

# Jordfeildeteksjon i spolejorda distribusjonsnett

Mulige årsaker til utilsiktet utfall av linjer i Fillan  
transformatorstasjon

**Magnus Guldal**

Master i energi og miljø

Oppgaven levert: Juni 2007

Hovedveileder: Hans Kristian Høidalen, ELKRAFT



# Oppgavetekst

Spolejorda distribusjonsnett benyttes for å redusere jordfeilstrømmene. Spolen reguleres for å kompensere de kapasitive driftsstrømmene i nettet. Den spenningen som da oppstår i nøytralpunktet er avhengig av spoleinnstilling, usymmetrien i nettet og kapasitanser og konduktanser mot jord. Hvis nøytralpunktsspenningen blir for stor kan det i visse tilfeller feiltolkes som jordfeil og føre til utilsiktet utkobling av nettet. TrønderEnergi benytter mye spolejording og ser at nøytralpunktsspenningen varierer fra nett til nett. På Hitra er nøytralpunktsspenningen stor mens den på nabøya Frøya med tilsynelatende tilsvarende nett er liten. Det er imidlertid uvisst om dette gjelder for alle værforhold. Spørsmålet blir da: Hva er årsaken til denne variasjonen og hvordan skal e-verket forholde seg ved innstilling av jordfeilsvern?

Oppgaven går ut på å undersøke funksjonalitet til jordfeilvern i spolejorda nett, analysere hva som styrer spenningen i nøytralpunktet ved hjelp av teoretiske betraktninger, foreta simuleringer i dataprogrammet ATP med modellering av usymmetri, last og konduktiv avledning, og gjennomføre langtidsmålinger av nøytralpunktsspenning og nullstrømmer i Fillan transformatorstasjon på Hitra for å avdekke eventuelle variasjoner og avhengighet av vær og lastforhold.

Oppgaven gitt: 29. januar 2007

Hovedveileder: Hans Kristian Høidalen, ELKRAFT



## Forord

Denne diplomoppgaven er gjennomført ved NTNU, institutt for elkraftteknikk for elkraftteknikk våren 2007. Den omhandler nullpunktspenningsproblematikk i TrønderEnergis spolejordete nett på Hitra i Sør-Trøndelag, herunder grunner til variasjoner i nullpunktspenningen. Diplomoppgaven er en fortsettelse på arbeidet som ble gjort i prosjektoppgaven ”Jordfeilvern og spolejorda distribusjonsnett” som ble gjennomført høsten 2006.

Jeg vil herved rette en takk til ansatte ved institutt for elkraftteknikk og Sintef energiforskning for hjelp med bakgrunnsinformasjon og utlån av utstyr. Jeg vil også spesielt takke professor Hans Kristian Høidalen for hjelp og støtte i arbeidet med diplomoppgaven.

Til slutt vil jeg rette en takk til TrønderEnergi ved Lars Hofstad for gjennomføring av datalogging i Fillan transformatorstasjon, samt hjelp til å finne bakgrunnsinformasjon så vel som praktisk innsikt i spolejording og verninnstillinger.



## Sammendrag

I denne oppgaven er det sett på nullpunktspenninger i det spolejordete Fillan-nettet på Hitra. Grunner til variasjoner i nullpunktspenningen er undersøkt, spesielt med hensyn å avdekke hvorfor man i noen tilfeller får unormalt høye spenninger. Dette har i det aktuelle nettet tidligere ført til uønskede utkoblinger av feilfritt nett.

Nullpunktspenningen samt nullstrømmene for de fire avgangene i nettet er logget i perioden 7. februar til 14. mars. Dette ble gjort for å undersøke en eventuell sammenheng mellom nullpunktspenningen og værforholdene. På grunn av en feil i jordslutningsspolens regulatorkrets den 12. februar ble perioden hvor målingene kunne brukes veldig kort.

Det ble funnet en sammenheng mellom nedbør og nullpunktspenning, hvor nullpunktspenningen var lavere i regnvær. Dette kan forklares ut fra økt konduktiv avledning i vått vær. Det kunne imidlertid være ønskelig med flere målinger for å verifisere dette da datagrunnlaget er noe tynt.

En sammenheng mellom lastforholdene i nettet og nullpunktspenningen ble også vist. Variasjonene som følge av dette var imidlertid begrensede og kan ikke forklare nullpunktspenninger i en størrelsesorden som vil aktivere jordfeilvernene.

Nettet på Hitra ble simulert i programmet ATP. Simuleringene viste at en lav symmetrisk konduktiv avledning vil kunne aktivere jordfeilvernene, men at vernene i disse tilfellene ikke vil løse ut linjen grunnet for lav wattmetrisk nullstrøm. Det må i forbindelse med simuleringene nevnes at samsvar mellom kretsparametrene i simuleringen og målingene ikke ble oppnådd, og at dette kanskje kan føre til feil.

Variasjoner i den kapasitive usymmetrien som følge av endringer i temperatur, luftfuktighet, lufttrykk og nedbør kan sannsynligvis avskrives som grunn til endringer i nullpunktspenningen. Her må det imidlertid tas forbehold på grunn av et tynt målegrunnlag.

Det ble ikke observert nullpunktspenninger som var høye nok til å aktivere jordfeilvernene i perioden hvor målinger ble gjort. Det ble heller ikke funnet noen sikker forklaring på hvorfor dette har oppstått tidligere.





## Abstract

In this thesis the zero sequence voltage of the Petersen coil grounded distribution network at Fillan on the island of Hitra has been examined. The reasons for changes in the zero sequence voltage have been investigated in order to discover why extremely high zero sequence voltages sometimes may occur. This has in the past lead to disconnections of lines by the earth fault protection relays.

The zero sequence voltage and the zero sequence currents of the four lines from the transformer substation have been logged in the period from February 7<sup>th</sup> to March 14<sup>th</sup>. This has been done to investigate any possible connection between the zero sequence voltage and the weather conditions. A fault occurred in the coil regulator unit on February 12<sup>th</sup>. This meant that only the readings prior to this date could be used in comparing with the zero sequence voltage.

A connection was found between the zero sequence voltage and rainfall, where the rainfall lead to a lower zero sequence voltage. This can be explained by lower resistance between the zero sequence system and true earth. One could however want more readings to verify this.

A connection between the zero sequence voltage and the load conditions in the network was also found. The changes due to this was however too small to explain any zero sequence voltages high enough to activate the earth fault protection relays.

The Fillan distribution network was simulated in the program ATP. These simulations showed that a very high symmetrical resistance between the zero sequence system and true earth could lead to zero sequence voltages high enough to activate the earth fault protection relays, but that these would not disconnect any lines due to a too low resistive zero sequence current. One must however mention that accordance between the network parameters and the simulated ones were not obtained. This may lead to faulty results.

Changes in the capacitive dissymmetry as a result of changes in temperature, air humidity, air pressure and rainfall can probably be cleared of any influence in changes in the zero sequence voltage. A reservation must here be made with reference to the few readings witch this is based on.

No observations of zero sequence voltages high enough to activate the earth fault relays were made. Nor were any certain explanation of such high voltages found.



<b>1 Innledning</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Teoridel</b> .....	<b>3</b>
2.1 Jording av nullpunkt .....	3
2.1.1 Direkte jording .....	3
2.1.2 Isolert nullpunkt .....	3
2.1.3 Spolejording .....	4
2.2 Spenning og strømmer i nullsystemet .....	5
2.3 Jordfeil og behandling av disse .....	7
2.3.1 Automatisk gjeninnkobling .....	7
2.3.2 Begrensing av feilstrøm .....	8
2.3.3 Jordfeilvernet .....	9
2.4 Feilfritt spolejordnet nett .....	12
2.4.1 Kapasitiv avledning .....	14
2.4.2 Konduktiv avledning .....	16
<b>3 Datalogging i Fillan trafostasjon</b> .....	<b>17</b>
3.1 Oppsett av måleutstyr .....	17
3.2 Resultater .....	18
3.2.1 Nullpunktspenningen .....	18
3.2.2 Nullstrømmene .....	20
3.2.3 Nullsystemimpedansen .....	22
3.3 Sammenligning med værdata .....	24
3.3.1 Temperaturens innvirkning .....	25
3.3.2 Nedbørens innvirkning .....	26
3.3.3 Lufttrykkets innvirkning .....	28
3.3.4 Luftfuktighetens innvirkning .....	29
3.3.5 Duggpunktstemperaturens innvirkning .....	30
3.4 Sammenligning med lastforhold .....	31
3.5 Oppsummering og diskusjon av måleresultater .....	34
<b>4 Simuleringer</b> .....	<b>37</b>
4.1 Resultater fra prosjektoppgaven .....	40
4.2 Simuleringsresultater .....	41
4.2.1 Nullstrømbidrag i nettet .....	41
4.2.2 Konduktiv avledning .....	45
4.2.3 Sammenligning med måleresultater .....	48
4.2.4 Simulering av hendelsene den 12. februar .....	51
4.3 Hva skal til for å aktivere jordfeilvernet? .....	53
4.3.1 Jordfeil på enden av radialene .....	53
4.3.2 Minket konduktiv avledning .....	55
4.3.3 Økt kapasitiv usymmetri .....	56
4.4 Oppsummering og diskusjon av simuleringsresultater .....	57
<b>5 Konklusjon</b> .....	<b>59</b>
<b>6 Referanseliste</b> .....	<b>61</b>
<b>Vedlegg</b> .....	<b>63</b>



# 1 Innledning

TrønderEnergi er i ferd med å gå over til spolejording i sitt distribusjonsnett og har i den forbindelse i noen tilfeller erfart problemer med høy spenning over kompensasjonsspølen. Dette skaper problemer for jordfeilvernene, og fører til uønskede bortkoblinger av feilfrie linjer. Dette gjelder spesielt i Soknedal og på Hitra. I den forbindelse er en datalogger satt ut i Fillan transformatorstasjon på Hitra for å overvåke nullpunktspenningen i transformatoren. Nullstrømmene på de fire avgangene fra stasjonen er også blitt loggført.

Bakgrunnen for den høye nullpunktspenningen søkes belyst gjennom sammenligninger med blant annet meteorologiske parametere og lastforhold. Innvirkningen av disse vil bli vurdert opp mot konduktiv og kapasitiv avledning i nettet, som ansees som de viktigste parametrene hva nullpunktspenning i spolejordete nett angår.

Nettet vil også bli forsøkt simulert i ATP for å underbygge og supplere målingene fra nettet. Her vil innvirkningen av de ulike parameterne kunne undersøkes nærmere.



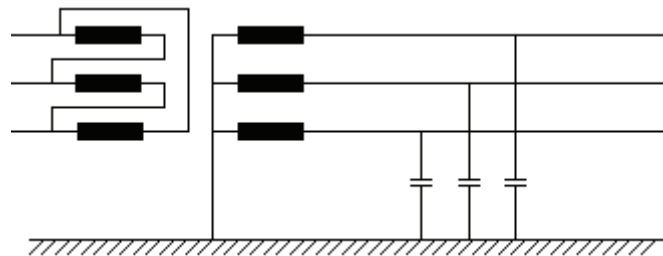
## 2 Teoridel

### 2.1 Jording av nullpunkt

I en trefasetransformator hvor et av uttakene er stjernekoblet, tar man også ut et nullpunkt. Dette skal ved optimale, symmetriske forhold ligge på jordpotensiale. Nullpunktet i et trefasesystem kan behandles på flere ulike måter. Det kan isoleres fra jord, kobles direkte til jord, kobles til jord gjennom en resistans eller kobles til jord gjennom en induktans. Teoretisk sett vil ikke jordingsmetoden spille noen rolle i normal drift, da jord ikke vil lede noen strøm. (Faanes, Olsen 2005) Hvis det derimot oppstår en jordfeil, vil jordingsmetoden for det gitte nett kunne spille stor rolle.

#### 2.1.1 Direkte jording

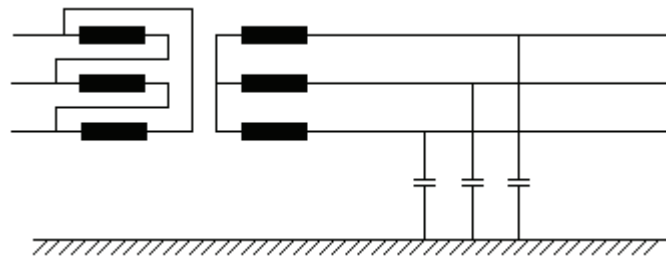
Direkte jording av nullpunktet tvinger nullpunktet til å opprettholde sin posisjon, slik at spenningsøkning på de friske fasene ikke oppstår ved en enpolt jordfeil. Metoden fører imidlertid til store feilstrømmer. Lysbuen som oftest oppstår på feilstedet slukkes ved at man hurtig kobler ut linjen, for deretter raskt å koble den inn igjen. Dette kalles gjerne GIK.



Figur 1 Direktejordet nett

#### 2.1.2 Isolert nullpunkt

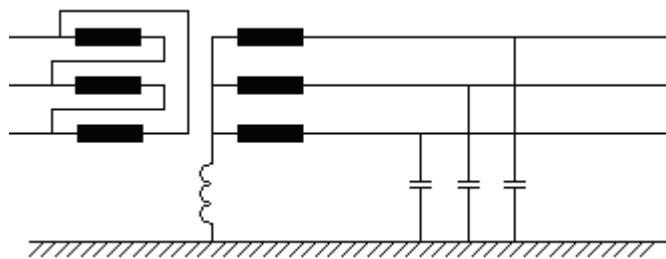
I et nett med isolert nullpunkt vil feilstrømmene i hovedsak bestemmes av spenningsnivå og kapasitiv avledning fra nettet. Større utstrekning på nettet vil gi større kapasitiv avledning, som gir mindre nullsystemimpedans, slik at feilstrømmene øker. Disse vil være mindre enn det som er tilfellet ved direkte jording, og det er større sjanse for at lysbuen slukker seg selv. Hvis ikke må feilen kobles fra på samme måte som ved direkte jordet nett. Ulempen er at man her har mindre kontroll med spenningene på de friske fasene, og ved lav lysbuemotstand kan nærme seg linjespenningen. På grunn av dette er ofte direktejordet nett brukt på de høyeste spenningsnivåene, mens isolert og spolejordet nett er brukt på lavere spenningsnivåer.



Figur 2 Isolert nett

### 2.1.3 Spolejording

Nøytralpunktet i transformatoren kan også jordes gjennom en induktans, eller en såkalt Petersenspole. Prinsippet går ut på å koble en spole i nullpunktet som skal kompensere for den kapasitive avledningen slik at nullsystemimpedansen øker. Dette fører til at feilstrømmene blir enda mindre, og muligheten for selvslukking øker betraktelig. Petersenspolen kan reguleres enten trinnvis eller kontinuerlig. Dette blir gjort for å kunne regulere kompenseringen ved koblinger og andre endringer i nettet. Spolen stilles imidlertid ikke nøyaktig inn i resonans med nettets kapasitanser. Dette siden man i resonans får problemer med spenningene hvor små usymmetrier i nettkapasitansene fører til store skjevheter i spenningene. (Faanes, Olsen 2005) Et annet problem som oppstår når spolen driftes i resonans med nettet, er spenningen som ligger over spolen. Den vil nå et toppunkt i resonanspunktet, og dette fører til problemer for vernreleene, som vi skal se i kapittel 2.3.3. På bakgrunn av dette driftes gjerne spolen noe overkompensert. Spolejording fører til at en større andel av de forbigående jordfeil kan håndteres uten driftsavbrudd.



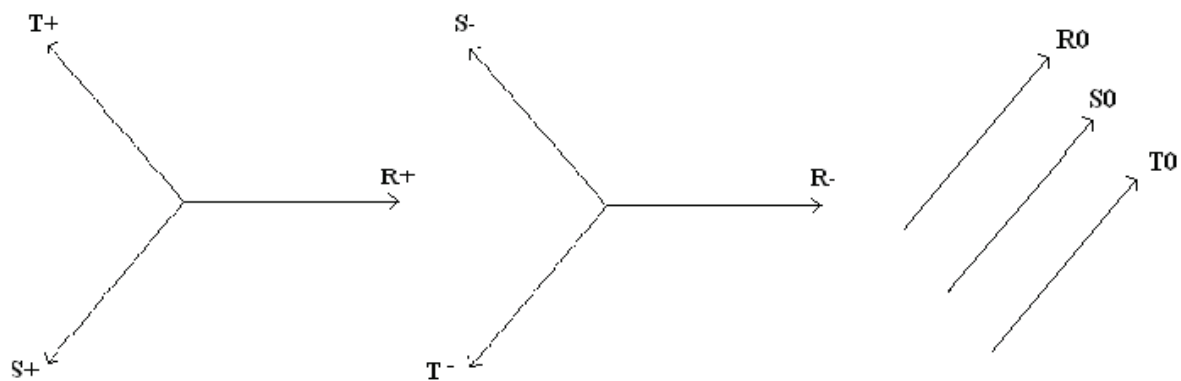
Figur 3 Spolejordet nett



## 2.2 Spenning og strømmer i nullsystemet

Nullsystemet er en del av en teoretisk tilnærming til feilproblematikk i trefasesystemer. De øvrige systemene er pluss- og minussystemet. Dette representerer egentlig en dekomponering av strøm og spenningsvektorene som oppstår ved både feilsituasjoner og i usymmetriske nett. Alle fysiske distribusjonsnett er i en eller annen grad usymmetriske. Dette kan være både kapazitivt og konduktivt.

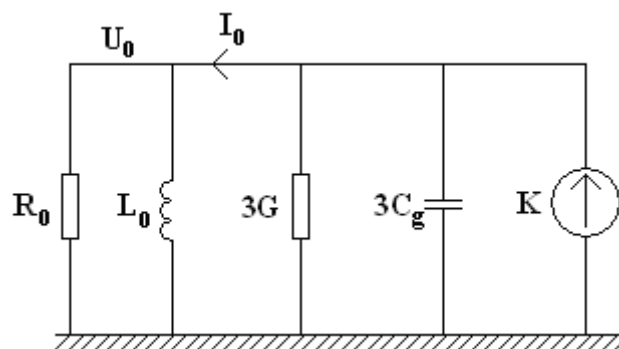
Plussystemet består av tre enhetsspenningsvektorer i positiv faserekkefølge, minussystemet er tre enhetsspenningsvektorer i negativ faserekkefølge og nullsystemet er bygd opp av tre spenninger som er "like i tallverdi og samtidige i alle tre faser". (Faanes, Olsen 2005)



Figur 4 Pluss- minus- og nullsystemet

Hvis det oppstår en feilsituasjon i et trefasesystem vil impedansene man finner i pluss- og minussystemene være av samme størrelsesorden, mens nullsystemets impedanser vil være betydelig større. Derfor er det vanlig å neglisjere bidragene fra pluss- og minussystemene når man regner på jordfeilsituasjoner.

I en trefasetransformator som er stjerne koblet er det tatt ut et nullpunkt. Spenningen i dette punktet tilsvarer spenningen som ligger over impedansene i nullsystemet. Nullsystemet har følgende ekvivalentsskjema:



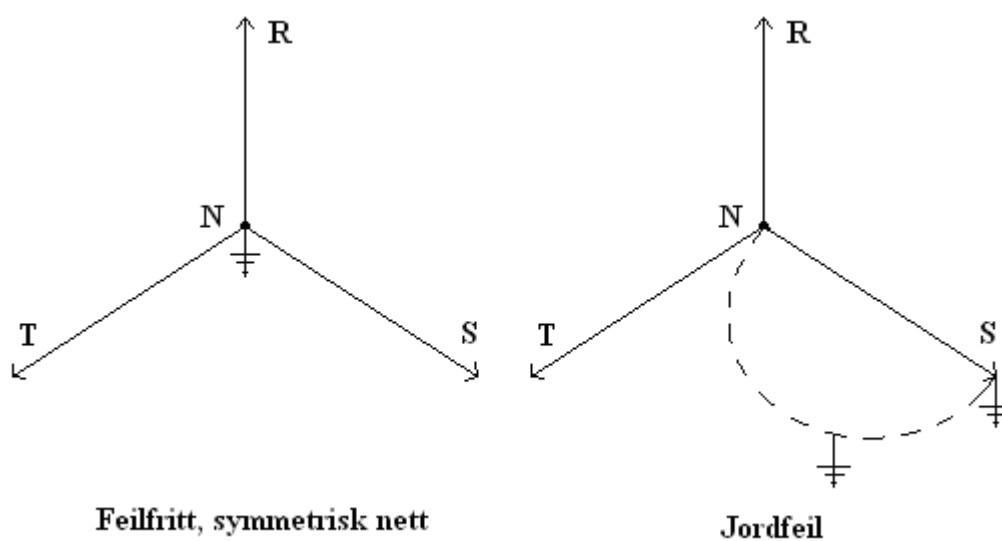
Figur 5 Nullsystemet

Her er nullpunktet i trefasesystemet noden hvor  $U_0$  er markert.  $L_0$  representerer spolens induktans,  $R_0$  tilsvarer parallellmotstanden som i noen tilfeller er koblet over spolen,  $3G$  er nettets konduktive avledning samt parallellkoblingsresistansen mens  $3C_g$  er nettets samlede symmetriske kapasitans mot jord.  $K$  er den strømmen som blir satt opp som følge av nettets

usymmetriske kapasitans og konduktans mot jord. Summen av  $K$ , strømmen fra  $3C_g$  og strømmen fra  $3G$  er det samme som  $I_0$ . Denne er det mulig å måle ved hjelp av en såkalt kabelstrømtransformator, eventuelt ved hjelp av tre strømtrafoer hvor fasestrømmene summeres for å finne  $3I_0$ . Nullsystemspenningen er her den spenningen som ligger over parallellkoblingen av induktansen, konduktansen og kapasitansen.

## 2.3 Jordfeil og behandling av disse

Jordfeil kan oppstå i nettet av mange ulike årsaker, hvor de fleste er forbigående. Dette kan for eksempel være fugler eller grener fra tre som midlertidig kommer i kontakt med en eller flere faseledere. I en jordfeilsituasjon vil spenningen i nullpunktet i trefasesystemet i større eller mindre grad avvike fra jord, og dette har også tradisjonelt vært brukt som definisjon på en jordfeil. (30 % av fasespenningen) I et releperspektiv er det imidlertid bedre å se på overgangsmotstand mot jord på feilstedet. Her er kravene per i dag at en jordfeil med overgangsmotstand på  $3000 \Omega$  skal kobles fra, mens deteksjon skal etterstrebes for feil med en motstand opp mot  $5000 \Omega$ . I figuren under vil jordpunktet "flytte seg" i forhold til trefasesystemet langs den stiplede linjen, avhengig av motstanden i feilen. I en ideell galvanisk jordfeil vil jordpunktet bli liggende på fasespenningen.



Figur 6 Jordfeil og nullpunktspenning

### 2.3.1 Automatisk gjeninnkobling

Hvis jordfeilen medfører en lysbue vil denne ofte slukke i strømmens nullgjennomgang, såfremt det ikke er i et direktejordet system. Da vil videre bortkobling ofte ikke være nødvendig. Man kan også tenke seg at grunnen til jordfeilen faller bort når linjen blir koblet ut, slik at nettet igjen kan kobles inn. Det er derfor vanlig at vernreleene blir satt opp for å koble inn igjen hurtig etter at de har koblet ut. Dette medfører da enten ny utkobling hvis systemet fremdeles er i en feilsituasjon, eller at feilen er koblet bort og at nettet således er reparert. Dette systemet kalles ofte GIK.

### 2.3.2 Begrensing av feilstrøm

Når en jordfeil oppstår vil størrelsen på feilstrømmen kunne bestemmes ut fra nettet. Denne kalles ofte nettets lade strøm. For å få en sluttet strømkrets for feilstrømmen å gå i, går den tilbake fra jord til nettet gjennom nettets kapasitanser og lekkresistanser. Dette skjer i de fasene som er friske. Disse er distribuerte utover hele nettet. Av disse er det den kapasitive komponenten som er klart dominerende. Jordfeilstrømmen er gitt av følgende uttrykk:

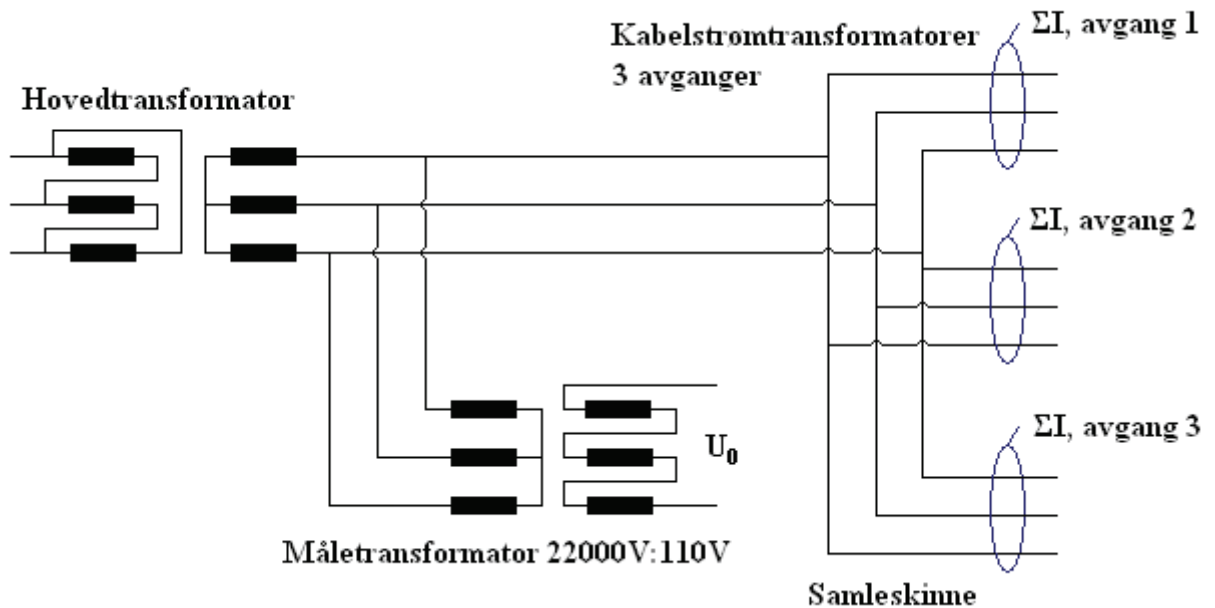
$$I_{feil} = \frac{3 \cdot U_f}{Z_+ + Z_- + Z_0 + 3 \cdot R_f} \approx \frac{3 \cdot U_f}{Z_0 + 3 \cdot R_f} \quad (0.1)$$

Her representerer  $U_f$  fasespenningen på feilstedet før feilen oppsto,  $R_f$  motstanden i feilen mens  $Z$  er systemimpedansen sett fra feilstedet i henholdsvis pluss- minus- og nullsystemet. Her kan man vanligvis neglisjere pluss- og minussystemet fra ligningen, da nullsystemet som oftest har betydelig større impedans. (Ingebrigtsen, Hofsmoen 2005)

For å begrense jordfeilstrømmen og derigjennom øke sjansen for at en eventuell lysbue ved feil slukker av seg selv, kan man sette inn en spole mellom nullpunktet i transformatoren og jord. Denne kalles ofte en petersenspole, etter denne løsningens oppfinner. Spolen tilføyer en induktans i nullsystemet som kompenserer for kapasitansene fra nettet, og slik nuller ut den kapasitive delen av feilstrømmen. Spolen er som oftest regulerbar, slik at man kan stille den inn etter for eksempel omkoblinger i nettet. Spolen stilles imidlertid ikke inn i nøyaktig balanse med nettets kapasitanser, da dette medfører problemer med for høy spenning i nullpunktet. Spolen stilles vanligvis inn i en fast avstand i forhold til balansepunktet med nettkapasitansene, også kalt resonanspunktet. Den vil da automatisk stille seg inn etter endringer i nettets kapasitans.

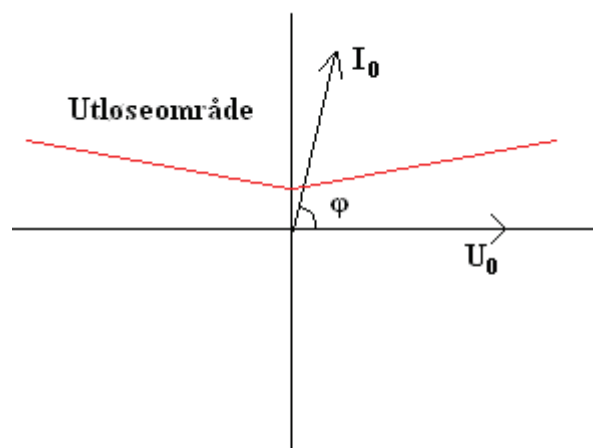
### 2.3.3 Jordfeilvernet

Jordfeilreleet måler spenning i nullpunktet,  $U_0$ , og nullstrømmen,  $I_0$ .  $I_0$  måles ved hjelp av en kabelstrømtrafo. Denne måler summen av fasestrømmene på en avgang. Hvis nettet er i balanse og uten feil skal denne være lik null for de tre fasene.  $U_0$  måles ved hjelp av en såkalt åpen trekantvikling, det vil si at man på måletransformatorens sekundærside måler spenningen over de tre spolene i serie. Dette tilsvarer spenningen i nullsystemet.



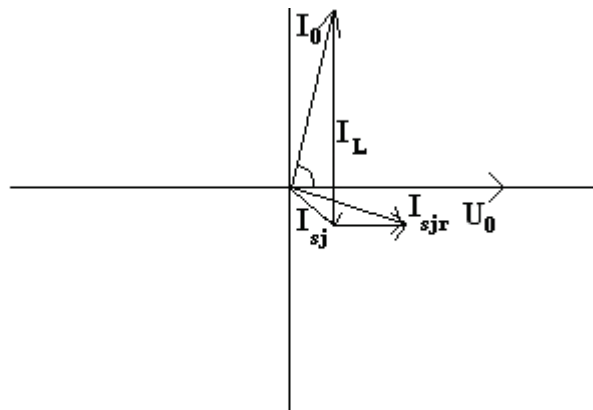
Figur 7 Måling av  $U_0$  og  $I_0$

Retningen på feilen bestemmes av fasevinkelen mellom  $U_0$  og  $I_0$ . I tilfellet med et isolert nett måles  $U_0$  og  $I_0 \sin \varphi$  som vist i figur 8, og releet løser ut hvis strømvektoren kommer inn i det markerte utløseområdet på figuren. Hvis  $\varphi$  ligger i området mellom  $0^\circ$  og  $180^\circ$  og over den røde markeringen i figur 8 ligger feilen i foroverretning for releet. Hvis ikke ligger feilen i bakoverretning.



Figur 8 Isolert nett

Hvis nettet er spolejordet blir denne målingen vanskelig, da spolejordingen kompenserer bort målegrunnlaget som man vanligvis vil måle retningen med. Løsningen på dette er å måle på nullstrømmens reelle komponent, det vil si  $I_0 \cos \varphi$ , som ligger i fase med  $U_0$ . Denne stammer fra de ohmske tap i nettet, som er gitt av ohmske tap i spolen, tap i nettets transformatorer samt tap som følge av nettets avledningsresistans mot jord. Sistnevnte kan være meget væravhengig. (Ingebrigtsen 1998) Dette medfører at utløseområdet må vris med  $90^\circ$  i forhold til det releoppsettet man bruker ved isolert nullpunkt. De ohmske tapene i nettet er imidlertid ofte svært små, noe som gir usikre målinger. Derfor er det vanlig å koble inn en resistans i parallell med petersensspolen for å øke den aktive nullstrømskomponenten i en feilsituasjon. Denne kobles gjerne inn som følge av at nullpunktspenningen overstiger en gitt verdi. Dette medfører at man får en sikrere feilpåvisning, slik at man kan flytte grensen for utløsning lenger ut mot høyre i figur 10. Det blir da lettere å unngå utkoblinger hvor feilen ligger i bakoverretning for releet. Innkoblingen av parallellmotstanden skjer med en tidsforsinkelse fra den initiale feilpåvisning slik at eventuelle forbigående feil kan passere uten å utløse vernet. (Nordskag, Waage 2001)

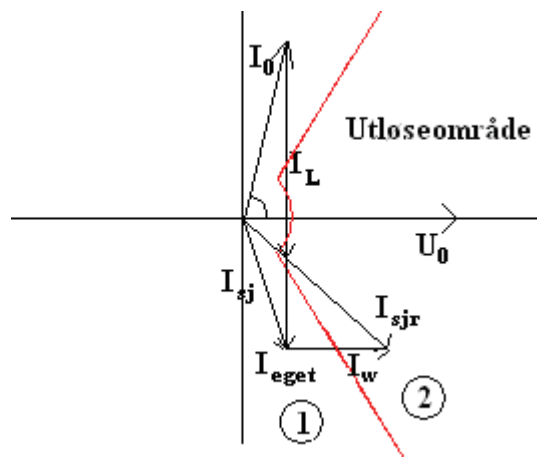


Figur 9 Spolejordet overkompensert nett fra feilsted

I figur 9 er  $I_0$  nullstrømmen for et isolert nett,  $I_L$  er petersensspolens bidrag,  $I_{sj}$  er nullstrømmen for det spolejordete nettet før parallellmotstanden er innkoblet og  $I_{sjr}$  er nullstrømmen for det spolejordete nettet etter at parallellmotstanden er innkoblet. Dette er forholdene sett fra feilstedet. I figur 9 er nettet overkompensert, noe som fører til at resultantvektoren havner i 4. kvadrant. I et underkompensert nett ville  $I_L$  vært kortere, og resultantvektoren ville havnet i 1. kvadrant.

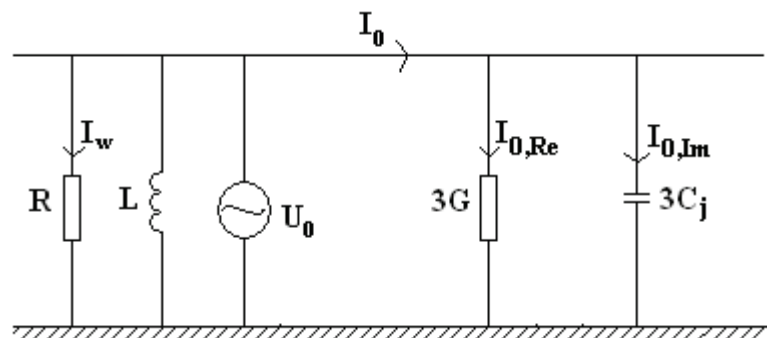
Når det gjelder hvordan vernet ser feilen, får vi enda et bidrag. Det er linjens egetbidrag,  $I_{eget}$ . Dette representerer den kapasitive ladestrømmen som avgangen vernet står på bidrar med, og tar vanligvis målevektoren ned i 4. kvadrant.  $I_w$  representerer det wattmetriske bidraget som innkoblingen av parallellmotstanden bidrar med. I TrønderEnergi er det vanlig å stille vernkarakteristikken slik at vinkelen mellom den imaginære aksene og den skrå vernkarakteristikken er  $5^\circ$ , og at radiusen i sirkelen rundt origo er 6 Ampere. Man kan også stille vernene litt annerledes, med nullakse på  $45^\circ$  og en utløsesektor på  $260^\circ$ . Dette fører til at vernet fungerer tilfredsstillende også ved utfall av petersensspolen. Denne løsningen er en blanding av figurene 8 og 10. Man får da et utløseområde mellom  $275^\circ$  og  $175^\circ$ . (Øksnes 2005) I figur 10 er vinkelen mellom den imaginære aksene og vernkarakteristikken overdrevet

for å understreke at vernet i dette tilfellet ikke ville løst ut uten at parallellmotstanden var blitt koblet inn.



Figur 10 Spolejordet nett, fra vern

Problemene oppstår når man i visse tilfeller opplever høy nullpunktspenning uten at det er noen feil i nettet. Avhengig av hvordan spolen er innstilt får man en høy verdi på  $U_0$ , som i sin tur fører til at vernet løser ut. For å forstå dette må vi se på nullsystemets ekvivalentskjema:



Figur 11 Nullsystemets ekvivalentskjema

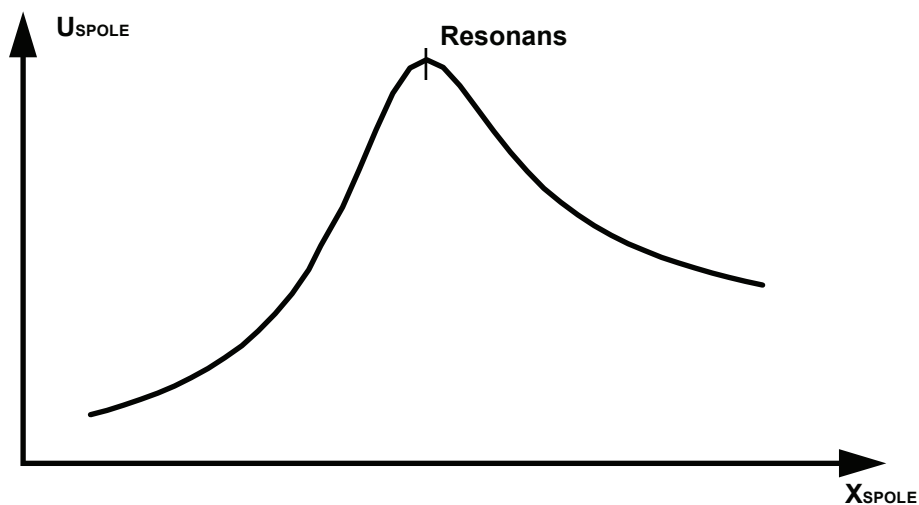
Her representerer L spolen, C den kapasitive avledningen og R den konduktive avledningen. Denne kan man i dette tilfellet anta er konstant for nettet. Hvis verdien på  $U_0$  øker over den predefinerte grenseverdien for vernet, aktiveres dette. Det løser imidlertid ikke ut. Etter en tidsforsinkelse kobles parallellmotstanden inn, noe som skal føre til at  $I_w$  drar resultantvektoren inn i område 2 i figur 10. Det er den wattmetriske strømkomponenten som drar strømvektoren ut i utløseområdet, og dette er i følge Lars Hofstad i TrønderEnergi den direkte årsaken til at vernet løser ut. I Fillan-nettet er grenseverdien for  $U_0$  satt til 15 % av merkespenningen, noe som tilsvarer 1905 Volt.

Retningsanvisningen i vernet er gitt av strømvektoren. Hvis feilen ligger i foroverretning vil strømvektoren ligge i område 2 i figur 10, mens hvis den ligger i bakoverretning for vernet vil strømvektoren ligge i område 1. (Øksnes 2005)

Hvis grunnen til høy nullpunktspenning ikke er en jordfeil, kan på denne måten vernet løse ut i et friskt nett. Likevel må det påpekes at  $U_0$ -settingen vanligvis er så høy at nullpunktspenningen normalt ikke skal kunne løse ut vernet. Likevel kan dette synes å ha skjedd i Fillan-nettet på Hitra.

## 2.4 Feilfritt spolejordet nett

Selv om det ikke er noen feil i nettet, vil det være en spenning over jordslutningsspølen. Dette skyldes at nettet aldri har perfekt symmetri, samt at man alltid vil ha en viss ohmsk lekkstrøm fra nettet. Dette oppfører seg som en meget høyohmig jordfeil. Når nettet driftes nær resonans, det vil si at spolens reaktans nøyaktig veier opp for nettets kapasitans, er koblingen mot jord fra nettet meget svak. Dette fører til at kapasitiv usymmetri i nettet spiller en mye større rolle for nullpunktsspenningen i en slik driftssituasjon. Hvis man ser bort fra ovenforliggende jordfeil kan man da si at nullpunktsspenningen er gitt av kapasitiv usymmetri i nettet samt konduktiv avledning. I figuren under er nullpunktsspenningen i et nett for ulike kompensasjonsgrader vist. Dette kalles ofte nettets resonanskurve.



Figur 12 Resonanskurve

Spenningen over spølen er gitt av følgende formel:

$$U_0 = \frac{U_f}{\left(1 - \frac{s}{u}\right) - j\left(\frac{d}{u}\right)} \quad (0.2)$$

Her er spolens innstilling,  $s$ , usymmetri mellom fasene,  $u$ , og nettets dempning,  $d$ , gitt av følgende uttrykk:

$$s = 1 - \frac{1}{\omega^2 \cdot L_{spole} \cdot 3 \cdot C_j} \quad (0.3)$$

$$u = \frac{\Delta C_j}{3 \cdot C_j} \quad (0.4)$$

$$d = \frac{1}{\omega \cdot C_j \cdot R_j} \quad (0.5)$$



Her representerer  $C_j$  fasens kapasitive avledning og  $R_j$  fasens ohmske avledning. (Torbergesen)  
Her er det sett bort fra usymmetrisk konduktiv avledning. Maksimalverdien på nullpunktspenningen er gitt av:

$$U_{0,\max} = \frac{U_f}{-j\left(\frac{d}{u}\right)} = \frac{U_f \cdot u}{-jd} = \frac{U_f \cdot \frac{\Delta C_j}{3 \cdot C_j}}{\frac{1}{j\omega \cdot C_j \cdot R_j}} = \frac{U_f \cdot j\omega \cdot \Delta C_j \cdot R_j}{3} \quad (0.6)$$

Toppunktet på resonanskurven oppstår når  $s$  er lik  $u$ . I denne situasjonen har vi:

$$1 - \frac{1}{\omega L_{spole} \cdot 3 \cdot \omega C_j} = \frac{\Delta \omega C_j}{3 \cdot \omega C_j} \quad (0.7)$$

$$3 \cdot \omega C_j - \frac{1}{\omega L_{spole}} = \Delta \omega C_j$$

Her er differansen i admittans mellom spolen og de symmetriske nettkapasitansene lik det usymmetriske kapasitive bidraget, noe som vil si at spoleimpedansen er lik den totale kapasitive impedansen i nettet. I denne situasjonen vil nullpunktspenningen bare være begrenset av nettets resistans mot jord, samt eventuelle parallellmotstander til spolen. Dette er nettets konduktive avledning. (Torbergesen) Siden nettets symmetriske kapasitive avledning er betydelig større enn nettets usymmetriske kapasitive avledning, kan man si at resonanspunktets plassering i x-aksen på figur 12 er gitt av det symmetriske nullstrømbidraget.

$$\text{gitt: } \frac{1}{3\omega C_j} \approx \omega L_{spole} \quad (0.8)$$

$$\Rightarrow I_{resonans} = \frac{U_f}{j\omega L_{spole}} = U_f \cdot j3\omega C_j$$

Spolens induktans blir i praksis ikke oppgitt i Henry, men i Ampere referert til merkespenning. Merkespenningen i nullpunktet er lik fasespenningen i nettet, det vil si at for vårt nett blir referansespenningen lik:

$$\frac{22000V}{\sqrt{3}} = 12702V \quad (0.9)$$

Spolens størrelse i Ampere blir da:

$$I_{spole} = \frac{U_f}{j\omega L_{spole}} = \frac{12702V}{314 \cdot L_{spole}} \quad (0.10)$$

På samme måte refereres også nettets totale nullstrømbidrag i Ampere ved en metallisk jordslutning. Dette tallet blir da direkte sammenlignbart med spoleinduktansen oppgitt i Ampere, siden denne feilsituasjonen medfører en nullpunktspenning lik fasespenningen på 12,7kV.

## 2.4.1 Kapasitiv avledning

Spenningen på en leder med uniform ladningsfordeling  $q$  per lengdeenhet i en høyde  $h$  over bakken og med en diameter på  $d$ , kan beskrives som følgende:

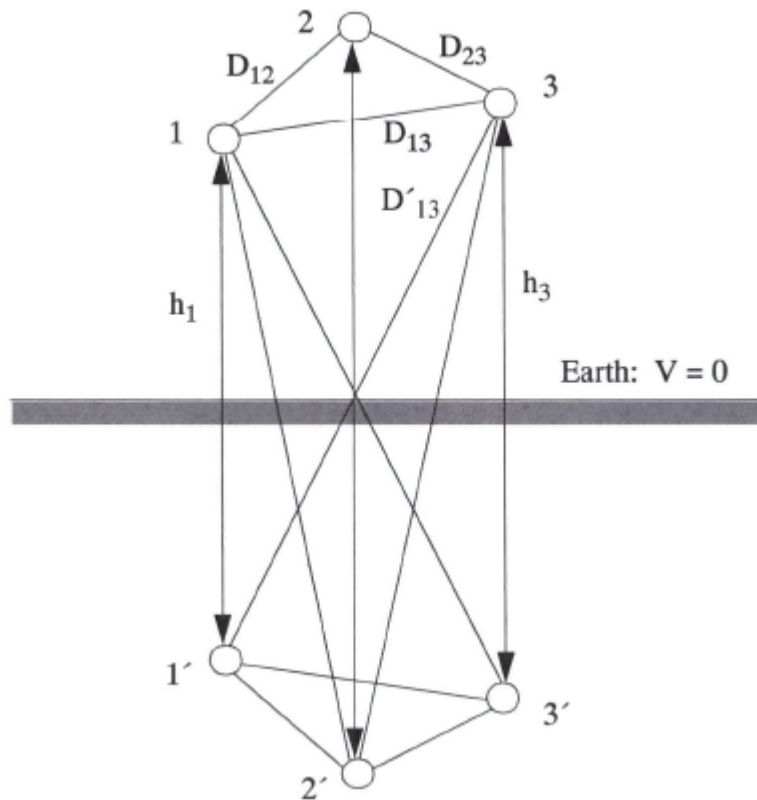
$$V_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h}{d/2} = \frac{q}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{4h}{d}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

$$\epsilon_r = \text{relativ permittivitet}$$
(0.11)

(Holen 2006)

I et trefasenett vil man i tillegg få bidrag fra de andre fasene:



Figur 13 Kapasitanser i trefasenett

$$V_1 = \frac{q_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{4h_1}{d} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D'_{12}}{D_{12}} + \frac{q_3}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D'_{13}}{D_{13}}$$

$$V_2 = \frac{q_2}{2\pi\epsilon} \ln \frac{4h_2}{d} + \frac{q_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D'_{21}}{D_{21}} + \frac{q_3}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D'_{23}}{D_{23}}$$

$$V_3 = \frac{q_3}{2\pi\epsilon} \ln \frac{4h_3}{d} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D'_{32}}{D_{32}} + \frac{q_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D'_{31}}{D_{31}}$$
(0.12)

(Holen 2006)

Her kan en legge merke til at hvis  $D_{12}$ ,  $D_{23}$  og  $D_{13}$  er like vil spenningen på de tre fasene bli like, gitt at ladningen på alle fasene er like. Dette vil i praksis være et trekantoppheng av lederne. Det vanligste faseoppheng er imidlertid et planoppheng. Her vil  $D_{13}$  være større enn de to andre faseavstandene. Dermed vil spenningen i fase 2,  $V_2$ , bli større enn på de to andre fasene. Dette er gitt av formel 12, og at man har den samme ladning i hver fase.

Kapasitans er definert som:

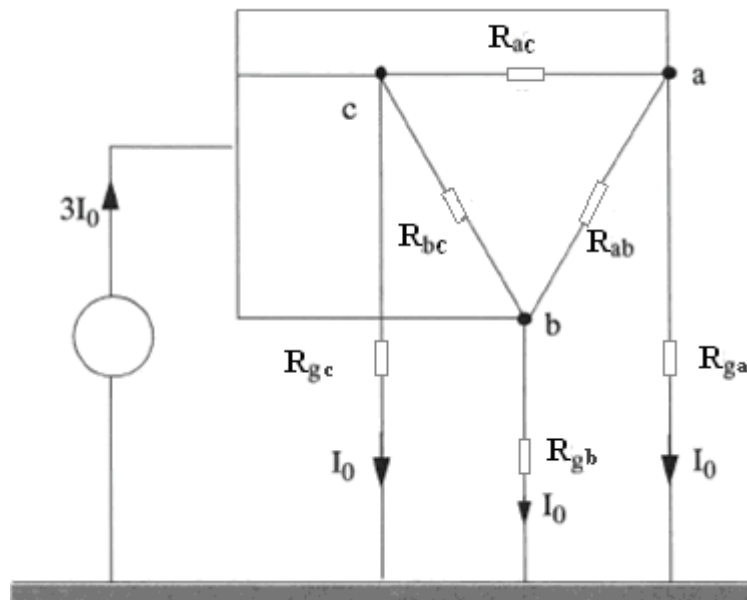
$$C = \frac{q}{V} \quad (0.13)$$

Dermed blir også kapasitansen mot jord for de ulike fasene forskjellig. Forskjellen er ikke stor men det er nok til å sette opp en strøm i nettet. Det er denne strømmen som eksiterer nullsystemet i nettverket, og dermed skaper nullpunktspenningen.

Den elektriske permittiviteten i vakuum,  $\epsilon_0$ , er konstant. Derfor vil eventuelle endringer i kapasitansene i nettet komme gjennom endringer i  $\epsilon_r$  i formel 11.

## 2.4.2 Konduktiv avledning

Den konduktive avledningen er i hovedsak gitt av resistansen i isolatorene i nettet. I nullsystemet, hvor de tre fasene påtrykkes den samme spenning, vil isolatorene som hver fase henger på kobles i parallell, som vist i figuren under:



Figur 14 Resistanser i nullsystemet

$$R_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_{ga}} + \frac{1}{R_{gb}} + \frac{1}{R_{gc}}} \quad (0.14)$$

Den konduktive avledningen er sterkt avhengig av værforhold og grad av nedsmussing. (Gustavsen 1998) Her vil nedbør føre til økt konduktiv avledning gjennom våte isolatorkjeder. Resistansen i jordsmonnet vil også i følge Lars Hofstad være mindre i våt jord enn den vil være under tørre forhold.

Hvis isolatorene på de forskjellige fasene har ulik grad av nedsmussing vil dette kunne føre til en økt verdi for  $K$  i figur 5. Dette vil gi en økning i ohmsk usymmetristrøm i forhold til kapazitiv usymmetristrøm. I dette tilfellet vil man oppleve en økning i nullpunktspenningen. (Gustavsen 1998) Det er her viktig å påpeke at dette kan oppstå ved at bare en av isolatorene har en resistans som er betydelig mindre enn de andre, siden isolatorene på samme fase langs en linje kommer i parallell mot jord. Derfor er dette en situasjon hvor det kan være vanskelig å finne isolatoren som er skyld i nullpunktspenningsøkningen.

I følge Lars Hofstad i TrønderEnergi påvirkes også konduktiviteten av hvorvidt det er løv på trærne og om det er snødekket på bakken eller ei. Siden vårt nett ligger på øya Hitra, vil også saltbelegg på isolatorene være en aktuell problemstilling.

### 3 Datalogging i Fillan trafostasjon

I perioden 7. februar til 14. mars 2007 ble det satt ut en datalogger i Fillan transformatorstasjon for å loggføre spenning over jordslutningsspølen samt nullsystemstrømmene i de fire avgangene fra stasjonen. Dette ble gjort for å belyse nettets oppførsel blant annet under ulike værforhold. Loggingen ble gjennomført i den samme stasjonen som de skarpe testene som ble gjort i forbindelse med prosjektoppgaven før jul, og kan i så henseende sees i sammenheng med disse.

#### 3.1 Oppsett av måleutstyr

I målingene ble en Aquilent Data Acquisition/Switch unit 34970A (NTNU nr G05-0103) benyttet til å måle nullpunktsspenning og nullsystemstrømmene. Nullpunktsspenningen ble målt direkte på måletransformatoren i stasjonen, det vil si fra en åpen trekantvikling. Se for øvrig kapittel 2.3.3. Nullsystemstrømmene ble målt over en motstand på  $6,8\Omega$ , som ble koblet opp i en krets over måletransformatoren i stasjonen. Dette var målt i en såkalt kabelstrømtransformator, noe som førte til at de målte strømmene var  $3 I_0$ , og ikke  $I_0$ . Dette blir imidlertid også gjort i spoleregulatoren, og blir derfor riktig med tanke på å sammenligne med de andre målingene av nullstrøm. Omsetningsforholdet i denne var 1:50. Dataloggeren ble satt opp slik at alle resultater ble lagret i volt og ampere. Videre ble en måling av alle kanaler gjort hvert kvarter døgnet rundt. Denne målefrekvensen vil nok ikke kunne fange opp eventuelle feil i nettet, men dette var da heller ikke intensjonen. Samplingsfrekvensen holder imidlertid til å få med lastvariasjoner over døgnet uten at datamengdene blir alt for store. Også endringer i været bør være dekt av dette intervallet. Da dataloggeren ble satt i gang ble hver måling merket med tid og dato.

Tabell 1 Innstillinger på datalogger

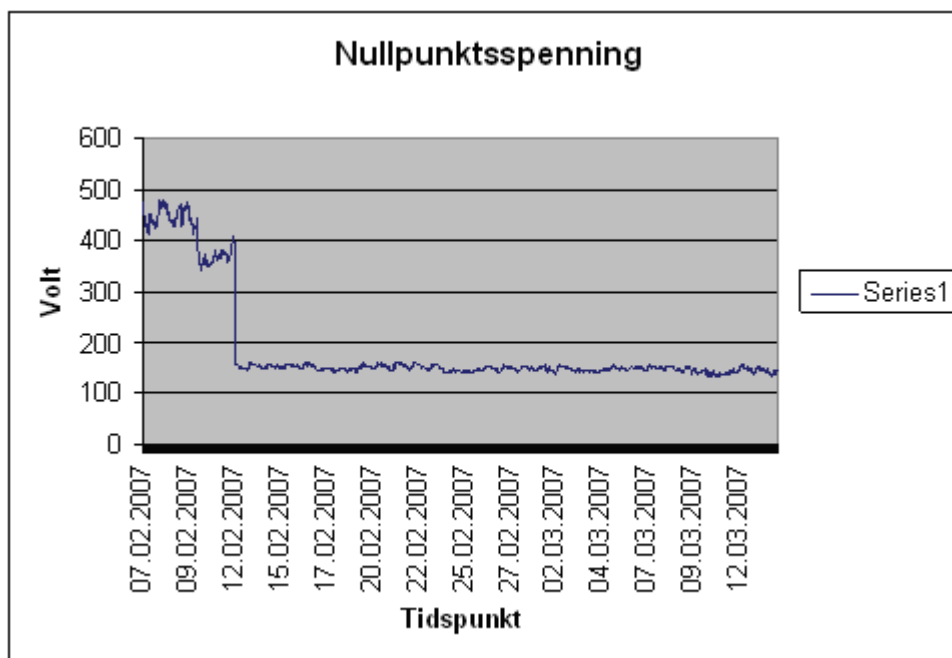
Kanal	Måler	Gain	Samplingsfrekvens
101	$I_0$ avgang 1	50/6,8	Hvert 15. min
102	$I_0$ avgang 2	50/6,8	Hvert 15. min
103	$I_0$ avgang 3	50/6,8	Hvert 15. min
104	$I_0$ avgang 4	50/6,8	Hvert 15. min
105	$U_0$ nullpunkt	22000/110	Hvert 15. min

Dataloggeren ble stående i transformatorstasjonen på Fillan frem til den 14. mars, da den ble hentet. I løpet av denne tiden hadde været endret seg noe, selv om det var en lang periode med relativt tørt vær i begynnelsen av måleperioden. Mot slutten kom det betydelig med nedbør.

## 3.2 Resultater

### 3.2.1 Nullpunktspenningen

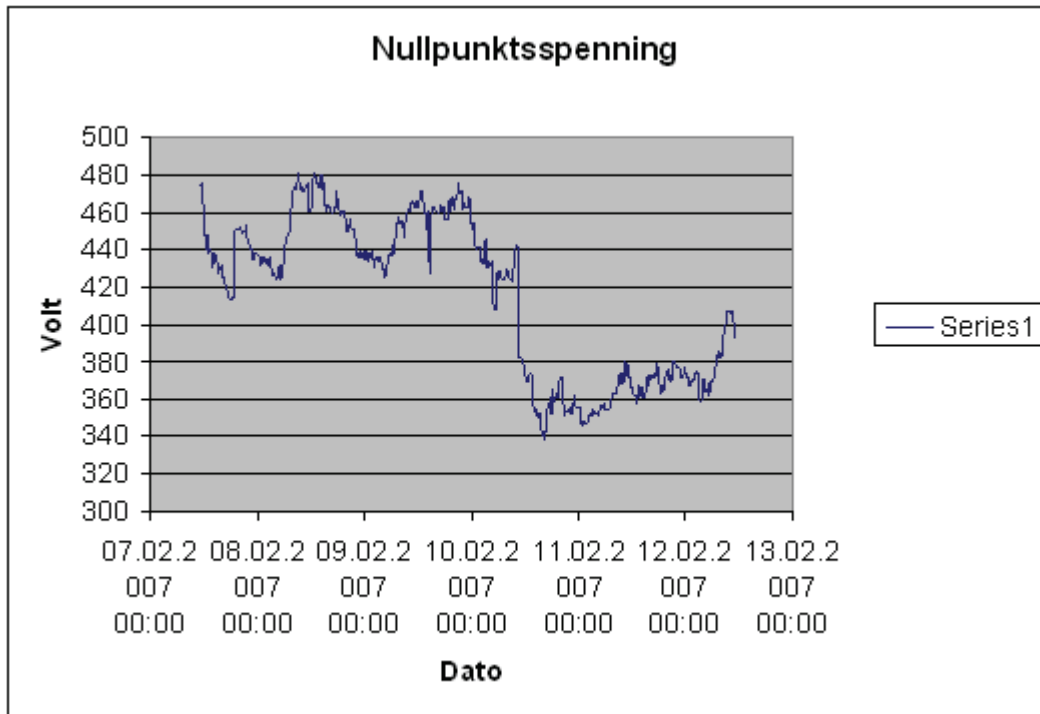
Etter at loggeren var hentet inn igjen den 14. mars ble resultatene eksportert over i excel. Nullpunktsspenningen ble da som vist i figur 15.



Figur 15 Nullpunktsspenning

Som vi ser var nullpunktsspenningen ganske høy i starten av måleperioden. Det var også relativt store svingninger i verdien på denne tiden. Det ligger imidlertid godt under  $U_0$ -settingen for vernet som er på 1905 Volt. Det er imidlertid åpenbart at et eller annet har endret seg den 12. februar mellom 11:10 og 11:25. Etter dette har spenningen vært ganske stabil på rundt 150 Volt. I denne perioden er det imidlertid mulig å se en variasjon over uka. Dette er mest sannsynlig på grunn av lastendringer med topper på dagen og bunnpunkter på natta. Det er imidlertid verdt å merke seg at man i helgene ikke får disse toppene.

I følge Lars Hofstad i TrønderEnergi ble det ikke gjennomført noen omkoblinger i det galvanisk sammenhengende nettet i løpet av måleperioden. Dette var kanskje den mest plausible forklaringen på spenningsfallet den 12. februar. Det ble imidlertid oppdaget at en feil hadde oppstått i spoleregulatoren. Dette skjedde klokka 10:56:57 den 12. februar. Et brudd i indikatoren for spolestillingen førte til at spolen stilte seg i posisjon 200 Ampere, noe som er langt fra resonanspunktet. All den tid spolen har stått så lavt på resonanskurven er heller ikke endringene i spolespenning særlig markante. Dette er på grunn av at nettet, i spolestilling 200 Ampere, oppfører seg nesten som et direktejordet nett. Direktejording av nullpunktet tvinger nullpunktet til å ligge på jordpotensial, eller lav spenning i vårt tilfelle. Før den 12. februar var spolen stilt inn 3 Ampere underkompensert i forhold til nettet, noe som er ganske nær resonans. I dette området er spolespenningen mye mer sensitiv for endringer i nullsystemets impedanser mot jord. Derfor vil mesteparten av analysen av måleresultatene fokusere på den første delen av måleperioden, før den 12. februar. I følgende figur er spenningsvariasjonene i denne perioden vist mer detaljert.

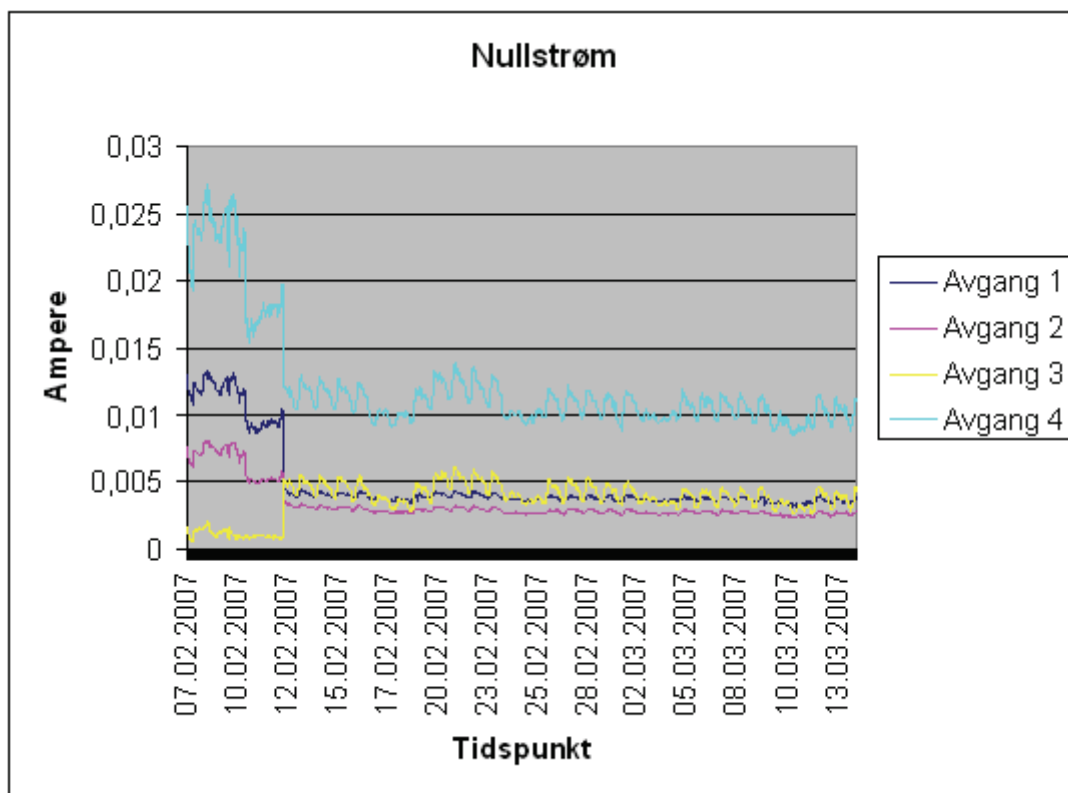


**Figur 16 Nullpunktsspenning før den 12. februar**

Her ser man også den samme tendensen som i perioden etter 12. februar med tanke på lastendringer over døgnet. Her er imidlertid spenningsforskjellen mellom høylast og lavlast betydelig større enn etter den 12. februar. Dette har sannsynligvis sin forklaring i at man i starten av måleperioden lå høyere på resonanskurven, og at spenningsvariasjonene som en følge av dette ble mer betydelige. Man kan derimot merke seg et tydelig fall i spenningen den 10. februar. Dette fallet skjer på en lørdag klokken 10:40. Etter dette klatrer spenningen igjen gradvis oppover, men den kommer ikke opp mot de verdier som man kunne observere i dagene før. Hvis man sammenligner spenningsfallet på den 10. februar med det man kan observere for andre helger i målerperioden, ser vi at nullpunktsspenningen vanligvis faller fredag kveld og ikke tar seg ordentlig opp igjen før mandag morgen. I figur 16 kan vi tydelig se det samme denne helgen, da spenningen faller med cirka 50 volt fredag kveld. Derfor kan spenningsfallet den 10. februar sannsynligvis ikke forklares ut fra lavlast i helgen. Det må imidlertid bemerkes at de andre helgene i måleperioden var etter at feilen den 12. februar oppsto, og derfor ikke hadde de samme variasjonene i spolespenning som det man kan se for denne helgen.

### 3.2.2 Nullstrømmene

Hvis en ser på nullsystemstrømmene på de ulike avgangene, legger en merke til at avgang nummer 4 mot Fausland er den som i særstilling bidrar med mest nullstrøm. Ellers kan man legge merke til at alle nullstrømkurvene har samme form som nullpunktsspenningen, bortsett fra avgang 3 mot Sandstad. Se for øvrig figur under.

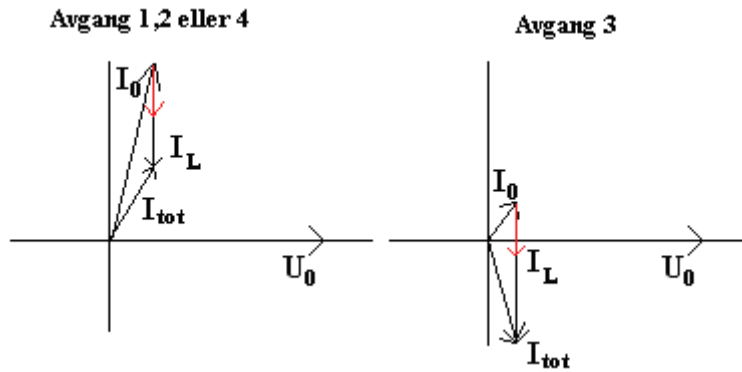


Figur 17 Nullstrømmer

Her kan man legge merke til at endringen den 12. februar også gjelder nullstrømmene. I avgang 3 får man imidlertid en markant økning i nullstrømmen, i stedet for det fallet i nullstrøm som man opplever for de andre avgangene. Dette er veldig merkelig. Avgang 3, som går til Sandstad, har desidert minst nullstrøm før den 12. februar. Det er kun målt rms-verdier av strømmene. På grunn av dette vitnes lite om de ulike nullstrømmenes faseforskyvning i forhold til hverandre.

En mulig forklaring på nullstrømøkningen i avgangen mot Sandstad kan kanskje ligge i den betydelig økte induktive strømmen som spolen bidrar med. Siden denne avgangen hadde så lite nullstrøm fra før, kan den plutselige økningen i spolens bidrag kanskje ha forlenget den totale strømvektoren som vist i figur 18. Her tilsvarer  $I_0$  avgangens totale nullstrøm,  $I_L$  spolens strømbidrag og  $I_{tot}$  den totale strømmen på avgangen. Dette er den som er målt i trafostasjonen. Den røde vektoren representerer spolestømmen før den 12. februar.





Figur 18 Nullstrømmer for avgangene, -3A og 200A

Her ser vi at dette kanskje kan være en forklaring på hvorfor nullstrømmen i avgang 3 øker når spolen stiller seg i stilling 200 Ampere. Hvis dette var tilfellet ville nullstrømmen i avgang tre ligge nesten i motfase til nullstrømmen i de andre avgangene. Siden vi ikke vet noe om nullstrømmenes faseforskyvning seg imellom er det vanskelig og si om dette scenarioet stemmer eller ikke. Figuren viser bare til et tenkt tilfelle, så størrelsen på vektorene er valgt som et eksempel.

### 3.2.3 Nullsystemimpedansen

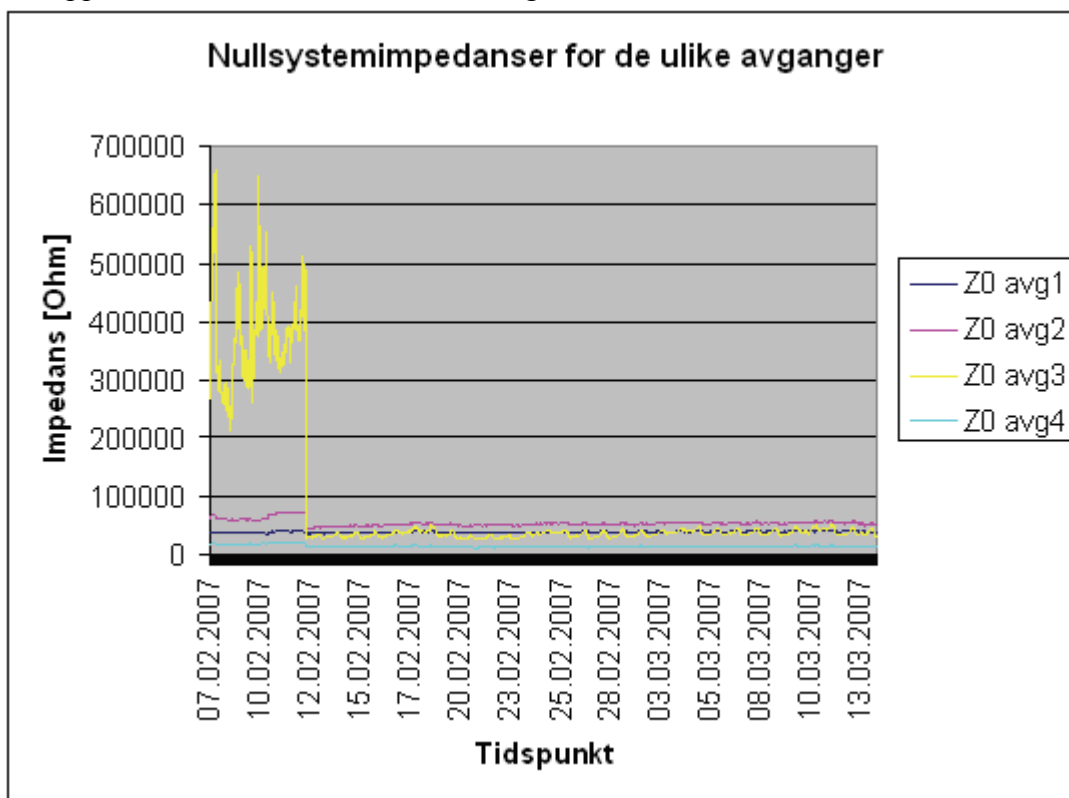
Hvis vi kaller parallellkoblingen som nullsystemspenningen ligger over for nullsystemimpedansen vil denne være avgjørende for spenningen i nullpunktet. Spoleregulatoren er stilt inn til å være tre Ampere underkompensert til enhver tid, noe som medfører at det induktive bidraget alltid nuller ut mesteparten av det kapasitive, og den kapasitive impedansen alltid vil være:

$$C_0 = \frac{I_{spolestilling}}{j\omega \cdot U_{ref}} = \frac{3A}{314 \cdot \left(\frac{22000}{\sqrt{3}}V\right)} = 752,2pF \quad (0.15)$$

Den resterende delen av nullsystemimpedansen vil da være gitt av parallellkoblingsresistansen til spolen samt nettets konduktive avledning. Den kontinuerlige parallellkoblingsresistansen er på 62,5 kW, noe som tilsvarer:

$$R_{parallel} = \frac{U_{ref}^2}{P_{merke}} = \frac{\left(\frac{22000}{\sqrt{3}}V\right)^2}{62,5kW} = 2581\Omega \quad (0.16)$$

Hvis vi ser på nullsystemimpedansen for de ulike avgangene, er det avgang 3 som peker seg ut, i hvert fall før den 12. februar. Her er variasjonene veldig store, og ekstremt mye høyere enn for de andre avgangene. Avgang 3 er den avgangen som har mest utpreget luftnett. I avgangen mot Sandstad (avgang 3) er det veldig liten nullstrøm. Det kan her tenkes at målefeil oppstår i kabelstrømtransformatoren grunnet de ekstremt lave strømverdiene.



Figur 19 Impedanser i nullsystemet

Denne impedansen er den som kan måles for hver avgang. Den totale impedansen for nullsystemet er parallellkoblingen av disse fire impedansene og spoieimpedansen. Denne vil bli mindre enn den minste av de parallellkoblede motstandene.

Hvis vi antar at nullstrømmene er i omtrent samme fase, kan vi finne den totale impedansen i nullsystemet. Siden det er starten av måleperioden, før den 12. februar, som er mest interessant for disse analysene ble den gjennomsnittlige summen av nullstrømmene funnet for denne perioden. Dette ble gjort i excel. Denne ble funnet til å være 40mA. Den gjennomsnittlige spolespenningen ble for den samme perioden funnet til å være 415 Volt. Dette gav følgende samlede impedans:

$$Z_{0,tot} = \frac{U_0}{I_0} = \frac{415V}{40mA} = 10375\Omega \quad (0.17)$$

Dette var en veldig høyt tall med tanke på at parallellmotstanden er på 2581Ω. Den totale impedansen burde være mindre enn dette. Man kan tenke seg av nullstrømmene for de tre avgangene ikke er i samme fase, men siden alle har både linje og kabeldel skulle man tro at forskjellen ikke var så stor. En stor forskjell her ville uansett føre til at den samlede strømmen ble mindre, noe som igjen ville føre til en enda større impedans. Hva dette skyldes synes derfor vanskelig å forklare.

### **3.3 Sammenligning med værdata**

Værforholdene kan ofte spille stor rolle for nullpunktsspenningen, kanskje spesielt gjennom konduktiv avledning, eller usymmetrisk sådan. Se for øvrig kapittel 2.4.2. Det meteorologiske institutt har en målestasjon på Hitra, men denne har ikke målinger av alle de parametrene vi er interesserte i. Derfor benyttes her målinger gjort i Sula målestasjon. Denne ligger på øya Sula i Frøya kommune, men det antas likevel at værforholdene her er noenlunde like de man har på Hitra. Dataene er innhentet fra klima-systemet som er drevet av det meteorologiske institutt.

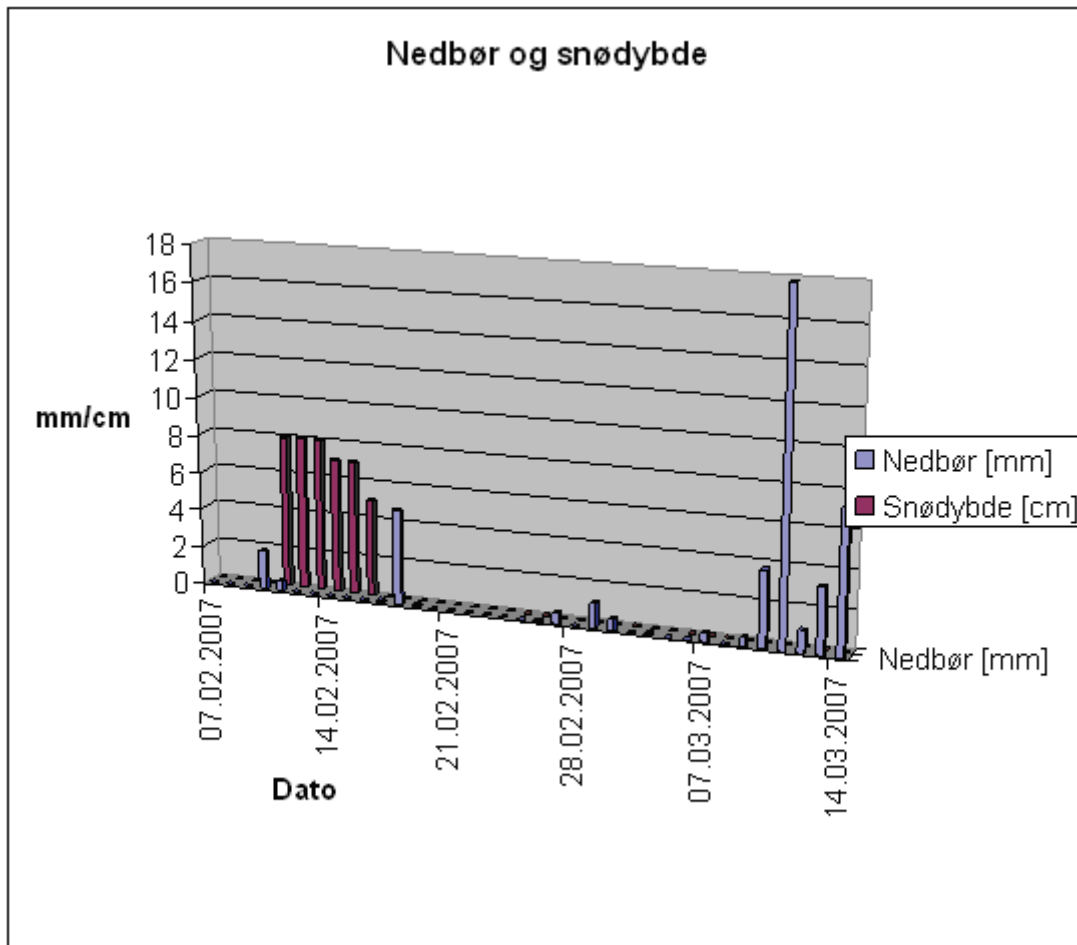
Siden spolen sto i et punkt ganske langt fra resonans etter den 12. februar, ser vi bare på sammenhengen før denne datoen. Etter denne datoen var endringene i nullpunktsspenningen relativt små og det virker heller ikke som de har noen særlig sammenheng med værforhold, se kapittel 3.2.1. Derfor er det mest interessant å se på perioden før 12. februar når det gjelder værforholdenes innvirkning på nullpunktsspenningen.

Det ble sett på temperatur, nedbør, snødekke, lufttrykk, luftfuktighet og duggpunktstemperatur. Når det gjelder nedbør og snødekke må det sies at usikkerheten her kanskje er større enn for de atmosfæriske målingene, da det her kan være større lokale variasjoner. Nettet har også en såpass stor utstrekning at målinger fra bare en stasjon ikke vil kunne gi et helhetlig bilde hva nedbør og snødekke angår. Dette er formodentlig også de to parameterne som spiller størst rolle, spesielt med tanke på konduktiv avledning.



### 3.3.2 Nedbørens innvirkning

Nedbøren som kom i løpet av perioden kom i stor grad mot slutten av målingene, derfor er det veldig synd at spenningsmålingene fra denne perioden ikke kan si oss stort.



Figur 21 Nedbør og snødybde

Vi kan her legge merke til at spenningen den 10. februar sank med cirka 100 Volt. Dette skjedde også samme dag som man først opplevde nedbør. Dette kan tyde på at man får en redusert nullpunktsspenning som følge av nedbøren. Det er imidlertid vanskelig å bekrefte dette da ingen andre overganger mellom tørt og vått vær ble observert i den perioden spoleregulatoren sto i automatisk modus. Det stemmer likevel med det som ble observert i prosjektoppgaven som ble gjennomført høsten 2006, hvor man opplevde betydelig høyere nullpunktsspenning i tørt enn i vått vær. Det er imidlertid vanskelig å dra noen konklusjoner med et så begrenset datagrunnlag.

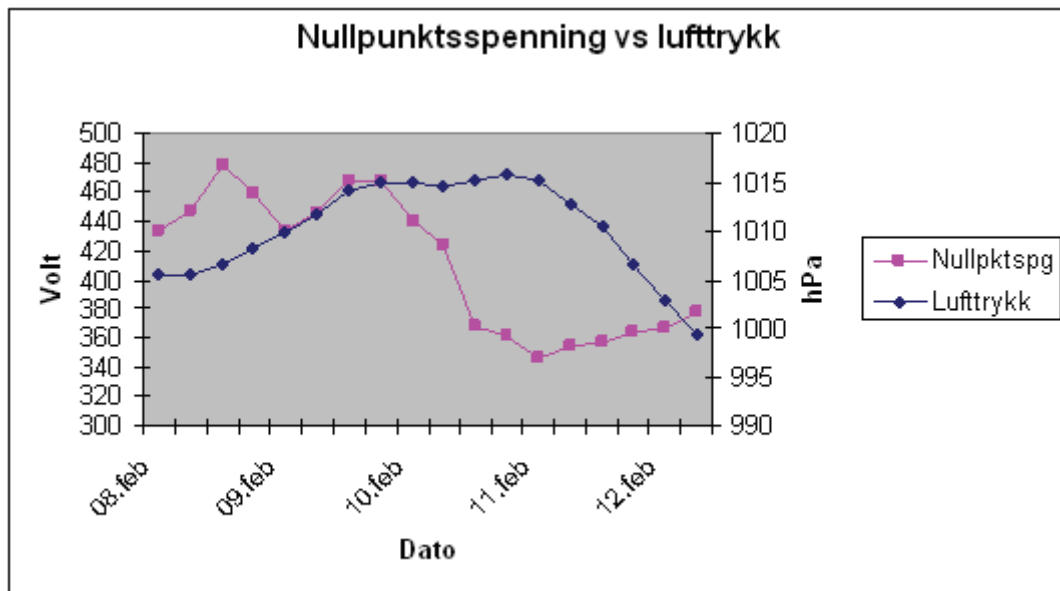
Den 11. februar kom det snø, men dette synes så ikke å spille noe videre inn på nullpunktsspenningen. I følge Lars Hofstad i TrønderEnergi påvirkes ofte den konduktive avledningen av hvorvidt det er snødekke på bakken eller ei. Det kan også nevnes at man ofte kan merke forskjell i spolespenning som følge av løvfall fra trær. Man må imidlertid påpeke at disse målingene er gjort på Sula, og kanskje derfor ikke stemmer så godt med de nedbør- og snøforhold som var på Hitra. Man kan for eksempel tenke seg at nedbøren som er registrert på Sula er kommet som snø på Hitra. Man kan også tenke seg at det kan ligge snø inne på øya, men ikke langs kystlinja rundt øya. Mesteparten av nettet går langs kystlinja, og har kanskje ikke hatt snø i disse dagene. Derfor er det vanskelig å konkludere på et så tynt

målegrunnlag, og kanskje spesielt siden snødybdene det her er snakk om er så vidt minimale. Det er da vanskelig å kunne si noe om hvorvidt mesteparten av nettets utstrekning ligger i et snødekt område eller ei.

Nedbøren kan først og fremst tenkes å virke inn på den konduktive avledningen, kanskje spesielt med tanke på våte isolatorkjeder. Her vil fuktigheten på isolatorene, kanskje i kombinasjon med forurensninger eller saltbelegg på overflaten av disse, føre til økt konduktiv avledning. Dette vil igjen føre til en lavere spolespenning. Se for øvrig kapittel 2.4.2. Det kan virke som det er nettopp dette som er observert den 10. februar, men grunnet den meget uheldige feilen i regulatorkretsen for spolen som oppsto den 12. februar er det ikke mulig å få verifisert dette. Det stemmer imidlertid med observasjoner gjort i forbindelse med prosjektoppgaven om dette tema, som ble gjennomført før jul. (Guldal 2006)

### 3.3.3 Luftrykkets innvirkning

Også luftrykket blir målt fire ganger om dagen, på de samme tidspunkt som temperaturen. Derfor brukes bare de målinger av spolespenningen som er gjort på disse tidspunktene.



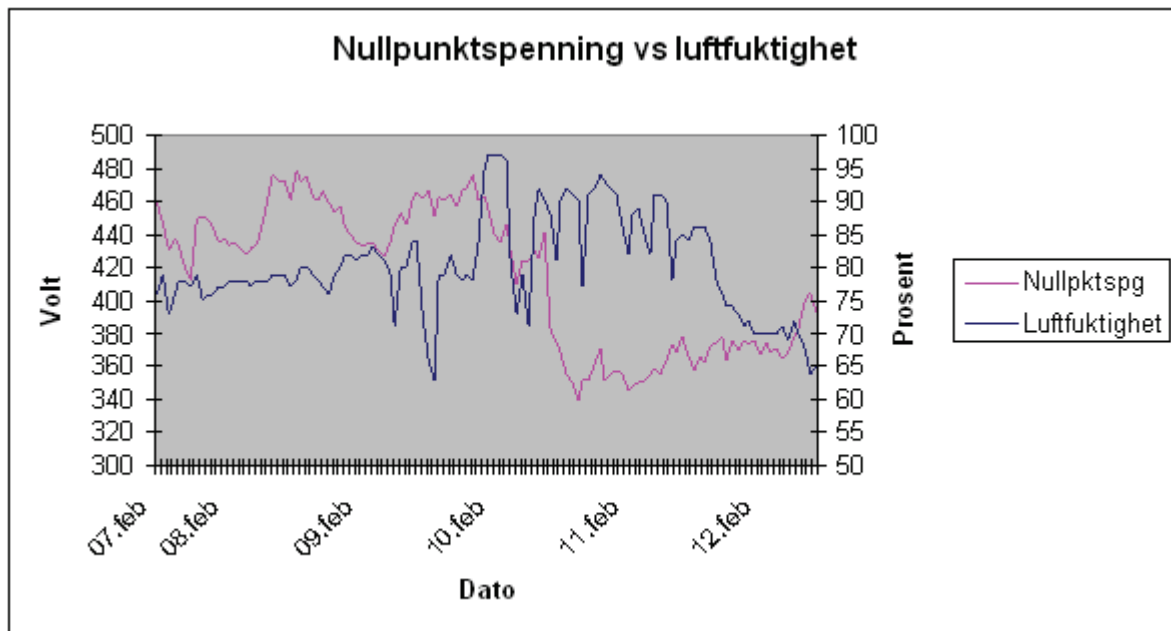
Figur 22 Nullpunktsspenning og luftrykk

Heller ikke luftrykket synes å virke inn på nullpunktsspenningen i særlig grad. Her kan en kanskje forvente at luftrykket skulle spille en rolle for kapasitansen i nettet, men det er mulig at såpass små forskjeller som det tross alt her er snakk om ikke spiller noen rolle. En kan tenke seg at luftrykket kan virke inn på  $\epsilon_r$ . For å få en økt nullpunktsspenning må man også få en større usymmetri i nettet på grunn av ulikt luftrykk. Dette synes imidlertid noe søkt. Det antas for øvrig at luftrykket ikke spiller noen særlig rolle for den konduktive avledningen.



### 3.3.4 Luftfuktighetens innvirkning

Luftfuktigheten ble målt en gang i timen. Av den grunn er målinger av spenningen også bare tatt med for hver time.

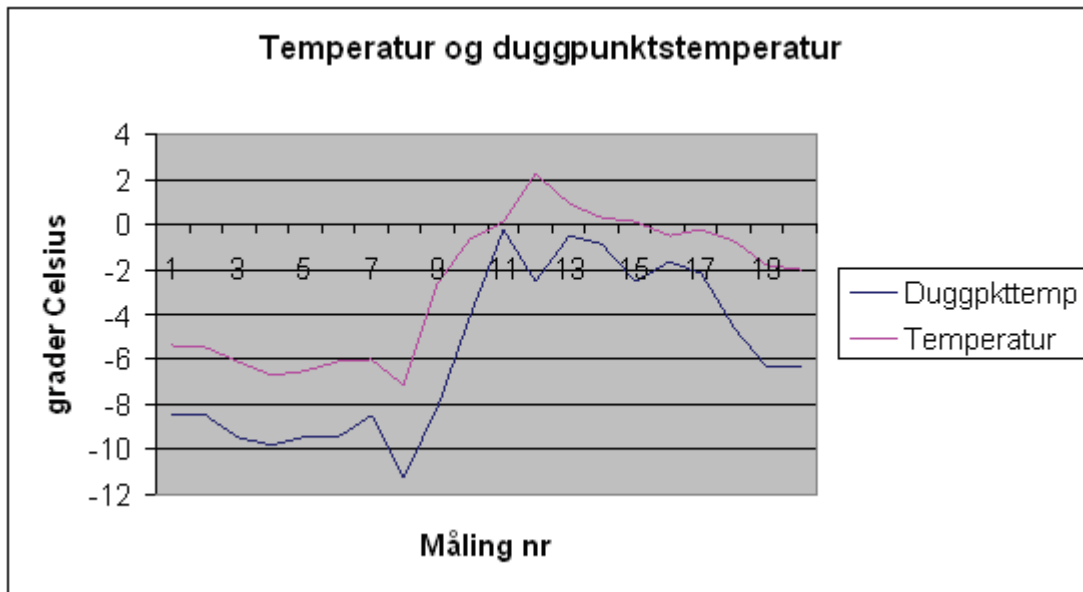


Figur 23 Nullpunktspenning og luftfuktighet

Heller ikke her synes det å være noen åpenbar sammenheng mellom nullpunktsspenningen og luftfuktigheten. Når spenningen synker den 10. februar ligger luftfuktigheten omtrent på samme generelle nivå som den gjorde tidligere, dog med en del variasjoner. Disse gjenspeiles imidlertid i liten grad i spenningsvariasjonene.

### 3.3.5 Duggpunktstemperaturens innvirkning

Duggpunktstemperaturen er den temperaturen hvor fuktigheten i lufta kondenserer til vann. Hvis temperaturen kommer under duggpunktstemperaturen oppstår tåke. Dette vil i vårt tilfelle føre til at isolatorkjeder blir fuktige, noe som vil kunne øke den konduktive avledningen. Dette vil kunne senke nullpunktspenningen såfremt det skjer symmetrisk for de tre fasene, eller heve den hvis en endringer blir usymmetrisk. Også disse målingene ble gjort en gang i timen, på samme måte som med luftfuktighetsmålingene. I tabellen under er duggpunktstemperaturen vist sammen med lufttemperaturen, men her er bare fire målinger i døgnet tatt med på grunn av at det sammenlignes med temperatur, som ikke ble målt oftere.



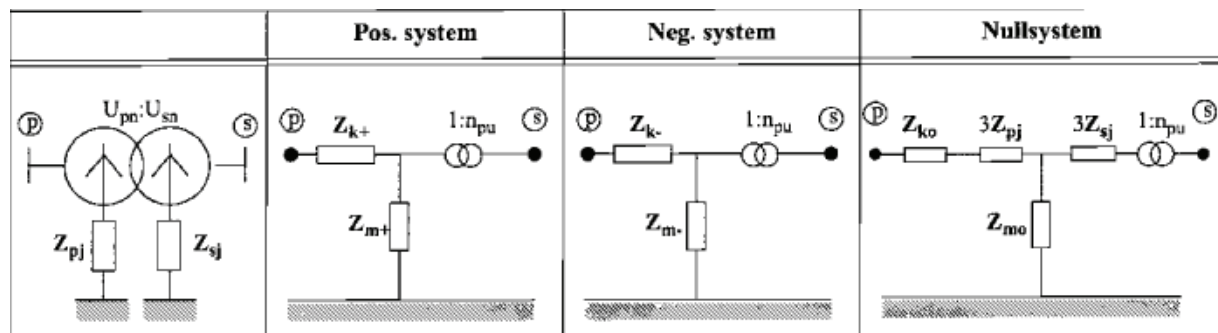
Figur 24 Temperatur og duggpunktstemperatur

Her ser vi at duggpunktstemperaturen i hele den aktuelle måleperioden ligger under den målte temperaturen, slik at vi ikke får noen dugging på komponentene i nettet. Derfor er det vanskelig å si noe om innvirkningen av dette. Klokket 1:00 den 10. februar var kurvene imidlertid veldig nær hverandre. Her skilte det kun  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Hvis vi ser på nullpunktspenningen denne natten sank den med 60 Volt mellom klokken 23:25 og 05:25. Dette kan imidlertid muligens forklares ut fra de samme lastvariasjonene over døgnet som viste seg i perioden etter 12. februar, da man også nettene før har ett bunnpunkt ved femtiden på morgenen. Man ser imidlertid et mer markant fall senere på dagen, formodentlig forårsaket av nedbøren som kom da.

### 3.4 Sammenligning med lastforhold

Som tidligere nevnt antas lasten å spille inn på variasjonene i nullpunktsspenning. Det ble imidlertid ikke gjort noen målinger av forbruk rundt i nettet i måleperioden, men TrønderEnergis nettsentral har målinger av hvor mye effekt transformatoren drar fra 66kV nettet. Disse ble benyttet for å se på lastendringenes innvirkning på nullpunktsspenningen.

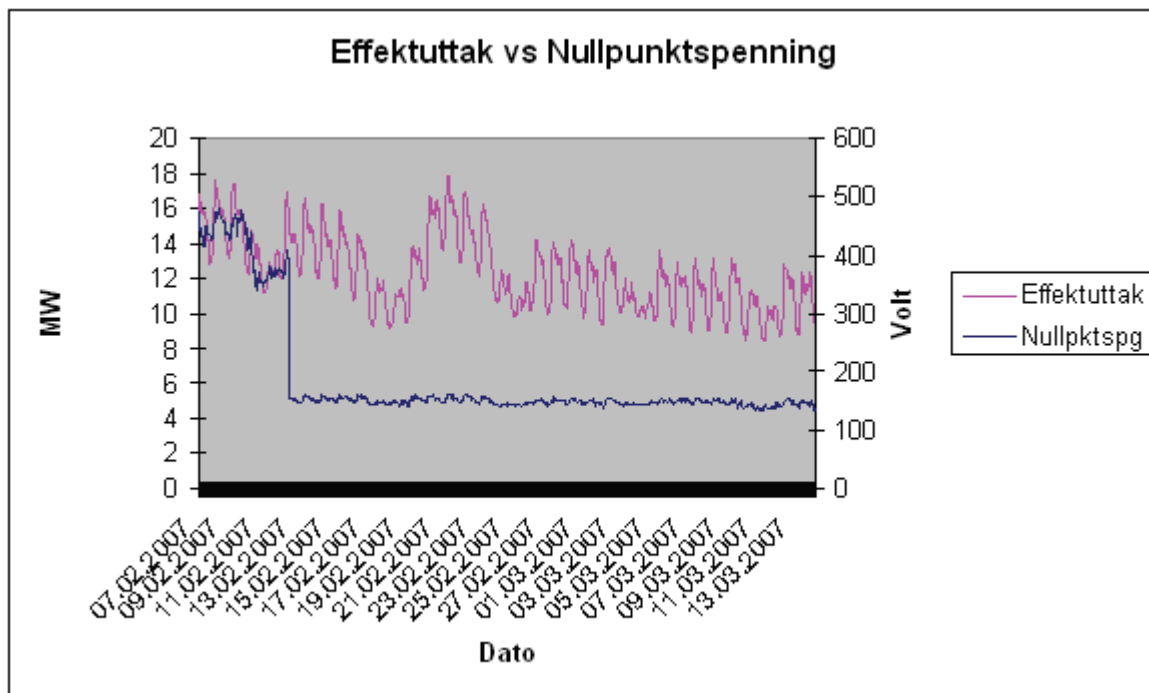
Alle fordelingstransformatorene i systemet er av type Yy, det vil si at de er stjernekoblet på både høyspent og lavspentsiden. Ekvivalentskjemaet for denne typen transformator er vist under: (Faanes, Olsen 2005)



Figur 25 Ekvivalentskjema for YY-trafo

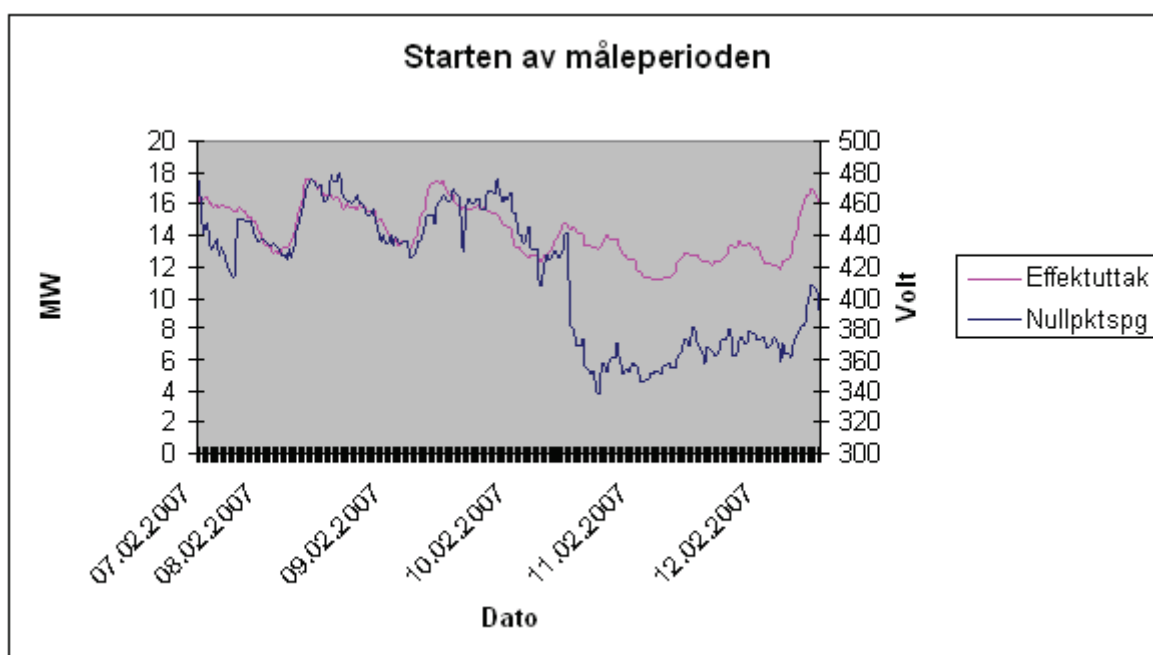
I vårt tilfelle er nullpunktet på lavspentsiden koblet til en såkalt nøytralpunktssavleder. På høyspentsiden er nullpunktet isolert fra jord. Dette fører til at man får brudd i nullsystemet i fordelingstransformatorene, slik at nullstrøm ikke overføres fra last til nett. Dette betyr at de variasjonene som observeres i nullpunktsspenningen etter den 12. februar må skyldes at nettet drives tyngre og lettere som følge av ulik last, og ikke at nullstrømmer overføres fra lastsiden.

For å sammenligne nullpunktsspenningen med lastuttaket i Fillan trafostasjon måtte disse plottes sammen. Spenningsmåling ble gjort hvert 15. minutt, mens lastuttaket ble målt hvert 24. minutt. Dette ble redusert til to målinger i timen, cirka hver hele og halve time. Slik ble målinger av nullpunktsspenning gjort klokka fem på hel og halv sammenlignet med lastmålinger gjort klokka hel og fem på halv, eller tretten over hel og sju over halv. Under er resultatet vist.



Figur 26 Effektuttak og nullpunktspenning

Som vi ser er det en tydelig sammenheng mellom lastuttaket i nettet og nullpunktspenningen. Denne sammenhengen kan vi se både før og etter den 12. februar. I perioden etter den 12. februar kan det se ut som lastendringene er det eneste som spiller inn for spolespenningen sin del. I denne perioden har spolen stått fast i et punkt relativt langt fra resonans, og er derfor ikke så utsatt for endringer i spenning. Likevel ser vi tydelig at lasten varierer i løpet av dagen på samme måte som spenningen. I perioden før den 12. februar kan det være greit å se litt nærmere på endringene. I figuren under er forholdene for de første dagene vist i detalj:



Figur 27 Effektuttak og nullpunktspenning før den 12. februar

Her ser vi at effekten og spenningen følger hverandre ganske godt, men sammenhengen er ikke like åpenbar som i resten av målingene. Dette kan tenkes å skyldes at man her også får påvirkning fra andre kilder. Likevel kan man legge merke til at lasten og spolespenningen hverandre mange steder, for eksempel i løpet av dagen den 8. februar og ved de små effekttoppene på søndag den 11. februar. På andre steder forekommer imidlertid endringer i nullpunktspenningen som ikke kan forklares av lastendringer, for eksempel natten mellom den 7. og 8. februar, hvor vi har en brå stigning i spenning. En kan imidlertid legge merke til at størrelsen på variasjonene som kan knyttes til lastvariasjoner i denne perioden er mye mer vesentlig enn det man kan se i perioden etter den 12. februar. Dette skyldes formodentlig at nullsystemet har betydelig mindre kobling til jord før den 12. februar, og at lastvariasjonene følgelig får en større innvirkning på spolespenningen hva tallverdi angår.

Et annet punkt man kan merke seg er også spenningsfallet på formiddagen den 10. februar. Da kan det se ut til at spenningen faller mer enn det den generelle nedgangen i last, som man typisk ser i helgen, skulle tilsi. Dette skjedde også på en tid på døgnet hvor det ikke er noen spesiell nedgang i last. Derfor kan det være naturlig og knytte dette spenningsfallet opp mot de registrerte nedbørsdataene nevnt i kapittel 3.3.2. Lastforholdene kan i hvert fall ikke forklare spenningsfallet.

Sammenhengen mellom last og nullpunktspenning må komme fra høyspentsiden i nettverket, på grunn av det tidligere nevnte brudd i nullsystemet i fordelingstransformatorene. Når lasten øker, vil også strømmene i nettet øke. Dette vil i sin tur føre til at nullstrømmene, som er gitt av summen av strømmene, vil bli større. Her kan en legge merke til at nullstrømmene i figur 17 følger lastmålingene i figur 26 veldig godt, spesielt etter den 12. februar. Økte nullstrømmer vil så øke spenningen i nullpunktet. Økningen av spolespenningen som følge av lastendringer er imidlertid beskjedent sammenlignet med noen av variasjonene man kan få i nullpunktspenningen. Derfor er det sannsynligvis ikke lastendringer som står bak problemene med høy spolespenning i feilfrie situasjoner.

### 3.5 Oppsummering og diskusjon av måleresultater

Nullpunktspenningen varierte en del i starten av måleperioden, før den 12. februar. Etter denne dagen var nullpunktspenningen ganske konstant, kun med små variasjoner. Dette skyldes at en feil oppsto i regulatorkretsen for spolen, hvorpå spolen stilte seg inn i posisjonene 200 Ampere. Dette er langt fra resonans og følgelig ble både verdiene og variasjonene i nullpunktspenning ganske små.

Nullstrømmene varierte på samme måte som nullpunktspenningen en del før den 12. februar. Etter dette var også her variasjonene mindre. Tre av avgangene fikk en reduksjon av nullstrømmene etter den 12. februar, mens avgangen mot Sandstad fikk en økning. Dette kan skyldes at denne avgangen i starten av måleperioden hadde ekstremt små nullstrømmer, og at den induktive strømmen som spolen bidro med da den stilte seg inn på 200 Ampere, kanskje kan ha forlenget den totale strømvektoren. Se for øvrig figur 18.

Det ble ikke funnet noen sammenheng mellom temperatur, luftfuktighet og lufttrykk og nullpunktspenningen. Dette stemmer med det man kunne anta på forhånd. Man kunne kanskje tenke seg at luftfuktighet og lufttrykk ville kunne virke inn på  $\epsilon_r$ , og derigjennom den kapasitive usymmetrien i nettet. Det synes imidlertid som om dette ikke har noen målbar effekt. Dette kan tyde på at den kapasitive avledingen ikke er særlig avhengig av værforholdene.

Nedbør synes å føre til en lavere nullpunktspenning. Dette ble i hvert fall observert den 10. februar, da spolespenningen sank med cirka 100 Volt samtidig som det begynte å regne. Denne observasjonen stemmer også over ens med observasjoner gjort i forbindelse med prosjektoppgaven om samme tema før jul. Dette kan forklares ut fra økt konduktiv avledning. Når isolatorer blir våte minker resistansen i dem som følge av krepstrømmer på overflaten. Resistansen i jordsmonnet minker også. Dette fører til at nullsystemet blir mer koblet til jord, og at nullpunktspenningen synker. Man kan imidlertid innvende at de meteorologiske målingene ble gjort i Sula målestasjon i nabokommunen Frøya. Derfor må det tas forbehold om at værforholdene har vært de samme her som på Hitra. Snødekket synes ikke å ha noen særlig innvirkning på nullpunktspenningen. Dette stemmer ikke med de erfaringer Lars Hofstad i TrønderEnergi har. Dette kan kanskje skyldes den nevnte avstanden mellom værmålingene og det undersøkte nettet.

Temperaturen sank aldri under duggpunktstemperaturen i løpet av måleperioden og det kan følgelig ikke sies noe om innvirkningen av tåke. Man kan tenke seg at det får den samme innvirkningen som nedbør gjennom økt konduktiv avledning grunnet mindre resistans i isolatorer.

Lastsituasjonen i nettet virker tydelig inn på både nullstrømmene og spolespenningen. Dette ble vist både i perioden før og etter feilen den 12. februar. Det kan imidlertid ikke forklare alle endringer i nullpunktspenningen, og spesielt ikke endringer som er så store at vernets  $U_0$ -setting på 15 % av fasespenningen overskrides.

Generelt kan det sies at det var veldig synd med feilen som inntraff den 12. februar. Denne ødela mesteparten av målingene, og det ble på grunn av dette ikke mulig å få verifisert for eksempel nedbørens innvirkning og den eventuelle innvirkningen av tåke. En skulle også

gjærne hatt litt større målegrunnlag med gjentatte hendelser på værfronten for å dra sikrere konklusjoner.





## 4 Simuleringer

I simuleringene ble det i likhet med for prosjektoppgaven før jul brukt simuleringprogrammet ATP. Simuleringene ble gjennomført for å sammenligne med resultatene fra målingene som ble gjort. Hver avgang ble modellert ved hjelp av en linjedel, en kabeldel og en last. Nettet ble bygd opp på bakgrunn av Fillan-nettet. Se vedlegg 1 og 2 for enlinjeskjema. Her ble det antatt verdier for de geometriske størrelsene på kabler og nett. Alle luftlinjer er antatt å være av typen FeAl 50. Dette stemmer ikke for hele nettet på Hitra, som har en blanding av ulike dimensjoner. Det er først og fremst FeAl 25 og FeAl 50 som er brukt. I nettet på Hitra er det ingen linjer med gjennomgående jording. Derfor er heller ingen av linjene modellert med dette. Som nevnt i kapittel 3.4 er det ingen kobling i nullsystemet i fordelingstransformatorene. Det vil si at nullstrøm ikke overføres fra 230V eller 400V systemet over på høyspentnettet. Derfor er alle laster modellert som en trekantlast ytterst på den aktuelle radialen. Størrelsen på lastene for de forskjellige avgangene er anslått med hjelp fra Lars Hofstad i TrønderEnergi. Den samlede lasten ble antatt å være 14 MW. Dette er valgt på bakgrunn av den effekten som transformatoren i Fillan dro fra det overliggende 66kV-nettet. Se figur 26.

Lengdene på de ulike radialene er grovt anslått ut fra kart i NetBas. Kabellengdene er funnet mer nøyaktig. Her ble lengden av hver kabel funnet i NetBas, og summert basert på type kabel. For avgangen mot Fillan sentrum er kabelnettet modellert som en høyspentkabel av typen TSLE 3x25. (7894m) Dette er en snodd PEX-kabel med egen kappe for de tre lederne. I tillegg er en sjøkabel av typen DKBA 3x25 (1452m) også med på denne avgangen. Avgangen mot Fausland har en sjøkabel over til Frøya. Dette er egentlig en 66kV kabel, men driftes på 22kV-nivå. Kabelen er av typen TSLE 150 (6703m), hvor tre enledere ligger ved siden av hverandre på bunnen. Resten av kablene på avgangen er modellert som TSLE 3x25. (22753m) Avgangen mot Tranvikan har en sjøkabel som går til Fjellværøya, og en som går til Herøya. Disse er av typen TXRA 3x25 (1490+1070m), og har tre snodde ledere inne i en felles kappe. Også her er de resterende kablene modellert som TSLE 3x25. (1113m) Dataene for kablene er hentet fra Alcatels hefte "Kabelboka". (Alcatel) I tabellen under er disse antagelsene vist:

Tabell 2 Antakelser for simulering

	<b>Avgang 1: Fillan</b>	<b>Avg2: Tranvikan</b>	<b>Avgang 3: Sandstad</b>	<b>Avgang 4: Fausland</b>
<b>Luftlinje [km]</b>	20	70	100	80
<b>Kabel [m]</b>	7894	3673	5679	29455
<b>Last [MW]</b>	4	2	1	7

Modelleringen av transformatoren og petersenspolen ble gjort på samme måte som i prosjektoppgaven. Her ble det ovenforliggende nettet modellert ved hjelp av en generator på 66 kV-nivå, mens transformatoren, som var trekant-stjernekoblet, fikk nullpunktet jordet gjennom en induktans med en motstand i parallell. Over induktansen ble det målt verdier av strøm og spenning, som det ble beregnet rms-verdier av. Ved hjelp av MODELS (Vedlegg 3) ble dette da skrevet til en resultatfil som ble kalt models.1. Verdiene ble lagret som U og U/I, hvor sistnevnte tilsvarer spoleimpedansen. For å få frem resonanskurven måtte spolens induktans varieres. Derfor ble det laget et oppsett hvor 50 simuleringer ble kjørt. Her ble spoleinduktansen automatisk satt til:

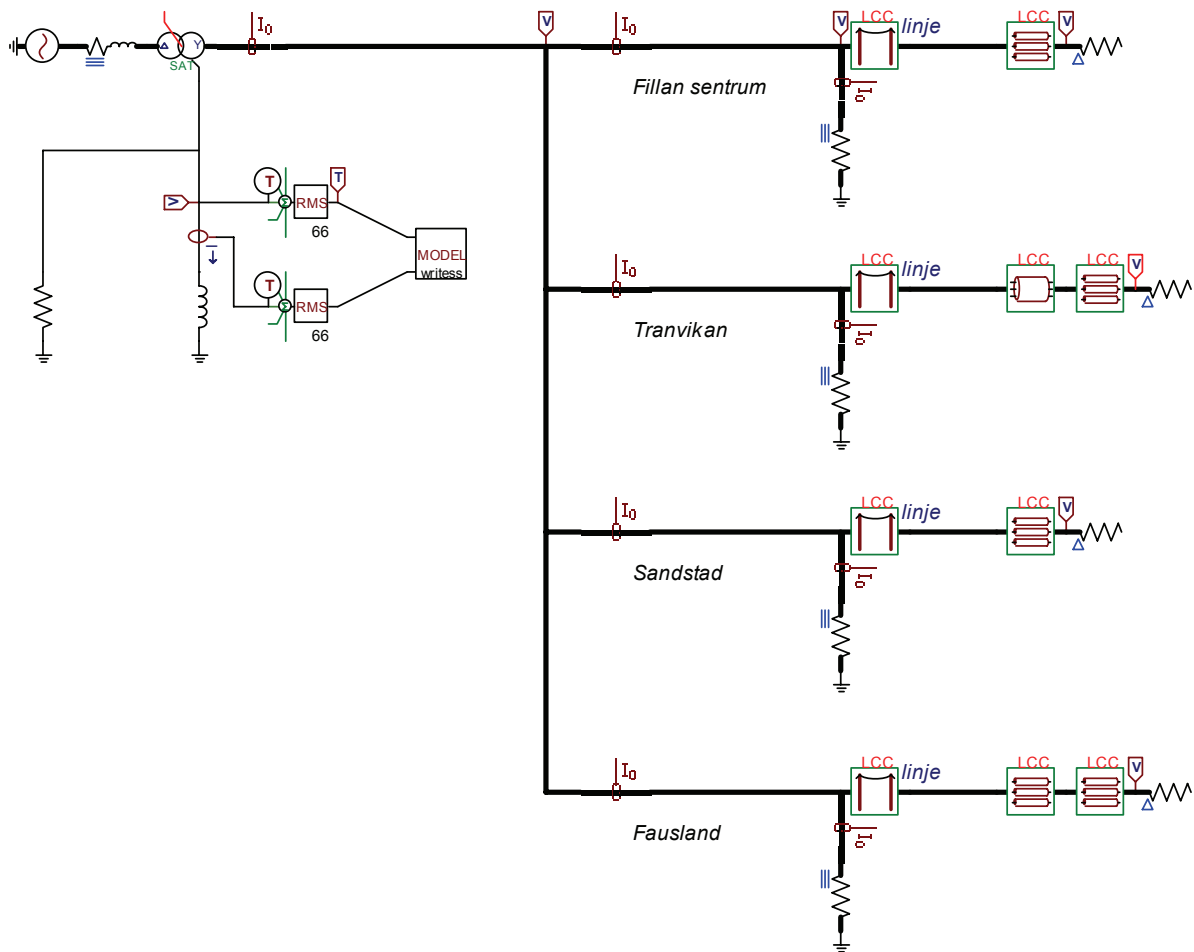
$$L = \frac{10000}{k} \text{ mH} \quad (0.18)$$

Her representerer  $k$  simuleringsnummeret. Det vil si at dette endret seg fra 1 til 50. Det er imidlertid ikke vanlig å måle induktansen i Henry, men i Ampere. Det vil si hvor mange Ampere spolen ville ha bidratt med under merkespenning. Dette er ikke det samme som hvor mange Ampere spolen faktisk bidrar med, men heller en annen måte å beskrive spolens induktans på i det aktuelle tilfellet. Dette oppsettet gir dermed lik avstand mellom punktene på x-aksen, gitt i Ampere.

$$I_{spole,ref} = \frac{U_{ref}}{X} = \frac{U_{ref}}{\omega L} = \frac{22000V}{314 \cdot L} = konst \cdot \frac{1}{L}$$

Resonanskurven ble så plottet ved hjelp av et matlab-script. (Vedlegg 4) Her ble spoleinduktansen gitt i Ampere og spolespenningen i prosent av merkespenningen. Denne merkespenningen er spolens merkespenning som er lik systemets fasespenning, 12,7kV.

I figuren under er den grafiske kretsmodellen som ble bygd opp i ATPDraw vist:



Figur 28 Grafisk kretsmodell

Som vi ser er kretsen her modellert med fire avganger; Fillan sentrum, Tranvikan, Sandstad og Fausland. Tranvikan og Fausland har to kabeldele, grunnet ulike typer kabler. Her er det bare tatt hensyn til de store sjøkablene som egen kabeltype, mens de andre er samlet som TSLE.

Lastene er modellert som en trekantkobling i enden av radialen. Denne er forutsatt å være rent ohmsk, og størrelsen på motstandene er funnet som følger:

$$\begin{aligned}
 R_{Fillan} &= 3 \frac{U^2}{P} = 3 \frac{22kV^2}{4MW} = 363\Omega \\
 R_{Tranvikan} &= 3 \frac{U^2}{P} = 3 \frac{22kV^2}{2MW} = 726\Omega \\
 R_{Sandstad} &= 3 \frac{U^2}{P} = 3 \frac{22kV^2}{1MW} = 1452\Omega \\
 R_{Fausland} &= 3 \frac{U^2}{P} = 3 \frac{22kV^2}{7MW} = 207\Omega
 \end{aligned}
 \tag{0.19}$$

Det er her forutsatt at den effekten som blir tatt ut av nettet er relativt konstant. Dette er imidlertid ikke korrekt. I figur 26 i kapittel 3.4 ser vi at lasten som blir tatt ut av 66-22kV transformatoren varierer mellom 8 og 18 MW. Her er det tatt utgangspunkt i en last på cirka 14MW, sett bort fra tap.

På hver avgang er nullstrømmen målt. Dette er gjort ved å måle de tre fasestrømmene på hver avgang. Deretter blir disse summert i en kontrollblokk. (TACS) I figur 28 er denne adderingen samlet i en *gruppe* kalt  $I_0$ . Den totale nullstrømmen inn på samleskinnen ble også målt.

Samme oppsett ble brukt for å måle den ohmske delen av nullstrømmen. Siden ohmsk avledning ikke er en del av modellene for linje- og kabelnett, ble dette lagt til som en resistans mellom hver fase og jord på hver avgang. Dette er egentlig en distribuert parameter, men her ble den samlet som en resistans innerst på avgangen, men vel og merke etter nullstrømmmålingen. Dermed ble det mulig og skille ut det wattmetriske nullstrømsbidraget. I første omgang ble den ohmske avledningen satt til 100 000Ω per fase.

## **4.1 Resultater fra prosjektoppgaven**

Før noen simuleringer gjennomføres kan det være greit å oppsummere hvilke resultater som ble funnet under simuleringene som ble gjennomført i prosjektoppgaven. Disse ble gjennomført høsten 2006, og for nærmere beskrivelser henvises det til rapporten som ble skrevet i denne forbindelse. (Guldal 2006)

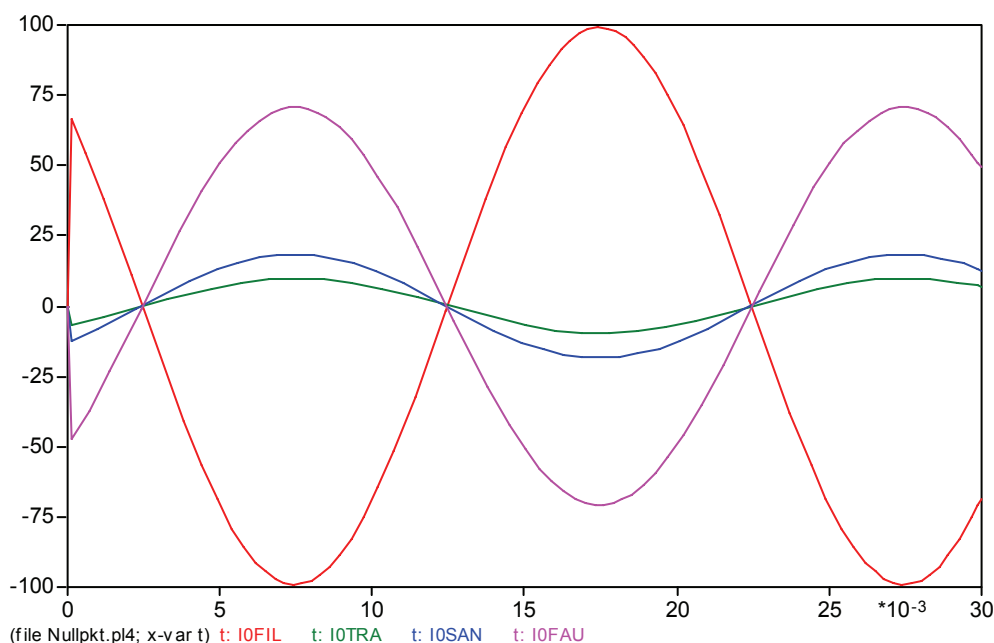
Simuleringene viste følgende:

- Resonanskurvens topp flytter seg til venstre når linjeseksjoner kobles ut, og til høyre når de kobles inn.
- Usymmetri i last spiller ingen rolle for resonanskurven
- En kapasitiv usymmetri i nettet skaper en forhøyet spolespenning
- Ulike kabellengder for de forskjellige fasene fører også til forhøyet spolespenning, men virkningen er begrenset sammenlignet med bidraget fra luftlinjene
- Stor symmetrisk konduktiv avledning, ofte kalt dempning, bidrar til å begrense størrelsen på spolespenningen
- Usymmetri i konduktiv avledning skaper en forhøyet spolespenning
- Innkobling av kontinuerlig parallellmotstand over spolen demper spolespenningen

## 4.2 Simuleringsresultater

### 4.2.1 Nullstrømbidrag i nettet

Etter at nettet var bygd opp som forklart over, ble nullpunktet isolert fra jord og en metallisk jordslutning lagt på avgangen mot Fillan sentrum. Dette ble gjort for å kontrollere nullstrømbidraget til hver avgang. Av denne målingen kan nullstrømbidraget til de tre friske fasene finnes, mens en måling med feil på avgangen mot Tranvikan måtte til for å finne nullstrømbidraget til Fillan-avgangen. I figuren under er feilsituasjonen med feil på Fillan-avgangen vist:



Figur 29 Jordslutningsprøve med feil på Fillan-avgangen

Deretter ble en ny simulering gjort, denne gangen med feilen på avgangen mot Tranvikan. Resultatet ligger i vedlegg 5. Her kan vi legge merke til at de fire avgangenens nullstrømmer ligger omtrent i samme fase. Vi ser også at nullstrømmen for den feilbefengte fasen har motsatt retning i forhold til de andre, jmfør kapittel 2.3.3. Verdiene ble sammenlignet med det nullstrømbidraget som NetBas fant for samleskinnen Fillan. Dette ble gjort ved å kjøre en jordslutningstest på samleskinnen.

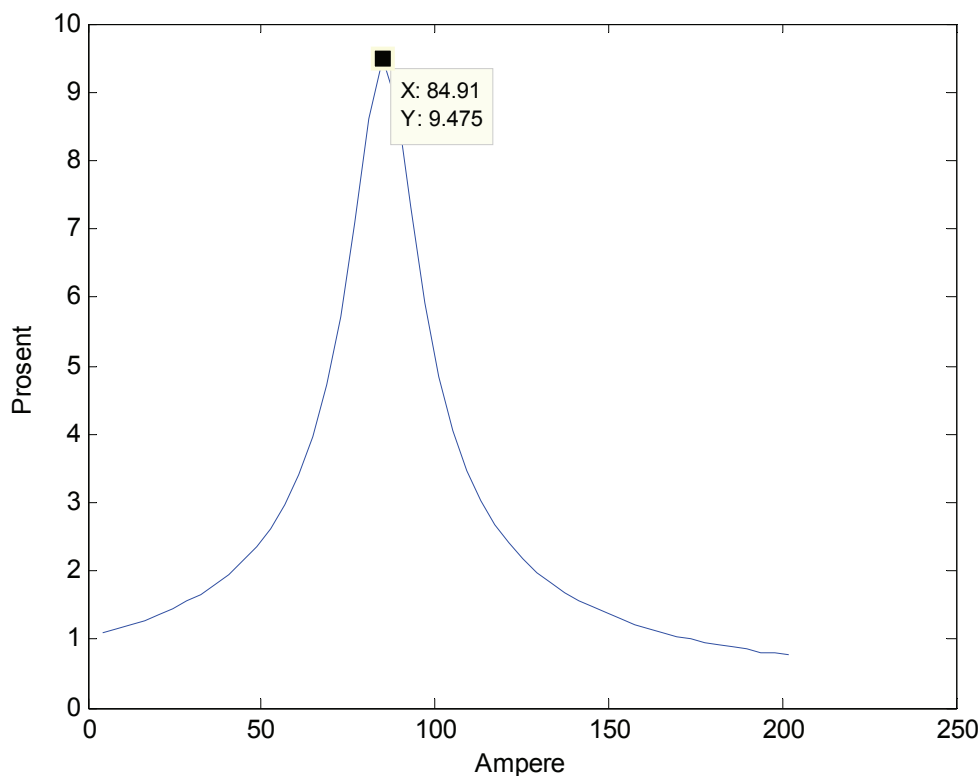
Tabell 3 Nettets kapasitive bidrag

	Fillan	Tranvikan	Sandstad	Fausland	Totalt
<b>I0max</b>	21,1	9,8	18,4	70,8	120,1
<b>I0eff</b>	15,0	6,9	13,0	50,0	84,9
<b>NetBas</b>	21,9	8,9	13,3	71,3	115,4

Her ligger resultatene fra ATP betydelig under det som NetBas finner. Dette kan for eksempel komme av at linjelengdene bare er grovt anslått i ATP. Kabellengdene, som ble manuelt lagt sammen, kan muligens mangle noen deler. I NetBas er det for eksempel indikert kabler ved

samleskinnen hvor det ikke er oppgitt noen lengder. Hvorvidt disse tas med i beregningen av nullstrøm vites ikke. Det skal imidlertid ikke kunne forklare det såpass substansielle fraviket som vi finner her. I trafostasjonen er alle avgangene luftlinjer helt inn til stasjonen, så dette kan bare være snakk om noen titalls meter fra transformatoren til den første stolpen.

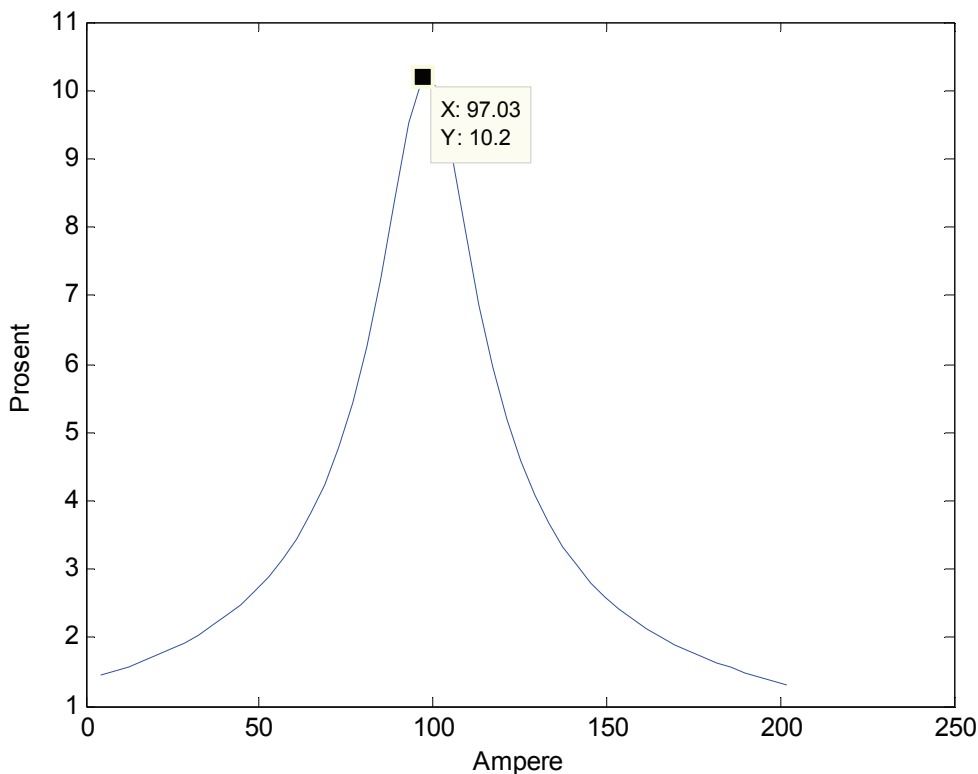
Etter at simuleringen med isolert nett ble kjørt, ble en spole koblet inn i nullpunktet på transformatoren, på samme måte som i prosjektoppgaven som ble gjennomført før jul. I tillegg ble en parallellmotstand koblet inn. Denne var på 62,5 kW, eller 2581Ω, som er den samme størrelsen som parallellmotstanden i det aktuelle nettet på Hitra. I denne simuleringen ble ingen feil lagt på noe sted i nettet. Resonanskurven for denne simuleringen er vist i figuren under:



**Figur 30 Simulert resonanskurve**

Her ser vi at spolen finner resonanspunktet på 84,9 Ampere, noe som stemmer veldig bra med det som ble funnet i kortslutningsprøvene. Spolespenningen i resonanspunktet på 9,5 % tilsvarer 1203 Volt.

Det er veldig rart at NetBas og ATP finner så vidt ulike kapasitive bidrag fra nettet. Mesteparten av det kapasitive bidraget i nettet skal i følge Lars Hofstad komme fra kablene i nettet. Disse skal være like lange i ATP- og NetBas-simuleringene, og hvis noen av de små kabeldelene fra NetBas er glemt i ATP, kan ikke disse spille så stor rolle. Når det gjelder linjelengdene er usikkerheten hva korrekte lengder angår betydelig større i ATP. For å kontrollere innvirkningen av luftlinjene ble en simulering med en økning på 50 % i linjelengder i nettet gjennomført. Dette er en voldsom økning, og betydelig mer enn hvor mye man kan tenke seg at feilen i anslaget på linjelengder kan være på. Resonanskurven ble da som følger:

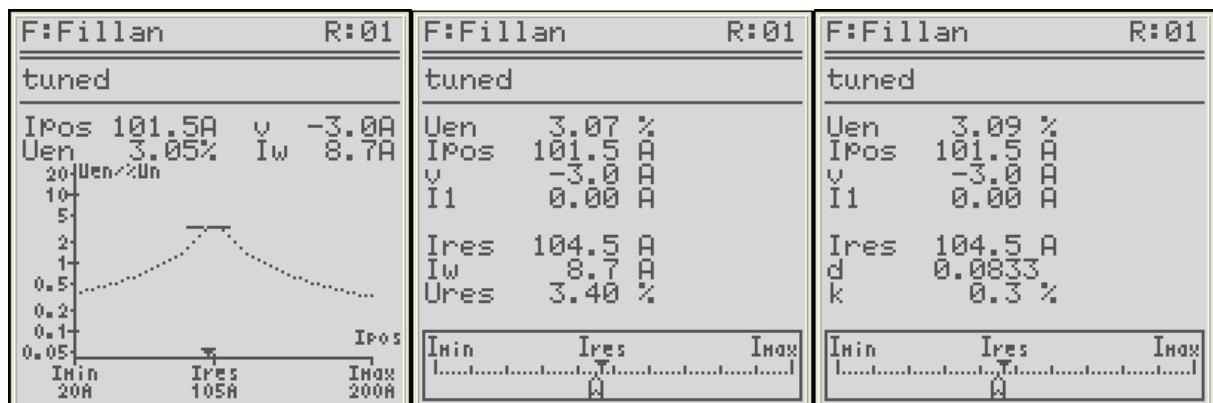


**Figur 31 Resonanskurve, 50 % lengre luftnett**

Økningen i linjelengden fører til at det nye resonanspunktet øker til 97 Ampere. Med en økning på 50 % i luftlinjelengden flyttes altså resonanspunktet bare med cirka 12 Ampere. Med tanke på hvor mye mer luftnett som kobles inn i denne simuleringen kan dette ikke forklare forskjellen mellom simuleringsresultatene i NetBas og ATP, siden usikkerheten i anslaget av linjelengde ikke er så stort.

Det er imidlertid interessant å legge merke til at nullpunktspenningen i dette tilfellet er økt fra 9,5 % til 10,2 %. Dette tilsvarer 1296 Volt.

Den 14. mars ble resonanskurven i nettet undersøkt og lagret. I figuren under er resonanskurven fra denne dagen vist:



**Figur 32 Målt resonanskurve den 14. mars**

Her ser vi at det faktiske resonanspunktet lå på 101,5 Ampere i nettet denne dagen. Dette stemmer mer over ens med resultatet for simuleringen med 50 % mer linjenett enn det som først ble antatt. Likevel fører overdrivelsen hva luftlinjelengder angår til at spolespenningen blir veldig høy sammenlignet med det som er blitt observert i kapittel 3.2.1. Her er resonanstoppen på 3,4 %, som tilsvarer 432 Volt.

Resonanspunktets plassering er gitt av nettets totale kapasitans mot jord. (Se kapittel 2.4) Denne antas å være betydelig større enn nettets kapasive usymmetri, som bestemmer spenningen i nullpunktet. Det antas derfor at resonanspunktets plassering hva gjelder totalt kapasitivt bidrag for nettet ikke vil påvirke resonanstoppens størrelse i særlig grad. Dette stemmer også overens med uttrykket i formel 6. Derfor ble simuleringene gjennomført med de først anslåtte linjelengdene, på tross av at den totale kapasive avledningen i ATP viste seg å være mindre enn den som ble funnet i NetBas og som ble målt i nettet.



## 4.2.2 Konduktiv avledning

Da dataloggeren ble hentet den 14. mars ble også spoleregulatorens resonanskurve undersøkt. (Se figur 32) Det ble da funnet at den wattmetriske nullstrømmen var på 8,7 Ampere. Både målingene denne dagen og de teoretiske betraktningene i kapittel 2.4 viser at den wattmetriske nullstrømkomponenten er den samme uansett spolestilling. Nok en gang er det greit å minne om at definisjonen denne nullstrømkomponenten innebærer den strøm man ville hatt ved 100 % skjevspenning. Dette betyr at vi på følgende måte kan finne nettets ohmske kobling mot jord:

$$R_0 = \frac{U_{ref}}{I_w} = \frac{12702V}{8,7A} = 1460\Omega \quad (0.20)$$

Dette er parallellkoblingen av nettets konduktive avledning og den kontinuerlige parallellmotstanden i nullsystemet. Siden vi kjenner parallellmotstandens størrelse kan vi finne nettets konduktive avledning som følger:

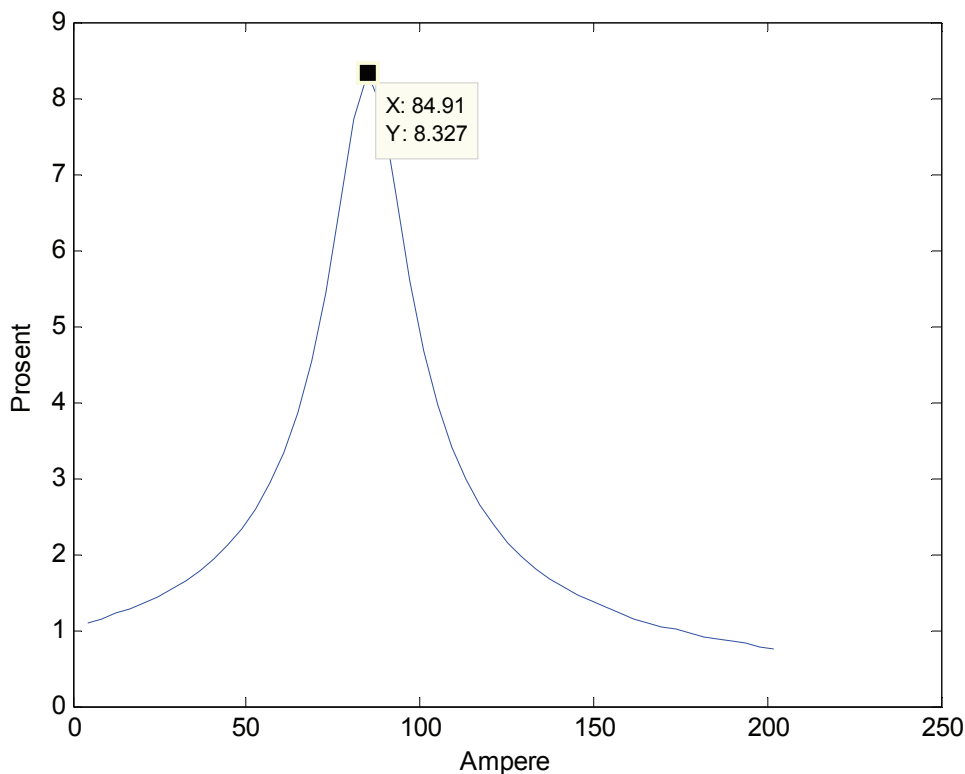
$$\begin{aligned} \frac{R_{PM} \cdot R_{nett}}{R_{PM} + R_{nett}} &= 1460\Omega \\ R_{nett} &= \frac{1460 \cdot R_{PM}}{R_{PM} - 1460} = \frac{1460 \cdot 2581}{2581 - 1460} \Omega = 4498\Omega \end{aligned} \quad (0.21)$$

Det er naturlig å tenke seg at den konduktive avledningen fordeler seg jevnt utover luftnettet. Det antas at kabelnettet ikke bidrar med noen konduktiv avledning. I tabellen under er fordelingen av konduktans vist:

Tabell 4 Nettets konduktive avledning

	Fillan	Tranvikan	Sandstad	Fausland	Totalt
<b>Luftlinje [km]</b>	20	70	100	80	270
<b>Konduktans [<math>\mu</math>S]</b>	16,5	57,6	82,3	65,9	222,3
<b>Resistans [<math>k\Omega</math>]</b>	60,61	17,36	12,15	15,17	4,498
<b>Resistans pr fase [<math>k\Omega</math>]</b>	181,83	52,08	36,45	45,51	13,49

Her er i tillegg resistansen tatt med, også for hver fase. Dette er basert på at hver fase har samme konduktive avledning, og at man i nullsystemet får en parallellkobling av de tre fasers impedans mot jord. I figur 33 er den nye resonanskurven vist:



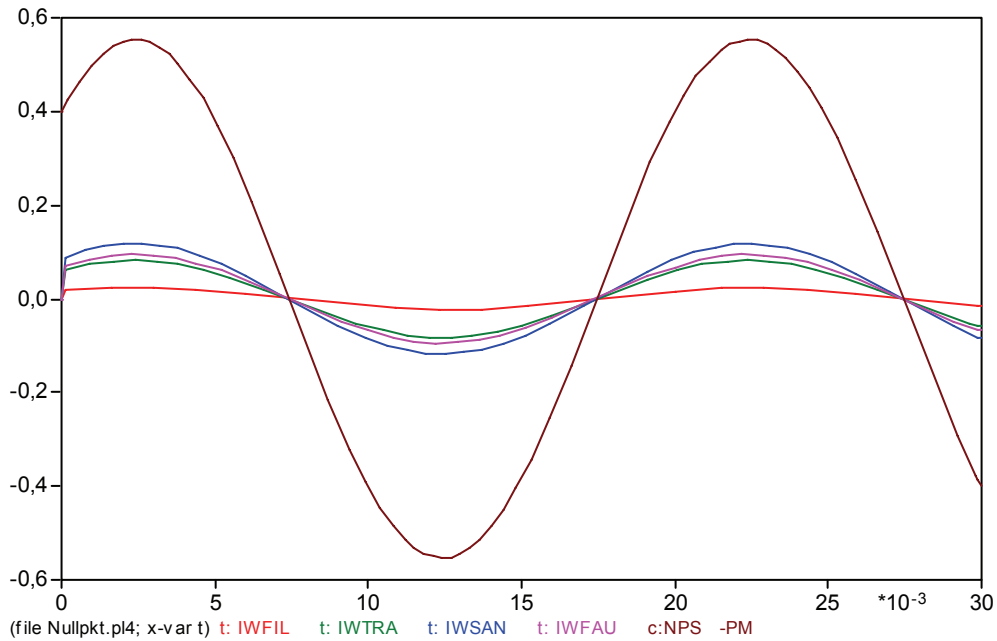
**Figur 33 Resonanskurve, justert for konduktiv avledning**

Hvis en nå kontrollerer resonanskurven for dette nettet mot den man fant ved den initiale antagelsen om at alle avgangene hadde samme konduktive avledning på  $100\,000\Omega$  per fase viser det seg at resonanstoppene er redusert fra 9,475 % til 8,327 %. Resonans oppstår fremdeles ved 84,91 Ampere. Den nye maksimalspenningen blir nå 1057 Volt.

Dataloggingen ble gjennomført med en underkompensering i nettet på 3 Ampere. Med et resonanspunkt på 84,9A tilsvarer dette følgende spoleinduktans:

$$L = \frac{U}{j\omega I} = \frac{12702V}{314 \cdot (84,9 - 3)A} = 494mH \quad (0.22)$$

Denne verdien ble så satt inn for jordslutningsspolen i ATP, og en simulering ble kjørt. Deretter ble de ohmske nullstrømmene plottet. I figuren under kan den konduktive avledningen for de fire avgangene samt strømmen som går i den kontinuerlig innkoblede parallellmotstanden sees. Sistnevnte er merket NPS-PM i figuren.



**Figur 34 Nettets wattmetriske strømmer**

Her ser vi at parallellmotstanden bidrar med det vesentligste av den ohmske strømmen i nullsystemet. Dette kan man spesielt legge merke til med tanke på den andre parallellmotstanden som kobles inn dersom nullpunktspenningen overstiger den nedre grenseverdien, som i dette tilfellet er satt til 1905 Volt. Denne vil øke den wattmetriske nullstrømmen betraktelig, hvilket også vil føre til at vernet løser ut. Se for øvrig kapittel 2.3.3.

Effektivverdien av den samlede wattmetriske nullstrømmen blir på:

$$I_{0,w} = \frac{0,024 + 0,082 + 0,118 + 0,094 + 0,553}{\sqrt{2}} A = 871 mA \quad (0.23)$$

### 4.2.3 Sammenligning med måleresultater

Spenningen i nullpunktet ble beregnet i en simulering med tre ampere underkompensert spole. Simuleringsresultatet ligger i vedlegg 6, og følgende nullpunktspenning ble funnet:

$$U_{0,-3A} = \frac{1428V}{\sqrt{2}} = 1010V = 7,9\% \quad (0.24)$$

Dette må sammenlignes med målingene som ble gjort før den 12. februar. Disse ligger i kapittel 3.2.1. Her ser det ut til at spolespenningen er høyere i simuleringen enn det den er i målingene, som hadde nullpunktspenning mellom 350 og 500 Volt. Gjennomsnittet for målingene ble funnet ved hjelp av excel til å være 415 Volt.

Ulikheten i resonanspunkt mellom simuleringene og nettet som ble målt den 14. mars er et interessant poeng med tanke på at spolespenningen blir såpass mye høyere i simuleringen enn i målingene. Gitt at kabellengdene i simuleringen er korrekte, kan det imidlertid ikke forklare hvorfor spenningen blir høyere. En økt resonansstrøm ville krevd lengre linjer i simuleringen, noe som ville hevet spolespenningen enda mer enn det som er tilfellet i simuleringen.

Når det gjelder nullstrømmene ble de funnet på samme måte som nullpunktspenningen. Se for øvrig vedlegg 7. I tabellen under er nullstrømmene som ble funnet med dataloggeren og ATP sammenlignet:

**Tabell 5 Nullstrømmer i avgangene**

	<b>I<sub>0</sub> Fillan</b>	<b>I<sub>0</sub> Tranvikan</b>	<b>I<sub>0</sub> Sandstad</b>	<b>I<sub>0</sub> Fausland</b>
<b>Maksimum [mA]</b>	12,9	7,9	1,6	27,2
<b>Minimum [mA]</b>	9,0	5,1	0,7	15,5
<b>Gjennomsnitt [mA]</b>	11,0	6,5	1,2	21,3
<b>ATP [mA]</b>	940	622	1146	3811

Her ser vi at resultatene fra simuleringen ligger langt over det som ble målt. Dette er svært besynderlig. En mulig feilkilde for målingene kan være at kabelstrømtrafoen kanskje ikke oppfører seg helt lineært ved så små strømmer som det her blir målt. Disse er vanligvis brukt til å måle strømmer som er større en 10- 20mA, og er derfor kanskje ikke helt nøyaktige så langt ned i måleområdet. Likevel kan det ikke forklare så store avvik som det vi her opplever.

Ellers kan en legge merke til at fasespenningene på samleskinnen er veldig skjeve i simuleringen. Toppverdiene er på 19,3kV, 17,6kV og 16,9 kV henholdsvis for fase A, B og C. Linjespenningene er imidlertid fine. Disse er vedlagt i vedlegg 8 og vedlegg 9.

Linjen som i simuleringen drives tyngst er helt klart avgangen mot Fausland. Den har en last på 7 MW i enden av en lang radial med veldig mye kabel. Hvis vi sjekker spenningen i enden av denne ser vi at spenningen her er helt uakseptabel. Også de andre avgangene hadde lavere spenning på enden, men disse var ikke så ille som det som ble funnet for Fausland-avgangen. I det virkelige nettet er lasten distribuert utover linjen, noe som ikke medfører så store spenningsfall. Linja mot Fausland har også en veldig lang kabeldel som i modellen er plassert ytterst, før lasten. I virkeligheten er dette summen av mange korte kabeldele som også ligger distribuert utover linja, for det meste som avstikkere som leverer liten last. Se for øvrig vedlegg 10,11 og 12.

For å undersøke virkningen av den tunge lastsituasjonen i avgangen mot Fausland, ble lasten her koblet fra, og en ny simulering ble gjennomført. Det samme ble også gjort for de tre andre avgangene for å undersøke deres bidrag til skjevspenningen. Samleskinnespenningene og nullstrømmene er vist i tabellen under: (maksimalverdier)

**Tabell 6 Samleskinnespenninger**

Utkoblet last:	Fase A	Fase B	Fase C	Nullpktspg
Fillan [kV]	18,6	18,2	17,0	1,40
Tranvikan [kV]	19,3	17,6	16,9	1,42
Sandstad [kV]	19,3	17,6	16,9	1,40
Fausland [kV]	18,6	18,2	17,0	0,94
Alle [kV]	18,6	18,2	17,0	0,96

**Tabell 7 Nullstrømmer**

Utkoblet last:	Fillan	Tranvikan	Sandstad	Fausland
Fillan [A]	1,34	0,86	1,58	5,27
Tranvikan [A]	1,32	0,89	1,60	5,34
Sandstad [A]	1,31	0,86	1,63	5,30
Fausland [A]	0,84	0,50	0,95	3,82
Alle [A]	1,31	0,86	1,62	5,29

Her ser vi at Fausland synes å være den eneste avgangen som får ned spolespenningen nevneverdig. For nullstrømmene ser det ut til at utkobling av avgangene mot Fillan og Fausland har mye av den samme innvirkningen. Dette er også avgangene med mest last. Man kan imidlertid legge merke til at det går en betydelig nullstrøm i avgangene selv med lasten frakoblet. Bare for Fausland får vi en mindre nullstrøm ved bortkobling av lasten. Dette kan tyde på at bare denne avgangen er hardt nok presset til at lastforholdene spiller en veldig stor rolle for nullstrømmene. Det er imidlertid verdt å merke seg at selv med all last frakoblet, er skjevspenningen betydelig i forhold til jord. Sammenlignet med resultatene fra målingene som ble gjennomførte i nettet, ser vi at nullpunktspenningen er 2-3 ganger så stor i simuleringen som i målingen.

I følge Lars Hofstad måles nullstrømmene også av vernreleene i transformatorstasjonen. Her var det i følge han ikke uvanlig å se verdier i størrelsesorden 1 til 2 Ampere. Dette kan tyde på at målingene som ble gjennomførte i nettet ikke er riktige. Her kan man tenke seg at feil *gain* muligens er blitt satt i dataloggeren, slik at de målte strømmene er blitt for små. Den mest sannsynlige feilen er at omsetningsforholdet er blitt glemt, slik at de målte strømmene er sekundære og ikke primære. Dette omsetningsforholdet er 1:50, noe som medfører at de målte verdiene sannsynligvis skulle vært multiplisert med 50. I tabellen under er dette gjort:

**Tabell 8 Nullstrømmer i avgangene, korrigert for omsetningsforhold**

	$I_0$ Fillan	$I_0$ Tranvikan	$I_0$ Sandstad	$I_0$ Fausland
<b>Maksimum [mA]</b>	645	395	80	1360
<b>Minimum [mA]</b>	450	255	35	775
<b>Gjennomsnitt [mA]</b>	550	325	60	1065
<b>ATP [mA]</b>	940	622	1146	3811

Simuleringsprogrammet får fremdeles verdier som er betydelig større enn de målte, men nå er de i hvert fall i samme størrelsesorden. Avgangen som skiller seg ut er imidlertid Sandstad. Her var de målte verdiene veldig mye mindre enn det som var tilfellet ved simuleringen.

Hvis de målte nullstrømmene faktisk har vært sekundærstrømmene i kabelstrømtransformatoren kan dette forklare at den anslåtte totale nullsystemimpedansen i kapittel 3.2.3 ble så høy. Hvis man multipliserer den gjennomsnittlige summen av nullstrømmer fra starten av måleperioden med 50 får man følgende impedans:

$$Z_{0,tot} = \frac{U_0}{I_0} = \frac{415V}{50 \cdot 40mA} = 207,5\Omega \quad (0.25)$$

Dette virker mye mer sannsynlig sammenlignet med størrelsen på de andre impedansene, noe som sannsynliggjør at de målte nullstrømmene faktisk er de sekundære, og ikke de primære. Videre kan man også legge merke til at nullstrømmene bortsett fra i avgang tre blir 2-3 ganger så store i simuleringen som i målingene. Dette samsvarer med det man kunne observere for nullpunktspenningen. Derfor kan det virke sannsynlig at feil faktor er blitt brukt i dataloggeren.

Hva som gjør at avgangen mot Sandstad har så mye mindre nullstrøm i målingene enn i simuleringen, er vanskelig å si noe sikkert om.

#### 4.2.4 Simulering av hendelsene den 12. februar

Da spoleregulatoren ble ødelagt den 12. februar satte spolen seg i stilling 200 Ampere, noe som førte til at nullpunktspenningen sank betraktelig. Nullstrømmen i tre av fire avganger sank også, mens avgang 3 mot Sandstad opplevde en økning i nullstrøm. En simulering ble gjennomført for å verifisere dette. Spolestillingen 200 Ampere tilsvarer:

$$L_{spole} = \frac{U_{ref}}{\omega \cdot I_{spole}} = \frac{12702V}{314 \cdot 200A} = 0,2H \quad (0.26)$$

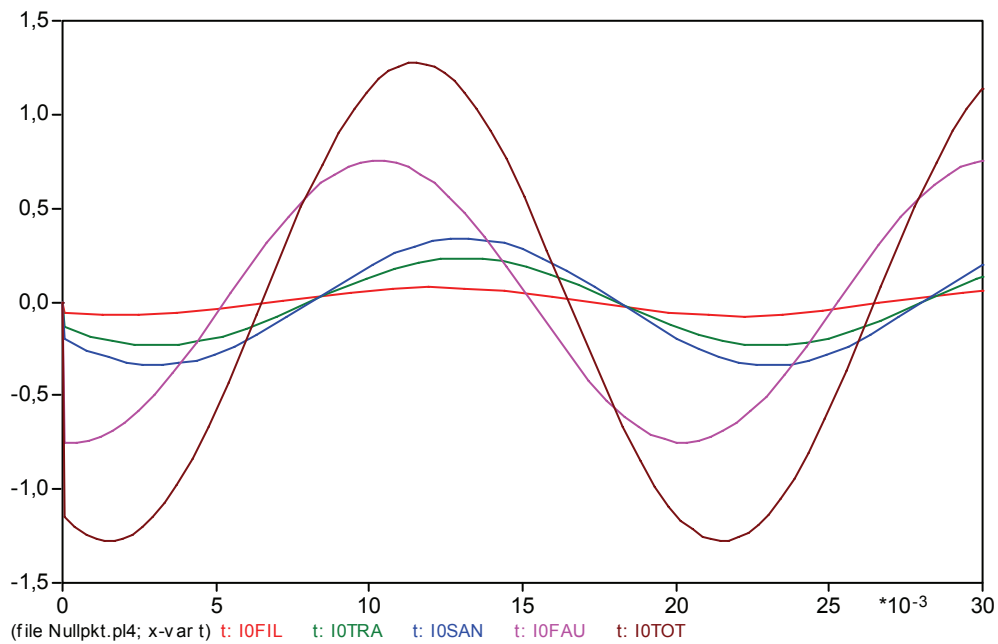
Denne induktansen ble satt inn for spolen i ATP. I vedlegg 13 ligger simuleringsresultatet for spolespenningen. Den ble veldig lav, med en effektivverdi på bare 57mV. Sammenlignet med den målte nullpunktspenningen, som var i størrelsesorden 150 Volt i denne perioden, er dette nærmest for et direktejordet nett å regne. En mulig forklaring på dette kan være at det virkelige nettet har et resonanspunkt på cirka 105 Ampere. Dette er hele 20 Ampere over resonanspunktet i simuleringen. Derfor kan en tenke seg at i en spolestilling på 200 Ampere kommer man betydelig lenger ut på resonanskurven i simuleringen enn det man gjør i det virkelige nettet.

I tabellen er nullstrømmene og spolespenningen vist både for spolestilling 3 Ampere underkompensert og 200 Ampere. En simulering med spolestilling 180 Ampere er også tatt med. (Vedlegg 14) Dette er gjort av hensyn til at resonanspunktet ligger 20 Ampere lavere i simuleringen enn det den gjør i det virkelige nettet.

**Tabell 9 Nullstrømmer og spolespenning for ulike spolestillinger**

Spolestilling	I <sub>0</sub> Fillan	I <sub>0</sub> Tranvikan	I <sub>0</sub> Sandstad	I <sub>0</sub> Fausland	U <sub>0</sub>
<b>81,9A (-3A)</b>	0,94A	0,62A	1,15A	3,81A	1010V
<b>180A</b>	0,08A	0,23A	0,34A	0,75A	71mV
<b>200A</b>	0,08A	0,23A	0,34A	0,75A	57mV

Her ser vi at i simuleringen øker ingen av nullstrømmene når spolen flyttes til 200 Ampere. Det ser heller ikke ut til at det er noen særlig forskjell på 180 Ampere og 200 Ampere spolestilling. Dette er kanskje ikke så rart med tanke på at forskjellen i induktans bare ikke er stor. 200A tilsvarer 200mH, mens 180A tilsvarer 238mH. Dette, sammen med det høye resonanspunktet i simuleringen, kan tyde på at resonanskurven i det virkelige nettet er flatere enn det som er tilfellet i simuleringen. Dette kan tyde på at dempingen i nettet er høyere enn det som er forutsatt i simuleringen. Simuleringene som ble gjennomført i forbindelse med prosjektoppgaven før jul viste at ved en stor konduktiv avledning til jord blir typisk resonanskurven rundere i formen, noe som kan forklare at det er såpass høy spenning i 200 Ampere som det man opplever i målingene. (Guldal 2006) I følgende figur er nullstrømmene med en spolestilling på 200 Ampere vist, mens nullstrømmene for tilfellet med 180 Ampere ligger i vedlegg 15.



**Figur 35 Nullstrømmer, spolestilling 200 Ampere**

Her kan vi se at nullstrømmene er kommet betydelig mer ut av fase med hverandre enn det som var tilfellet da spolen sto 3 Ampere underkompensert. Dette kan kanskje tyde på at de forskjellige fasene får en ulik andel av den induktive strømmen fra spolen.



### 4.3 Hva skal til for å aktivere jordfeilvernet?

I de følgende kapitlene er det undersøkt hva som må til i simuleringen for å øke nullpunktspenningen til over  $U_0$ -settingen i vernet. Denne er på 15 % av fasespenningen, eller 1905 Volt rms. Dette er imidlertid som tidligere nevnt ikke nok til å løse ut vernet. For at dette skal skje må også strømvektoren ligge inne i det predefinerte utløseområdet. Dette for å sikre sikker retningsbestemmelse av feilen. Se for øvrig kapittel 2.3.3.

#### 4.3.1 Jordfeil på enden av radialene

For å undersøke hva som skal til for at vernet aktiveres, ble simuleringer gjennomførte for å bestemme hvor stor overgangsmotstand mot jord som skulle til for at nullpunktspenningen skulle overstige 1905 Volt. Dette tilsvarer 2694 Volt i maksimalverdi. Feilen som ble satt på var en enpolt feil på fase A. Dette ble gjort for hver avgang fra transformatorstasjonen. Resultatene ligger i vedlegg 16 til 19, og er samlet i tabellen under. Simuleringene ble gjennomførte med 3 Ampere underkompensert nett. Her kan det være greit å minne om at jordfeil i følge forskriftene skal detekteres ved  $3000\Omega$ , og etterstrebes detektert ved  $5000\Omega$ . Feilen ble satt på ytterst på hver avgang siden dette er den vanskeligste feilsituasjonen å detektere.

Tabell 10 Overgangsmotstander ved detektering av feil

Feil på avgang:	Overgangsmotstand på feilsted ved aktivering av vern [ $\Omega$ ]
Fillan sentrum	3600
Tranvikan	3700
Sandstad	3900
Fausland	2200

Tallene som ble funnet i simuleringen tilsier at vernenes  $U_0$ -setting bør stilles lavere med tanke på avgang 3 mot Sandstad.. Dette bør imidlertid verifiseres av skarpe prøver i det reelle nettet, da helst med en overgangsmotstand på  $3000\Omega$  innkoblet. Det viser også at man i en posisjon på 3 Ampere underkompensert nett her må ha en betydelig feil for å oppnå aktivering av vernet. Dette er interessant med tanke på de problemene som har vært i dette nettet før, hvor vernet ble aktivert i feilfrie nettilstander.

For å undersøke om vernet vil løse ut etter at det er blitt aktivert ble de wattmetriske nullstrømmene simulert for de feilsituasjonene som er vist i tabell 10. Her ble det antatt at begge parallellmotstandene ble innkoblet etter at nullpunktspenningen hadde oversteget  $U_0$ -settingen. Den andre parallellmotstanden var på 125kW, noe som tilsvarer 1291 $\Omega$ . Resultatene ligger i vedlegg 20 til 23.

**Tabell 11 Wattmetriske nullstrømmer ved aktivering av jordfeilvern**

<b>Feil på avgang:</b>	<b>I0 Fil [A]</b>	<b>I0 Tra [A]</b>	<b>I0 San [A]</b>	<b>I0 Fau [A]</b>	<b>Parallellmotstander [A]</b>	<b>Totalt [A]</b>	<b>Totalt rms [A]</b>
Fillan	0,03	0,09	0,13	0,11	1,91	2,27	1,61
Tranvikan	0,03	0,09	0,13	0,11	1,88	2,24	1,58
Sandstad	0,03	0,09	0,13	0,11	1,90	2,26	1,60
Fausland	0,03	0,10	0,14	0,12	2,04	2,43	1,44

Her ser vi at mesteparten av den wattmetriske nullstrømmen som måles i releet kommer som følge av parallellmotstandene til spolen. Dette fører til at man ofte ikke kan få sikkert retningsbestemmelse av feilen uten å koble inn parallellmotstandene. Radien i halvsirkelen rundt origo i figur 10 er på 6 Ampere, mens egetbidraget fra de ulike avgangene må simuleres for de enkelte feilsituasjonene. Nettet er i utgangspunktet 3 Ampere underkompensert, slik at dette må legges til egetbidraget for å finne resultantvektorens plassering på imaginæraksen. I tabell 12 ser vi at alle resultantvektorene kommer inn i sirkelen rundt origo i figur 10.

**Tabell 12 Minimum wattmetrisk utløsestrøm for de marginale feilpåvisningssituasjonene**

<b>Feil på avgang:</b>	<b>Egetbidrag [A]</b>	<b>Resultantvektor(I<sub>m</sub>) [A]</b>	<b>Min. wattm.utløsestr[A]</b>
Fillan	2,72 (Vedl. 24)	0,28	5,99
Tranvikan	2,47 (Vedl. 25)	0,53	5,98
Sandstad	2,45 (Vedl. 26)	0,55	5,97
Fausland	5,13 (Vedl. 27)	-2,13	5,61

Her ser vi at jordfeilvernet ikke vil koble ut noen av linjene ved deteksjon av jordfeil. Til det er de wattmetriske nullstrømkomponentene alt for små i forhold til verninnstillingen i figur 10.

### 4.3.2 Minket konduktiv avledning

Hvis den konduktive avledningen i nettet minker får nullsystemet mindre kobling til jord, og nullpunktspenningen øker. En simulering ble kjørt for å finne ut av hvor liten denne måtte bli for å aktivere vernet ved å overstige 1905 Volt rms i nullpunktet. I denne simuleringen ble den konduktive avledningen samlet i en trefaset motstand ved samleskinnen. Nettet var 3 Ampere underkompensert i simuleringen.

I tabellen under er nullpunktspenningen vist for ulike verdier av konduktiv avledning. Parallellmotstanden var innkoblet i alle tilfellene. Resultatene ligger i vedlegg 28 til 30. Den første simuleringen er den som er blitt brukt i tidligere kapitler.

Tabell 13 Nullpunktspenning ved ulike konduktive avledninger

Kond. Avledning [ $\mu\text{S}$ ]	Resistans [ $\Omega$ ]	Resistans pr fase [ $\Omega$ ]	Nullpunktspenning (rms) [V]
222	4 498	13 494	1 010
30	33 333	100 000	1 256
3	333 333	1 000 000	1 301
0,003	333 333 333	1 000 000 000	1 306

Det ble imidlertid tydelig at man ved hjelp av å øke nullsystemets resistans mot jord ikke klarte å presse spenningen noe særlig over 1 300 Volt med parallellmotstanden innkoblet. Derfor ble parallellmotstanden koblet ut, og simuleringer ble kjørt til grenseverdien var funnet.

Ved 21 000 $\Omega$  per fase ble toppverdien på nullpunktspenningen 2 686 Volt, noe som tilsvarer 1 900 Volt i effektivverdi. (Vedlegg 31) Da var den totale nullsystemresistansen lik 7 000 $\Omega$ , og den konduktive avledningen var 143 $\mu\text{S}$ .

Simuleringen viste at så lenge parallellmotstanden er innkoblet, kan ikke endringer i den konduktive avledningen føre til at nullpunktspenningen blir større enn vernets grenseverdi på 15 % av fasespenningen. En minking i konduktiv avledning vil også føre til at det er mindre sannsynlig at vernet kobler linjen ut etter at det er aktivert, siden den wattmetriske nullstrømkomponenten, som er utløsekriteriet, da blir mindre. En simulering ble derfor kjørt med en konduktiv avledning på 143 $\mu\text{S}$  uten parallellmotstand for å undersøke hvor stor den wattmetriske nullstrømkomponenten i dette tilfellet ble. Denne ligger i vedlegg 32. Dette gav en wattmetrisk nullstrøm med en effektivverdi på 271mA.

Den minste wattmetriske nullstrøm som vil kunne utløse vernet er ved en resultantvektor som er 6 Ampere over- eller underkompensert. (Se figur 10) Da vil vernet løse ut ved en wattmetrisk nullstrøm på:

$$I_w = 6A \cdot \tan(5^\circ) = 525mA \quad (0.27)$$

Her ser vi at den wattmetriske nullstrømmen ved denne konduktive avledningen er alt for lav til at vernet kan løses ut. Den simulerte wattmetriske nullstrøm er også summen av nullstrømmene for alle fire avgangene. Følgelig vil den wattmetriske nullstrømmen som måles på hver avgang, hvor vernene sitter, være enda mindre.

### 4.3.3 Økt kapasitiv usymmetri

For å undersøke hvor stor endring i kapasitiv usymmetri som skal til for å aktivere vernet ble en kondensator koblet til en av fasene før en simulering ble kjørt. Denne simuleringen ble kjørt med parallellmotstanden innkoblet, og 3 Ampere underkompensert nett. Den konduktive avledningen ble som tidligere satt lik det som ble observert den 14. mars, 8,7 Ampere. Kondensatoren ble lagt til ved samleskinnen. I tabellen under er nullpunktspenningen for ulike verdier av tilleggskapasitans vist, mens de plottede kurvene ligger i vedlegg 33 til 36.

Tabell 14 Nullpunktspenning ved ulike kapasitive avledninger

Kondensatorkapasitans [ $\mu\text{F}$ ]	Nullpunktspenning [V] (rms)
0	1 010
0,1	1 395
0,229	1 909
0,5	2 944
1	4 624

Her ser vi at en tilleggskapasitans på  $0,229\mu\text{F}$  vil øke nullpunktspenningen tilstrekkelig til at varsel om jordfeil oppstår. For å sammenligne dette med nettets kapasitive usymmetri er denne funnet ved hjelp av formel 6.  $R_j$  er her satt til  $13\,494\Omega$ . Dette kommer fra tabell 4.

$$\Delta C_{j,nett} = \frac{3 \cdot U_{0,max}}{U_f \cdot j\omega \cdot R_j} = \frac{3 \cdot 1057V}{12702V \cdot 314 \cdot 13494\Omega} = 58,9nF = 0,0589\mu F \quad (0.28)$$

Her ser vi at økningen i kapasitiv usymmetri som skal til for å nå  $U_0$ -settingen er formidabel. Det virker ikke sannsynlig at den kapasitive usymmetrien endrer seg noe særlig som følge av atmosfæriske forhold. (Kapittel 3.5) Derfor er det vanskelig å tenke seg at endringer i kapasitiv usymmetri skulle kunne føre til at nullpunktspenningen blir så høy at vernet aktiveres, såfremt omkoblinger i nettet ikke forekommer.

#### 4.4 Oppsummering og diskusjon av simuleringresultater

Simuleringene som ble gjennomførte i ATP gav ikke nøyaktig samsvar med resultater funnet i NetBas og gjennom målinger i nettet. Resonanspunktets plassering både på x- og y-aksen stemte ikke med det man kunne forvente. Bakgrunnen for dette er vanskelig å sette fingeren på. Da nettets totale kortslutningsbidrag ble simulert ble ikke denne strømmen like stor som i NetBas og i målingene. Kortslutningsbidragene som ble funnet i NetBas og i målingen av resonanskurven som ble gjennomført den 14. mars stemte heller ikke overens. I tabellen under er de tre plasseringene av resonanspunktet på x-aksen vist:

Tabell 15 Jordslutningsbidrag fra nettet

ATP	NetBas	Målt i nettet
84,9 A	115,4 A	104,5 A

Vi ser her at ATP-simuleringen ligger betydelig under de andre målingene. Oppbygningen av nettet i ATP ble gjort på bakgrunn av linje- og kabellengder funnet i TrønderEnergis NetBas-modell av nettet på Hitra og Frøya, og disse skulle følgelig stemme ganske godt over ens. Kabellengdene skal være nøyaktig like for de to simuleringene, mens linjelengden i ATP-simuleringen er anslått ut fra kartmodulen i NetBas. Her vil det følgelig være ulikheter, men simuleringen med 50 % lengre linjer viste at det ikke kan spille en så stor rolle. Dette stemmer med antagelsen om at kabelnettet er dominant over linjenettet når det gjelder jordfeilstrømbidraget.

Et annet poeng er at en øking av andelen luftnett førte til en større kapasitiv usymmetri, og følgelig en større nullpunktspenning. Denne var allerede 2-3 ganger høyere i simuleringen enn det som ble målt i nettet. Her var simuleringresultatet 1 057 Volt, mens nullpunktspenningen i perioden før den 12. februar gjennomsnittlig lå på 415 Volt. Derfor vil ikke en økning av luftnettets lengde i simuleringen løse problemet.

Formel 6 viser at maksimalspenningen bare er gitt av fasespenningen, den kapasitive usymmetrien og den resistive koblingen til jord. Dette betyr at minst en av disse tre må være ulike fra virkeligheten i simuleringen. Den konduktive avledningen i simuleringen er basert på den som ble målt den 14. mars. Denne størrelsen er en man kan forvente visse endringer i som følge av værforholdene. (Se kapittel 3.5) Simuleringene viste imidlertid at så lenge parallellmotstanden er innkoblet, kan nullpunktspenningen ikke overstige 15 % som følge av minket konduktiv avledning. Dette er gitt at den konduktive avledningen er symmetrisk. Hvis dette ikke er tilfellet vil nullpunktspenningen kunne stige, idet dette blir ekvivalent med en høyohmig jordfeil. (Se kapittel 3.5) Siden nedbøren medførte lavere nullpunktspenning ser det ikke ut til at dette er tilfellet.

Den kapasitive usymmetrien ble i kapittel 4.3.3 funnet til å være 58,9nF i simuleringene i ATP. Denne kan kanskje være litt annerledes i det virkelige nettet, med tanke på at lengdene på linjene er grovt anslått. Faseavstanden kan også muligens skape ulikheter mellom simuleringen og målingene. Her er det brukt 1,2 meter i modellen, mens denne kanskje kan være forskjellig i virkeligheten, for eksempel 1,5 meter. Man kan også tenke seg at linjenettet på Hitra kanskje kan ha noen nettdeler med isolert BLX-linje, noe som formodentlig ville endre kapasitansene. I følge Lars Hofstad er det ikke noen av radialene i nettet som har gjennomgående jording.

Da nettet ble simulert i en driftssituasjon med 3 Ampere underkompensering, som var den samme kompensasjonsgraden som målingene ble gjort under, viste det seg at nullstrømmene var ekstremt mye større i ATP-simuleringen. Her er det sannsynlig at en feil er blitt gjort i forbindelse med målingene. Trolig er omsetningsforholdet i strømtrafoene blitt glemt da oppsettet for dataloggeren ble gjort, noe som har ført til at målingene blir 50 ganger for små. Etter at dette er tatt hensyn til er fremdeles simuleringresultatene høyere enn de målte verdiene, men forskjellen her ligner mer på den forskjellen vi har mellom den målte og simulerte nullpunktspenningen. I tillegg sannsynliggjøres dette videre av impedansbetraktningene i formel 17 og 25.

Simuleringen viste at fasespenningene på samleskinnen var svært skjeve, selv uten last. Dette er veldig merkelig og tyder kanskje på at linjene i simuleringen har en ganske stor usymmetri. Hvis en antar at den konduktive avledningen i simuleringen er korrekt sammenlignet med forholdene i det fysiske nettet, får man i følge formel 1.6 over dobbelt så stor kapasitiv usymmetri i det simulerte nettet:

$$\Delta C_{j,nett} = \frac{3 \cdot U_{0,max}}{U_f \cdot j\omega \cdot R_j} = \frac{3 \cdot 432V}{12702V \cdot 314 \cdot 13494\Omega} = 24,1nF \quad (0.29)$$

Her er den målte resonanstoppen fra den 14. mars benyttet som  $U_0$ . (Se figur 32)

Usymmetrikapasitansen ble for simuleringen funnet til å være 56,3nF. Hva denne ekstra usymmetriske kapasitansen kommer av er usikkert. Hvis andelen usymmetri per kilometer luftlinje hadde vært lik ville en halvering av luftlinjelengdene kanskje føre til at nullpunktspenningen kom ned mot samme nivå som det ble målt i nettet. Dette ville imidlertid ført til at resonanspunktet ville komme enda lenger ned på x-aksen, og slik lengre fra resonanspunktet i det virkelige nettet.

Målingene av de ulike værparametrenes innvirkning på spolespenningen tyder på at de metrologiske forhold først og fremst påvirker den konduktive avledningen. Siden nedbørens innvirkning kan forklares ut fra den konduktive avledningen, og ingen av de andre meteorologiske parameterne hadde noen nevneverdig innvirkning på spolespenningen, kan man si at den kapasitive usymmetrien ikke påvirkes av noen av de undersøkte meteorologiske parameterne. Siden det i kapittel 4.3.3 ble vist at en massiv økning i den usymmetriske kapasitive avledningen måtte til for å aktivere jordfeilvernet, kan endringer i den kapasitive usymmetrien som følge av værforhold mest sannsynlig avskrives som årsak til unødvendige utkoblinger av feilfrie nett.

Kapittel 4.3.2 viste at en lavere konduktiv avledning kan forhøye spolespenningen tilstrekkelig til at vernet aktiveres. For at dette skal være mulig må begge parallellmotstandene være frakoblet. Den wattmetriske nullstrømmen er imidlertid ikke stor nok til at vernet kobler ut noen av linjene. Denne vil bli enda mindre for en videre økt resistans mellom nullsystemet og jord, og følgelig vil ikke dette kunne føre til noen utkoblinger av linjer. Likevel har dette skjedd tidligere. Her kan man kanskje tenke seg at avledning eller en eller annen form for høyohmig jordfeil kan skape store nok nullpunktspenninger og wattmetriske nullstrømmer til at jordfeilvernet utløses.

## 5 Konklusjon

Grunnet en feil i regulatorkretsen for spolen ble målingene av nullpunktspenning og nullstrømmer svært ulike før og etter at feilen oppsto. I perioden etter at feilen oppsto var målingene relativt konstante med små variasjoner. Dette skyldes at spolen da hadde stilt seg i en posisjon langt fra resonans, hvor nullsystemets strømmer og spenninger i mindre grad var påvirket av meteorologiske forhold. Variasjonene i måleverdiene i denne perioden synes å være gitt av lastvariasjonene.

I perioden før feilen oppsto ser det ut til at nullpunktspenningen er påvirket av nedbøren. Regn fører til en lavere nullpunktspenning, sannsynligvis på grunn av økt konduktiv avledning. Det ble ikke funnet noen sammenheng mellom snødekke og spolespenning, men dette kan skyldes usikre meteorologiske målinger og et tynt målegrunnlag hva spolespenning angår. Dette på grunn av den korte måleperioden før feilen oppsto. Også i denne perioden kunne påvirkningen av lastvariasjonene sees på nullpunktspenningen.

Temperatur, lufttrykk og luftfuktighet påvirket ikke nullpunktspenningen i nevneverdig grad. På grunn av den korte perioden hvor målinger ble gjennomført før feilen inntraff kan det ikke sies noe om innvirkningen av tåke.

Simuleringen i ATP av Fillan-nettet gav ikke det samme resonanspunktet som det som ble funnet i målingene. Jordfeilstrømbidraget fra nettet som ble funnet i simuleringene var betydelig mindre enn det som ble målt. Samtidig var spenningen i nullpunktet for et nett i resonans 2-3 ganger for høy i forhold til de målte resultatene. Det ble ikke funnet noen god forklaring på dette. Nullstrømmene i simuleringen lå også sannsynligvis 2-3 Ampere over de målte. Her må det imidlertid taes visse forbehold på grunn av usikkerhet om hvordan dataloggeren ble satt opp.

Det ble i måleperioden ikke observert nullpunktspenninger store nok til å aktivere vernet. Simuleringen viste at en voldsom økning av den kapasitive usymmetrien måtte til for å oppnå dette. Det ble ikke observert noen endringer i kapasitiv usymmetri som følge av værforhold, så dette kan sannsynligvis avskrives som grunn til for høy nullpunktspenning. Den konduktive avledningen kan i følge simuleringene bli så lav at vernet aktiveres, men den wattmetriske nullstrømmen vil i dette tilfellet ikke være stor nok til å løse ut jordfeilvernet på noen av avgangene. Her bør simuleringsresultatene verifiseres av nye simuleringer hvor det er oppnådd samsvar mellom de simulerte og målte parametere i nettet.

Simuleringen viste at kravet om deteksjon av jordfeil ved  $3000\Omega$  ikke var dekt for Fausland-avgangen. Dette bør undersøkes nærmere ved hjelp av jordfeilprøver med en overgangsmotstand mot jord på  $3000\Omega$ .

For videre arbeid kunne det være aktuelt å logge nullpunktspenningen i en ny periode for å få et bredere målegrunnlag uten feil på spoleregulatoren. Her kunne det vært interessant å se på en periode på høsten hvor trærne mister løvet og man kanskje kan få noen dager med snødekke på bakken. Da ville man kanskje også kunne avdekke perioder med ekstremt høy nullpunktspenning som vil kunne aktivere vernene.





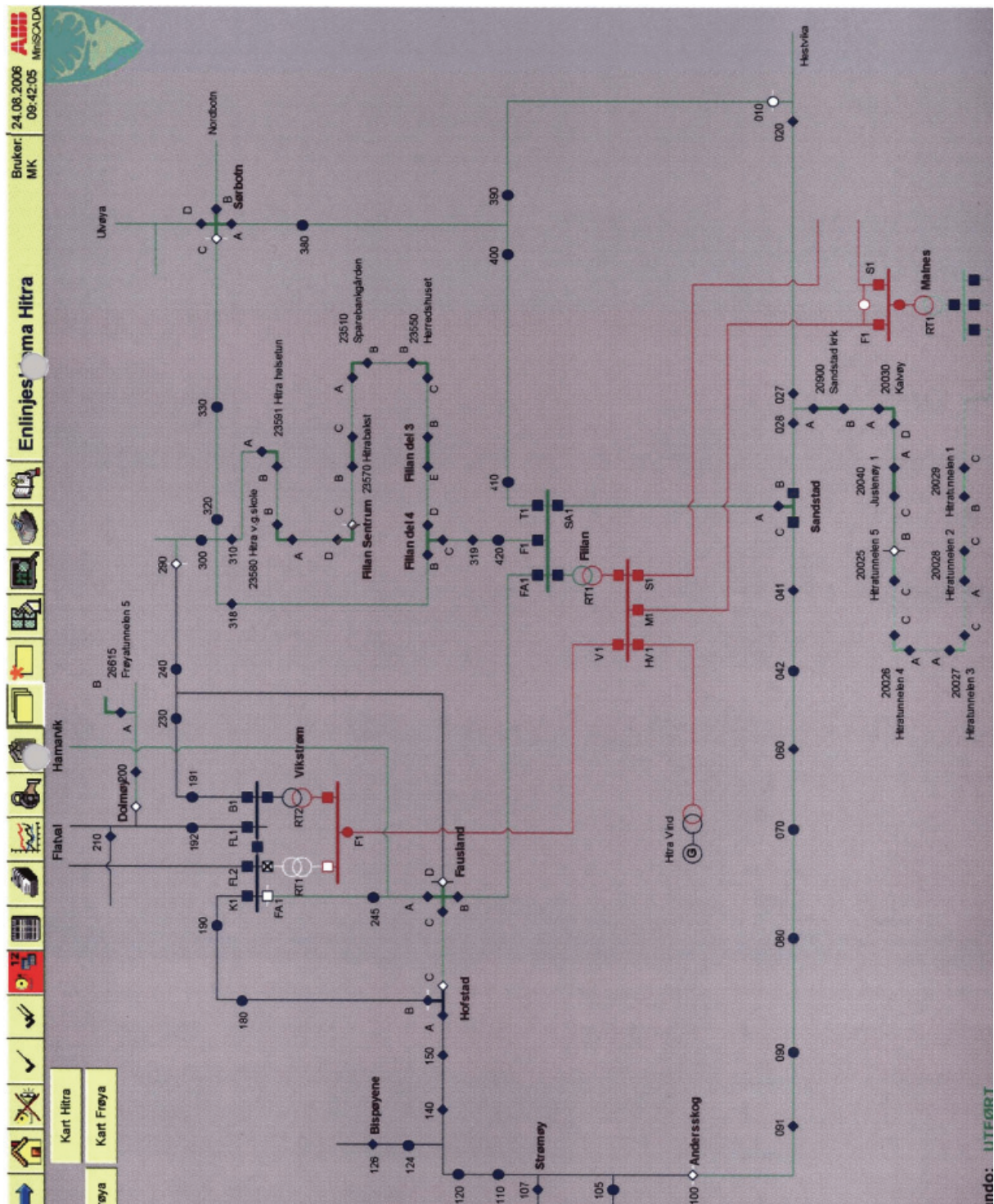
## 6 Referanseliste

- Alcatel *Kabelboka* Alcatel kabel Norge AS, Årstall ikke oppgitt
- Faanes, H., Olsen, K.J. *TET4115 Elektriske kraftsystemer*, NTNU Institutt for elkraftteknikk 2005
- Guldal, M. *Jordfeilvern i spolejorda distribusjonsnett*, NTNU Institutt for elkraftteknikk 2006
- Gustavsen, B. *Nullpunktsspenning i 132 kV Støen-nettet, prosjektnr 12X001.60*, Sintef energiforskning, 1998
- Holen, A. T. *TET 4115 Power system analysis TET 5100 Power engineering updates*, NTNU Institutt for elkraftteknikk 2006
- Ingebrigtsen S., Hofsmoen W.F. *Jordlutning i mellomspenningsnett 11/22 kV, Grunnlag for jordfeilretningsreleer*, Siemens AS, 2005
- Ingebrigtsen, S. *Gjeninnfør jordlutningsspolen i høyspenningsfordelingsnettet*, Siemens AS, konferansen Vern'98, Gardermoen, 11-12 november 1998
- Nordskag, E., Waage, R. *Jordlutningsbehandling i det høgsente fordelingsnettet, Spolejordet nett og relevern: en driftsmessig utfordring*, Jacobsen Elektro AS, 2001
- Torbergesen, G. *Jordlutningsspoler; kompensering og regulering ved jordfeil*, ABB AS Divisjon Energi, Årstall ikke oppgitt
- Øksnes, T. *Spolejording av 22 kV-nett hos NTE*, notat fra foredrag for SEFAS, 2. august 2005



## **Vedlegg**

Vedlegg 1: Enlinjeskjema for Hitra: (Fillan-nettet i grønt)







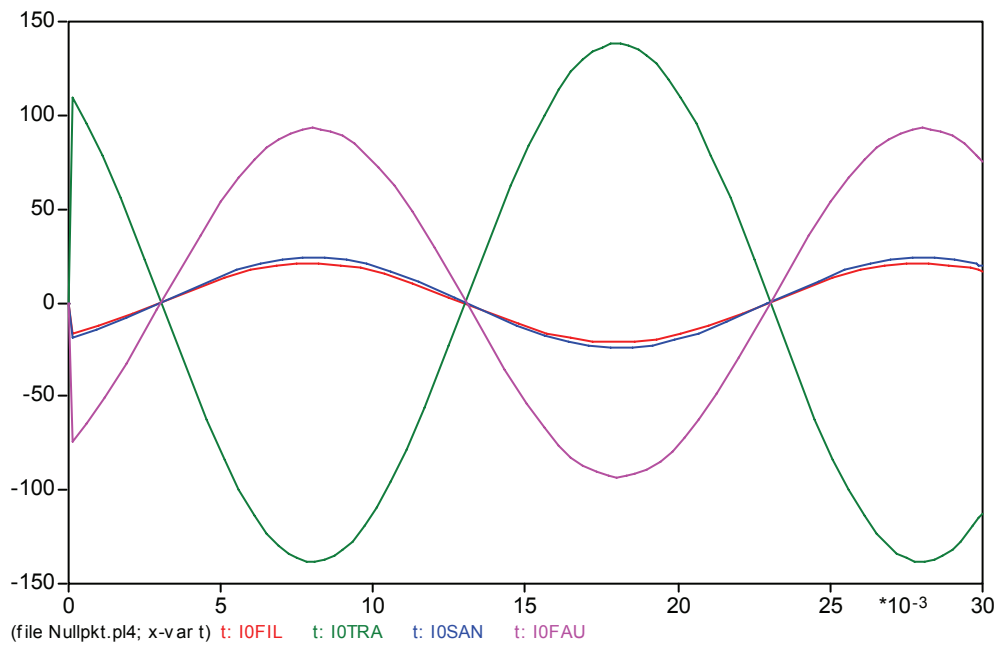
### Vedlegg 3: MODELS-script i ATP

```
MODEL WRITESS
INPUT U,I
DATA Freq
VAR flag
INIT
flag:=0
ENDINIT
EXEC
  if (T>1/Freq) and (flag=0)
  then
    write1(U,U/I)
    flag:=1
  endif
ENDEXEC
ENDMODEL
```

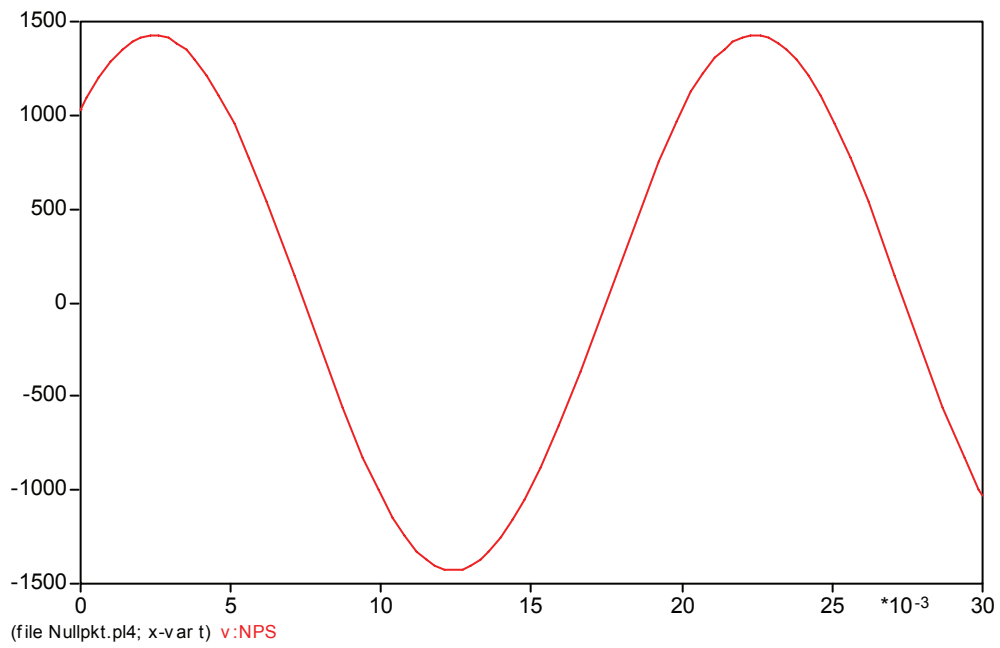
### Vedlegg 4: Matlab-script

```
clear;
A=load('MODELS.1');
s = size(A);
for i = 1:s(1)
    U(i) = A(i,1)/(127.02);
    X(i) = A(i,2);
    C(i) = (12702/(X(i)));
end
plot(C,U)
```

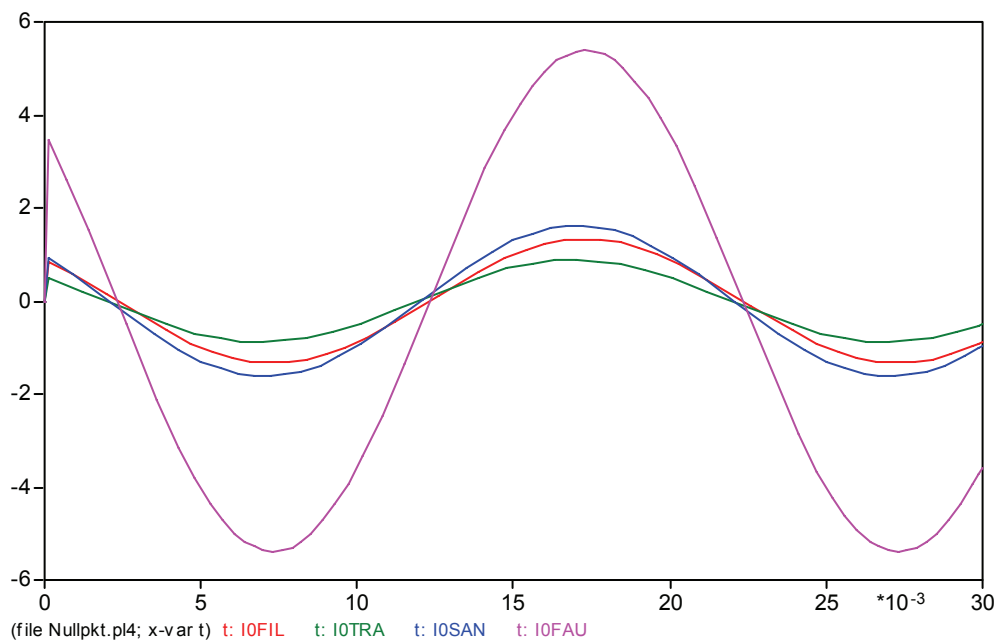
### Vedlegg 5: Simulering metallisk jordfeil på avgang mot tranvikan; isolert nett



**Vedlegg 6:** Nullpunktsspenning ved 3 Ampere underkompensert nett:

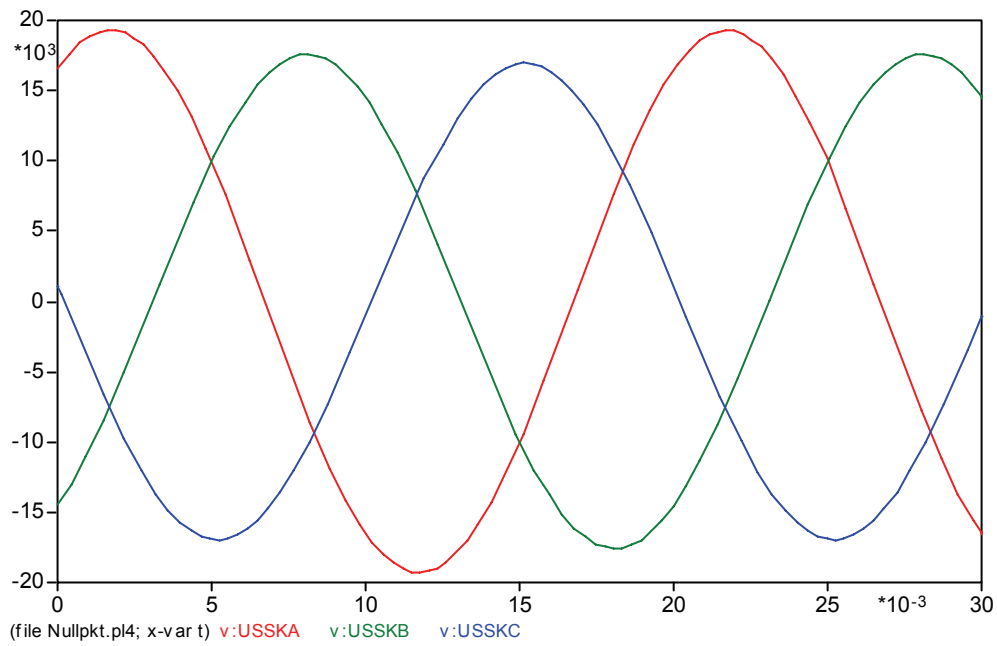


**Vedlegg 7:** Nullstrømmer ved 3 Ampere underkompensert nett:

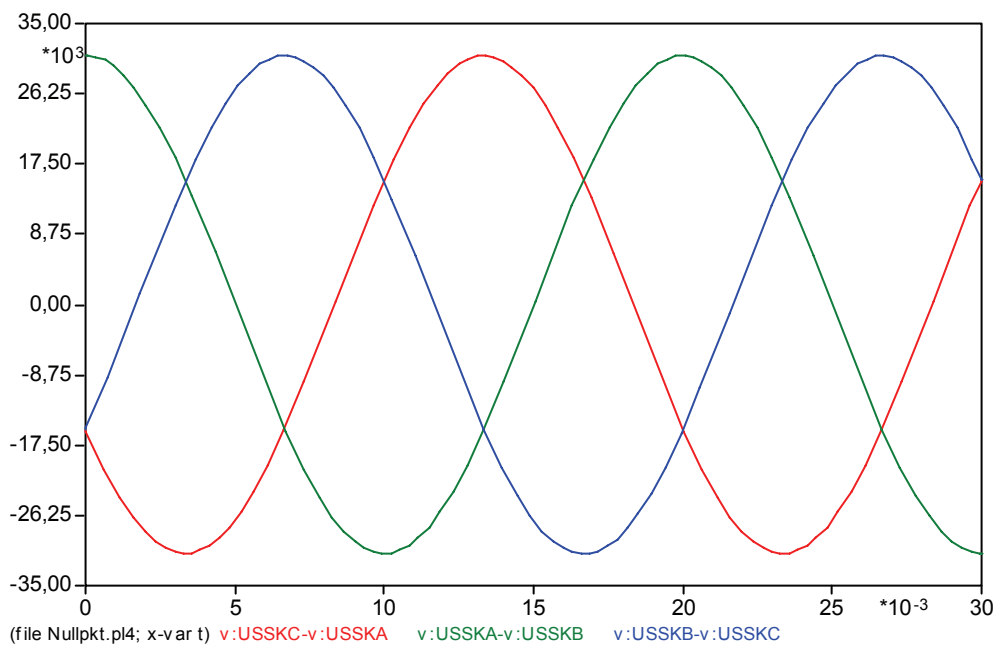




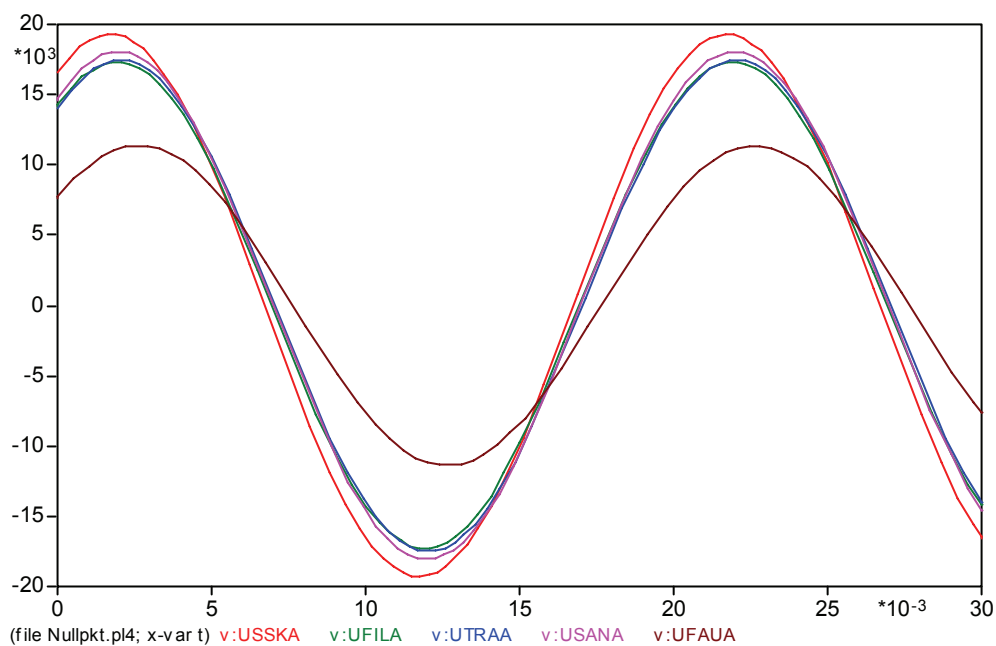
### Vedlegg 8: Fasespenninger på samleskinnen, 3 Ampere underkompensert



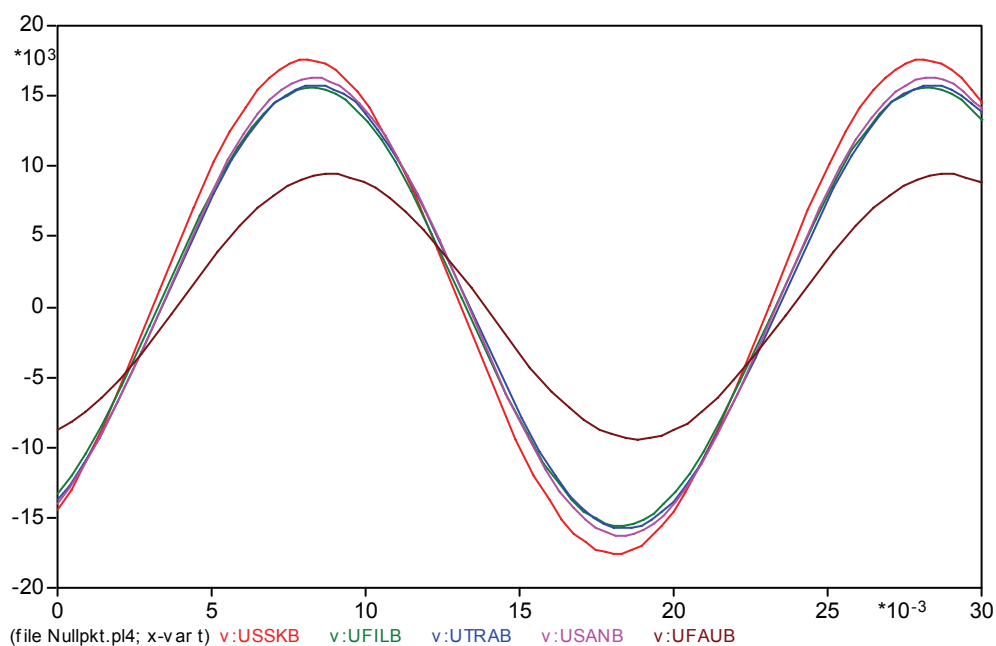
### Vedlegg 9: Linjespenninger på samleskinnen, 3 Ampere underkompensert



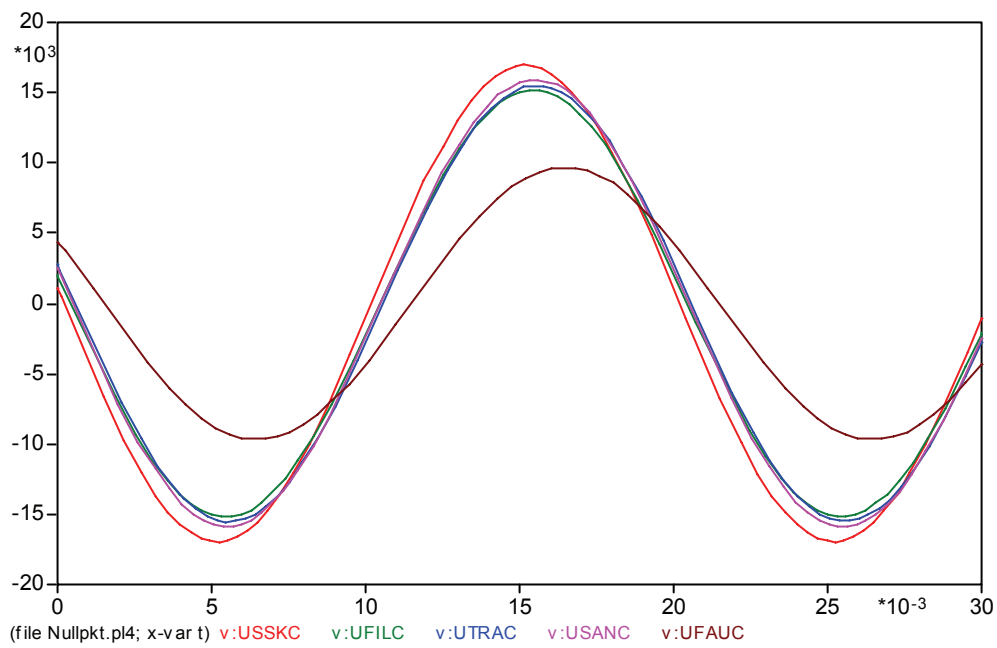
**Vedlegg 10:** Fasespenninger på samleskinnen og i enden av avgangene, fase A:



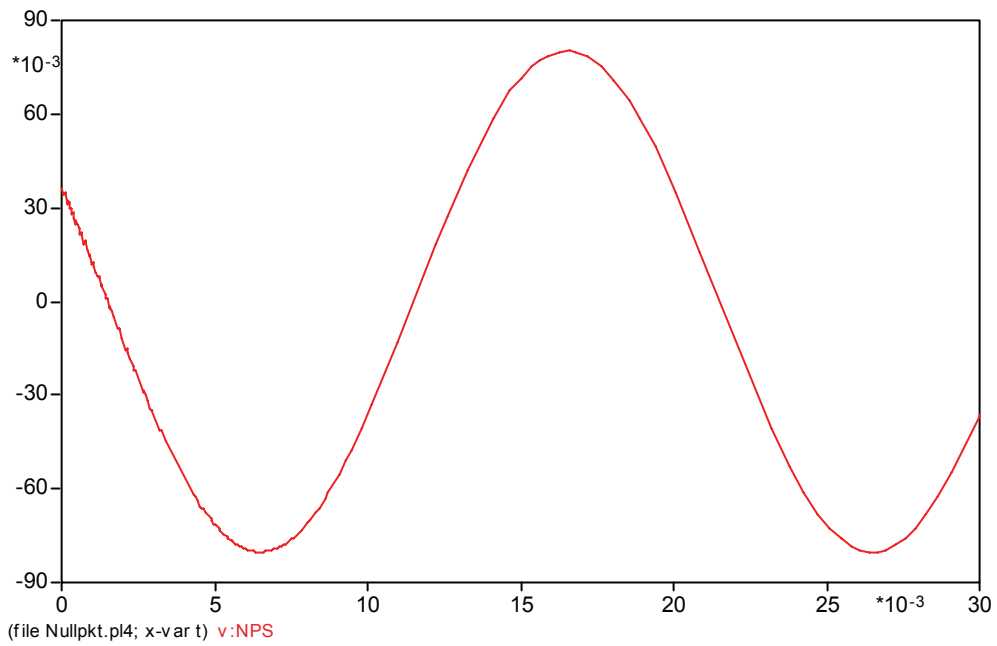
**Vedlegg 11:** Fasespenninger på samleskinnen og i enden av avgangene, fase B:



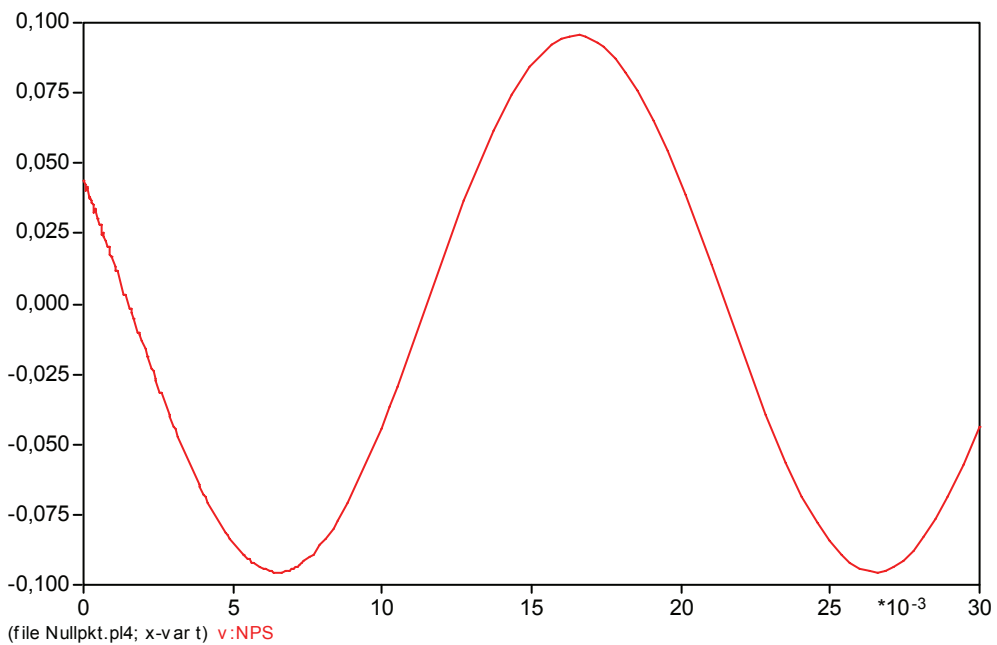
**Vedlegg 12:** Fasespenninger på samleskinnen og i enden av avgangene, fase C:



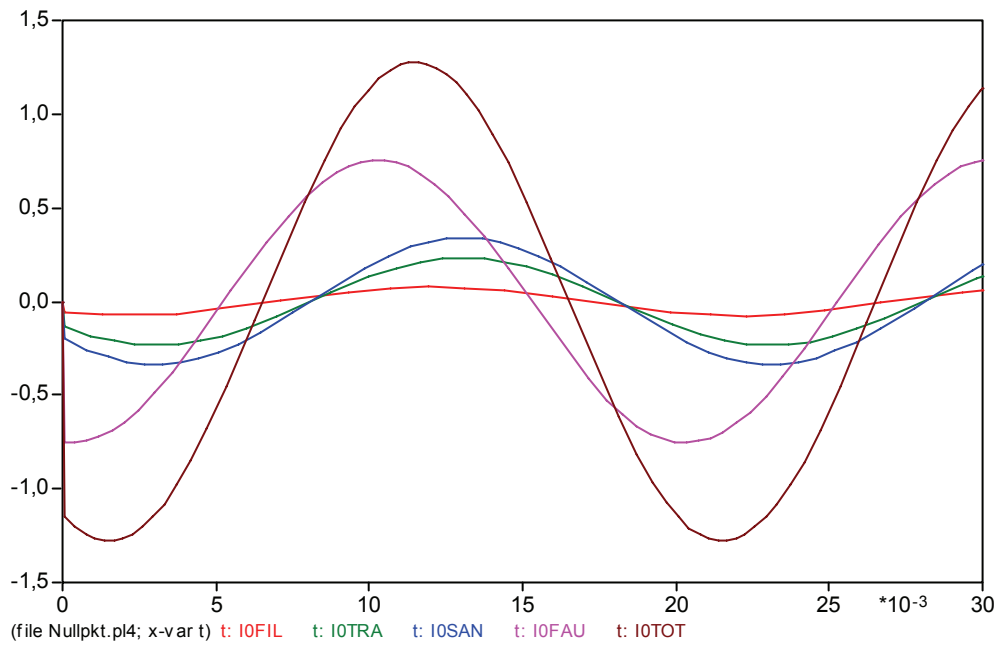
**Vedlegg 13:** Nullpunktspenning, spolestilling 200 Ampere:



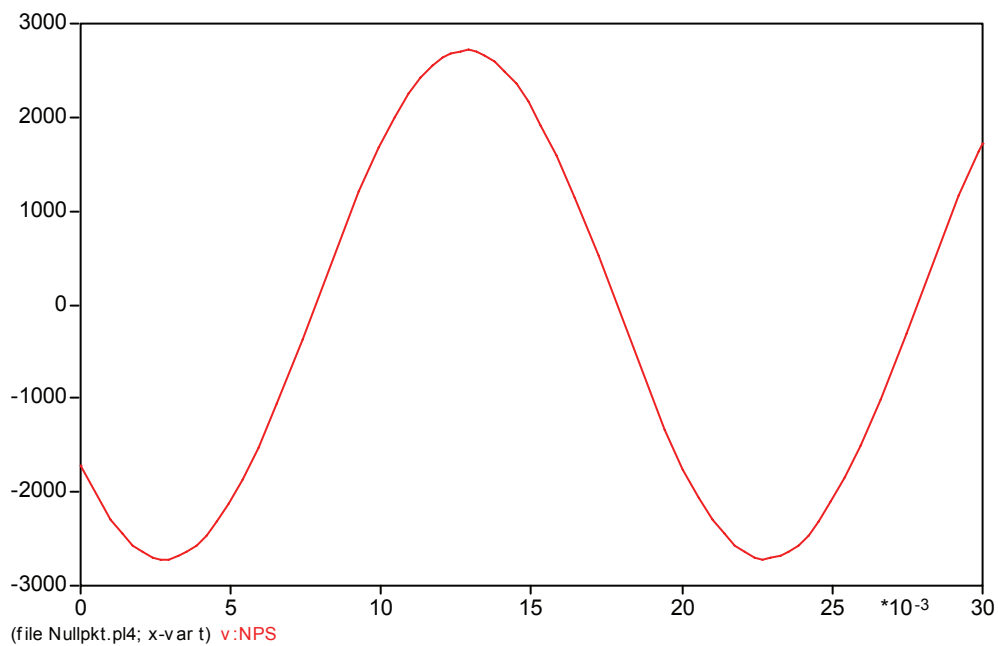
**Vedlegg 14:** Nullpunktspenning, spolestilling 180 Ampere:



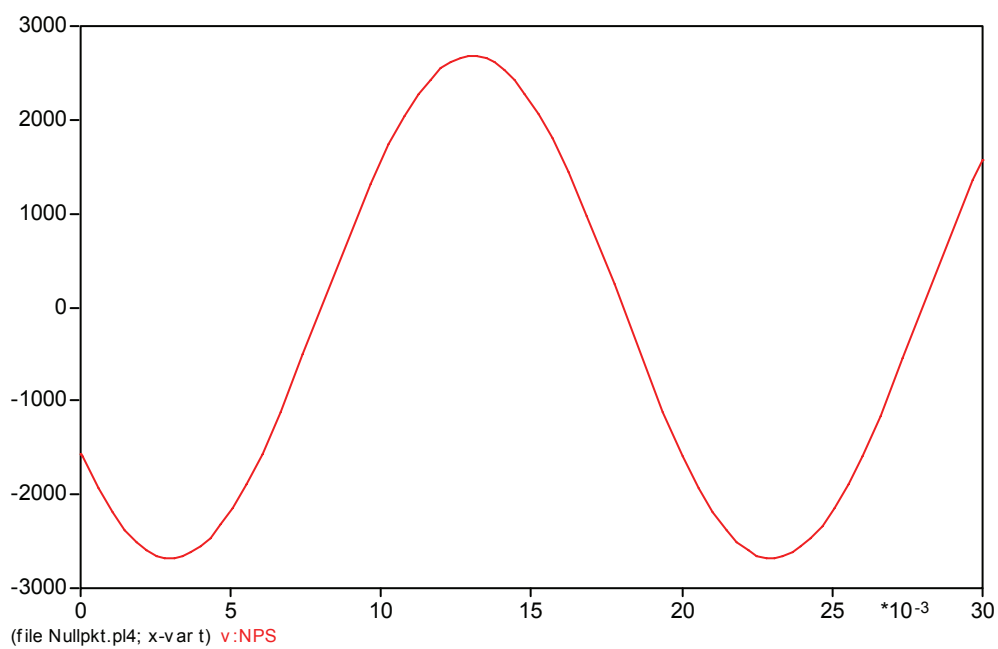
**Vedlegg 15:** Nullstrømmer, spolestilling 180 Ampere:



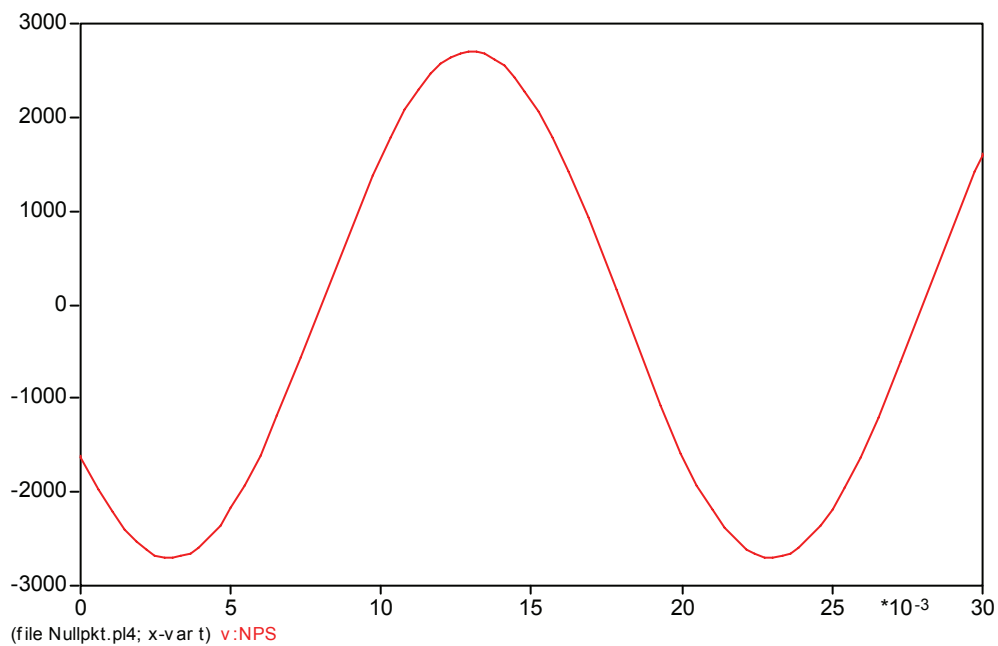
**Vedlegg 16:** Overgangsmotstand:  $3600\Omega$ , avgang 1, 3 Ampere underkompensert:



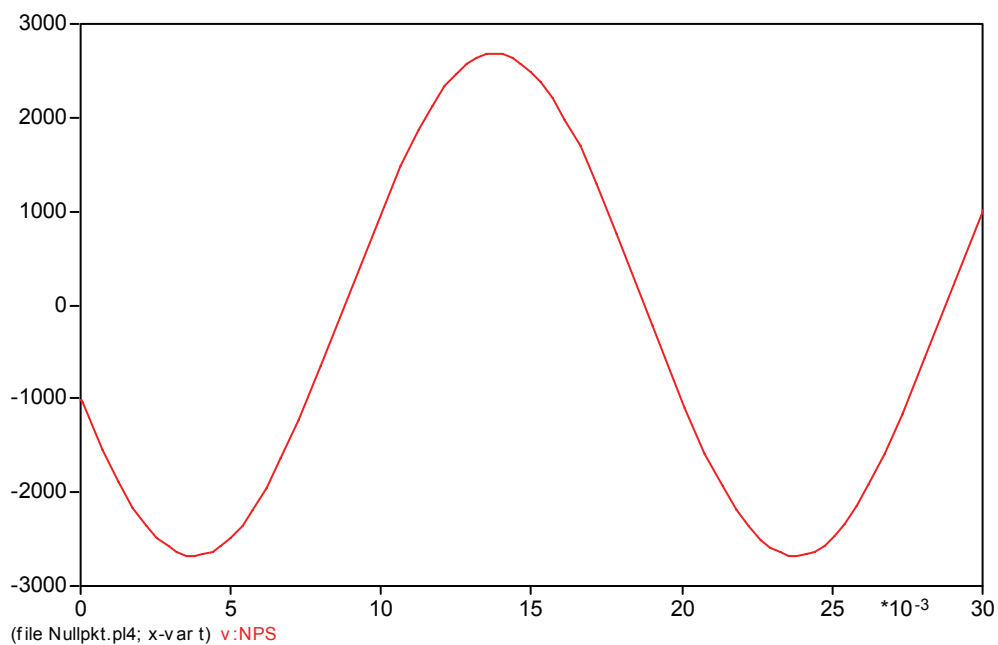
**Vedlegg 17:** Overgangsmotstand:  $3700\Omega$ , avgang 2, 3 Ampere underkompensert:



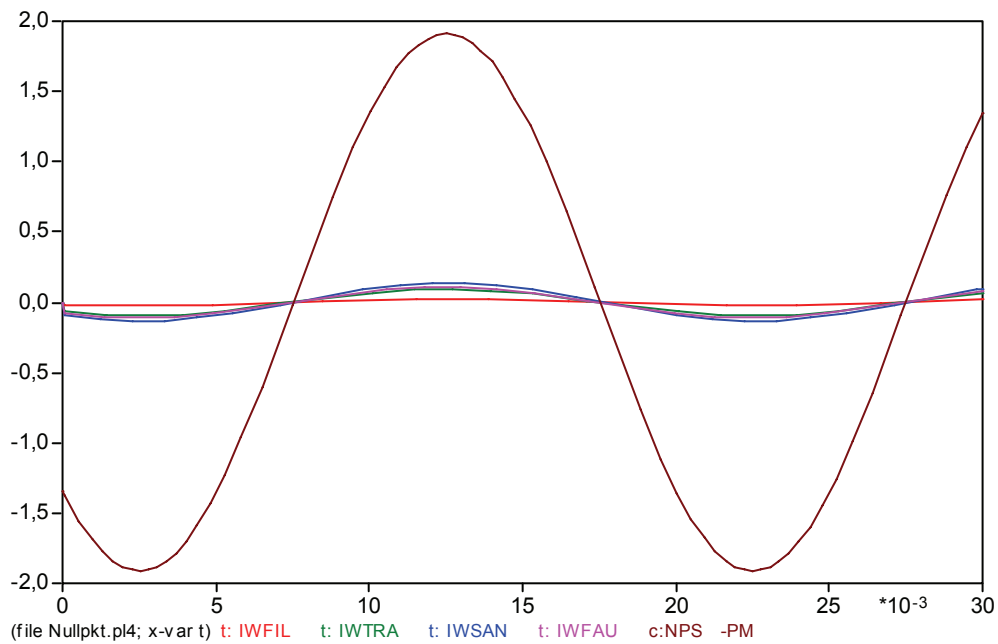
**Vedlegg 18:** Overgangsmotstand:  $3900\Omega$ , avgang 3, 3 Ampere underkompensert:



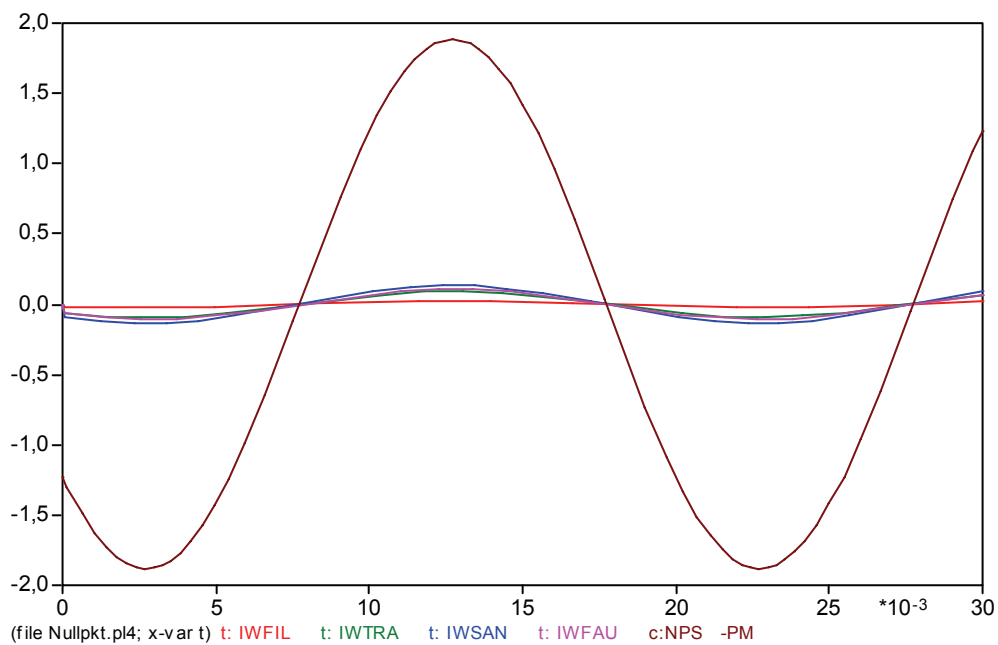
**Vedlegg 19:** Overgangsmotstand:  $2200\Omega$ , avgang 4, 3 Ampere underkompensert:



**Vedlegg 20:** Wattmetriske nullstrømmer, overgangsmotstand:  $3600\Omega$ , avgang 1, 3 Ampere underkompensert:

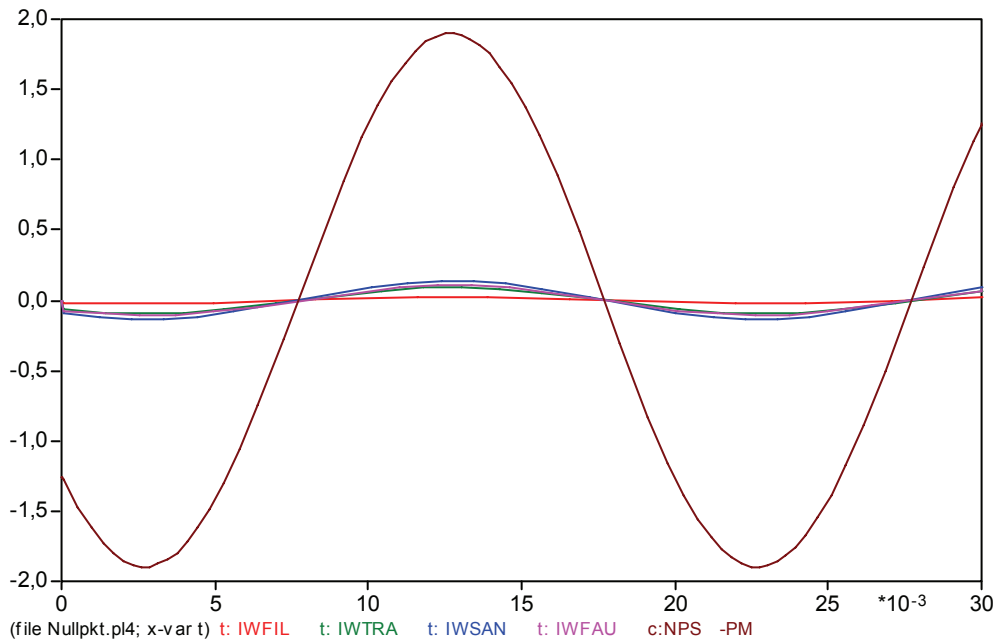


**Vedlegg 21:** Wattmetriske nullstrømmer, overgangsmotstand:  $3700\Omega$ , avgang 2, 3 Ampere underkompensert:

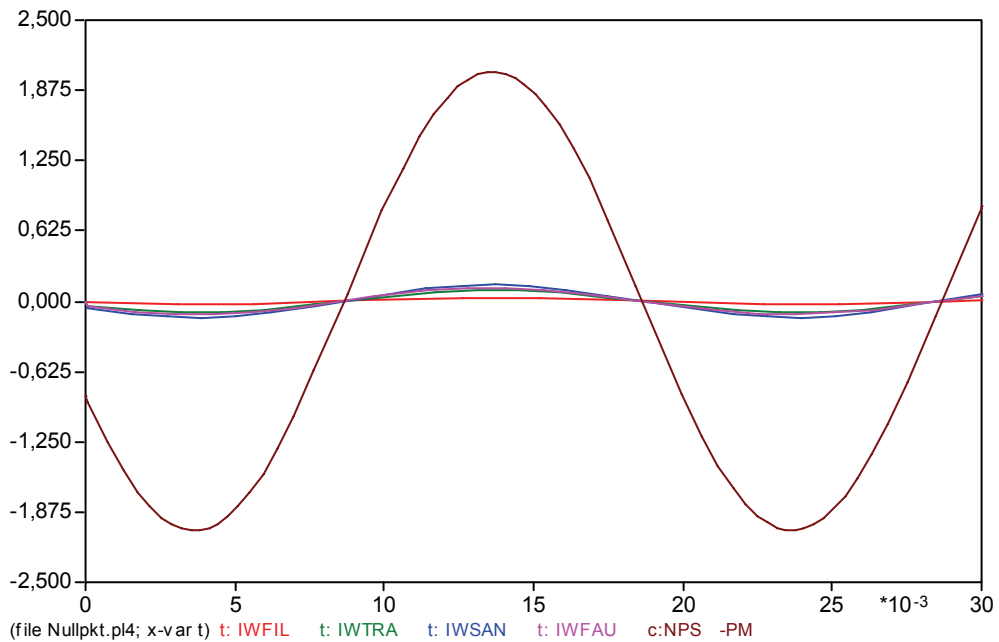




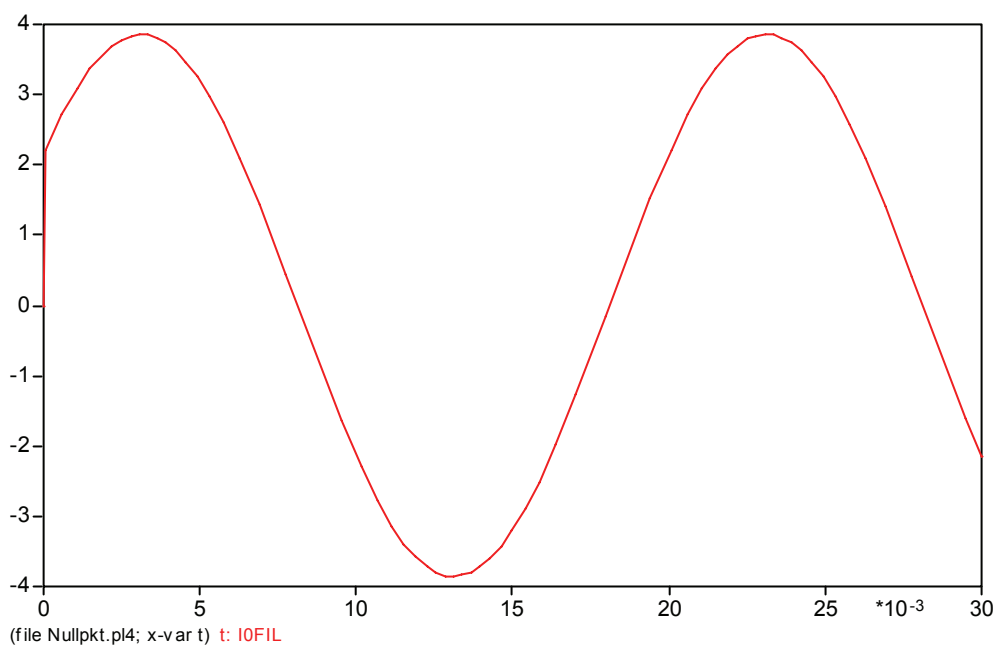
**Vedlegg 22:** Wattmetriske nullstrømmer, overgangsmotstand:  $3900\Omega$ , avgang 3, 3 Ampere underkompensert:



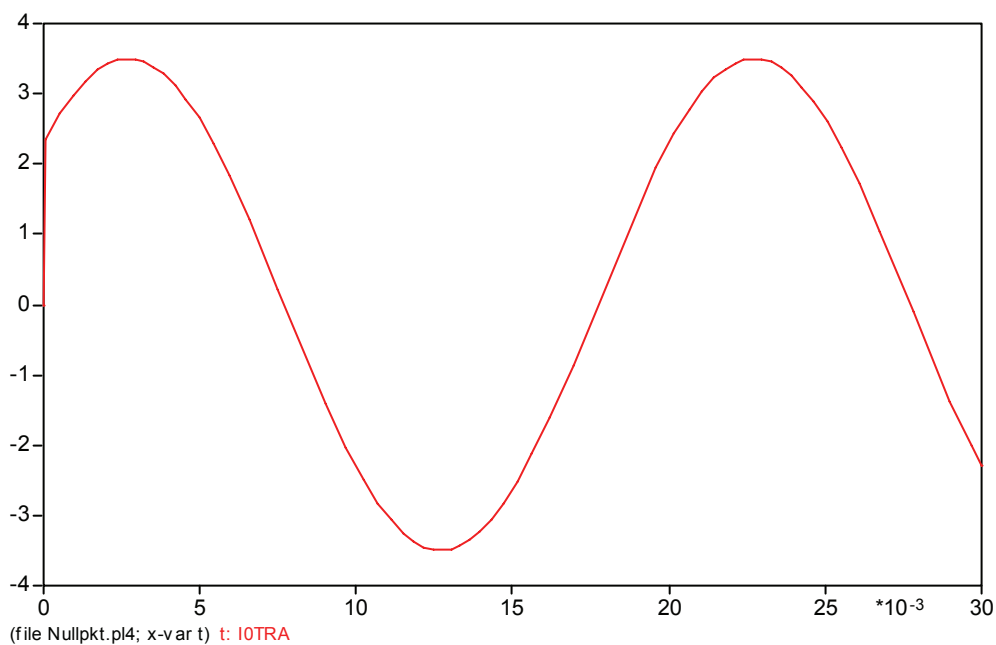
**Vedlegg 23:** Wattmetriske nullstrømmer, overgangsmotstand:  $2200\Omega$ , avgang 4, 3 Ampere underkompensert:



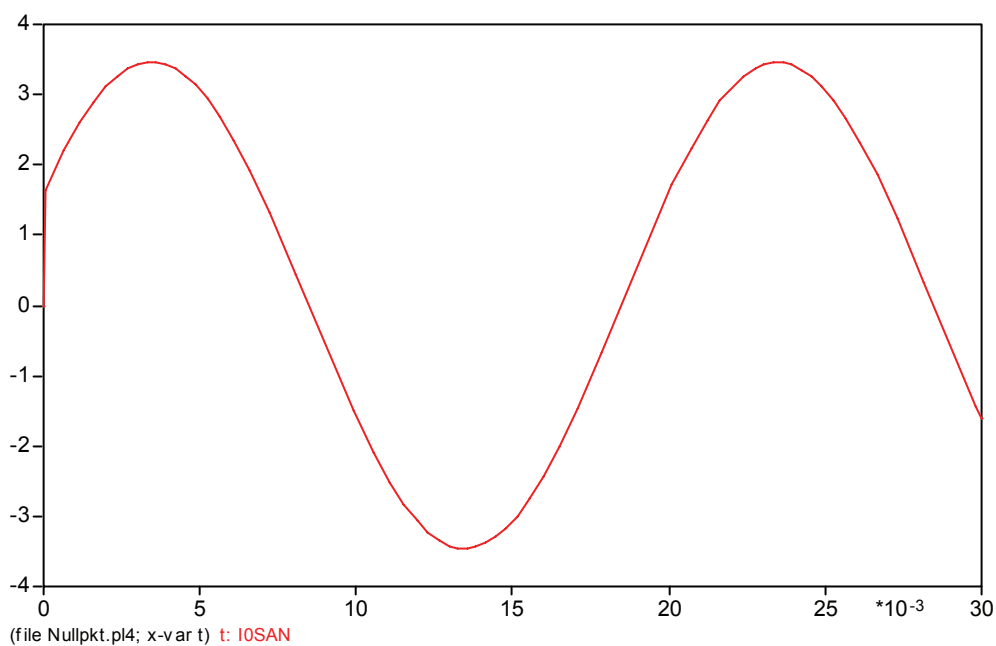
**Vedlegg 24:** Egetbidrag, feil på avgang 1,  $3600\Omega$ , 3 Ampere underkompensert nett:



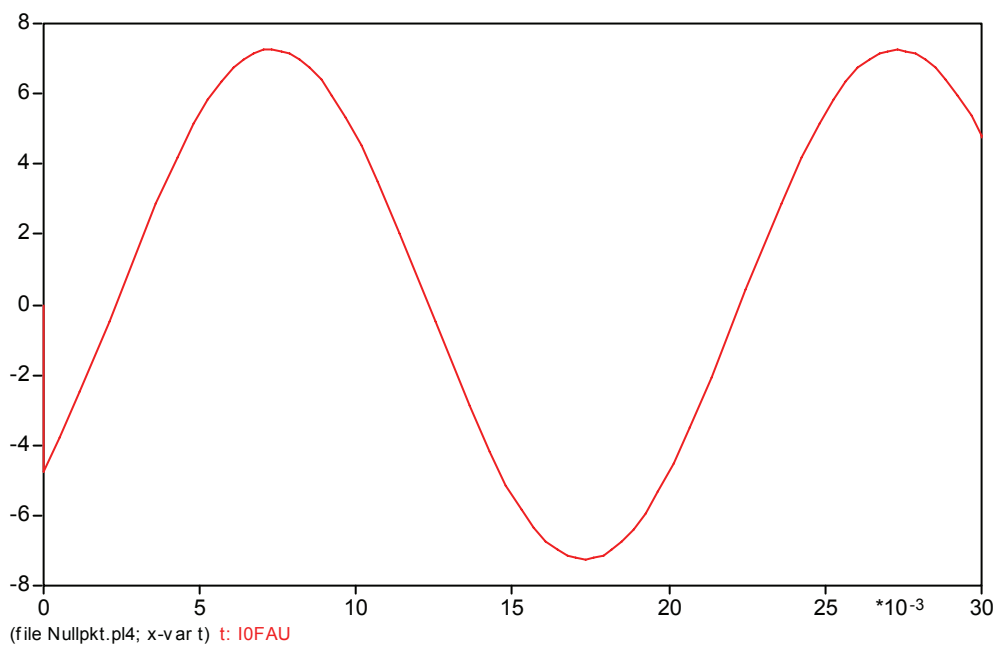
**Vedlegg 25:** Egetbidrag, feil på avgang 2,  $3700\Omega$ , 3 Ampere underkompensert nett:



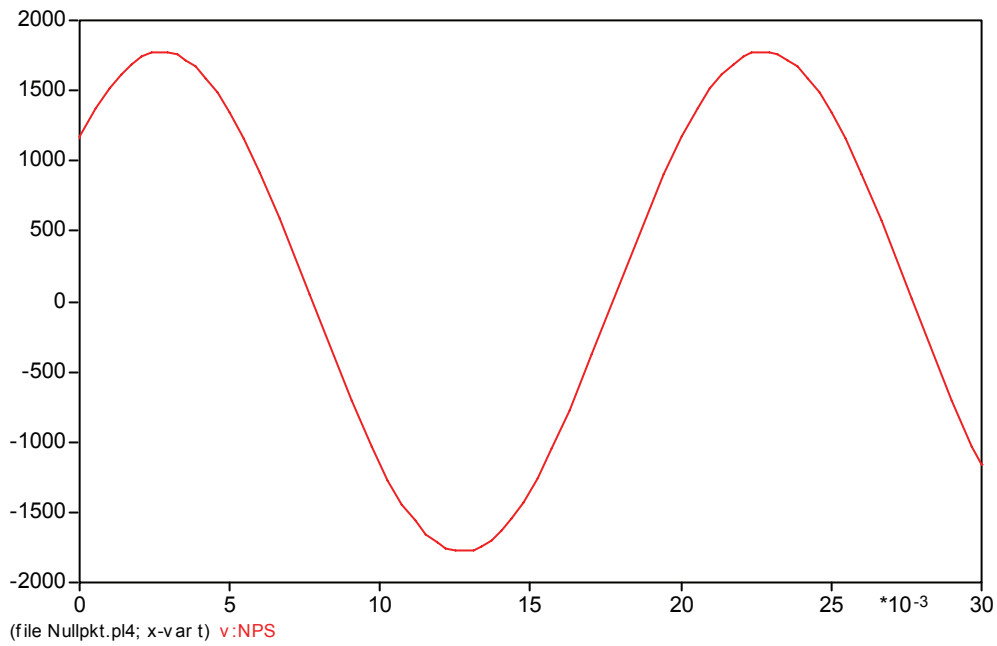
**Vedlegg 26:** Egetbidrag, feil på avgang 3,  $3900\Omega$ , 3 Ampere underkompensert nett:



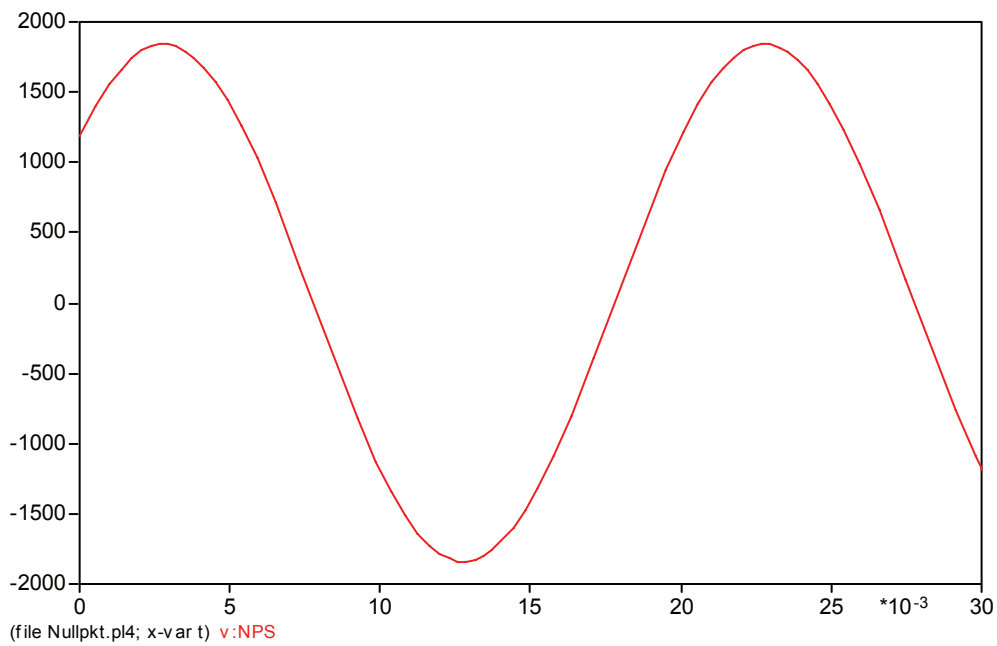
**Vedlegg 27:** Egetbidrag, feil på avgang 4,  $2200\Omega$ , 3 Ampere underkompensert nett:



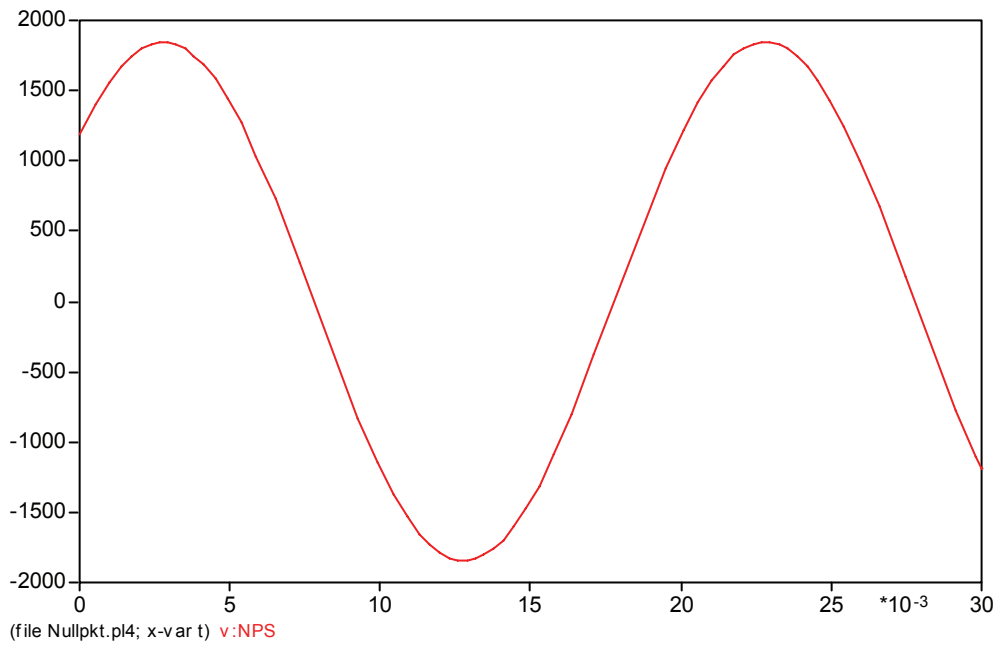
**Vedlegg 28:** Minket kond. Avl., 30 $\mu$ S:



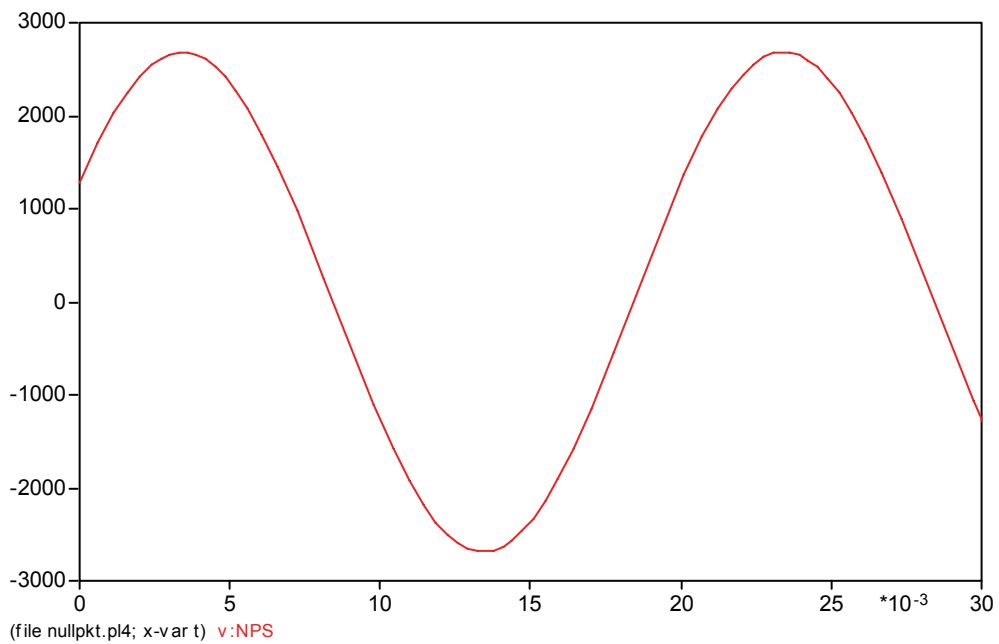
**Vedlegg 29:** Minket kond. Avl., 3 $\mu$ S:



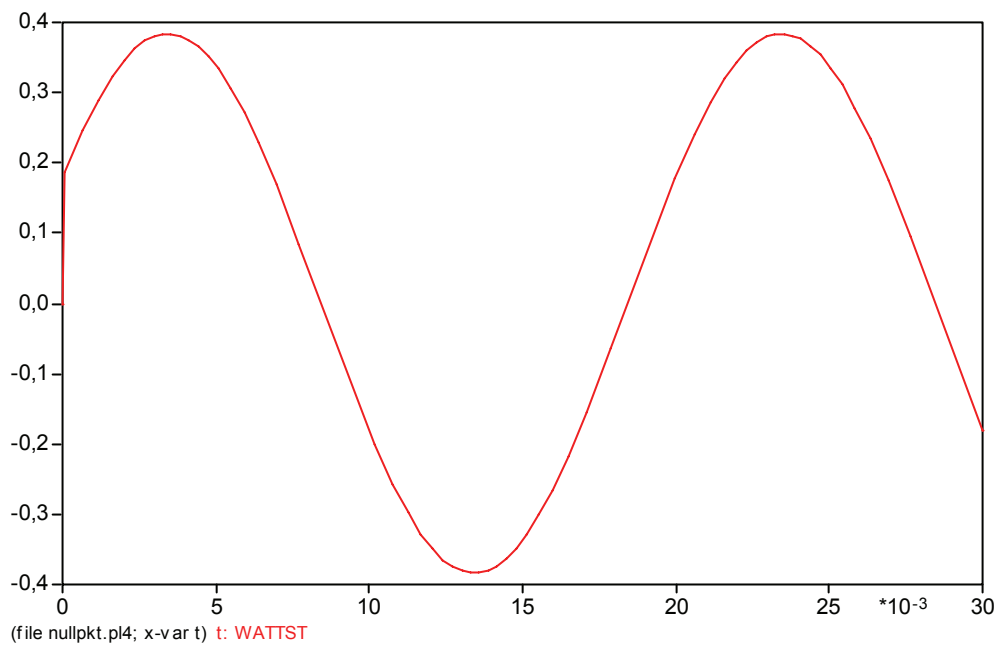
**Vedlegg 30:** Minket kond. Avl.,  $0,003\mu\text{S}$ :



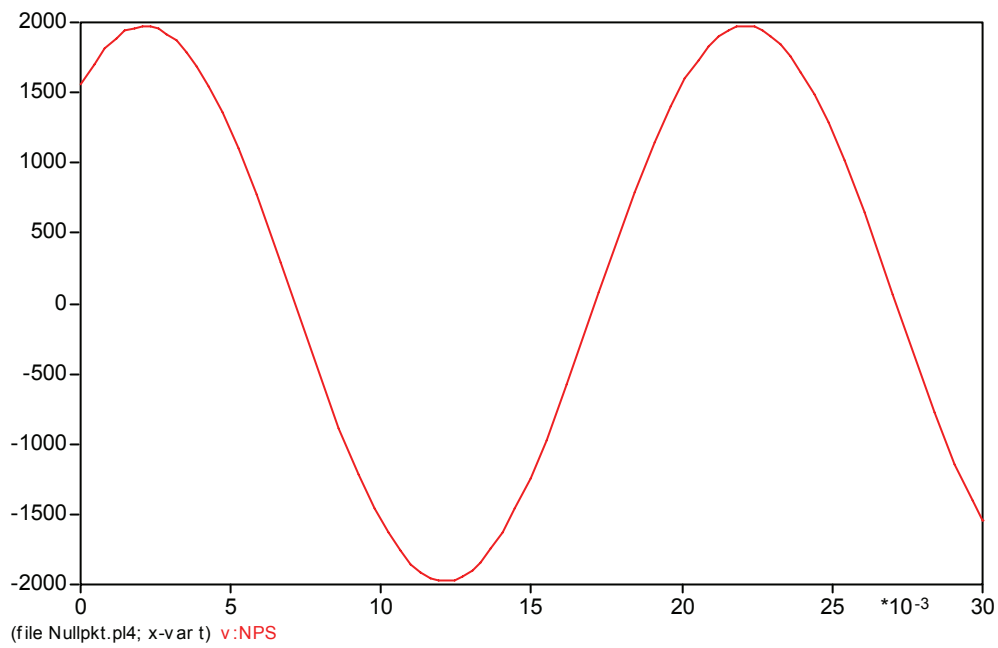
**Vedlegg 31:** Nullpunktspenning, konduktiv avledning  $143\mu\text{S}$ , uten parallellmotstand:



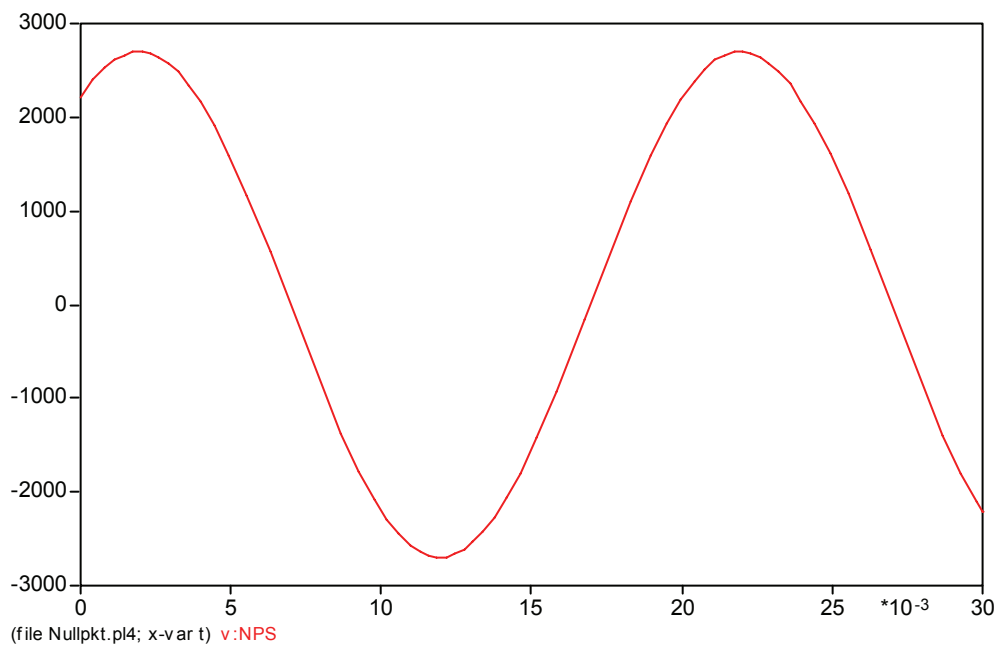
**Vedlegg 32:** Wattmetrisk nullstrøm, konduktiv avledning  $143\mu\text{S}$ , uten parallellmotstand:



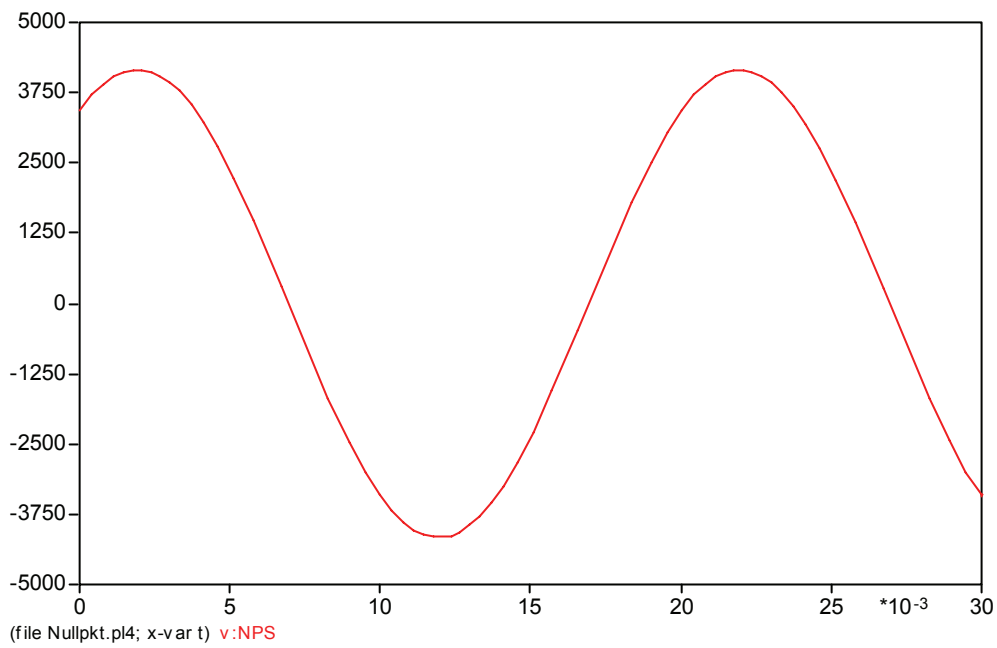
**Vedlegg 33:** Økt kapasitiv usymmetri; 0,1  $\mu\text{F}$ :



**Vedlegg 34:** Økt kapasitiv usymmetri; 0,229  $\mu\text{F}$ :



**Vedlegg 35:** Økt kapasitiv usymmetri; 0,5  $\mu\text{F}$ :



**Vedlegg 36:** Økt kapasitiv usymmetri; 1  $\mu\text{F}$ :

