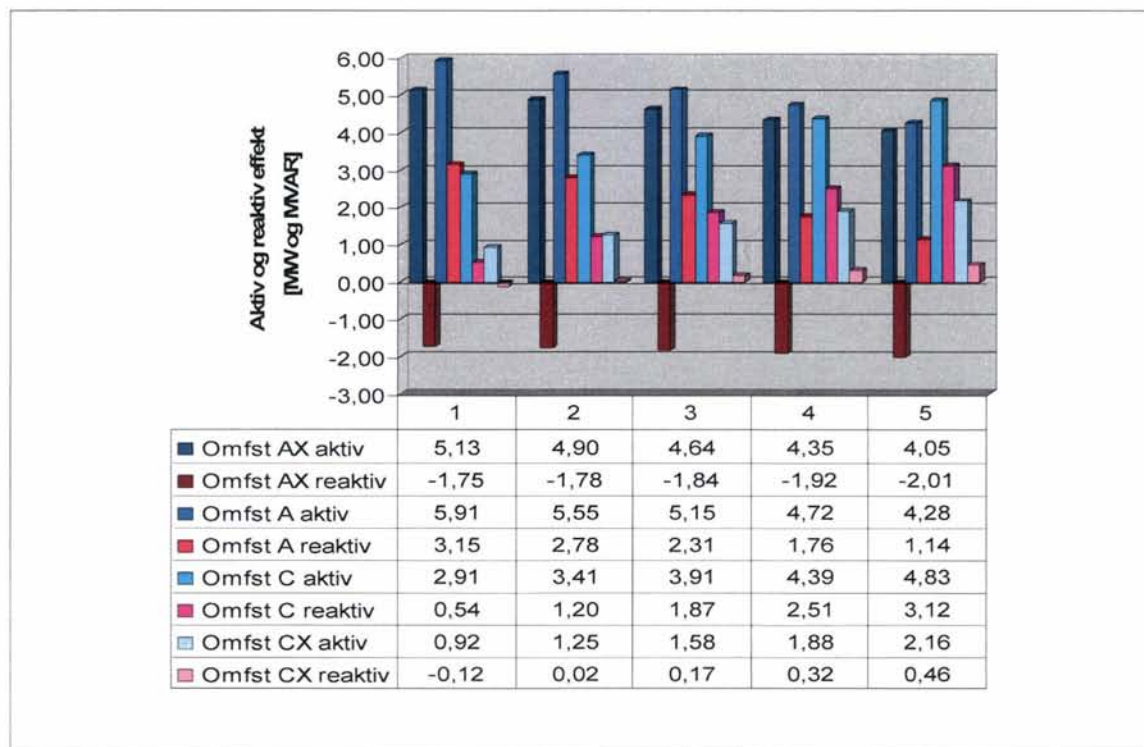
Figur 183 Spenningene og vinklene i tomgang for tilfellet med AT-system og matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Forskjellene mellom fasevinkelen i det overliggende nettet for hver omformer er 18° , der alle stasjoner unntatt A har reaktorer for fasekompensering. Det er benyttet en last for hver omformerstasjon med referanse for motorens spenningsregulator med effekt 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ samtidig som motorene skal trekke 0 MVar hver.



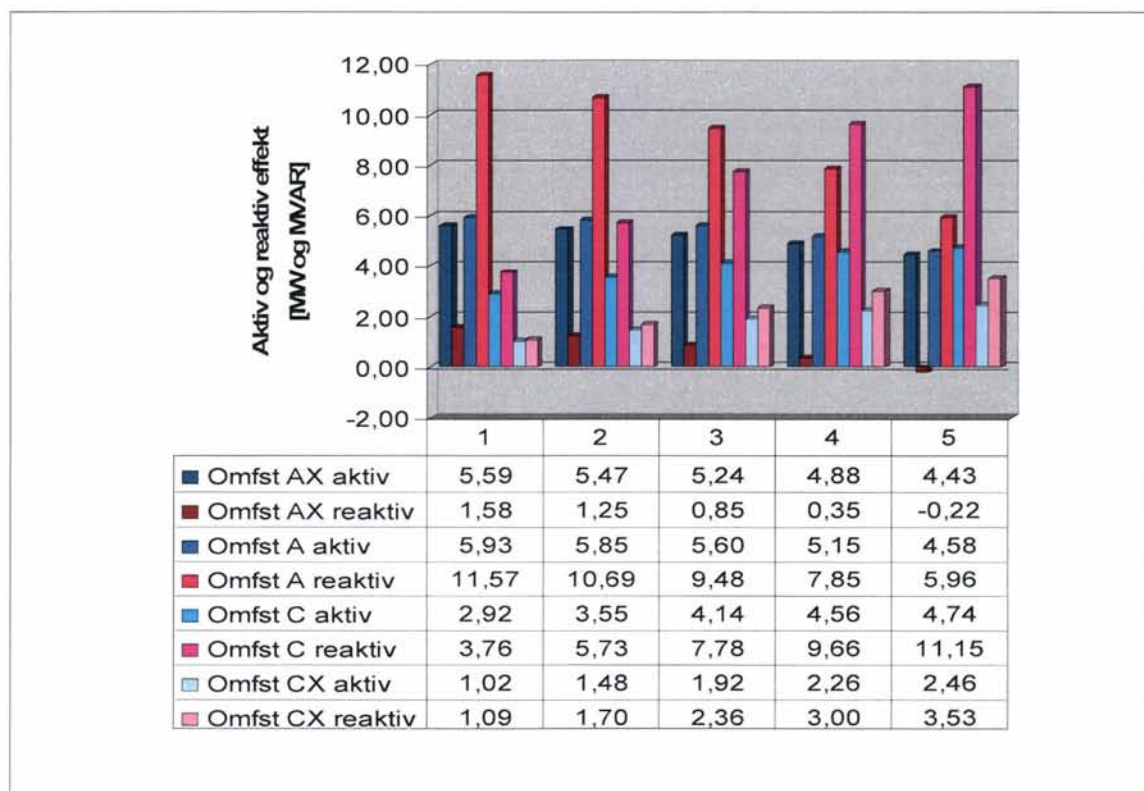
Figur 184 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Forskjellene mellom fasevinkelen i det overliggende nettet for hver omformer er 18°, der alle stasjoner unntatt A har reaktorer for fasekompensering. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \phi = 1,0$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 185 Grafisk fremstilling av lastflyten for tilfellet med AT-system og matestrekning med nabostasjoner og til sammen fire omformerstasjoner med roterende omformeraggregat på 3 x 5,8 MW. Forskjellene mellom fasevinkelen i det overliggende nettet for hver omformer er 18°, der alle stasjoner unntatt A har reaktorer for fasekompensering. Belastningen flyttes mellom fem posisjoner (BEL1...BEL5 og mellom stasjonene A og C) og er på 7 MW $\cos \varphi = 0,7$ med en faktor for spenningsavhengighet på 0,2.



Figur 186 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



Figur 187 Søylediagram som viser aktiv og reaktiv effekt levert fra omformerstasjon AX, A, C og CX. Positive fortegn tilsvarer levert effekt og negative fortegn er opptatt effekt. Belasting på 7 MW og $\cos \varphi = 0,7$.

3 KONKRETE UNDERSØKELSER VEDRØRENDE LEIVOLL OMFORMERSTASJON

Leivoll omformerstasjon har siden den ble igangsatt hatt problemer med å levere ønsket effekt til togene, dessuten leverer den påfallende mye aktiv effekt til det overliggende trefasenettet. På kontaktledningen overføres det aktiv effekt fra Krossen og Sira omformerstasjoner samtidig som disse får reaktiv effekt fra Leivoll. Det har vært antatt og målt⁵ at Leivoll har fasevinkler fra det overliggende nettet som ligger etter Krossen og Sira. Dette i tillegg til de korte avstandene mellom omformerstasjonene er sett på som årsak til denne effektutvekslingen. I et brev av 2.5.2003 med saksreferanse 03/5502 SBE 762 skriver Bane Energi til Agder Energinett AS at dette må skyldes forhold i deres nett som det må iverksettes tiltak for å avbøte.

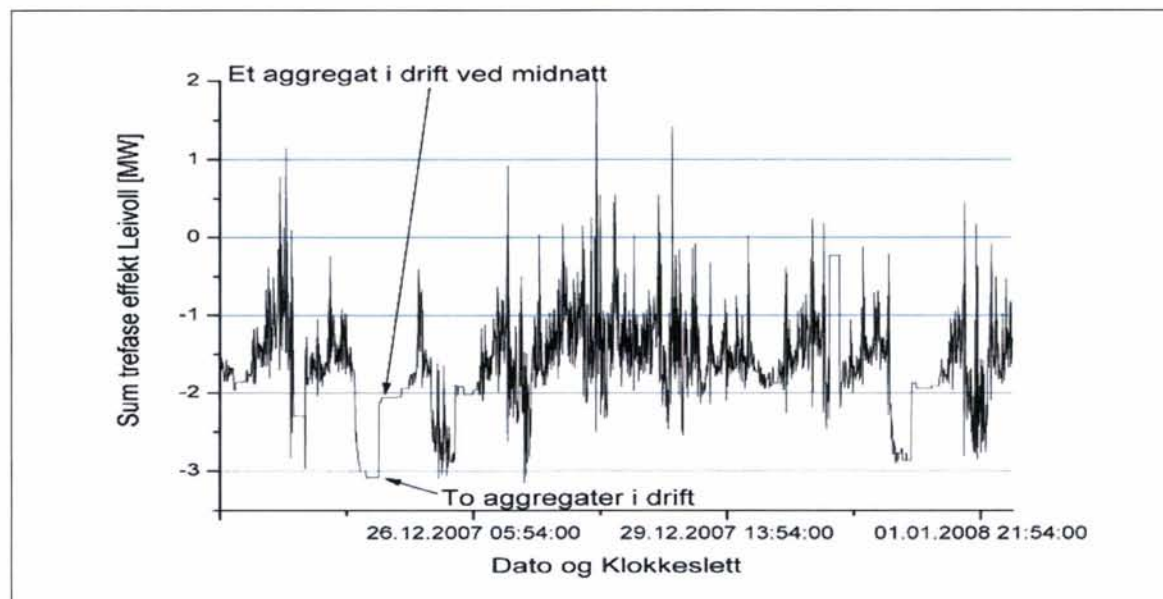
3.1 Målinger for Leivoll omformerstasjon

Det er i overnevnte brev til Agder Energi AS referert til avlesninger av energimåler som viser effektflyten fra omformerstasjonen til det overliggende nettet. Det er ukjent om andre målinger for denne effektflyten er utført og dokumentert, og det ble derfor diskutert enkle måter å måle effekten på. Målinger er utført for Leivoll omformerstasjon mellom den 22.12.2007 til den 2.1.2008 via Bane Energi sitt sentrale målesystem som gir 6-minutters middelerverdi. På grunn av liten trafikk i julen, er dette en spesielt interessant periode for måling fordi det ellers knapt er perioder uten trafikk. Figur 188 viser opptatt effekt til Leivoll, og det er bare i korte perioder at omformereren tar effekt fra det overliggende nettet. Med to aggregater inne og tomgang som første del av den lengre perioden med tomgang viser, er det ca. 3,1 MW som leveres. Senere med ett aggregat leveres det 2 MW til trefasenettet.

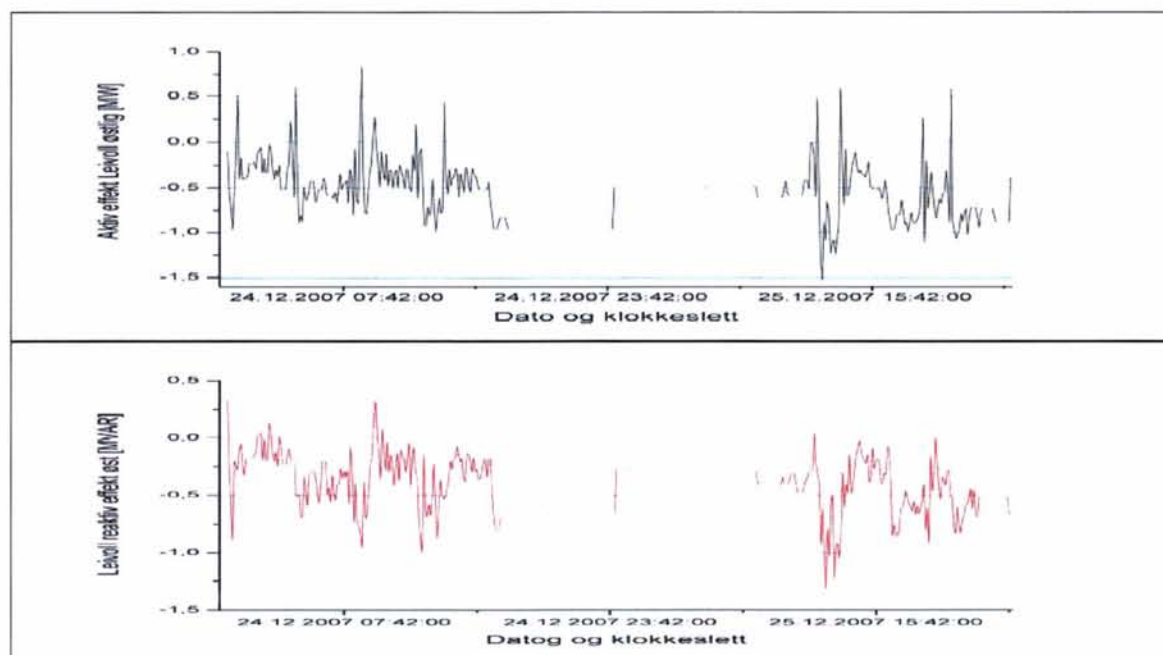
I figur 189 og figur 190 er aktiv og reaktiv effekt i henholdsvis østlig og vestlig retning undersøkt for 48 timer fra den 24. og 25. desember. I tomgangsperioden med to aggregater inne mottar Leivoll ca. 1 MW fra øst (fra Krossen) og leverer ca. 0,7 MVA_r. Samtidig mottar den fra vest (fra Sira) 1,3 MW og leverer ut 1,3 MVA_r. Med denne flyten av (og retningen på) effekten tyder det på at Leivoll i denne tiden har en fasevinkel som **ligger etter** nabostasjonene. Se for eksempel avsnitt 2.2.2.7, der det ble undersøkt med en omformerstasjon som ligger 18° etter på trefasesiden. Siden undersøkelsen i 2.2.2.7 viste en langt mindre aktiv og reaktiv effektflyt i tomgang på henholdsvis 0,34 MW og 0,33 MVA_r i hver retning, er det langt igjen til den registrerte effektutvekslingen over Leivoll.

Enten må det være større fasevinkler i det overliggende nettet enn normal erfaring tilsier, eller så må det være noe som er svært uvanlig med Leivoll omformerstasjon. Grundige undersøkelser av nettet over Krossen, Leivoll og Sira må gjøres for å se om det er så store forskjeller mellom fasevinkler i det overliggende nettet.

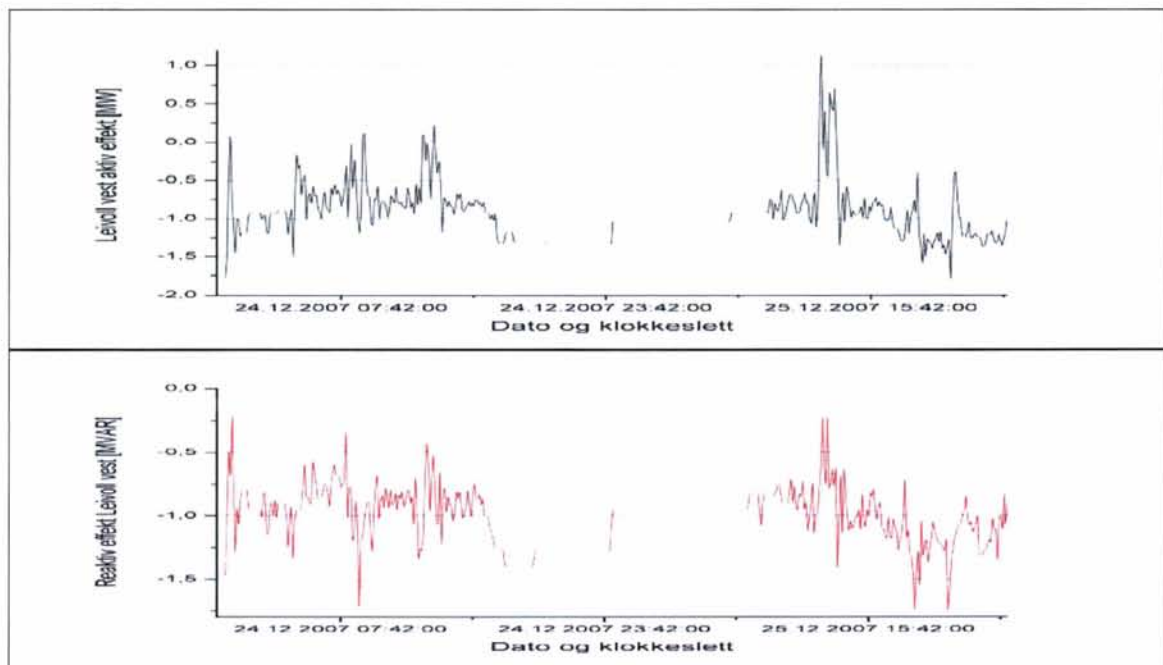
⁵ Det er i brevet som det henvises til, gjort målinger på enfasesiden, men det er ikke lyktes å finne dokumentasjon for disse målingene.



Figur 188 Aktiv trefaseeffekt 6-minutters middelværdi til Leivoll omformerstasjon målt i julen 2007 (22.12.2007 til den 2.1.2008). Negative verdier betyr at effekten er levert til trefasenettet. Lengre perioder med konstant effekt er perioder uten toggang der banestrømforsyningen går i tomgang, og forholdene blir enkle å studere. Det er perioder med både ett og to aggregater (2 x 5,8 MVA) i drift. Måleverdiene har dessverre en feilmargen på minst +/- 1 MW.



Figur 189 Aktiv (sort) og reaktiv (rød) 6-minutters middelværdi effekt fra Leivoll omformerstasjon i vestlig retning målt hele julaften og 1. juledag. Negative verdier betyr at den aktive effekten er levert til omformerer fra kontaktledningen og negative verdier for reaktiv effekt betyr at effekten er levert ut. Lengre perioder med konstant effekt er perioder uten toggang der banestrømforsyningen går i tomgang, her skjer dette ved julekvelden og påfølgende natt, først med to aggregater og fra midnatt med ett. Måleverdiene har en feilmargen på minst +/- 1 MW.



Figur 190 Aktiv (sort) og reaktiv (rød) 6-minutters middelerdi effekt fra Leivoll omformerstasjon i østlig retning målt hele julaften og 1. juledag. Negative verdier betyr at den aktive effekten er levert til omformeren til kontaktledningen og negative verdier for reaktiv effekt betyr at effekten er levert ut. Lengre perioder med konstant effekt er perioder uten toggang der banestrømforsyningen går i tomgang, her skjer dette ved julekvelden og påfølgende natt, først med to aggregater og fra midnatt med ett. Måleverdiene har en feilmargen på minst +/- 1 MW.

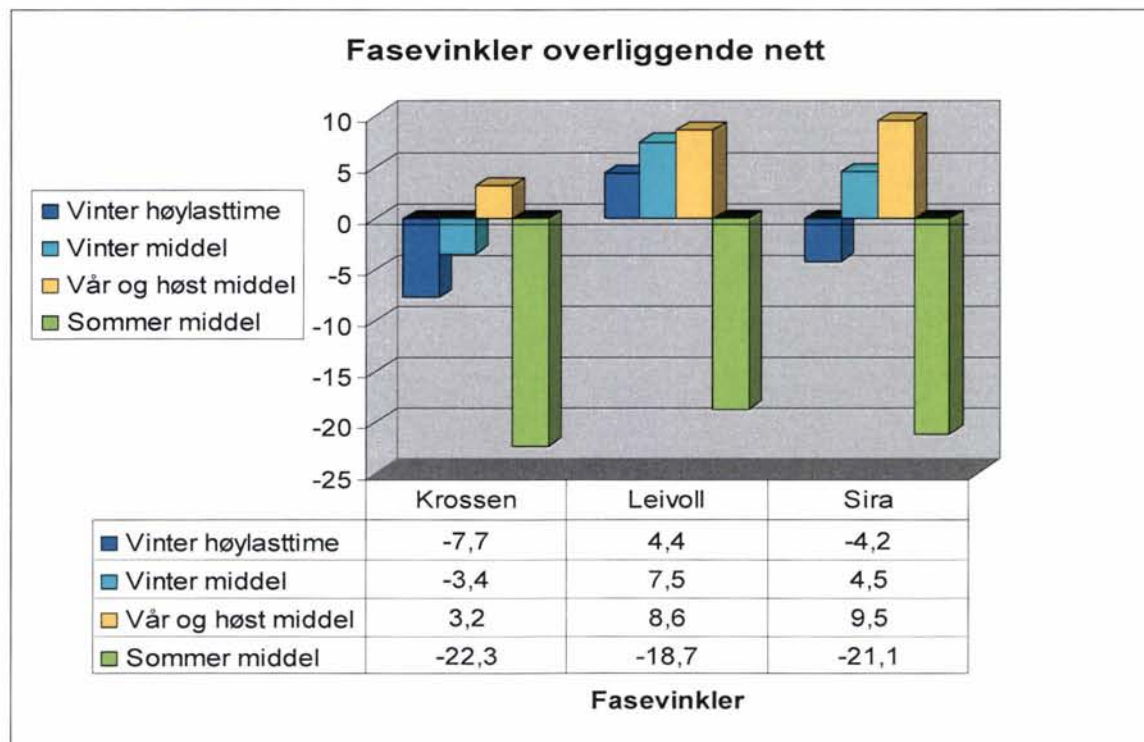
3.2 Fasevinkler for overliggende regional- og stamnett

Mye arbeid er lagt ned for å få en oppdatert og nøyaktig beskrivelse av det overliggende nettet over omformerstasjonene Nelaug, Krossen, Leivoll og Sira. Også data for Nordagutu er delvis bekreftet av netteier, men for Kjelland og Ganddal er den tidligere informasjonen ikke verifisert. Grunnen til at en kun har innhentet informasjon for Nelaug, Krossen, Leivoll og Sira er at disse får energi fra den samme netteieren, de har størst betydning for lastflyten. Dessuten ble informasjonsinnhentingene svært arbeidskrevende.

Arbeid er utført for å lage modeller for det overliggende nettet som inkluderer årstidsvariasjoner. Det er kraftproduksjon og forbruk for husholdningene som varierer mye over året, og som får en direkte betydning for fasevinklene. Forholdene i stamnettet har også betydning, og spesielt er det forholdene rundt kraftproduksjon og transitt på kablene til kontinentet som får betydning. Disse forhold er diskutert med Agder Energiverk, men det kan være store variasjoner fra ett år til et annet. Siden det er forholdene over lange perioder som har interesse, er det ikke tatt hensyn til revisjoner og utkoblinger av linjer og transformatorer, eller fellesferie og nedkjøring av industri som vanligvis varer noen uker.

Figur 191 viser elektriske grader for de tre omformerstasjonene ved inntaket (primærsiden av motortransformatorene). De relative vinkelforskjellene er størst mellom Leivoll og Krossen for "vinter høylasttime". Denne perioden er ikke nødvendigvis en time, men kan være alt fra noen timer til noen dager. De øvrige periodene er forutsatt å være representative middelerdi med mange måneders varighet. I appendiks 2 er forholdene rundt effektflyten og belastningene i det overliggende nettet forklart mer utfyllende.

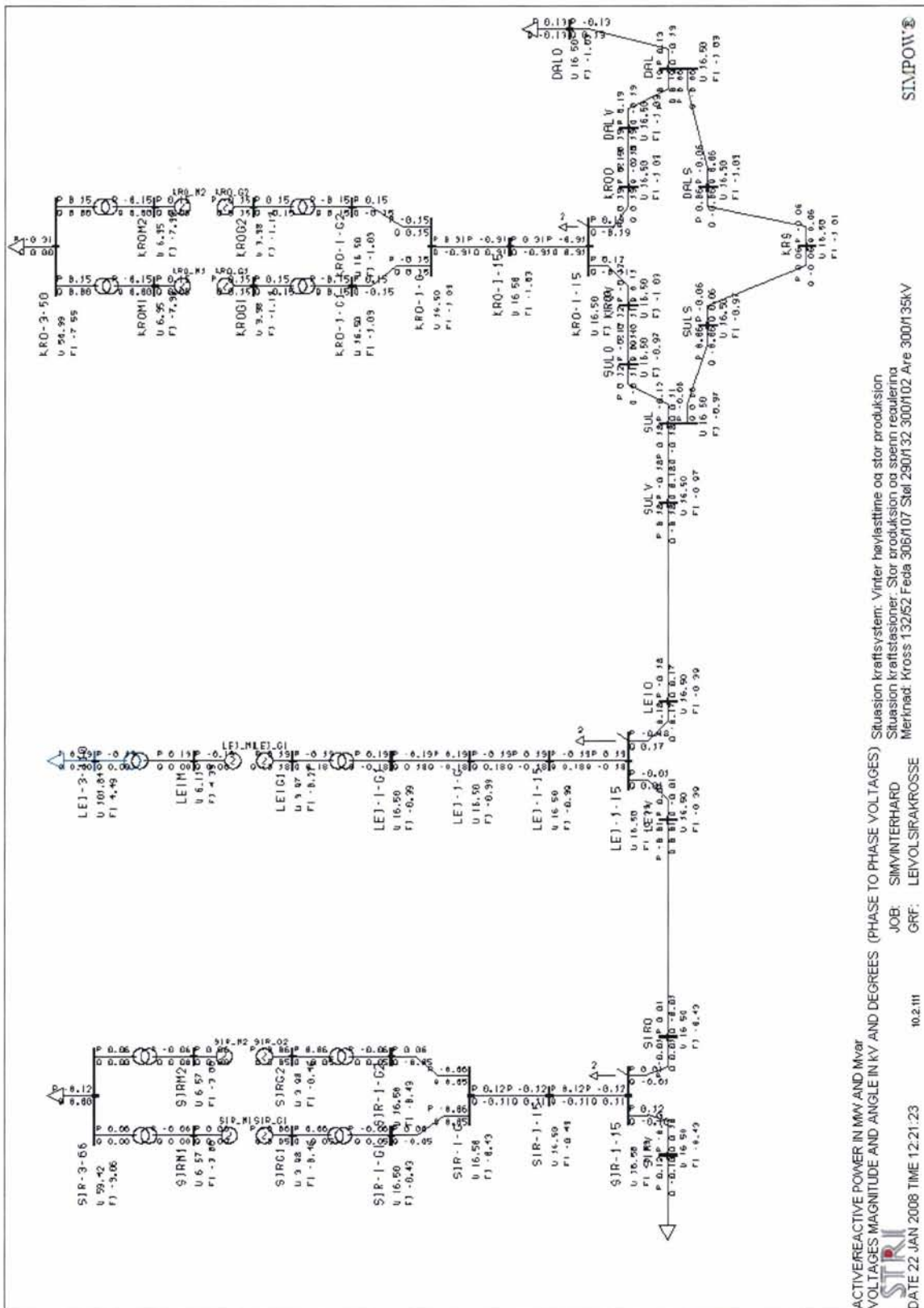
Fasevinkelen til Leivoll ligger **foran** Krossen og Sira for alle tider av året. Forskjellen er ikke særlig stor: den største forskjellen mot Krossen er $5,4^\circ$ om vår og høst, og den største forskjellen mot Sira er ved høylasttime om vinteren med $8,6^\circ$. Dette strider svært mye imot observasjonene for Leivoll omformerstasjon, og mye arbeid er lagt ned på å undersøke om modellen for det overliggende nettet er korrekt.



Figur 191 Fasevinkler referert til Flesaker transformatorstasjon sin 300 kV-samleskinne for Krossen, Leivoll og Sira. "Vinter høylasttime" representerer høy produksjon og forbruk. "Vinter" forutsetter at belastningene for alminnelig forbruk er redusert til 70 %. Vår og høst representerer meget høy produksjon (vår- og høstflom) og alminnelig forbruk redusert til 35 %. "Sommer" gjelder for lav produksjon og alminnelig forbruk redusert til 20 % av høylasttiden.

3.2.1 Forsøk med effektflyt mellom Krossen, Leivoll og Sira for fasevinkler som vinter høylasttime

Med de fasevinkler som ga de største forskjellene med Krossen, Leivoll og Sira, forsøkes det å lage en lastflyt for tomgang for å se hvor stor effektoverføring som skjer med modellen en har for Sørlandsbanen. Hele nettet fra Stavanger til Nordagutu er med, men i figur 192 er bare matestrekingene mellom Krossen og Sira inkludert når det er "Vinter høylasttime". Med "Vinter høylasttime" forventer en de verst tenkelige forhold. Det er knapt effekt mellom Leivoll og Sira, mens det går 180 kW ut fra Leivoll til Krossen og 170 kVAR fra Krossen til Leivoll. Dette er mye mindre effekt enn det som er målt, og det er da ting som tyder på at noe er uvanlig i denne omformerstasjonen.



ACTIVE REACTIVE POWER IN MW AND MVAR
 VOLTAGES MAGNITUDE AND ANGLE IN KV AND DEGREES (PHASE TO PHASE VOLTAGES)
 SITUASJON kraftsystem: Vinter høylasttime og stor produksjon
 SITUASJON kraftstasjoner: Stor produksjon og sønn reduksjon
 MERKNAD: Kross 132/52 Feda 306/107 Støl 250/132 300/102 Are 300/135KV
 JOB: SIMYINTERHARD
 GRF: LEIVOLSIRAKROSSE
 10.2.111
 DATE 22 JAN 2008 TIME 12:21:23
 SIMPOW

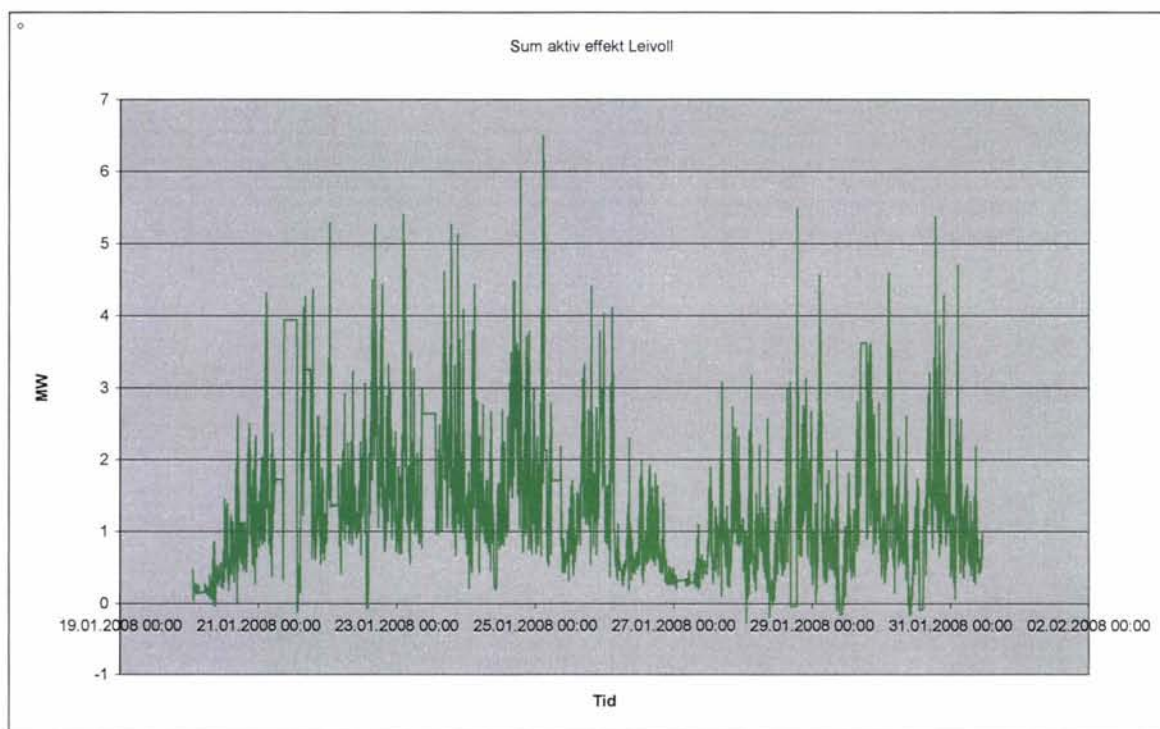
Figur 192 Spenningene og vinklene i tomgang for Krossen, Leivoll og Sira omformerstasjoner for fasevinkler i det overliggende nettet som for "vinter høylasttime". Matestrekningene videre fra Sira og Krossen er med i modellen, men ikke inkludert i tegningen.

3.2.2 Fullskala forsøk i Leivoll omformerstasjon

Med den store forskjellen mellom fasevinkler og effektflyt for stiliserte simuleringer, modellen for det overliggende nettet og målingene ble det antatt at noe måtte være svært galt i Leivoll omformerstasjon. Målingene tyder på at Leivoll har en fasevinkel som må ligge etter de andre, og det med en meget stor vinkel. En fikk mistanke om at linjen inn til Leivoll har fasevinkler som ved en feiltagelse er i størrelsesorden opp mot -60° til -120° eller mer forskyvning i tillegg til bidraget i fasevinkel fra belastningen. Dette kan være feil koblingsgruppe i en transformator i det overliggende nettet, i omformerens egen transformator eller en utilsiktet revolvering i det overliggende nettet.

Det ble derfor besluttet å undersøke dette med en fullskalatest. Samson Yared og Øyvind Stensby reiste ned til Leivoll og sammen med maskinsjefen ble kablene koblet om mellom transformatoren og motorene den 14. januar 2008. Denne koblingen gir en fasedreining på $+120^\circ$, da en tenkte at dette var det mest sannsynlige. Imidlertid viste det seg at ved innfasingen ville ikke motoren synkronisere mot nettet på annet en såkalt "unormal polaritet", dette gir en effektiv fasedreining på -60° . Da viste det seg at Leivoll omformerstasjon oppførte seg normalt, og at effektretningen kun går fra det overliggende nettet og inn til motorene. Vedlegg 6 er et notat som forklarer detaljer rundt dette forsøket.

En har ikke etter dette gjort ytterligere undersøkelser, men en antar at det er feilkoblinger internt i trefasetransformatoren. Figur 193 viser gjennomsnittlige effektmålingene i 6-minutters intervaller etter at det ble byttet om på fasene. Effekten over disse døgnene i januar er positiv og i retning fra det overliggende nettet og inn til omformereren.



Figur 193 Målt effektopptak for det overliggende nettet til Leivoll omformerstasjon fra midnatt 19.01.2008 til midnatt 02.02.2008. Kurven viser gjennomsnittsverdier av aktiv effekt i 6-minutters intervaller. Periodene med helt vannrett utvikling i effektopptaket forklares med et problem i fjernstyringen av stasjonen slik at oppdaterte verdier ikke overføres til driftsentralen.

3.2.3 Forsøk med lastflyt mellom Ganddal, Kjelland, Leivoll og Nelaug samt Nordagutu med et fremtidig AT-system

Problem med stor effektflyt i tomgang i et fremtidig AT-system er tidligere identifisert, se [1] og [6], og i forsøkene i avsnitt 2.3 fikk en også bekreftet at med forskjellige fasevinkler i overliggende nettet blir effektoverføringene mellom omformerstasjonene betydelig. Det kan være interessant å undersøke dette for et reelt kraftsystem som i området ved Leivoll, men med i større utstrekning for å få med påvirkning av mellomliggende matestrekningene med et AT-system.

Figur 194 viser fasevinkler for samtlige av dagens omformerstasjoner. Også for Nordagutu, Kjelland og Ganddal omformerstasjoner er det lagt inn endringer i forbruk og produksjon i det overliggende kraftnettet, men dette bør verifiseres grundigere. Det en del forskjeller mellom stasjonene, og størst er forskjellen mellom vinter og sommer. De forskjellene på 3-4° er imidlertid ikke så mye i forhold til tidligere analyser i avsnitt 2.3, og det videre utgangspunktet er "sommer middel" og "vinter middel". "Vinter høylasttime" gir riktignok det største avviket, men denne perioden er svært kortvarig (timer eller dager) i forhold til det ønskede perspektivet på måneder.

Hele modellen for kraftsystemet på Sørlandet settes inn for omformerstasjonene Ganddal, Kjelland, Leivoll, Nelaug og Nordagutu, og impedansen for et AT-system settes inn for kontaktledningen mellom disse stasjonene. Dette tilsvarer alternativ A2 fra "Strekningsvise utbyggingsplaner - Sørlandsbanen", se [9]. Spenningsregulatorer med 4 % fallende statikk er benyttet, og det er aggregater på 3 x 5,8 MVA i samtlige stasjoner unntatt Kjelland med statiske aggregater på 3 x 7 MVA.

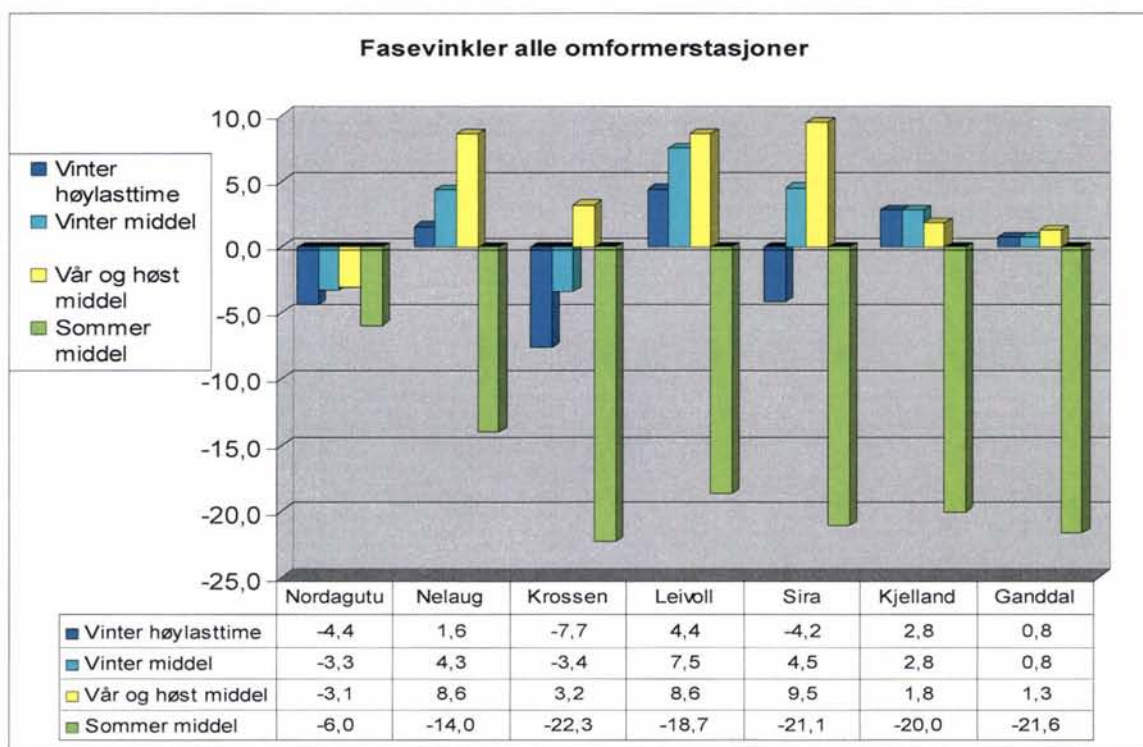
Figur 195 viser resultatet av lastflyten med situasjonen "vinter middel". Effektflyten er størst mellom Neslandsvatn og Nelaug med ca. 370 kW og 260 kVAr. På de andre strekningene er effektflyten under halvparten av dette. Av enlinjeskjemaet kan en ikke se forskjell for aktiv effekt innmatet og ut av kontaktledningen, og med det gjeldende antall desimaler betyr det tap under 10 kW på alle strekningene. Denne lastflyt gjelder med alle aggregater innkoblet. Figur 196 viser hvordan dette endrer seg når to av de tre roterende aggregatene i hver stasjon kobles ut (i Kjelland beholdes alle aggregatene inne). Nå er det bare 170 kW og 90 kVAr som flyter mellom Neslandsvatn og Nelaug. For de andre strekningene er effektflyten tilsvarende redusert.

Figur 197 viser effektflyten i tomgang med alle aggregater inne for "sommer middel", og figur 198 viser effektflyten når bare ett av de tre aggregatene er innkoblet i hver stasjon. Situasjonen er nå noe annerledes, og flere steder er det større effektoverføring enn for "vinter middel". Størst effekt går mellom Nelaug og Leivoll med 330 kW og 220 kVAr. Heller ikke nå ser dette ut til å skape tap over 10 kW på noen av strekningene.

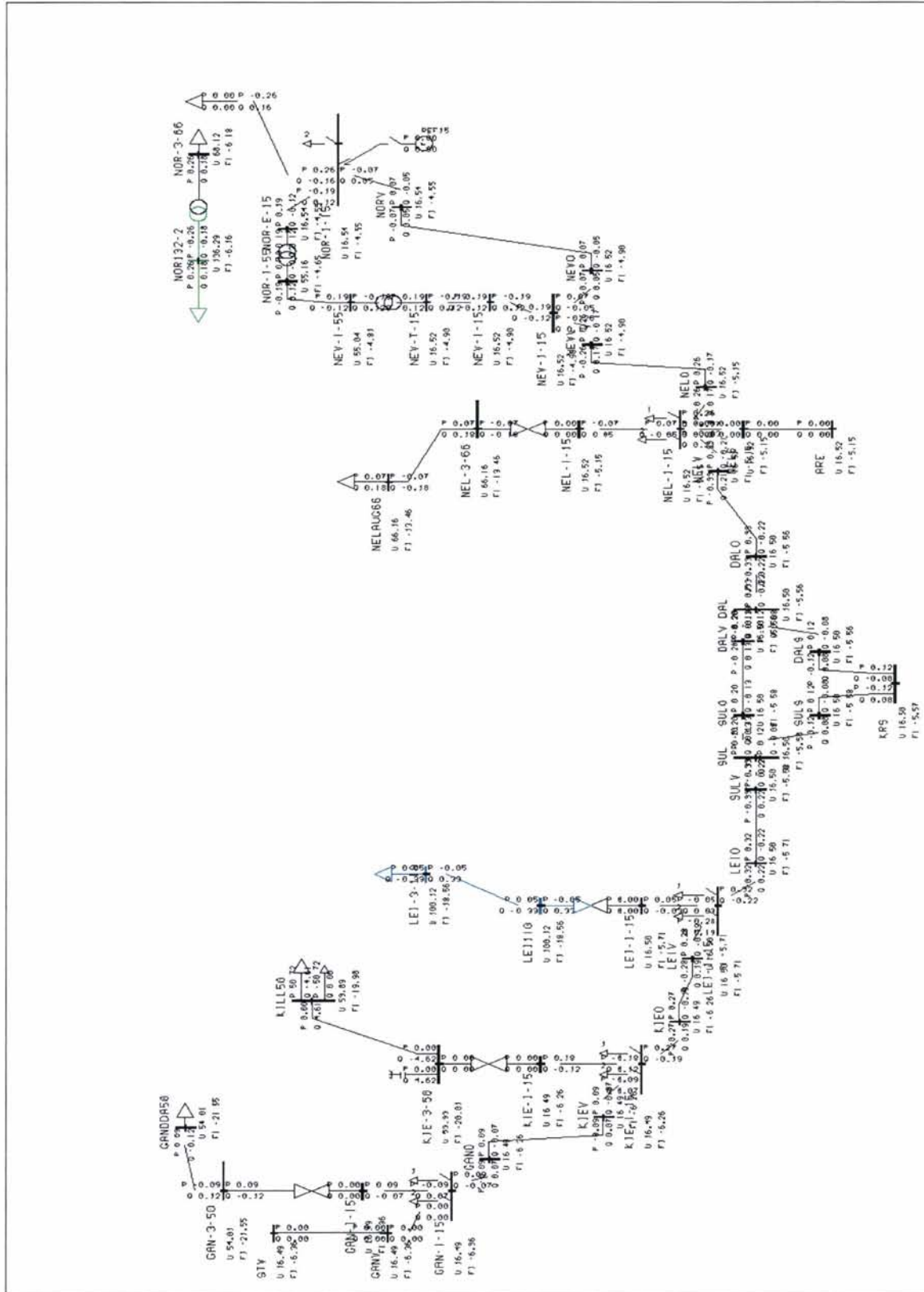
Med AT-system og stasjoner som planlagt for fremtiden kan effektflyten i tomgang kan være noen titalls kW til 170 kW om vinteren, eventuelt opp til 330 kW om sommeren, under det som Statnett og Agder Energiverk beskriver "normale situasjoner". Dette er det som kan forventes med den mest ugunstige situasjonen med dagens kontaktledningsanlegg, se avsnitt 3.2.1. Effektflyten i tomgang er selvfølgelig ikke gunstig, men ut fra denne undersøkelsen ser det ikke ut til å bli noe større problem enn med dagens banestromforsyning. Tapene i overføringen med AT-system blir ikke store, under 10 kW. Faktisk vil tomgangstapene for autotransformatorene bli betydelig større. For en hel matestrekning på ca. 120 km med ca. 12-16 autotransformatorer der hver er på 5 MVA og 2,6 kW i tomgangstap, blir de totale tapene

31,2-41,6 kW. Den mest ugunstige effekten av denne energioverføringen (og tomgangstapene i autotransformatorene) blir sannsynligvis tap i omformerstasjonene, men dette blir neppe noe større problem enn i dag.

Fasevinklene for de stasjonene som er aktuelle for et fremtidig AT-system er tilfeldigvis dem med små fasevinkelforskjeller på 3-4°, og hadde en ville benyttet for eksempel Krossen og Sira, ville forskjellene ha blitt større, 5-8°. Tapene kunne da blitt i området 30 kW på en 120 km strekning, se avsnitt 2.3.1.10 med 12° forskjell mellom stasjonene og med 2 x 5,8 MVA aggregater i stasjonene. For å få en ugunstig effektfordeling i belastningssituasjonen må fasevinklene være enda større enn de forskjellene som har fremkommet her. Videre undersøkelse av belastningen og effektfordelingen på denne strekningen med AT-system synes derfor unødvendig. Heller ikke trafikksimuleringer gjøres da disse fasevinklene ikke påvirker lastflyten i noen særlig grad eller påvirker tapene i kl-anlegget eller spenningen for togene.



Figur 194 Fasevinklene referert til Flesaker transformatorstasjon sin 300 kV-samleskinne for samtlige omformerstasjoner på Sørlandsbanen. "Vinter høylasttime" representerer høy produksjon og høyt forbruk. "Vinter" forutsetter at belastningene for alminnelig forbruk er redusert til 70 %. Vår og høst representerer meget høy produksjon (vår- og høstflom), og det alminnelige forbruket er redusert til 35 %. "Sommer" gjelder for lav produksjon, og det alminnelige forbruket er redusert til 20 % av høylasttiden.



Figur 198 Spenningene og vinklene i tomgang for et fremtidig AT-system med omformerstasjoner i Nordagutu, Nelaug, Leivoll, Kjelland og Ganddal. Fasevinkler i det overliggende nettet er som for "sommer middel". To av tre roterende aggregater i hver omformerstasjon er utkoblet. I kjelland er imidlertid alle de tre statiske aggregatene innkoblet.


4 OPPSUMMERING, KONKLUSJON OG ANBEFALINGER

4.1 Oppsummering av resultatene


4.1.1 Oppsummering av problem og løsning for de tre undersøkte hovedtypene av matestrekninger

Tabell 1, tabell 2 og tabell 3 oppsummerer de karakteristiske problemene i banestrømforsyningen som har vært undersøkt, og har forslag til løsninger. Tabellene forutsettes å være selvforklarende. Konkrete forslag til løsninger er markert med pil (→).


Tabell 1 Karakteristiske egenskaper og problemer med banestrømforsyning med kl-anlegg og omformerstasjoner i avstander på 80 km. Forskjellige forslag til løsninger er satt opp ved siden av teksten som beskriver problemet, men bare dem med pil (→) har vist seg å gi en ønsket virkning.

System	Karakteristika	Mulig problem	Løsning
<p>Tradisjonelt kontaktlednings-system med omformerstasjon med typisk 2 x 5,8 MVA. 80 km mellom hver stasjon og forsyning fra lokalt 22, 66 eller 132 kV nett.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Like store aggregater i stasjonene • Ingen forskjell mellom fasevinkler i det overliggende nettet • Sterkt overliggende nett 	Ingen problemer	Fallende statikk forsøkt men ga ikke forbedret effektfordeling
	<ul style="list-style-type: none"> • Forskjell mellom fasevinkler i det overliggende nettet • Et svakt overliggende nett eller forskjell mellom stasjonene 	Effektoverføringen mellom stasjonene i tomgang gir tap.	Forsøk med overmagnetisering av aggregatenes motorer ga liten effekt.
		Ujevn effektfordeling mellom stasjonene.	Det så ikke ut til at tapene i nettet var særlig store, selv med store forskjeller mellom fasevinklene. Tomgangstapene i aggregatene er større.
			Et svakt overliggende nett så ikke ut til å være noe problemstilling alene.
	<ul style="list-style-type: none"> • Forskjellig ytelse (forskjellige aggregater eller antall) i omformerstasjonene 	Ujevn effektfordeling mellom stasjonene.	→Fra forsøkene med 40 km mellom omformerstasjoner kan det se ut som om en fallende statikk på f. eks 4 % kan være en løsning.
	<ul style="list-style-type: none"> • Større belastning enn installert ytelse i stasjonene. 	Utfall av omformeraggregater p.g.a. overlast	→Om en tillater multiple EI16 må disse gies pådragsbegrensning. Det må være begrensninger for antallet som får kjøre samtidig på samme matestrekning.
		Lav spenning	→Lav spenning kan være en gunstig påminnelse til lokomotivføreren om å redusere pådraget.

Tabell 2 Karakteristiske egenskaper og problemer med banestrømforsyningen med kl-anlegg og omformerstasjoner i avstand på 40 km, der den i midten har mindre installert ytelse enn de andre. Forskjellige forslag til løsninger er satt opp ved siden av teksten som beskriver problemet, men bare dem med pil (→) har vist seg å gi ønsket virkning.

System	Karakteristika	Problem	Løsning
<p>Tradisjonelt kontaktlednings-system med omformerstasjon med typisk 2 x 5,8 og 5,8 MVA. 40 km mellom hver stasjon og forsyning fra lokalt 22, 66 eller 132 kV nett.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Ulike aggregater i stasjonene • Ingen forskjell mellom fasevinkler i det overliggende nettet • Et sterkt overliggende nett 	<p>Ujevn effektfordeling mellom stasjonene</p> <p>Mye reaktiv effekt levert fra den med ett aggregat til nabostasjonene</p> <p>Fare for overbelastning av stasjonen med ett aggregat</p>	<p>→Spenningsregulatorer med fallende statikk på 4 %.</p> <p>→Spenningsregulatorer med fallende statikk på 4 %.</p> <p>→Spenningsregulatorer med fallende statikk på 4 %.</p> <p>→Lavere spenning for den i midten.</p> <p>→Mekanisk tomgang for stasjonen i midten.</p> <p>→Innsetting av ett ekstra aggregat for stasjonene i midten.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Forskjell mellom fasevinkler i det overliggende nettet slik at stasjonen i midten ligger etter naboene • Sterkt eller svakt overliggende nett 	<p>Ujevn effektfordeling mellom stasjonene. Den i midten leverer mindre aktiv effekt og mer reaktiv effekt enn ellers</p> <p>Effektflyt i tomgang der aktiv effekt flyter til den i midten og reaktiv effekt motsatt veg, dette fører til tap</p>	<p>→Spenningsregulatorer med fallende statikk på 4 %.</p> <p>→ Med store forskjeller mellom fasevinklene, anslagsvis 18°, kan en reaktor med automatisk justerbar induktans vurderes</p> <p>→Lavere settpunkt for spenningsregulatoren for den i midten</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Forskjell mellom fasevinkler i det overliggende nettet slik at stasjonen i midten ligger foran naboene • Sterkt eller svakt overliggende nett 	<p>Ujevn effektfordeling mellom stasjonene. Den i midten leverer mer aktiv effekt og mindre reaktiv effekt enn ellers</p> <p>Effektflyt på kontaktledningen i tomgang der aktiv effekt flyter fra den i midten og reaktiv effekt motsatt veg, dette fører til tap</p>	<p>→Spenningsregulatorer med fallende statikk på 4 %.</p> <p>→Med store forskjeller mellom fasevinklene, anslagsvis 18°, kan en reaktor med automatisk justerbar induktans vurderes i nabostasjonene.</p> <p>→Høyere settpunkt for spenningsregulatoren for den i midten (Dette er ikke simulert, men antas å kunne være til hjelp)</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Større belastning enn installert ytelse i stasjonene 	<p>Utfall av omformeraggregater p.g.a. overlast</p>	<p>→Spenningsregulatorer med fallende statikk på 4 %.</p> <p>→Mekanisk tomgang for stasjonen i midten.</p> <p>→Innsetting av ett ekstra aggregat for stasjonene i midten.</p>

Tabell 3 Karakteristiske egenskaper og problemer med banestrømforsyningen med kl-anlegg med AT-system og omformerstasjoner i avstand på 120 km. Forskjellige forslag til løsninger er satt opp ved siden av teksten som beskriver problemet, men bare dem med pil (→) har vist seg å gi ønsket virkning.

System	Karakteristika	Problem	Løsning
<p>Kontaktledningsanlegg med AT-system med omformerstasjon med typisk 3 x 5,8 MVA. 120 km mellom hver stasjon og forsyning fra lokalt 22, 66 eller 132 kV nett.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Like store aggregater i stasjonene • Ingen forskjell mellom fasevinkler i det overliggende nettet • Sterkt overliggende nett 	Tendens til utveksling av reaktiv effekt mellom stasjonene	→Spenningsregulatorer med fallende statikk på 4 %.
	<ul style="list-style-type: none"> • Forskjell mellom fasevinkler i det overliggende nettet • Sterkt eller svakt overliggende nett 	<p>Uteksling av reaktiv effekt mellom stasjonene</p> <p>Ujevn fordeling av effekt mellom stasjonene</p> <p>Effektflyt og tap i tomgang</p>	<p>→Spenningsregulatorer med fallende statikk på 4 %.</p> <p>→Spenningsregulatorer med fallende statikk på 4 %.</p> <p>→Spenningsregulatorer med fallende statikk på 4 %.</p> <p>→Færre aggregater i drift</p> <p>→Med store forskjeller mellom fasevinklene, anslagsvis 18° eller mer, kan reaktorer med automatisk justerbar induktans vurderes.</p>

4.2 Diskusjon

4.2.1 De beste modellene for trafikksimuleringer

I et tidligere arbeid med trafikksimuleringer, se [8], ble det benyttet stive spenningskilder for omformerstasjonene. Om en skal få undersøkt lastflyten mellom omformerstasjoner, er ikke dette noen brukbar modell, det så en tydelig av sammenligningene i avsnitt 2.2.1. Det er også tydelig hvordan nabostasjoner deler lasten. Om en skal undersøke forholdene på en matestrekning mellom to omformerstasjoner, må også bidragene fra stasjonene på tilhørende matestrekninger inkluderes. Følgelig er det fornuftig å håndtere randsonene slik som praksisen har vært til nå, og som tar med modellen av banestrømforsyningen og togtrafikken på de tilstøtende matestrekningene (med tilhørende omformerstasjoner).

Gjennom diverse forsøk hvor initiell last i OPTPOW bestemmer settpunktet for spenningsregulatorene, har dette vist å ikke ha særlig betydning for videre effektfordeling når en ser på forholdene i DYNPOW. En har imidlertid erfart at aggregatene kan falle ut av synkronisme ved store lastendringer, og at en høy magnetisering av motorene er en fordel for å unngå dette. Følgelig er det best å videreføre praksisen med å la den initielle lasten representere et gjennomsnitt av omformerstasjonenes installerte ytelses eller den gjennomsnittlige antatte belastningen.

4.2.2 Lastflyten i tomgang og tap med dagens banestrømforsyning

Det er en iboende egenskap med banestrømforsyning som har roterende omformere og 16 2/3 Hz, at fasevinkler i det overliggende nettet overføres til 15 kV-siden. Fasevinkelen på trefasesiden gir en tredjedel så stor fasevinkel på enfasesiden, og er denne stor nok, oppstår det effektflyt i tomgang og elektriske tap. På den undersøkte strekningen på Sørlandsbanen er det etablert en nøyaktig modell av Agder Energiverks nett der det ikke funnet større forskjeller i fasevinkler enn 5-8° mellom innmatingen til omformerstasjonene. Med en relativ forskjell på 12° grader på 80 km, fant en at tapet ble beskjedne 10 kW og sjelden varer utover noen timer. Riktignok vil dette gi belastningsavhengige tap i omformerne, men tomgangstapene er tross alt mer dominerende, se [10].

4.2.3 Lastflyten i tomgang og tap med AT-system

Når AT-system innføres reduseres impedansen mellom omformerstasjonene mye, selv om avstanden økes til 120 km, dette fører til større transitt av effekt. Antar en fremdeles at forskjeller mellom fasevinkler i det overliggende nettet som ble funnet på Sørlandsbanen (5-8°), og at forsøk med 9° forskjell med AT-system ga ca. 20 kW tap i tomgang, er ikke det mye. Autotransformatorene vil representere et større tap på til sammen 31,2-41,6 kW. Det er mulig at det i Sverige er funnet [6] så store effektoverføringer på grunn av forskjellige fasevinkler over lange avstander at reaktorer for kompensering er nødvendig. På Sørlandsbanen er det neppe aktuelt, men det kan eventuelt være andre banestrekninger der dette blir identifisert som et problem. (Større belastning i svake nett eller stor effektoverføring via kabler til kontinentet).

4.2.4 Modelleringen av det overliggende nettet i trafikksimuleringer

Simuleringene her har vist at også stivheten i det overliggende nettet til omformerstasjonene har en viss betydning. Men om linjen inn til Mjølfjell omformerstasjon er representativ som landets svakeste linje, var ikke forskjellen mellom lastfordelingen mellom sterke og svake nett særlig stor. For spenningen til togene spiller det nok liten rolle, men for effektfordelingen har det litt større betydning. Av disse grunner kan en ikke ignorere impedansen i det overliggende nettet.

Forskjellige fasevinkler har en del å si for lastfordelingen mellom stasjonene, spesielt med AT-system, men forskjellene skal være nokså store før det får noen særlig betydning. Med AT-system ble det sett på forskjellige vinkler på 18° i det overliggende nettet til omformerstasjonene. Dette gir utslag på effektfordelingen, men forskjellige vinkler og belastning er ikke undersøkt i detalj. For konvensjonell banestrømforsyning med 80 km mellom stasjonene er det undersøkt forskjellige fasevinkler mellom stasjonene, og vinklene må være større enn med AT-system for å gi utslag. Det er vanskelig å angi grensen for hvor store vinkelforskjeller som er betydningsfulle. For simuleringer der en ser på effektflyten, vil togene imidlertid være dominerende og av en annen størrelsesorden enn de få hundre kVA som forskjellige fasevinkler rundt 10° gir.

I arbeidet med å kartlegge fasevinkler i det overliggende nettet til Agder Energiverk tok det flere ukers arbeidsinnsats å få alle data tilgjengelig og finne variasjonene over året. Fasevinklene i høylasttimene endrer seg årstidene. Det enkleste vil selvfølgelig være om elverkene sammen med Statnett kan oppgi fasevinklene, og hvorledes disse endres over året, slik at dette kan benyttes i en forenklet modell av det overliggende nettet i trafikksimuleringer. Men om alle disse vinklene endrer seg usystematisk gjennom året vil det være et uoverkommelig arbeid å simulere alle mulige trafikktilfeller og variasjoner. Det er derfor bedre å legge til en margin for usikkerhet i simuleringene for større eller mindre

effektproduksjon, enn å ta hensyn til disse fasevinklene. På den annen side vil større reaktiv effekt fra en omformerstasjon bety mindre levert aktiv effekt, og i mange tilfeller vil dette kunne utjevnes, slik at den tilsynelatende effekten i MVA ikke er så forskjellig.

For simuleringer med hensyn på tap på kontaktledningen foreslåes det bare å legge til for eksempel 10-20 kW for hver matestrekning på 80 km. Tilsvarende brukes 20-30 kW for hver strekning på 120 km med AT-system. Så kan en simulere uten forskjellige fasevinkler og heller opplyse om at ekstra tap i denne størrelsesorden kan forventes.

I de modeller som er laget i forbindelse med [11] for det overliggende nettet til omformerstasjonene, ser en ikke særlig store forskjeller: 10° er maksimal forskjell mellom vinklene. Det forventes ikke særlig større avvik, og erfaringene fra regionalnettet til Agder Energiverk, motiverer ikke til å kartlegge disse vinklene enda mer eksakt. Tross alt representerer Agder Energiverk den delen av landet der en forventer størst forskjeller.

Det foreslåes at for fremtidige trafikksimuleringer settes fasevinklene i modellene for simuleringene til null. Med den kunnskapen en har om dette nå, der forskjellene mellom fasevinklene i nettene i Norge er under 10° de aller fleste steder, vil arbeidsinnsatsen for å få kartlagt dette, være for stor i forhold til det resultatet (nøyaktigheten) en oppnår. Imidlertid kan en modellere det overliggende nettet som en stiv spenningskilde foran en impedans som representerer kraftlinjen inn til stasjonen.

4.2.5 Sesongvarierende innstilling av spenningsregulatorer

Undersøkelsene av fasevinkler og hvorledes disse varierer over året, avdekket store variasjoner, men allikevel ikke slik at den relative forskjellen mellom omformerstasjonene ble veldig større for visse perioder. Selv om det nok for spesielle situasjoner kan skje at fasevinklene blir større enn det som ble avdekket. Forskjellige fasevinkler fører til effektflyt og tap i tomgang, og til ugunstig lastfordeling om forskjellene blir veldig store. Forhøyning eller reduksjon av spenningen som omformerstasjonene holder på utgangene, vil direkte påvirke denne lastflyten. For å redusere tapene på kontaktledningene kan det nok utvilsomt finnes optimale settpunkter for hver enkelt omformerstasjon, og kanskje vil ikke disse komme i konflikt med spenningskrav til togene.

Problemet er at dette vil være svært resurskrevende å realisere, ved at spenningsregulatorenes settpunkt gjerne må stilles om fire ganger i året (om en antar ubetydelige endringer av fasevinkel innenfor årstiden). Dessuten er denne metoden ikke så enkel, justeringen må gjøres i tomgang uten togtrafikk, og en eller flere personer må stille opp eller ned spenningen slik at effektflyten til nabostasjonen er null. En kan tenke seg at en begynner med Kjelland omformerstasjon natt til søndag (eller en annen trafikkfri periode), og stiller ned eller opp spenningen slik at det ikke utveksles effekt mot Ganddal. Så forflytter en seg til neste stasjon som er Sira og gjentar prosedyren der, helt til en kommer til Nordagutu.

En annen metode er å installere nettanalysatorer som ser trefasenettets fasevinkel for alle omformerstasjonene og kan opplyse om fasevinkelen til nabostasjonene. Ut fra fasevinkelen til en stasjons trefasenett og om den sakter eller leder, fås en indikasjon på hvor mye spenningen må justeres. Dette krever kommunikasjon mellom alle disse apparatene, og vil selvfølgelig koste en del. For regulerbare reaktorer for fasekompensering kan en tenke seg lignende metoder.

Det sier seg selv at dette blir kostbare rutiner, og det er vel tvilsomt om de elektriske tapene en har sett på Sørlandsbanen kan forsvare slike tiltak. Slike rutiner kunne en ha i gamle dager da det var døgnkontinuerlig bemanning i stasjonene. Et tiltak som imidlertid er enkelt, er dagens praksis med å bare ha ett omformeraggregat i drift i lavlastperioder.

Alle undersøkelser her har dreid seg om lange matestrekninger og ikke for strukturer som i Oslo-området med flere radiale strekninger som går ut fra et sentrum (Oslo S). Her er det dobbeltspor og flere sterke omformerstasjoner med kort avstand og fasevinkler i det overliggende nettet kan få større betydning for tomgangseffekter og lastfordeling. Det bør nok legges ned et arbeid for å få vurdert fasevinklene med hensyn på tiltak, spesielt om en ønsker å legge ned Alnabru og få tilsvarende mer effekt fra Lillestrøm. Justering av grunnlastvinkelen (CTETA) som er en mulighet i statiske omformere, kan være en vei å gå.

4.2.6 Drøftinger rundt innstilling av spenningsregulatorer

I henhold til Teknisk regelverk JD 548 kapittel 18 skal spenningsregulatoren for omformerne sørge for at 15 kV-samleskinne holder en spenning på 16,5 kV. Det skal også være en flat statikk om ikke andre forhold tilsier noe annet. Med omformerstasjoner med samme ytelse (eller omtrent samme ytelse) ser dette ut til å være fornuftig. Men om avstanden mellom stasjonene er 40 km, og ytelsen er forskjellig, om det er forskjellige fasevinkler i det overliggende nettet og forskjellig stivhet i det overliggende nettet, kan det være grunn til å vurdere å la alle stasjoner få en fallende statikk (reaktiv kompensering). Siden det i dag ikke er spesielle problemer med effektfordeling, er det på den annen side ikke noe som er lett å argumentere sterkt for å innføre og avsette resurser til. Med mer nøyaktig utrustning for logging av verdier i driftsentralen til Bane Energi kunne en ha sett på lastfordelingen om noen stasjoner bidrar på en påfallende ugunstig måte.

Alle jernbanens omformerstasjoner er i dag innstilt likt med en flat statikk og settpunkt på 16,2 kV⁶. Rapportens undersøkelser har ikke sett på hva en innstilling på 16,2 eller 16,5 kV får å si for togene, men sannsynligvis vil nok spenningen bli noe bedre. Det er kjent at spenningsregulatorens settpunkt for omformerstasjonene på Rudshøgda og Otta er stilt ned⁷. Disse stasjonene er på 3,1 MVA og har sterke naboer, og dermed vil de påta seg mye reaktiv effekt og lett kunne overbelastes. Reduseres spenningsregulatorens settpunkt, unngås dette. Imidlertid vil dette bidra til effektflyten i tomgang, i alle fall om det ikke er fasevinkler i det overliggende nettet som gjør at redusert spenning er fornuftig for å unngå denne effektflyten. Et bedre alternativ kan derfor være større fallende statikk.

Om en senere vil redusere antallet aggregater i Leivoll til ett, kan dette være mulig ved at den får en fallende statikk, eller ett av de andre tiltakene vurderes. Tross alt er det ikke lite effekt som er problemet på strekninger med 40 km mellom stasjonene, men lav spenning. Det anbefales i første omgang å teste ut denne type tiltak i Leivoll ved å la bare ett aggregat ligge inne når det er stor trafikk. Trafikk med doble lokomotiver, enten E116 eller nye typer, kan bli aktuelt de neste årene, og da kan det bli store effektuttak som kan bli problematisk for stasjoner som Otta og Rudshøgda med bare 3,1 MVA aggregater. Som en har sett kan det være forskjellige enkle løsninger for dette. Selv om større aggregater er det mest nærliggende, er dette kostbart. Med tanke på større tog med doble lokomotiver er det ikke lett å anbefale å fjerne ett av aggregatene i Leivoll, med vekst i trafikken i tillegg kan det tenkes at to aggregater kan være nødvendig.

⁶ Bane Energi er innforstått med at spenningen ihht. regelverket skal være 16,5 kV, men har ikke satt av tid og ressurser til å gjøre denne endringen enda.

⁷ Opplysninger uten dokumentasjon.

Det er ikke lett å gi klare anbefalinger for dagens situasjon og omformere, men forskjellige løsninger er i alle fall illustrert gjennom undersøkelsene her. Når det gjelder fremtidig AT-system er det i alle fall ingen tvil om at en fallende statikk (reaktiv kompensering) på rundt 4 % er klart å anbefale.

4.3 Anbefalinger

Dagens spenningsregulatorinnstillinger bør settes opp til 16,5 kV for å forbedre spenningen til togene, dagens praksis med en flat statikk kan beholdes med dagens trafikk. Men om det om noen år blir mer aktuelt å kjøre doble E116 lokomotiver i multippel, eventuelt nye lokomotiver som kjøres slik, blir det høyst sannsynlig nødvendig å se på ytterligere tiltak. Innføring av fallende statikk vil nok være et gunstig middel for å forbedre lastfordelingen mellom omformerne og unngå overbelastning av aggregater, i tillegg til at slike lokomotiver gies pådragsbegrensning som en forutsetning for å få kjøre. For Rudshøgda og Otta med bare ett aggregat på 3,1 MVA må sannsynligvis ytterligere tiltak gjøres. Større aggregater, fallende statikk, redusert spenning eller andre tiltak kan vurderes.

Med et fremtidig AT-system innføres det en fallende statikk på 4 % fra tomgang til fullast, eller en annen prosent om en kan finne et mer optimalt tall. Det synes ikke relevant å begynne å bekymre seg for om tiltak for fasekompensering, for eksempel reaktorer, verken nå eller under detaljplanlegging. En får heller finne løsninger om det viser seg å oppstå slike problemer.

4.4 Videre arbeid

Forslag til videre arbeid:

- Om det i de neste årene blir en trafikkvekst i godstrafikken med enda mer intens kjøring i periodene med høy trafikk, spesielt E116, RC4 eller andre lokomotiver i multippel, bør det sees på tiltak for å tillate dette uten problemer med overbelastning og utfall av omformere.
- For Oslo-området bør det gjøres studier av fasevinkler og se på tiltak for å styre effektflyten. Se [9] og [10].
- I simuleringene her ble det sett på en statikk på 4 %, men enda større, eventuelt mindre, statikk kan også være aktuelt. For å unngå utfall av aggregater ved store laster vil en sannsynligvis ønske enda større fall, og for optimal lastflyt i en banestrømforsyning med AT-system vil kanskje enn annen optimalisering være aktuell.
- Statikk for omformerstasjonene behøver nødvendigvis ikke bare å være for reaktiv kompensering, aktiv kompensering kan også være aktuelt å undersøke.

5 REFERANSELISTE

1. Rapport; *Simulering av banestromforsyningen i Oslo-området*. BanePartner, 2000.11.20. Prosjekt nr.: 199208, Saks ref.: 99/5506 JI 760.
2. Rapport; *Utredning av alternative løsninger for bedre samkjøring i Oslo-området*. BanePartner, 2000.11.20. Prosjekt nr.: 292368, Saks ref.: 03/4697 SBP 762.
3. Teknisk rapport; *Systemstudie Kraftforsörjning Gällivare – Riksgränsen*. Balfor Beatty Rail for Banverket Region Norra. Preliminäry 04-06-03. Dokument nr. BBSE101104-A. J. Stern.
4. Steinar Danielsen, *Spenningsregulator med statorström- og feltströmbegrensning for jernbanens roterende omformere*. Trondheim, NTNU - Institutt for elkraftteknikk, 2002. (Hovedoppgave, 11. juni 2002).
5. Teknisk Rapport; *Utredning Oslo-området, Samkjörningsstudie och trafiksimulering*. Adtranz Sweden, 97-05-28. Ident. No. XT 180 209 – AT. Ann Palesjö.
6. Master of Science Thesis; *Load flow control and optimization using phase shifting equipment in combination whit Banverkets rotating converteres*. KTH Electrical Engineering, Stockholm, Sweden 2005/2006. XR-EE-EES-2006:02. Klas Karlsson.
7. Rapport; *Further investigation of the AT-system for the Norwegian Railway, Part 2- EMC study for ATPLNL system in Norway*. György Varju, Budapest 2005.
8. Notat; *Valg av tverrsnitt for NL og PL ledere i AT-system med seksjonert kontaktledningsanlegg*. Jernbaneverket ITPE 14.01.2008. Dokument nr EB.800032-000. Frank Martinsen.
9. Simuleringsrapport; *Strekningssvise utbyggingsplaner – Sörlandsbanen*. Jernbaneverket ITPE 28.07.2006. Frank Martinsen.
10. Rapport; *Utredning av samkjöringen i Oslo-området med hensyn på mulig reduksjon av energitap*. Bane Partner, oktober 2003, Frode Johannessen.
11. Rapport; *Utredning av kontaktledingstap*. Jernbaneverket Utbygging Prosjektjenester, 29.04.2005. Dokument nr. SAK 200400568-26. Steinar Danielsen.

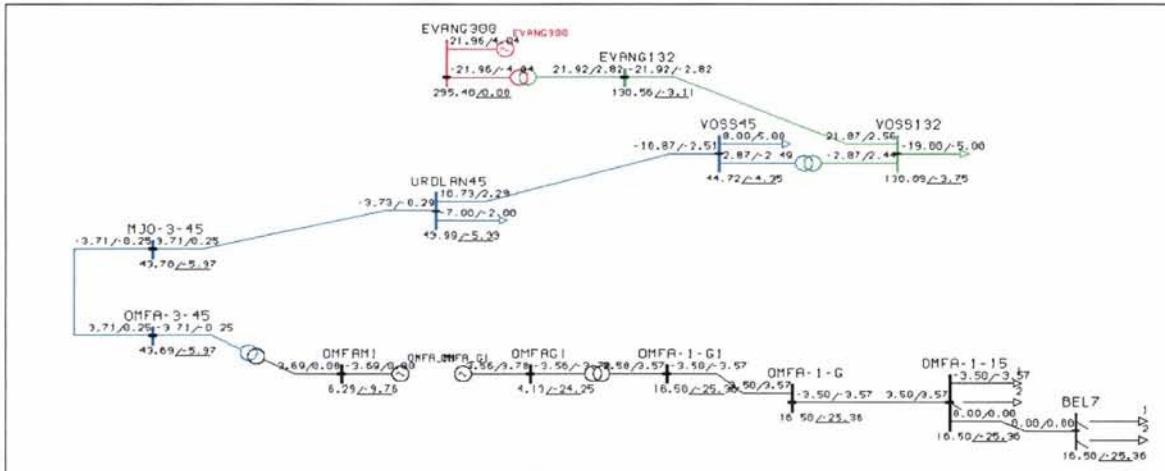
6 APPENDIKS 1 SVAKT OVERLIGGENDE NETT OG BETYDNINGEN AV INITIAL LAST I OPTPOW

I et sterkt overliggende nett vil jernbanens omformerstasjoner ikke påvirke spenningen eller fasevinkelen, men for et svakere nett kan dette ha en større betydning, se avsnitt 2.2.1.10 som viser spenningsendringer i nettet til Mjølfell omformerstasjon med og uten belastning på 15-kV siden. I tomgang er fasevinkelen ca. $3,3^\circ$ på 45 kV-samleskinne i stasjonen, mens den endres til ca. $8,3^\circ$ i fullast med 7 MW på 15 kV-siden. Det kan være interessant å se på disse forholdene.

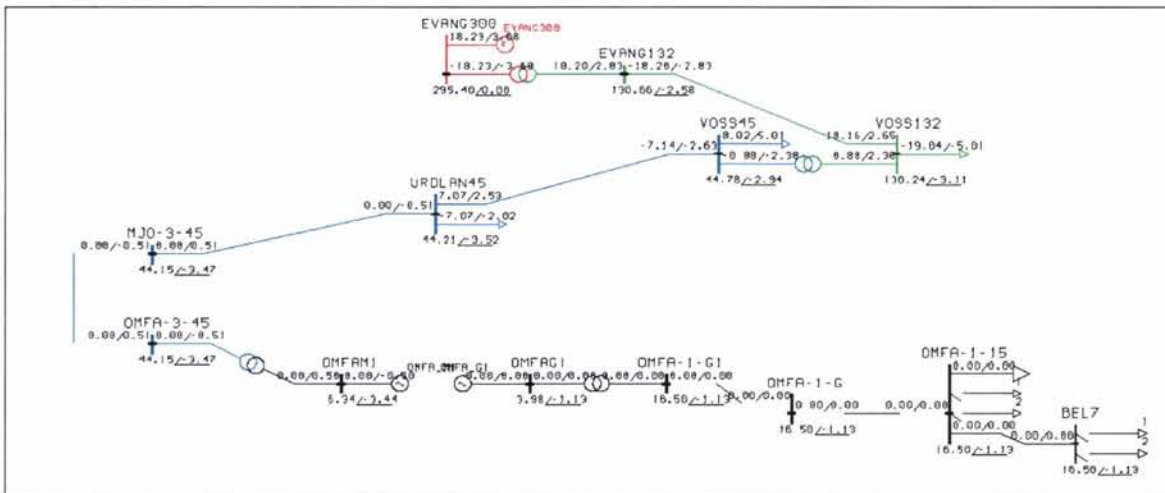
Spenningsregulatoren på motorsiden er i modellene som benyttes for trafikksimuleringer, laget slik at den har en svakt fallende statikk, men i virkeligheten har disse regulatorene en karakteristikk som holder reaktiv effekt konstant, og da helst null. Referansen til spenningsregulatoren i simuleringene er spenningen som oppstår i lastflytløsningen i OPTPOW. Prosedyren for å få riktige initialbetingelser for denne regulatoren er som følger:

- I lastflytprogrammet OPTPOW settes det inn en last for 15 kV-siden som er lik antatt midlere belastning for stasjonen. Her settes den til 3,5 MW med $\cos \varphi = 0,7$ for ett aggregat på 5,8 MVA (og 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ for to) fordi det i simuleringene skal benytte en last av denne størrelsen på kontaktledningen.
- En ønsker at motoren(e) ikke skal produsere reaktiv effekt, og dermed settes motorenes spenningsregulatorer til å gi 0 MVar i lastflytløsningen i OPTPOW.
- Det undersøkes at transformator(e) til motoren(e) er trinnet slik at spenningen på motoren(e) skal bli lik den nominelle spenningen, altså 6,3 kV. Se figur 199 nedenfor.
- Spenningen som nå oppstår på motoren(e), vil være referanse for spenningsregulatoren(e) når initialverdiene fra OPTPOW benyttes i de dynamiske simuleringene i DYNPOW. I tomgang vil spenningen på motoren bli litt i høyeste laget, og det trekkes reaktiv effekt, se figur 200, men når det i den dynamiske simuleringen trekkes nøyaktig tiltenkt effekt, blir også forholdene ved motorsiden riktig figur 201 og figur 202. Ved en høyere belastning enn motorens spenningsregulator er beregnet på, trekkes det en del reaktiv effekt til motoren, se figur 203 og figur 204.

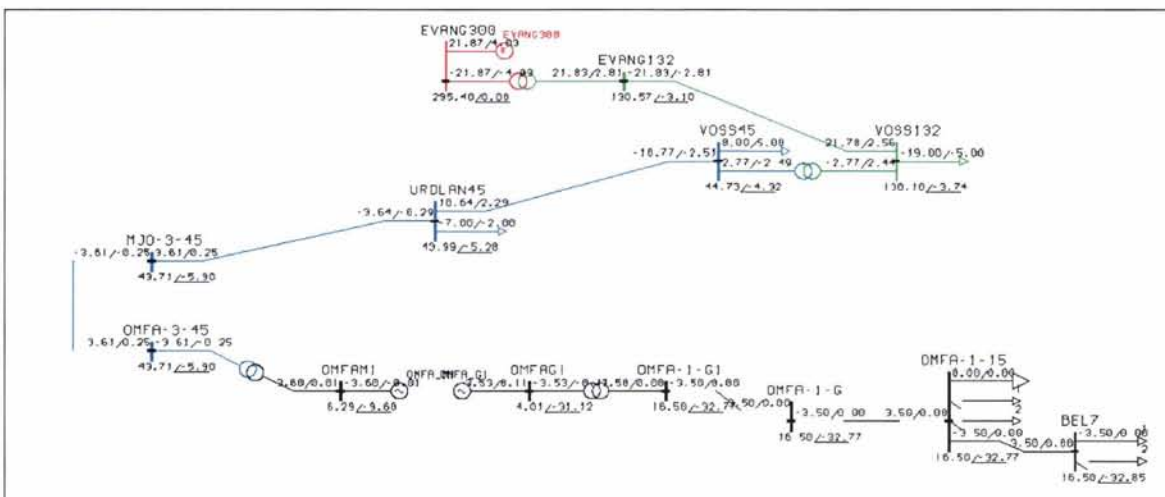
Når det går relativt mye reaktiv effekt til motoren for andre lasttilfeller enn det den er innstilt for, kan en lure på om det er valgt rett type spenningsregulator. Burde det heller vært benyttet en regulator som sørger for å holde den reaktive effektproduksjonen ved motoren konstant på null? Det er jo slike regulatorer som etter hvert brukes for jernbanens omformere. Dette er undersøkt ved at regulatoren får initialbetingelser for en stor belastning, her 7 MW, slik at den da trekker null reaktiv effekt, se figur 205. Dette er gjort uten å trinne trefasetransformatoren til å holde sekundærspenningen på 6,3 kV (noe som neppe har noen særlig betydning). I figur 206 og figur 207 kan en se hvorledes det går når belastningen økes til det store uttaket på 7,0 MW for henholdsvis kun aktiv effekt og med $\cos \varphi = 0,7$: Det gir knapt noen endring av vinklene på noen av samleskinnene.



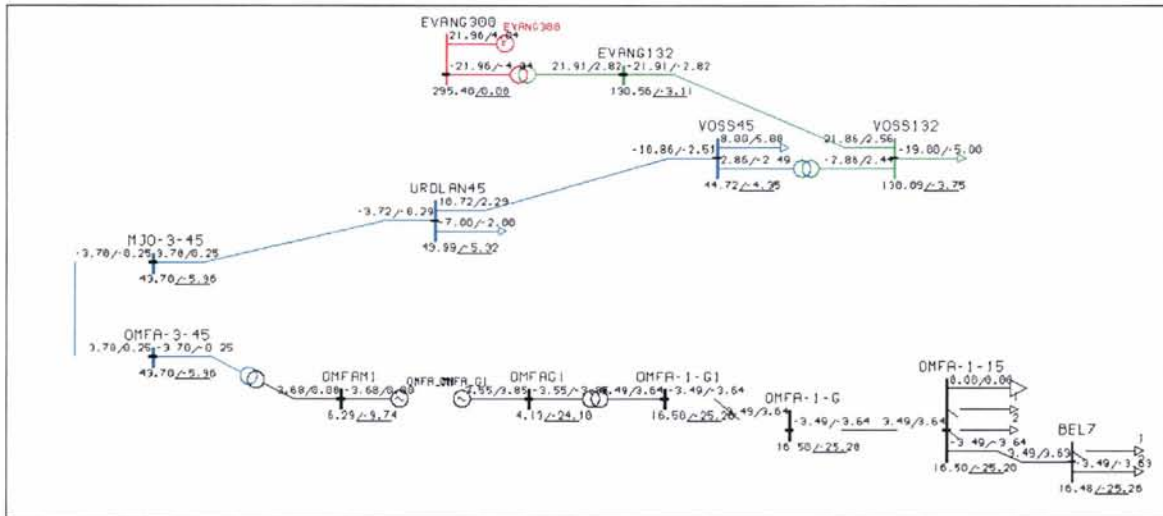
Figur 199 Antatt midlere belastning på 3,5 MW og $\cos \varphi = 0,7$ innsatt i OPTPOW (LOAD OMFA-1-15 NO=1). Trinner opp transformatoren etter normal prosedyre og med $U_1 = 43,5$ kV er spenningen på motoren ca. 6,3 kV.



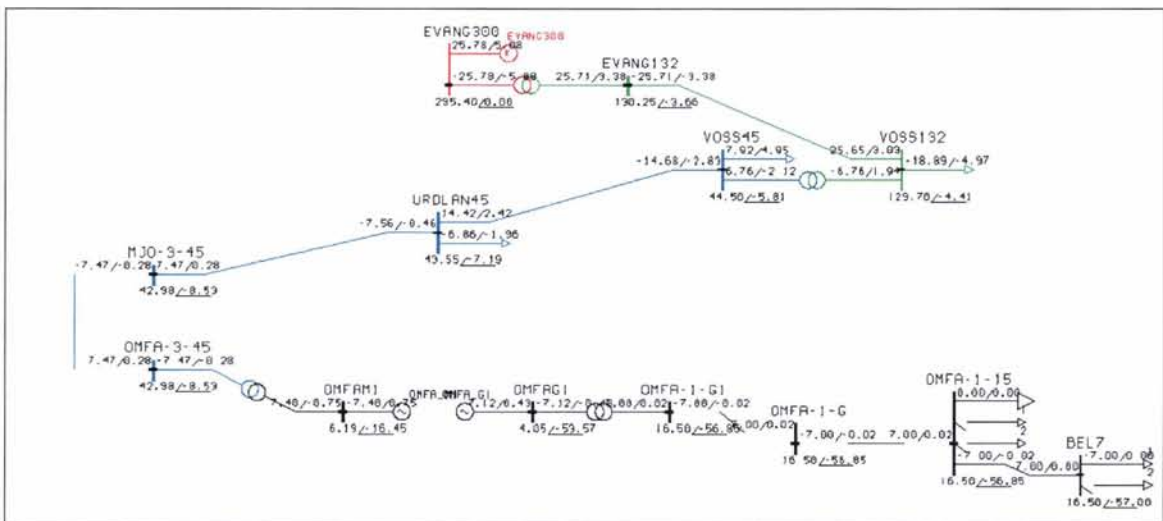
Figur 200 Antatt midlere belastning er utkoblet og omformereren går i tomgang. Dette gir noe høy spenning på motoren, og en del reaktiv effekt trekkes.



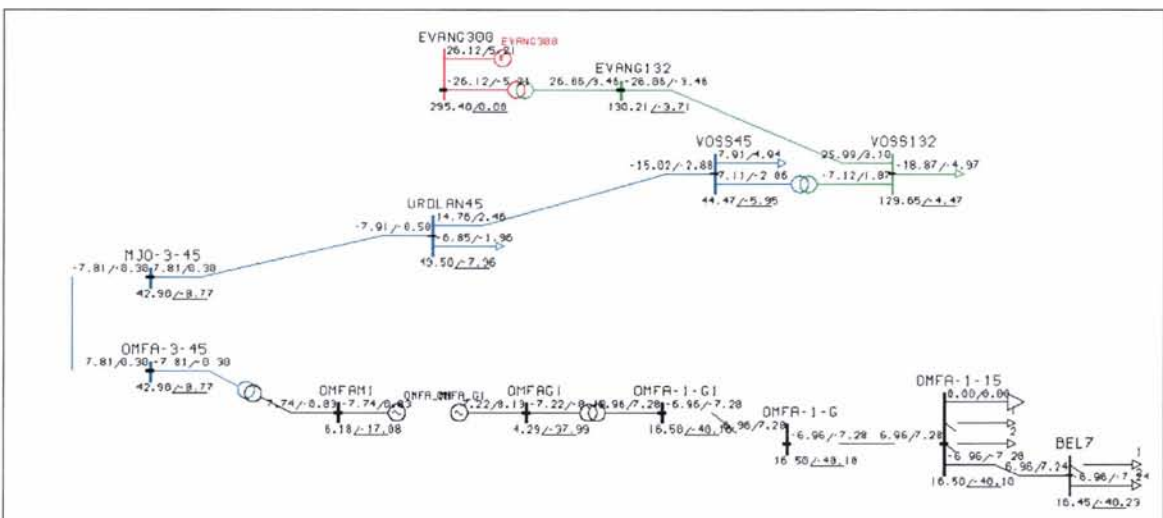
Figur 201 Tiltent aktiv last med 3,5 MW og $\cos \varphi = 1,0$.



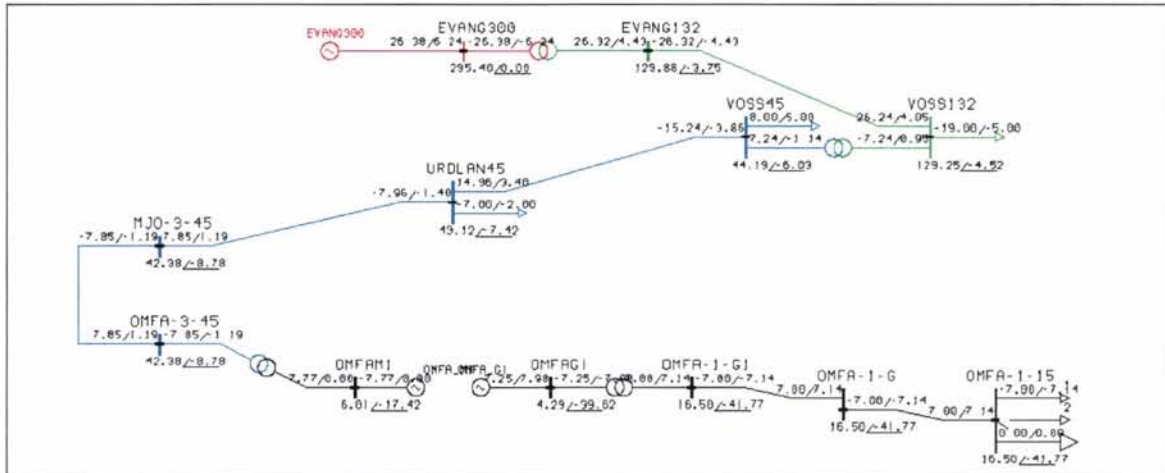
Figur 202 Tiltenkt aktiv og reaktiv last på 3,5 MW og $\cos \varphi = 0,7$.



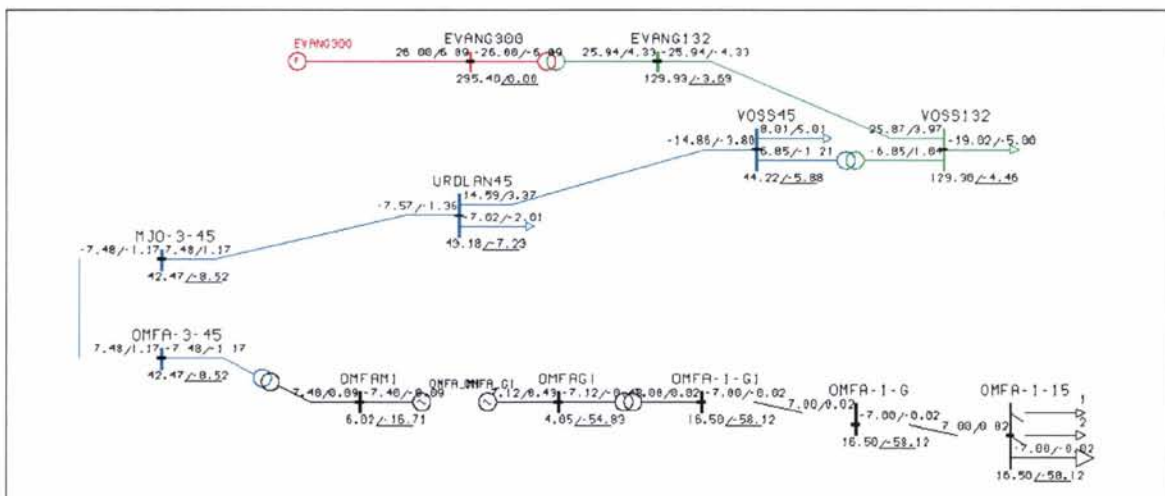
Figur 203 Dobbelt så høy last som tiltenkt, og vinkelen på belastningen er vridd mye. Legg merke til den store vridningen av fasevinkelen på motoren. Aktiv belastning.



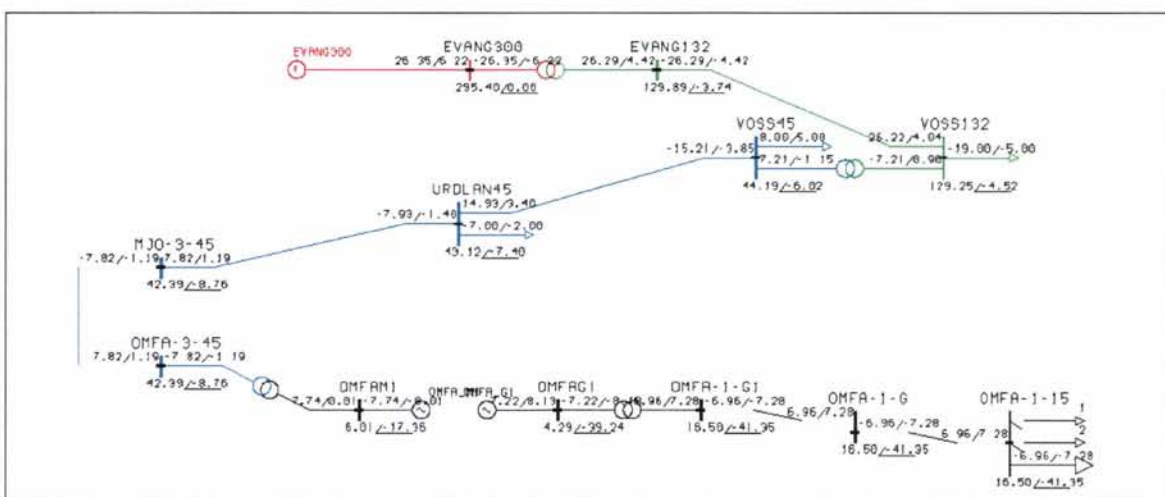
Figur 204 Dobbelt så høy last som tiltenkt med $\cos \varphi = 0,7$, og det blir 14 grader mindre vinkeldreining enn i tilfellet med kun aktiv belastning.



Figur 205 Belastning på 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ innsatt i OPTPOW (LOAD OMFA-1-15 NO=1). Trinner ikke transformatoren for denne større lasten, men lar den være U1 = 43,5 kV som for last på 3,5 MW og $\cos \varphi = 0,7$.



Figur 206 Aktiv last på 7,0 MW og initialbetingelser for spenningsregulatoren for motoren slik at denne ikke trekker reaktiv effekt.



Figur 207 Aktiv last på 7,0 MW og $\cos \varphi = 0,7$ når initialbetingelser for spenningsregulatoren for motoren er slik at denne ikke trekker reaktiv effekt.

7 APPENDIKS 2 LASTFLYTEN I KRAFTNETTET SOM FORSYNER SØRLANDSBANEN

Data for det overliggende nettet for alle landets omformere er hentet inn helt siden en har drevet med trafikksimuleringer for å få frem riktige spenninger og fasevinkler til omformerstasjonene. En har antatt at fasevinklene kan skifte en del over året, og at dette kan ha en viss betydning for lastfordelingen mellom omformerstasjonene. Det er lagt ned et stort arbeid med å få en detaljert modell av nettet til Agder Energiverk, og for å få et best mulig inntrykk av fasevinkler og problemer med effektflyten mellom omformerstasjonene om de relative forskjellene skulle bli store nok.

Data for linjer og transformatorer på nettene med henholdsvis 132 kV, 110 kV, 66 kV og 50 kV er oversendt fra Agder Energiverk, samt last- og produksjonsprognoser for høylasttime i 2007. Ut fra disse dataene vil OPTPOW gi fasevinkler inn til omformerstasjonene. I møte den 16. januar 2008 ble en del av disse dataene verifisert med nettpplanlegger Rolf Erlend Grundt. Det ble også diskutert og gitt anbefalinger for hvorledes kraftstasjoner og belastninger typisk vil endres over året. Det ble enighet om å se på fire typiske perioder:

- Vinter høylasttime; høyeste forbruk i husholdninger og tilgjengelig vintereffekt fra kraftstasjoner.
- Vinter middel; antatt at 70 % av prognose for høylasttiden gir midlere forbruk i husholdningene og tilgjengelig vintereffekt fra kraftstasjoner.
- Vår og høst middel; antatt at 35 % av prognose for høylasttiden gir midlere forbruk i husholdningene og at alle kraftstasjoner i elver kjører på minst 80 % av installert ytelse. Dette representerer vårflom eller en regnfull høst.
- Sommer middel; antatt at 20 % av prognosen for høylasttiden gir midlere forbruk i husholdningene og at alle kraftstasjoner i elver er stanset. Produksjon i andre kraftstasjoner er redusert, men i henhold til bestemmelser for minstevannsføring.

Tabell 4 viser belastninger i samtlige belastningspunkter i regionalnettene over Nelaug, Krossen, Leivoll og Sira. Tallene er diskutert prinsipielt i møtet med Agder Energiverk og bygger på prognoser fra "Regional Kraftsystemutredning for Agder 2007-2017". For fasevinkler i det overliggende 300 kV stamnettet har en fått oppgitt fasevinkler fra statnett, se **Tabell 5**. En har senere i beregningene i OPTPOW benyttet de vinklene som gir de største relative forskjellene mellom omformerstasjonene.

I vedleggene 1 til 5 er enlinjeskjemaer med resultater fra OPTPOW vist for samtlige omformerstasjoner fra Nordagutu til Ganddal og årstidsmoduser, men kun for Nelaug, Krossen, Leivoll og Sira som har tilknytning til Agder Energiverk, er oppdateringer av nettet gjort. Det kan derfor tenkes at økt forbruk og nye linjer er kommet til i de øvrige nettene. Først og fremst har en lagt vekt på å få riktig impedans og lengde for de linjene som danner direkte forbindelse til omformerne, slik at radialer som går ut til forbrukere som ikke har serieforbindelse til omformer ikke nødvendigvis har innhentede verdier. Det samme gjelder for transformatorene. For belastninger og kraftstasjoner er ikke transformatorer ned til lavere spenningsnivå (22 kV, 11 kV og 230 V) inkludert. Ved beregning av lastflyten i OPTPOW har en lagt vekt på å trinne transformatorer slik at spenningen tilsvarer vanlig driftsspenning og slik at reaktiv effektflyt ikke skal bli for stor. Det er fasekompensering på lavere spenningsnivåer og derfor er alle belastninger satt med $\cos \phi$ 1,0. Imidlertid har ikke reaktiv effektflyt stor betydning for fasevinkler, og dette er ikke tillagt stor vekt. Nettene over de fleste omformerstasjonene er atskilte, men for nettene over Nelaug og Krossen

omformerstasjoner er det forbindelse på 132 kV nivå. For Leivoll omformerstasjon er det dessuten innmating fra to transformatorer fra 300 kV-nivå. I disse tilfellene vil trinning av transformatorer også ha betydning for den aktive effektfordelingen, dette kan nok ha betydning for fasevinklene helt ned til omformerstasjonene. Dette er imidlertid ikke undersøkt spesielt.

I vedlegg 1 sees effektflyten for nettet slik Agder Energiverk har det i sine beregninger i Nettbass. Fasevinkler i det overliggende nettet er satt til null, og spenningen er nøyaktig 300 kV og helt stiv. Denne beregningen er utført for å kunne sammenlignes mot beregningene for samme situasjon som Agder Energi har utført. For lastflytberegningen for Nelaug stemmer beregningene i OPTPOW nokså godt. Effekten over Arendal 300 kV transformatorstasjon ble noe lav med 6,0 MW, mens beregningene fra Agder Energiverk viste 14,3 MW. Dette kan skyldes trinning av transformatorer og effektfordeling mellom innmatingene fra 300 kV mellom Arendal og Stølen. For lastflytberegningen for Krossen fåes også delvis like resultater, det går 57,4 MW / -9,5 MVAR over transformatoren i Stølen og beregningen i OPTPOW gir 73,16 MW / 25,05 MVAR. Dette avviket er undersøkt nøye uten at det har lyktes å finne feil. For lastflyten over Leivoll omformerstasjon er avvikene små, unntatt at Stølen transformator leverer 31,3 MW og Agder Energi sin beregning viser 58,6 MW. Lastflyten over Sira omformerstasjon viser veldig like resultater. Avvikene mellom beregningene er ergerlige, men det vil ikke bli nedlagt mer arbeid i å finne ut av dem.

I vedlegg 2 sees resultatene for lastflyt når Statnett sine beregninger for "Vinter 1" er lagt til grunn og belastninger for vinter høylasttime. Lastflyten er noe endret fra den opprinnelige, men ikke mye.

I vedlegg 3 er vist resultatene fra lastflyten for "Middel vinter" der belastningene fra tabell 4 og fasevinkler i 300 kV-nettet som for "Vinter 1" er lagt til grunn. Nå viser beregningene at fasevinklene ved omformerstasjonene endres en hel del. Tydeligvis er disse følsomme for belastningen.

I vedlegg 4 sees situasjonen for "Middel vår og vinter" når fasevinkler i 300 kV er som for "Vår" i Statnetts beregning. Igjen sees store endringer av fasevinklene ned til omformerstasjonene.

I vedlegg 5 vises situasjonen for "Middel sommer" med meget lav produksjon og forbruk. Nå er det bare industribedriftene som trekker ned fasevinkelen ved omformerstasjonene.

Resultatene for omformerstasjonene Krossen, Leivoll og Sira er vist som stolpediagrammer i hoveddelens avsnitt 3.2. Selv om endringene mellom tidene på året er store, er det den relativ forskjellen i fasevinklene mellom omformerstasjonene som har betydning. Fasevinklens betydning for effekttransitt i tomgang og ved belastning blir også undersøkt i dette avsnittet.

Tabell 4 Effekt for samtlige av lastuttakene og kraftstasjonene i regionalnettet på Sørlandet som har betydning for banestrømforsyningen på Sørlandsbanen. Det er tatt utgangspunkt i prognosen for Agder Energiverk og kalkulert årstidsvariasjoner. Kun allmenn energiforsyning og kraftstasjoner endrer effektopptak/produksjon over året.

Belastninger i 132, 66, 22 og 11kV i modellen for Sørlandsbanen (Asker - Kristiansand)

Node	Type	Prognose	Middel	Middel	Middel
		høylasttime vinter 2007	vinter 2007	høst og vår 2007	Sommer 2007
		P	P	P	P
		[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
Nordagutu omformer					
ROEDA132	Allm	185,7	130,0	65,0	37,1
PORSG132	Industri	200,0	200,0	200,0	200,0
MEENA132	Allm	20,0	14,0	7,0	4,0
FROGN132	Allm	30,0	21,0	10,5	6,0
NOR132-1	Kraft st.	12,0	12,0	12,0	12,0
Nelaug omformer					
AKLAND132	Allm	14,5	10,2	5,1	2,9
GJERST132	Allm	8,3	5,8	2,9	1,7
RISØR132	Allm	15,0	10,5	5,3	3,0
AAML132	Allm	9,5	6,7	3,3	1,9
AAML132	Kraft st. E	11,8	11,8	22,0	0,0
HOGEFOS132 No1	Kraft st.	70,9	70,9	71,0	10,0
HOGEFOS132 No2	Allm	6,0	4,2	2,1	1,2
HOLDT132	Allm	25,0	17,5	8,8	5,0
BOYLE66	Kraft st. E	44,2	44,2	74,6	0,0
BOYF66EY	Kraft st. E	13,0	13,0	13,0	0,0
STGOBAI66	Industri	4,5	4,5	4,5	4,5
KROKENES66	Allm	24,0	16,8	8,4	4,8
HANEFOS66	Kraft st. E	23,0	23,0	23,0	0,0
TORBJORN66	Allm	29,0	20,3	10,2	5,8
EVENSTAD66	Kraft st. E	14,7	14,7	21,0	0,0
FROLAND66	Allm	11,0	7,7	3,9	2,2
VINDHOLM66	Allm	2,0	1,4	0,7	0,4
Krossen omformer					
BROKKE132	Kraft st.	160,0	160,0	160,0	30,0
HEKNI132 No 1	Kraft st. E	41,0	41,0	48,0	10,0
HEKNI132 No 2	Allm	3,0	2,1	1,1	0,6
HOVATN132	Kraft st. E	23,1	23,1	44,0	10,0
JORUNDL132	Kraft st. E	51,0	51,0	52,0	0,0
FJAERE132	Allm	38,0	26,6	13,3	7,6
GRIMST132	Allm	16,0	11,2	5,6	3,2
STGOBAILI66	Industri	25,0	25,0	25,0	25,0
BIRKEL132	Allm	15,7	11,0	5,5	3,1
MOEN132	Allm	34,0	23,8	11,9	6,8
RYGENE132 No1	Kraft st. E	36,0	36,0	52,0	0,0
RYGENE132 No2	Industri	12,0	12,0	12,0	12,0
ENGENE132	Allm	23,0	16,1	8,1	4,6
BJORE132	Allm	7,0	4,9	2,5	1,4
BJORBK132	Allm	26,5	18,6	9,3	5,3
BARBU132	Allm	25,0	17,5	8,8	5,0

Belastninger i 132, 66, 22 og 11kV i modellen for Sørlandsbanen (Asker - Kristiansand)

Node	Type	Prognose	Middel	Middel	Middel
		høylasttime vinter 2007	vinter 2007	høst og vår 2007	Sommer 2007
		P	P	P	P
		[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
LUND132	Allm	45,0	31,5	15,8	9,0
STEIN50 No 1	Kraft st. E	Flomkraft 0		16,0	0,0
STEIN50 No 2	Kraft st. E	Flomkraft 0		16,0	0,0
STEIN11	Kraft st. E	71,5	71,5	100,0	20,0
NOME50	Kraft st. E	21,5	21,5	22,0	0,0
IVELA50 No 1	Kraft st. E	42,8	42,8	43,0	0,0
IVELA50 No 2	Allm	3,8	2,7	1,3	0,8
EVJE50	Allm	16,0	11,2	5,6	3,2
AUGLAND50	Allm	10,8	7,6	3,8	2,2
DALANE50	Industri	9,0	9,0	9,0	9,0
ELKEM50	Industri	0,0	4,3	4,3	4,3
FALCON50	Industri	75,0	75,0	75,0	75,0
FALKONKJ50	Industri	0,0	7,1	7,1	7,1
Krossen 11kV	Allm	22,0	15,4	7,7	4,4
Elvegata	Allm	26,0	18,2	9,1	5,2
Gartnerløkka	Allm	30,0	21,0	10,5	6,0
Hannevika	Allm	25,0	17,5	8,8	5,0
Kjos	Allm	36,0	25,2	12,6	7,2
Lumber	Allm	10,0	7,0	3,5	2,0
KROSS50		149,0	104,3	52,2	29,8
Leivoll omformer					
Øye110	Allm	18,0	12,6	6,3	3,6
Vanse110	Allm	17,0	11,9	6,0	3,4
Havik110	Allm	17,0	11,9	6,0	3,4
Lyngdal110	Allm	29,0	20,3	10,2	5,8
Vallemoen110	Allm	8,5	6,0	3,0	1,7
Ramslandsvågen	Allm	16,0	11,2	5,6	3,2
Hallshaug110	Allm	33,0	23,1	11,6	6,6
Hallshaug110	Kondensator	-10,8	-10,8	-10,8	-10,8
Mikkelsmyr110	Allm	17,5	12,3	6,1	3,5
Leire110	Allm	25,0	17,5	8,8	5,0
Skjerka110	Allm	10,5	7,4	3,7	2,1
Skjerka110	Kraft st. E	-98,0	-98,0	-100,0	0,0
Håverstad111	Kraft st. E	-44,0	-44,0	-50,0	0,0
Bjelland110	Allm	7,8	5,5	2,7	1,6
Bjelland111	Kraft st. E	-51,0	-51,0	-56,0	0,0
Hunsfoss111	Kraft st. E	11,2	11,2	-13,0	0,0
Hunsfoss110	Industri	12,0	12,0	12,0	12,0
Huntonitt110	Industri	7,2	7,2	7,2	7,2
Vigeland110 No1	Kraft st. E	24,0	24,0	-24,0	0,0
Vigeland110 No2	Industri	11,0	11,0	11,0	11,0
Vennesla110	Allm	23,0	16,1	8,1	4,6
Laudal110	Allm	10,0	7,0	3,5	2,0

Belastninger i 132, 66, 22 og 11kV i modellen for Sørlandsbanen (Asker - Kristiansand)

Node	Type	Prognose	Middel	Middel	Middel
		høylasttime vinter 2007	vinter 2007	høst og vår 2007	Sommer 2007
		P	P	P	P
		[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
Laudal110	Kraft st. E	-26,0	-26,0	-30,0	0,0
Friks110	Allm	26,0	18,2	9,1	5,2
Kullia110	Allm	20,0	14,0	7,0	4,0
Fiskaa110	Industri	20,0	20,0	20,0	20,0
Logna110	Allm	3,0	2,1	1,1	0,6
Logna110	Kraft st. E	-18,0	-18,0	-18,0	0,0
Smela110	Kraft st. E	-23,0	-23,0	-23,0	0,0
Timenes110	Allm	26,0	18,2	9,1	5,2
Ålefjær110	Allm	10,0	7,0	3,5	2,0
Sira omformer					
Finså	Allm	7,0	4,9	2,5	1,4
Finså	Kraft st. E	21,9	21,9	21,9	0,0
Søyland	Allm	14,0	9,8	4,9	2,8
Austvik	Allm	15,7	11,0	5,5	3,1

Prognose 2007 er høylasttime prognosert i kraftsystemplanen for Agder energiverk

Middel vinter 2007 er 70 % av den prognosert høylasttiden

Middel høst og vår 2007 er 35 % av den prognosert høylasttiden

Middel sommer 2007 er 20 % av prognosert høylasttime

Industriaster antas konstant uansett årstid

Kraftverk merket E er elvekraftverk og vil på en tørr sommer ha null produksjon.

På høst og vår kan disse ha produksjon mellom null eller minstevannsføring og full ytelse. Antar at elvekraftverkene kjører på minst 80 % av installert ytelse for å beregne en våt høst.

Tabell 5 Spenning og fasevinkler for sentrale transformatorstasjoner som er tilknyttet regionalt kraftnett, og som påvirker fasevinklene til omformerstasjonene. Oppgitt av Statnett slik som de mener er ”typiske verdier” for årstidene.

	Org.			Vinter 1			Vinter 2			Vår			Sommer			Høst		
	Spenning	Vinkel	Vinkel ref Flesaker	Spenning	Vinkel	Vinkel ref Flesaker	Spenning	Vinkel	Vinkel ref Flesaker	Spenning	Vinkel	Vinkel ref Flesaker	Spenning	Vinkel	Vinkel ref Flesaker	Spenning	Vinkel	Vinkel ref Flesaker
Flesaker	292	34	0	294	19	0	293	10	0	298	9,4	0	303	0,9	0	299	-13	0
Tveiten	293	32	-2	295	17	-2	294	8,1	-2	296	7,3	-2	303	-2	-3	300	-15	-2
Rød	295	35	1	296	19	-0	296	11	0,4	299	7,9	-2	302	-4	-4	301	-16	-3
Porsgrunn	297	34	0	299	18	-1	300	11	0,4	298	7,9	-2	300	-5	-6	303	-16	-3
Arendal	297	35	1	299	20	1,2	300	13	2,9	300	9,2	-0	300	-10	-11	302	-16	-3
Kristiansand	295	37	3	298	22	3,2	297	15	4,7	297	9,4	0	297	-14	-15	297	-15	-2
Feda	294	42	8	296	27	8	296	18	8,1	299	14	4,3	297	-15	-16	297	-14	-1
Kjelland	292	38	4	294	25	6,4	294	16	6	301	15	5,2	300	-16	-17	297	-14	-1
Stokkeland	290	36	2	293	24	5,4	293	15	4,5	301	15	5,7	301	-16	-17	297	-15	-2

VEDLEGG 6 Notat vedrørende problemer med tilbakemating
i Leivoll omformerstasjon.

NOTAT

LEIVOLL OMFORMERSTASJON

VURDERING AV PROBLEMER MED TILBAKEMATING

01	Oppdatering etter kommentarer fra FM	07.05.08	STOY		
00	Utkast	05.05.08	STOY		
Rev.	Revisjonen gjelder	Dato	Utarb. av	Kontr. av	Godkj. av
LEIVOLL OMFORMERSTASJON TILBAKEMATING		Ant. sider	Fritekst 1d		
		10	Fritekst 2d		
			Fritekst 3d		
			Produsent	Bane Energi	
		Prod. dok. nr.			
Tittel: Leivoll omformerstasjon Undertittel: Tilbakemating		Erstatning for			
		Erstattet av			
 Jernbaneverket		Dokument nr.			Rev. 01
		Dokument nr.			Rev.

1	INNLEDNING	3
2	ANALYSE AV PROBLEMET	4
2.1	MÅLERE.....	4
2.2	FASEVINKEL	4
2.2.1	<i>Transformatoren på Leivoll</i>	7
2.2.2	<i>Agder Energi sin trefasetransformator.</i>	7
2.2.3	<i>Sannsynlig feil</i>	8
3	FULLSKALA FORSØK MED OMKOPLING	9

1 INNLEDNING

Leivoll omformerstasjon har siden idriftssettelsen i 2001 tilbakematet store mengder energi fra enfasenettet til trefasenettet. Kun i situasjoner med svært stor belastning har Leivoll omformer matet effekt ut til enfasenettet. Dette har vært forklart med fasevridning i overliggende trefasenett. Omformerens eneste misjon har da vært å heve spenningen i kontaktledningsanlegget, mens effekten har blitt matet fra nabostasjonene Krossen og Sira. Belastningen på omformerens har i stor grad vært reaktiv, i tillegg til tilbakematet aktiv effekt.

Tilbakematingen har hatt økonomiske konsekvenser ved at tapene i kontaktledningsanlegget og i omformere har økt på grunn av uønsket effektflyt mellom omformerstasjoner. Jernbaneverket har videre betalt mer for energien som ble kjøpt i Krossen og Sira, enn den som har blitt solgt i Leivoll.

Frank Martinsen ved Jernbaneverket ITPE (nå BTPE) gjennomførte i november og desember 2007 detaljerte simuleringer av overliggende trefasenett i området for å undersøke problemstillingen. Simuleringsresultatene ble sammenstilt med logger av belastningen fra Bane Energis driftssentral. Det ble ikke funnet samsvar mellom simulerte og loggete tomgangsbelastninger selv i verst tenkelige tilfelle av fasedreining i trefasenettet. Loggen viste at omformerens mater tilbake så mye som 1,5 – 2 MW (på generator), mens simuleringene i verste tilfelle viste 0,1 – 0,2 MW. Konklusjonen ble at fasedreining i overliggende trefasenett ikke kunne forklare de store målingene av tilbakematet effekt.

2 ANALYSE AV PROBLEMET

På bakgrunn av uoverensstemmelsen mellom simuleringer og målte verdier ble det gjennomført nye analyser av problemene. Flere mulige feilkilder ble vurdert.

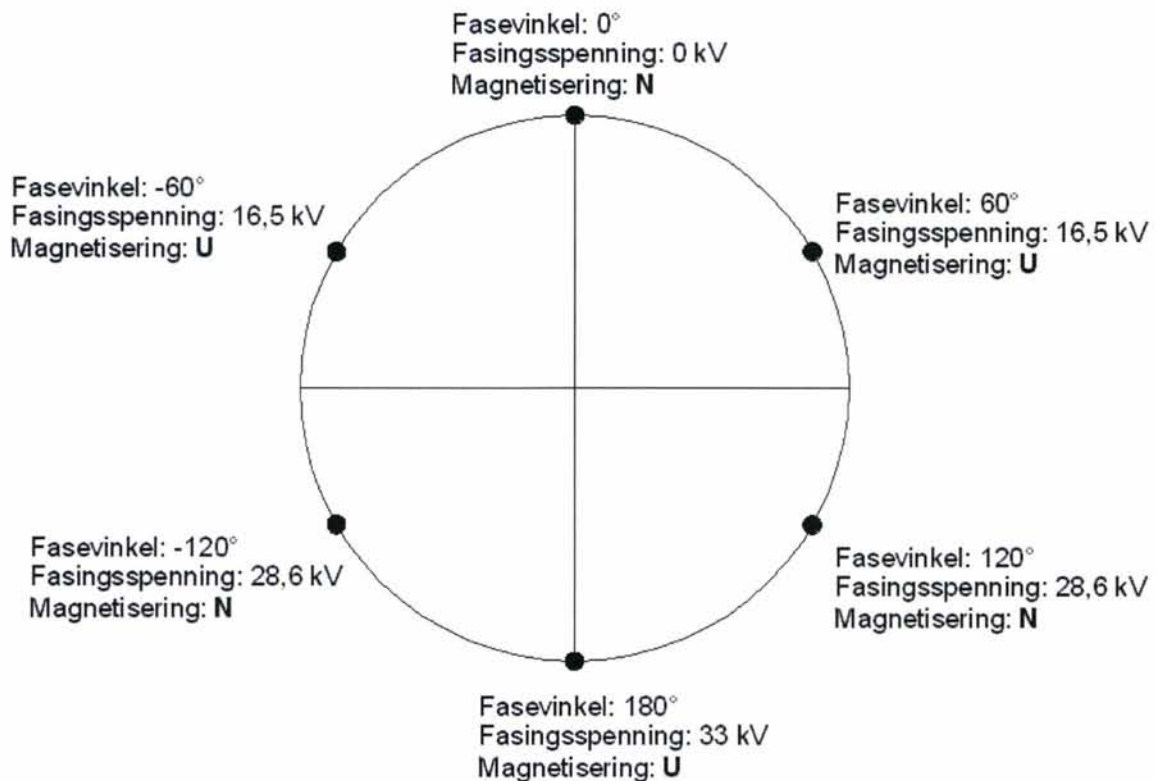
2.1 Målere

Først ble alle målerne i Leivoll kontrollert mot hverandre og det ble oppdaget at den ene av de to omformerne i Leivoll (som ble idriftssatt tidligere på høsten 2007) ga målinger med feil effektretning. For øvrig var det samsvar mellom målinger på utgående linjer, målinger på den ene omformeren, og målinger på transformatoren. Det ble konkludert med at feilmålinger er en lite sannsynlig årsak til den registrerte tilbakematingen. Dette har det også tidligere blitt konkludert med.

2.2 Fasevinkel

Den neste teorien var at omformeren lå i feil fase i trefasenettet. Dette kunne for eksempel skje ved at omformeren hadde fått feil fasefølge, slik at den lå 120 grader for langt bak på trefasesiden, tilsvarende 40 grader for langt bak på enfasesiden. Det ble gjort simuleringer med dette tilfellet, og resultatene viste at dette kunne være en plausibel forklaring. Det ble derfor jobbet videre med denne teorien.

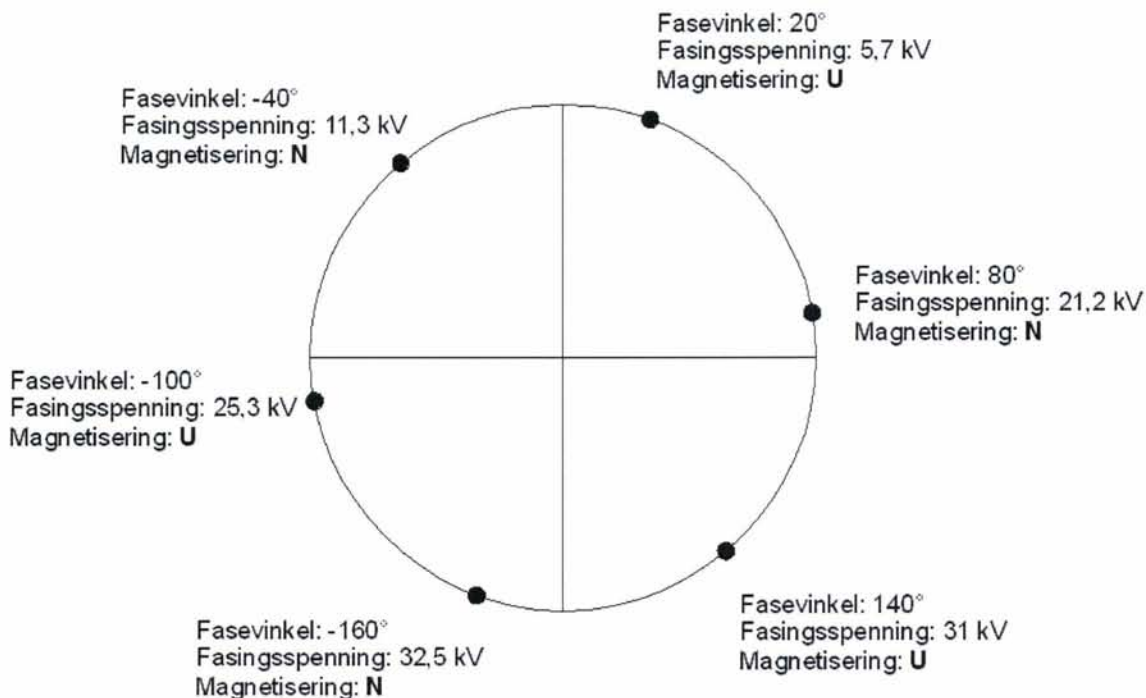
En roterende omformer har innfasingsutrustning, som skal fase inn omformeren riktig mot enfasenettet. Denne virker slik at dersom tomgangsspenningen (med åpen bryter) mellom enfasegenerator og enfase samleskinne er mer enn ca. 8 kV, vil ikke bryteren gå inn, men omformeren vil hoppe bakover til neste polhakk. Dette gjøres ved å snu retningen på feltstrømmen til motorens polhjul. Da vil motorens rotor brått hoppe ett polhakk, dvs. 180 elektriske grader, bakover. Generatorens rotor (som sitter på samme aksel) vil hoppe bakover et likt antall mekaniske grader, og dermed en tredjedel så mange elektriske grader: 60 elektriske grader. I tillegg sjekkes ytterligere en ting; -Når innfasingen er ferdig, skal magnetiseringsstrømmen til motor gå i riktig retning, såkalt normal magnetisering. Dersom magnetiseringsstrømmen til motor går i feil retning når innfasingen er ferdig, er magnetiseringen unormal, og bryteren går ikke inn. I figur 1 er dette beskrevet, der enfasegeneratorens fasevinkel i forhold til enfasenettet er vist. For hvert polhakk er fasevinkel og innfasingsspenning vist, i tillegg til magnetisering (N / U).



Figur 1. Vektordiagram for spenningen på generatorsiden ved normal innfasing.

I et normalt tilfelle kan generatorens effektbryter kun gå inn i de fasene som er markert med normal, "N", og dersom spenningsforskjellen mellom generator og enfase samleskinne er mindre enn 8 kV. Derfor kan omformerens ved riktig tilkøpling bare legges inn i fase.

Hva skjer så dersom fasefølgen på trefasesiden er forskjøvet slik at motoren ligger 120 grader lengre bak, som antatt? I et slikt tilfelle vil hele diagrammet forskyves 40 grader bakover, som vist i figur 2. Her vil ikke omformerens kunne legges inn i det hele tatt. Dersom generatoren ligger 40 grader bak enfase samleskinne, blir målt spenning mellom generator og samleskinne 11,29 kV, og omformerens går ikke inn. Ved -340 grader, dvs. $+20$ grader, blir målt spenning 5,7 kV, men her er magnetiseringen unormal, dvs. at magnetiseringsstrømmen til motor går feil vei, og bryteren går ikke inn. I denne situasjonen ville ikke omformerens blitt faset inn i det hele tatt.



Figur 2. Vektordiagram for en fasegenerator når trefasenettet er vridd 120° bakover.

Tilsvarende utledning viser at dersom fasefølgen byttes motsatt slik at generatoren blir liggende 40 grader for langt foran, vil en tilsvarende situasjon oppstå.

Dermed kan feil revolivering av innkommende trefaselinje ikke være grunnen til den målte tilbakematingen.

Fremdeles mente man at omformerer lå for langt bak i fase, og at dette var årsaken til tilbakematingen. Men hva kunne være årsaken til dette, og hvor mange grader dreide det seg om? Det ble foreslått to mulige grunner:

- En transformator i overliggende nett har feil klokketall. Klokketallet til alle overliggende transformatorer skal være 0, mens klokketallet til omformerens transformator skal være 11. Dokumentasjonen på de respektive transformatorer er gjennomgått (nettselskapets 300 / 110 kV transformator, samt omformertransformatoren), og dokumentasjonen viser at begge disse transformatorene har rett klokketall (hhv 0 og 11). Ved feil interne koplinger (fabrikasjonsfeil) på en av transformatorene kan dette imidlertid være feilkilden.
- Enfase tur- og returkabel er tilkoplest omformerer motsatt, slik at enfasenettet sett fra omformerer blir i motfase i forhold til slik det skal være. Dersom denne feilen har oppstått i kombinasjon med at omformerer har fått feil fasefølge, som i den forrige hypotesen, vil generatoren gå inn i de polhakkene som er markert med unormal "U".

Det siste alternativet holdes for å være svært usannsynlig, da tur- og returkabler er av forskjellig utførelse.

En trefasetransformator kan koples med klokketall 0-11, dvs. til sammen 12 forskjellige koplinger. De ulike koplingene gir fasevridning på transformatoren på 30 grader for hvert klokketall. Klokketall 11 gir en fasevridning på -30 grader.

Ved ulike interne koplinger på en transformator med koplingsgruppe YD (uten revolveringer) er det mulig å få klokketall 1, 5, 7 og 11. I tillegg kan YY og DD-koplete transformatorer ha klokketall 0 og 6. Ved revolvering av fasene kan en få en fasevridning som tilsvarer den aktuelle transformatorkoplingens klokketall ± 4 .

2.2.1 Transformatoren på Leivoll

En skal her se på hva som vil skje ved de ulike koplingene på YD-koplete transformatorer (som hovedtransformatoren i Leivoll).

- Klokketall 11 er referansen. Dette gir "riktig" fasevinkel.
- Klokketall 1 vil gi en fasevridning på +60 grader i forhold til "riktig" kopling, og det tilsvarer +20 grader på enfasesiden. Denne faseforskjellen ville innfasingsutrustningen akseptere (5,7 kV innfasingsspenning), og omformerer ville bli lagt inn. Omformerer ville da ligge 20 grader foran resten av enfasenettet, og derfor bli belastet mer enn den skulle. Dette samsvarer ikke med målingene, og er derfor ikke tilfelle.
- Klokketall 5 ville gi en fasevridning på +180 grader i forhold til "riktig" kopling, og det tilsvarer +60 grader på enfasesiden. Innfasingsutrustningen ville dermed begynne å fase bakover. Ved 0 grader (ref. enfase) ville motoren være magnetisert unormalt "U", og fasingen ville fortsette. Omformerer ville ikke gå inn.
- Klokketall 7 ville gi en fasevridning på -120 grader i forhold til "riktig" kopling. Dersom omformerer begynner å fase, vil den i dette tilfellet ikke gå inn. Dersom dette var feil ville det bare være å bytte faserekkefølge for å rette feilen.
- Dersom denne transformatoren er koplet feil, må det derfor også være en feil revolvering i tillegg som gjør at omformerer ligger i feil fase. Denne feilen kan kun oppstå dersom klokketallet er 1 eller 5.

De aktuelle feilkoplingene er:

- Klokketall 1 og en revolvering bakover gir totalt klokketall 9, og 60 grader bak "riktig" kopling. Dette tilsvarer 20 grader på enfasesiden. Omformerer ville her bli lagt inn 20 grader bak. Dette samsvarer med målinger av tilbakematet aktiv effekt.
- Klokketall 5 og en revolvering forover gir også klokketall 9, og er derfor også en mulig forklaring på problemet.

2.2.2 Agder Energi sin trefasetransformator.

Den overliggende transformatoren til Agder Energi er en YY-koplet transformator. Slike kan kun ha intern kopling med klokketall 0 og 6. Klokketall 0 er her "riktig" kopling. Dersom denne transformatoren er koplet i klokketall 6 i stedet for 0, vil samme situasjon oppstå som klokketall 5 på den YD-koplete transformatoren som skulle ha 11. Spenningen vil komme i

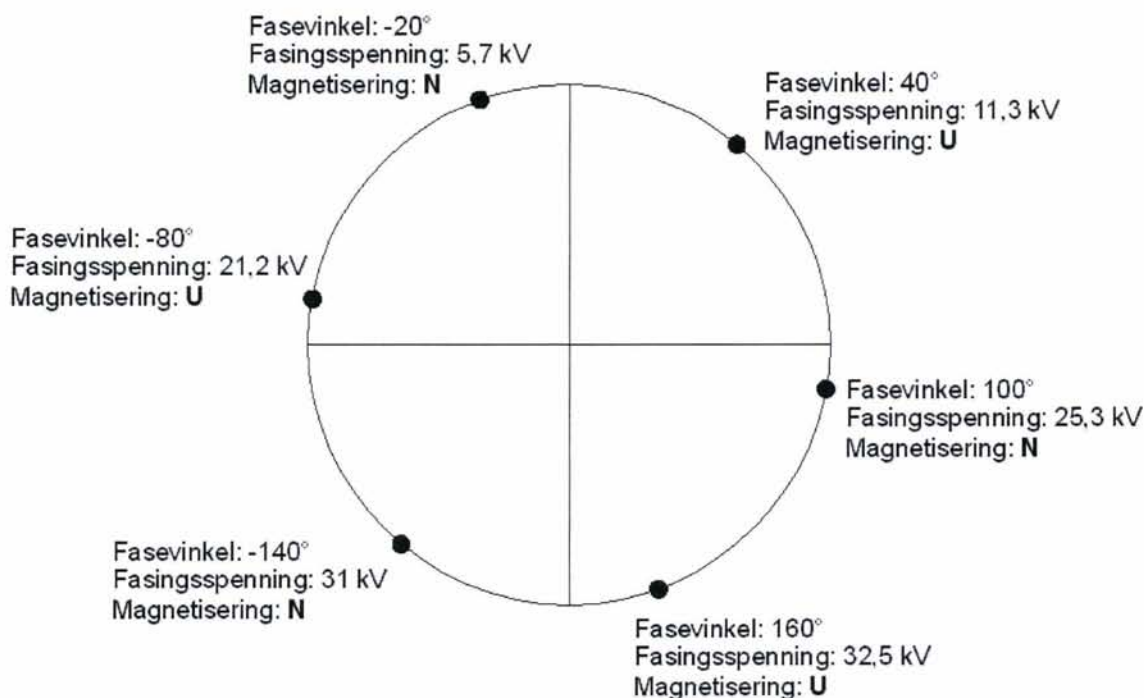
motfase. Dersom det i tillegg er en revolvering forover et sted, vil omformereren gå inn 20 grader bak.

2.2.3 Sannsynlig feil

Dermed kan følgende mulige feil forklare tilbakemating fra Leivoll:

- Agder Energi sin overliggende transformator (YY) er koplet med klokketall 6 i stedet for 0. I tillegg er trefasenettet revolvert forover en gang for mye.
- Bane Energi sin omformertransformator (YD) er koplet med klokketall 1 i stedet for 11. Trefasenettet er i tillegg revolvert bakover en gang for mye.
- Bane Energi sin omformertransformator (YD) er koplet med klokketall 5 i stedet for 11. I tillegg er trefasenettet revolvert forover en gang for mye.
- Enfaset tilkøpling til omformereren er motsatt. I tillegg er trefasenettet revolvert forover en gang for mye.

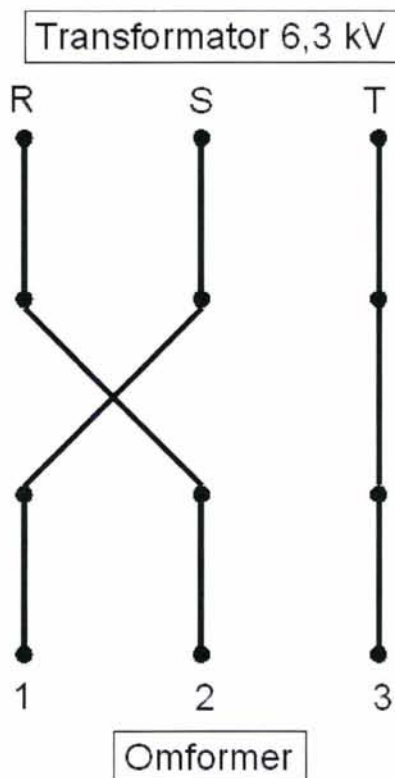
I alle disse mulige tilfellene ligger omformereren 60 grader etter i fase på trefasesiden, tilsvarende 20 grader etter på enfasesiden. Det holdes derfor som overveidende sannsynlig at dette er tilfelle. Figur 3 viser hvordan innfasingen ser ut i dette tilfellet. Som figuren viser, er innfasingsspenningen ved -20 grader kun 5,7 kV, så lite at innfasingsutrustningen vil akseptere dette og legge inn omformereren.



Figur 3. Sannsynlig innfasing for omformerne i Leivoll.

3 FULLSKALA FORSØK MED OMKOPLING

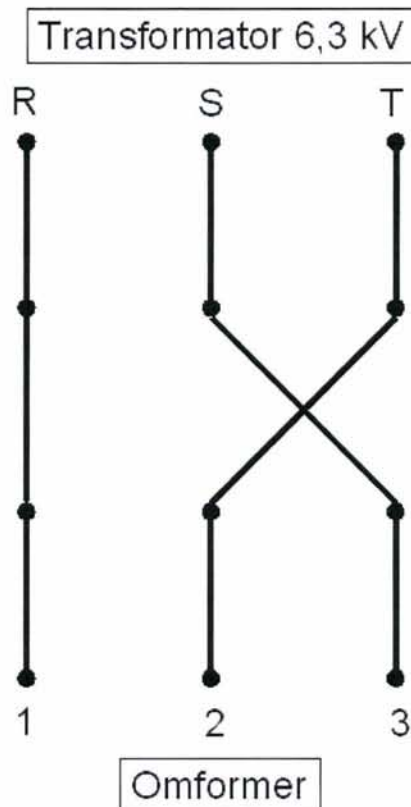
Mandag 14 januar 2008 var Samson Yared fra ITPE (nå BTPE) og Svein Dahl, Gunvald Brokke, Aksel Solås og Øyvind Stensby fra BE i Leivoll for å kople om tilkoplingen mellom trefasetransformatoren og omformerne slik at omformerne går i rett fase. Tilkoplingen av transformatoren på 6,3 kV-siden var som vist i figur 3.



Figur 4. Tilkopling mellom transformator og omformer.

Denne koplingen innebærer at rotasjonsretningen var snudd. Dette er sannsynligvis gjort som en rettelse under idriftssettelsen av stasjonen.

For å vri fasen 120 grader bakover, ble denne tilkoplingen koplet om, som vist i figur 4. Med dette skulle omformerens fase i forhold til enfasenettet bli som i figur 1, men med unormal magnetisering ved 0° faseforskjell (dvs. at motorens magnetiseringsstrøm går i unormal retning).



Figur 5. Ny tilkøpling mellom transformator og omformer.

Omformerene ble startet og fasett inn, og det ble vist at omformerene med denne koplingen kom i fase ved unormal magnetisering. Omformerene ble tilkoppelt enfasenettet, og det ble umiddelbart verifisert at den tok belastning som den skulle.

Som en midlertidig løsning er omformerene i Leivoll nå koplet om, slik at normal og unormal magnetisering er definert motsatt, for at omformerene skal kunne starte automatisk.

I den påfølgende uka ble det verifisert fra Bane Energis driftssentral at omformerene tar belastning som de skal. I perioder når det forventes at omformerene skal gå i tomgang er belastningen på rundt 50 – 100 kW (i motsetning til tidligere 1,5 – 2 MW tilbakemating). Det anses derfor som svært sannsynlig at en av de ovenfor beskrevne feilene har vært årsak til problemene. Det gjenstår arbeid for å finne ut eksakt hvor feilen befinner seg.

Nåværende løsning er imidlertid ikke en varig løsning. Det ble gjort noen enkle tilpasninger i omformerens kontrollutrustning for at de kan driftes i rett fase midlertidig. Disse tilpasningene må reverseres når omformerene skal flyttes til et annet sted. Videre jobber BE med å bygge om magnetiseringsutrustningen for de roterende omformerene til børsteløs magnetisering. Da vil man ikke ha mulighet til å snu magnetiseringsstrømmen til motor, og det er derfor ikke mulig å magnetisere maskinen unormalt. Følgelig må feilen finnes og utbedres før Leivoll kan bestykses med en børsteløs maskin.

Classic DFS, 15 mm for 121-150 sheets S28
www.bindomatic.com

Jernbaneverket
Biblioteket

JBV



09TU10935

102980