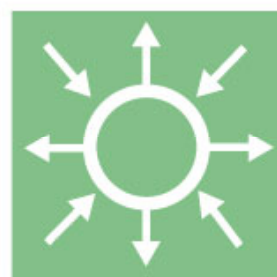
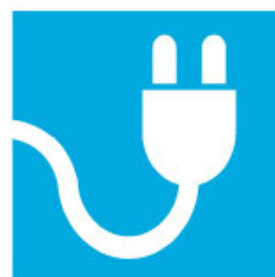
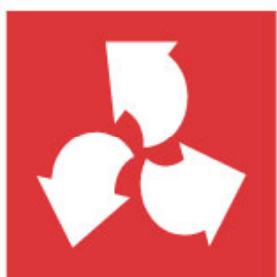


Nätkonsekvenser vid kablifiering av luftledningsnät

Elforsk rapport 06:64



Niklas Stråth Carl Bro AB
Henric Elfving Vattenfall Power Consultant AB

Oktober 2006

ELFORSK

Nätkonsekvenser vid kablifiering av luftledningsnät

Elforskrapport 06:64

Förord

Redan då stormen Gudrun 8 januari 2005 orsakade mycket stor förödelse i framför allt de södra delarna av Sverige, hade nätbolagen i olika omfattning startat arbetet med att kablifiera hela eller delar av sina luftledningsnät. De påföljande väldigt långa elavbrotten i framförallt delar av Småland medförde att myndigheterna initierade utredningar som ledde till att från och med 1 januari 2006 skall avbrottsersättning betalas ut till berörda kunder för avbrott längre än 12 timmar.

Nätbolagen har därefter tagit fram planer för hur, på vilket sätt och med vilken tidplan en forcerad kablifiering av luftledningsnät ska genomföras. Detta arbete pågår nu för fullt och de flesta tidplaner verkar hålla med ganska måttliga förseningar som i många fall beror på problem med att få fram kabelmaterial.

Detta uppdrag har bestått i att genom beräkningar identifiera tekniska problemställningar i samband med kablifiering av omfattande luftledningsnät. PEX-kablars generering av reaktiv effekt i normal drift och kapacitiv felström vid enfasfel är större än för vanlig luftledning. Detta leder till att nya principer och lösningar för kompensering av kapacitiv felström måste tas fram.

Utförare har varit:

Henrik Elfving, SwedPower/Vattenfall Power Consultant
Niklas Stråth, Carl Bro

Projektledare: Anders Petersson, Retea

I projektets expertgrupp har följande personer ingått:

Per Norberg Vattenfall Eldistribution ordf, Anders Vikman Vattenfall Eldistribution, Ove Göransson Staffanstorps Energi, Sture Lindahl Gothia Power, Lars Messing Gothia Power, Jörgen Hasselström Fortum Distribution, Tomas Johannesson E.ON Elnät, Matz Tapper Svensk Energi, Anna Guldbrand Lunds Tekniska Högskola, Åke Sjödin Elforsk och Anders Petersson Retea. Där nätbolagens representanter även har fungerat som styrgrupp.

Projektet har finansierats av följande företag:

Borlänge Energi AB, E.ON Elnät AB, Eskilstuna Energi & Miljö AB, Falu Elnät AB, Fortum Distribution AB, Gävle Energi Elnät AB, Göteborg Energi Elnät AB, Härjeåns Kraft AB, Jämtkraft AB, Jönköping Energi Nät AB, Luleå Energi Elnät AB, Lunds Energikoncernen AB (publ), Mälarenergi Elnät AB, PiteEnergi AB, Skellefteå Kraft AB, Sundsvall Energi Elnät AB, Tekniska Verken i Linköping AB, Umeå Energi Elnät AB, Vattenfall Eldistribution AB, Öresundskraft AB

Genom Basprojektet:

Basprojekt 2005

Bergs Tingslags Elektriska AB, Bjärke Energi ek för, Brittedals Elnät ek för, Elverket Vallentuna AB, Falkenberg Energi AB, Gislaved Energi AB, Grästorp Energi ek för, Hamra Kapellags Besparingsskog, Jukkasjärvi Sockens Belysningsförening, Kommunal Teknik Trelleborg, Kvänumbygdens Energi ek för, Lerum Energi AB, Linde Energi AB, Ljusdal Elnät AB, Lysekils Energi AB, Malungs Elnät AB, NVSH Energi AB, Oskarshamn Energi Nät AB, Sala-Heby Energi AB, Oxelö Energi AB, Staffanstorps Energi AB, Tranås Energi AB,

Varberg Energi AB, Västra Orusts Energitjänst ek för, Åkab Nät och Skog AB,
Övik Energi Nät AB.

Basprojekt 2006

NVSH Energi AB, Malungs Elnät AB, Falkenberg Energi AB, Landskrona
Kommun Tekniska Verken, Elverket Vallentuna AB (publ), Lerum Energi AB,
Oskarshamn Energi Nät AB, Övik Energi Nät AB, Sala-Heby Energi AB,
Lysekils Energi AB, Bergs Tingslags Elektriska AB, Gislaved Energi AB
Herrljunga Elektriska AB, Ljusdal Elnät AB, Kvänumbygdens Energi ek.för,
Västra Orusts Energitjänst ek.för., Brittedals Elnät ek för

Stockholm oktober 2006

Åke Sjödin
Överföring & Distribution

Sammanfattning

Denna rapport är primärt framtagen för nätplanerare och ger bakgrund och underlag för de olika beslut som behöver tas i samband med planering och ombyggnad av mellanspänningsnät för 12 och 24 kV.

Som hjälpmedel i analysarbeten har olika beräkningsprogram används. En mängd olika beräkningar har utförts för nät med spänningsnivåerna 12 kV och 24 kV. De olika typnäten, typnätsdata och beräkningsresultat finns redovisade i rapportens bilagor.

Beräkningarna har utförts vid normaldrift och vid jordfel. Kritiska gränser har tagits fram för hur stora nät och hur långa radiella ledningar som kan byggas. Diverse problemområden har identifierats: Nya krav på matande transformatorer och distributionstransformatorernas nollföljdsimpedans, hög spänningssättande jordfelsström, minskad förmågan att detektera jordfel med 5000 ohm i felstället samt riskerna med förhöjd nollföljdspänning. Även vissa problem i normaldrift har framkommit.

Problemområdet spänningssättande jordfelström visar sig vara svårast att komma till rätta med eftersom nivån på denna ström styr kraven på resulterande jordtagsvärden. Förutsätter man låga jordagsvärden visar det sig att stora nät kan byggas. Eftersom jordagsvärden kan variera i olika delar av landet påverkar detta den maximala nätstorleken. Skillnaden mellan de befintliga jordagsvärdena i näten och de värden nätet får efter kablifieringen kan bli stora. De påverkande parametrarna på vilka nivåer på spänningssättande jordfelsström som uppträder är många till antalet, och för stora nät och nät med långa enskilda radiala matningar rekommenderas att beräkningshjälpmedel används.

Att utnyttja utlokaliserad kompensering visar sig vara en möjlighet för att bygga större nät, men även då uppstår begränsningar. Utlokaliserad kompensering visar sig också ge fördelar i fråga om förmågan att detektera fel med 5000 ohm samt minska risken för förhöjd nollföljdspänning.

I de fall då central kompensering med större reaktorer är ett tänkbart alternativ krävs också mer ingående analyser. Det visar sig att bl.a. transformatorns nollföljdsimpedans, typ av kablar, jordningsutformning, medföljande jordlina och reläskyddsutformning påverkas.

Rapporten föreslår även att fortsatt utvecklingsarbete behöver göras inom några områden. Dessa områden är

- Analys av på vilket sätt shuntreaktorer kan placeras ut i mellanspänningsnäten för att kompensera för det reaktiva effektöverskottet orsakat av hög andel kabel.
- Analys av hur nya metoder för utformning jordtag. Jordtagens utformning och tekniska värden har visat sig påverka uppkomna spänningssättningar avsevärt.
- Identifiering av ännu idag ej kända problem med utlokaliserad kompensering vid transienta förlopp av olika slag, såsom kopplingsöverspänningar eller intermittenta jordfel i de allt mer omfattande kabelnäten.

- Analys av hur i denna rapport nämnda formler för nollföljdsdata på ett förenklat sätt kan användas i praktiska beräkningsfall

Rapporten avslutas med att ge riktlinjer och tumregler för nätplanerare samt förenklade metoder för egna beräkningar. Kostnadskalkyler för de olika tekniska lösningar som presenteras och analyseras i denna rapport har inte varit någon del av projektomfattningen.

Rapporten är gjord för att kunna hitta information samt för att skapa förståelse för vad som kan hända och är en vägledning för nätplaneraren. Lösningarna är inte generella utan nätplaneraren måste alltid förstå vilka konsekvenser som olika val kan innebära.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Projektmål och syfte.....	1
2	Beräkningar	3
2.1	Beräkningsverktyg	3
2.2	Normaldrift.....	4
2.2.1	Reaktiv effekt.....	4
2.2.2	Förluster.....	4
2.2.3	Driftspänning	5
2.3	Kortslutningar.....	6
2.4	Jordfel	6
2.4.1	Teori.....	6
2.4.2	Nollföljdsimpedanser i kablar och ledningar.....	9
2.4.3	Inverkan av jordtag och långsgående jordlina	10
2.4.4	Traditionellt luftledningsnät.....	11
2.4.5	Ökad kablifiering	11
2.4.6	Aktiva bidrag från radialer vid jordfel	12
2.4.7	Spänningsfall över transformatorns nollföljdsimpedans.....	13
2.4.8	Transformatorns överströmsskydd kan lösa vid jordfel	15
2.4.9	Ledningsfackens överströmsskydd kan lösa vid jordfel	15
2.4.10	Nollföljdsspänningen är inte lika i hela nätet	16
2.4.11	Utlokaliserad kompensering – lösningen på alla problem?	16
2.5	Sammanställning av beräkningarna.....	17
2.5.1	12 kV beräkningar	17
2.5.2	24 kV beräkningar	23
3	Upptäckta problemområden	27
3.1	Nollpunktsutrustningens verkningsgrad.....	27
3.2	Fasvridning över transformatorns nollföljdsimpedans.....	27
3.3	Val av transformatorer.....	27
3.3.1	Krafttransformatorer	27
3.3.2	Distributionstransformatorer	28
3.4	Feldetektering, skyddsfilosofi för jordfel.....	28
3.5	Avledare och isolationsmarginaler	28
3.6	Detekteringar av höghögsmiga jordfel	29
4	Slutsatser	30
4.1	Problem med kablifieringen	30
4.2	Reaktiv effekt	30
4.3	Fler radiala matningar	31
4.4	Utlokaliserad kompensering.....	32
4.4.1	När måste man tillämpa utlokaliserad kompensering.....	32
4.4.2	Optimal kompensering med utlokaliserade spolar	32
4.4.3	Utlokaliserad kompensering längs en radial.....	33
4.4.4	Storlek för utlokaliserad kompensering.....	34
4.5	Särjordning	35
4.6	Snedavstämning	35
4.7	Bortfall av central kompensering.....	35
4.8	Kortare felbortkopplingstider	36
4.9	Förhöjd nollföljdsspänning	36
4.10	Reservdriftläggning	37

4.11	Olika kabeltyper.....	38
5	Förslag till fortsatt arbete	39
5.1	Shuntreaktorer	39
5.2	Jordtagsutformning	39
5.3	Risker med förhöjd nollföljdspänning vid transienta förlopp och intermittenta jordfel	39
5.4	Känslighetsanalys formler	39
6	Riktlinjer för nätplanerare	40
6.1	Nätstorlek för kabelnät	40
6.2	Jordtagsvärden	40
6.3	Central kompensering eller en kombination av central och lokal kompensering	40
6.4	Maximala nätstorlekar då endast central kompensering används.....	41
6.5	Max nätstorlekar vid central kompensering tillsammans med lokal kompensering.....	45
6.6	Egna beräkningar	47
6.7	Planeringshorisont.....	49
6.8	Reservdriftläggning	49
7	Tumregler	50
7.1	Begränsningar	50
7.2	Förhöjd tomgångsspänning	50
7.3	Möjlighet att kunna kompensera kapacitiv felström	50
7.4	Max beröringsspänning 100 V.....	51
7.5	Felbortkoppling 5 000 ohm jordfel.....	52
7.6	Varierande känslighet vid reläinställning av 5000 ohm.....	53
7.7	Placering av utlokaliserad kompensering	53
7.8	Jordlina.....	53
7.9	Central kompensering.....	54
7.10	Flödesschema.....	54
8	Referenser	56
A	Beräkningar utförda av Vattenfall Power Consultant AB	A-1
A.1	Simuleringsdata.....	A-2
A.1.1	Matande nät.....	A-2
A.1.2	Krafttransformator utan utjämningslindning	A-2
A.1.3	Krafttransformator med utjämningslindning	A-2
A.1.4	Nollpunktsutrustning	A-3
A.1.5	Lokalkompensering	A-3
A.2	Rent luftledningsnät	A-3
A.3	Kabelradial 40 km	A-5
A.4	Kabelradial 40 km med last	A-7
A.5	Kabelradial 30 km	A-8
A.6	Kabelradial 50 km	A-9
A.7	Kabelradial 60 km	A-10
A.8	Kabelradial 80 km	A-14
A.9	Kabelradial 80 km med utlokaliserad kompensering.....	A-16
A.10	Kabelradial 60 km med öppna skärmkretsar	A-18
A.11	Kabelradial 60 km med enledarkabel	A-20
A.12	Reservmatning med utlokaliserad kompensering	A-22
A.13	Kabelradialer 5x30 km.....	A-24
A.14	Kabelradialer 5x60 km.....	A-26
A.15	Kabelradialer 5x60 km med utlokaliserad kompensering	A-28

A.16	Kabelradial 60 km med 24 kV kabel.....	A-30
A.17	Kabeldata.....	A-32
A.18	Beräkningar med kabelmodellen i EMTDC.....	A-33

B	Beräkningar utförda av Carl Bro AB	B-1
B.1	Simuleringsdata.....	B-2
B.1.1	Matande nät.....	B-2
B.1.2	Krafttransformator utan utjämningslindning	B-2
B.1.3	Krafttransformator med utjämningslindning	B-2
B.1.4	Nollpunktsutrustning	B-3
B.1.5	Lokalkompensering	B-3
B.1.6	Ledning	B-3
B.1.7	Belastning	B-4
B.2	De olika näten	B-5
B.2.1	Ursprungligt nät	B-5
B.2.2	Delkablifierat nät	B-6
B.2.3	Kablifierat nät	B-7
B.3	Kortslutningsströmmar	B-8
B.3.1	Ursprungligt nät	B-8
B.3.2	Delkablifierat nät	B-8
B.3.3	Kablifierat nät	B-9
B.4	Lastflöden	B-10
B.4.1	Ursprungligt nät	B-10
B.4.2	Delkablifierat nät	B-11
B.4.3	Kablifierat nät	B-12
B.5	Jordfel i det ursprungliga nätet	B-13
B.5.1	Avstämningsskurva	B-13
B.5.2	Jordfel vid samlingsskenan	B-13
B.5.3	Jordfel längst ut på ledning 1	B-15
B.5.4	Jordfel längst ut på ledning 6	B-17
B.6	Jordfel i det delkablifierade nätet	B-20
B.6.1	Avstämningsskurva	B-20
B.6.2	Jordfel vid samlingsskenan	B-20
B.6.3	Jordfel längst ut på ledning 1	B-22
B.6.4	Jordfel längst ut på ledning 6	B-24
B.7	Jordfel i det kablifierade nätet.....	B-25
B.7.1	Avstämningsskurva	B-25
B.7.2	Jordfel vid samlingsskenan	B-26
B.7.3	Jordfel längst ut på ledning 1	B-28
B.7.4	Jordfel längst ut på ledning 6	B-29
B.8	Jordfel i det kablifierade nätet med lokalkompensering	B-31
B.8.1	Avstämningsskurva	B-31
B.8.2	Jordfel vid samlingsskenan	B-32
B.8.3	Jordfel längst ut på ledning 1	B-34
B.8.4	Jordfel längst ut på ledning 6	B-36

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Verkningarna av den senaste tidens väderrelaterade störningar på infrastruktursystem för el och tele har framtvingat en förhöjd kablifieringstakt i de svenska distributionsnäten för mellanspänning. En mycket stor andel kabel i nätdelar som tidigare dominerats av luftledning, medför stora tekniska förändringar vad avser systemvillkor för dessa nät. Kablifieringsprojekten är redan igång och behovet av teknisk/teoretisk analys av konsekvenserna av hög andel jordkabel och långa enskilda ledningslängder, är stort. Detta projekt och denna rapport har som avsikt att belysa dessa frågor.

1.2 Projektmål och syfte

Projektets mål och omfattning har varit följande:

- Genomförande av teoretiska beräkningar på två i förväg definierade nätkonfigurationer (typnät) för mellanspänning, ett 12 kV-nät och ett 24 kV-nät. Distributionsnäten definieras utifrån antal km av resp. ledningstyp kabel, belagd ledare resp. luftledning.
- Beräkningarna skall detektera problemställningar både i normal felfri drift (ökat behov av reaktiv effektkompensering i utmatningspunkten) samt vid jordfel i nätet (ökat behov av kompensering av kapacitiv felström antingen centralt placerad eller lokalt placerad eller en kombination av dessa). Vid jordfel beräknas även de elektriska storheterna vid olika antagna värden på resistansen i felstället.
- Beräkningarna vid jordfel skall även omfatta beräkning av jordfelsströmmens transienta förlopp, både till belopp och utseende, som karaktäriserar förhållandena i omfattande kabelnät. Speciellt beaktas olika reläskyddssystemers förmåga att detektera det transienta förloppet.
- Utgående från beräkningsresultaten beskrivs på vilket sätt en optimal lokal kompensering utförs per utgående ledningsfack, dvs. hur många kompenseringpunkter och hur stor kompensering (A) resp. kompenseringpunkt skall ha, samt hur en optimal placeringsfilosofi kan se ut.
- Resultaten från beräkningarna skall även visa på vilket sätt ingående huvudkomponenters (t ex krafttransformator och lokal nollpunktsbildare) impedanser optimeras för att tillgodose tekniska krav och förutsättningar både i normal drift och vid fel.

- Resultatet från beräkningarna skall även visa på vilket sätt mycket omfattande kabelledningslängder, påverkar reläskyddssystemens (mättransformatorer, enskilt reläskydd) mätnoggrannhet och tillförlitlighet. Speciellt analyseras risken för sk "sympatiutlösning".
- Projektet skall även belysa konsekvenser för lokalt kompenserade nätdelar vid reservmatning från annan radial matning eller matning från angränsande nät. En konsekvens kan vara att mobila nollpunktsbildare inkl. reaktor måste övervägas.
- Projektet skall utifrån erhållna beräkningsresultat, ta fram specificerade riktlinjer för planering, projektering och beredning av omfattande kabelnät.
- Projektet skall genom beräkningar analysera vilka jordningsprinciper (utgående från föreskriftskraven) som skall gälla i omfattande kabelnät, samt på vilket sätt medföljande jordlina påverkar principerna.
- Som en avslutande aktivitet i projektet skall en "resultat-workshop" anordnas i syfte att redovisa resultat samt att identifiera nödvändiga kompletteringar och uppföljningar.

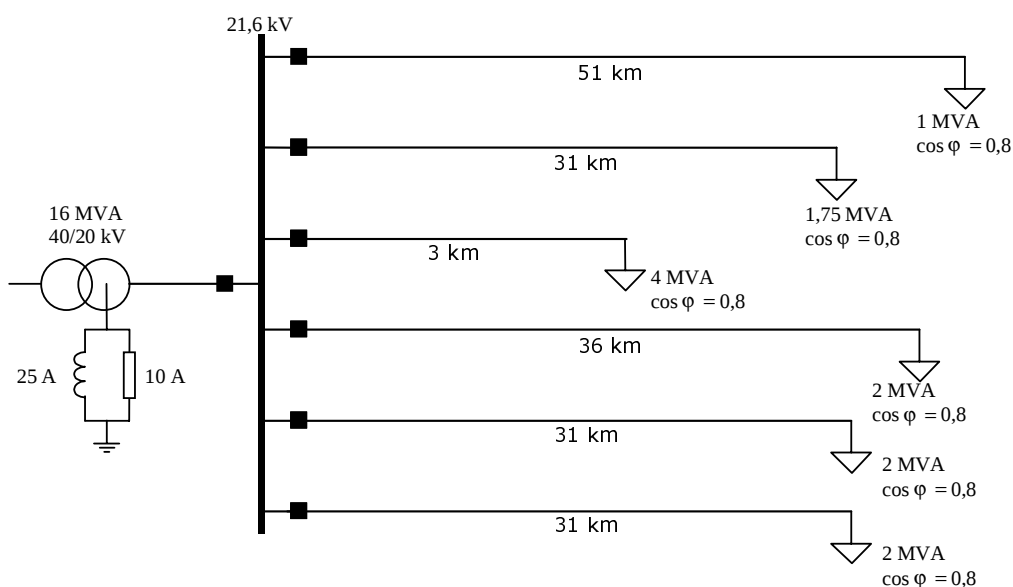
Syftet med projektets resultat är att det ska utgöra en grund för nätbolagens interna framtagande av styrdokument för planering, projektering, och beredning av stationer och ledningar i samband med stora kablifieringsprojekt. Resultaten ska också kunna användas av Svensk Energi vid diskussioner med Elsäkerhetsverket angående framtida föreskrifter.

2 Beräkningar

Detta avsnitt beskriver dels teorin bakom utförda beräkningar samt olika intressanta beräkningsresultat både i normal drift och vid jordfel i näten.

Beräkningarna har genomförts på två olika spänningsnivåer, 12 kV och 24 kV och resultaten återfinns i avsnitt 2.5. Av beräkningarna dragna slutsatser, riktlinjer, tumregler och upptäckta problemområden hänvisas till avsnitt 3-7. Mer detaljerade redovisningar av beräkningarna återfinns i bilagorna A och B.

Beräkningarna har utgått från ett luftledningsnät matat från en station med sex utgående ledningsfack. Nätet har därefter kablfierats i olika nivåer varvid olika problem har kunnat identifieras och studeras.



Figur 2.1 Exempel på typnät som beräkningar utförts på.

2.1 Beräkningsverktyg

Vid analys av normala driftfall och felsituationer i kraftsystem ger datorprogram en rad fördelar framför manuella metoder. I föreliggande arbete har PSCAD/EMTDC använts, men de flesta av analyserna går att genomföra med t.ex. PSS/E. PSCAD/EMTDC kan användas till de flesta typer av elektriska beräkningar och kan, med rätt modellering, också utföra transientberäkningar som behövs för analys av transienta förlopp i samband med jordfel.

I programmet finns möjlighet att använda kabel- och ledningsmodeller där modellen byggs upp av geometriska och fysikaliska indata varvid programmet själv beräknar ledningens elektriska egenskaper. Denna modell ger god representation av förhållanden i elnätet.

Det är också möjligt att modellera kablar och ledningar med den klassiska ekvivalenta pi-länken. För detta krävs att kabelns eller ledningens elektriska värden är kända eller kan beräknas via formler eller med hjälp av något beräkningsprogram. Pi-länken ger ingen fullständig representation men kan anses vara tillräcklig noggrann för de kraftfrekventa förloppen.

För beräkningarna på 12 kV-nivån har båda modelleringssätten använts. Kabelmodellen används med fördel för att skapa förståelse för de olika typer av fenomen som kan uppstå och resultaten har jämförts med pi-länken.

2.2 Normaldrift

2.2.1 Reaktiv effekt

Vid kablifiering av luftledningsnät ökar genereringen av reaktiv effekt eftersom kabel har betydligt högre driftkapacitans än luftledningar. Den reaktiva effekten påverkar spänningen både i distributionsnätet och i överliggande nät. För att underlätta spänningsregleringen i det överliggande nätet är det vanligt att eftersträva ett nollutbyte av reaktiv effekt från de underliggande distributionsnäten. Detta innebär att ökningen av den reaktiva effekten måste hanteras lokalt i distributionsnäten, vilket ju också innebär att krafttransformatorerna inte belastas med reaktiv ström.

Stora kabelnät ger stora reaktiva effektoverskott vid låg last. Enligt beräkningar för ett 300 km långt 12 kV tomgående kabelnät (bilaga A.13) uppgår det reaktiva effektoverskottet till 4 Mvar och förlusterna till ca 0,15 MW på grund av reaktiv effekttransport. Motsvarande värden för ett 260 km långt 24 kV-nät (med något annorlunda topologi) är knappt 8 Mvar och 0,16 MW (se B.4.3). I bilaga B.4.3 visas samma nät med mer last inkopplad. Här har den reaktiva effekten genom transformatorn minskat till nära noll. Exempelen visar på behovet av att kunna hantera varierande reaktiv effekt i nätet. Många distributionsnät med luftledning har shuntkondensatorer för att kompensera för kundernas reaktiva uttag. När luftledningen ersätts med kabel kan driftkapacitansen ta över delar eller hela den uppgiften. I nät med mycket kabel i förhållande till lasten kan det till och med bli aktuellt att installera shuntreaktorer för att få ett acceptabelt utbyte av reaktiv effekt med det överliggande nätet.

2.2.2 Förluster

Transporten av den reaktiva effekten ger upphov till förluster i ledningsresistanser. Dessa förluster påverkas mycket av längden på ledningarna. Beräkningarna visar t ex att en 60 km lång 12 kV tomgående kabelradial har förluster som uppgår till ca 35 kW i tomgång (bilaga A.6) medan en 30 km ren kabelradial har motsvarande förluster på ca 4 kW (bilaga A.12). Det är allmänt accepterat att reaktiv effekt inte ska överföras långa sträckor. Att använda shuntreaktorer placerade ute i långa ledningar (längre än 50-60 km) kan vara lönsamt ur förlustsynpunkt. Dessutom reduceras då det totala reaktiva effektoverskottet till överliggande nät. Hänsyn till nätets belastning och dess utnyttjningstid måste beaktas för att kunna göra en fullständig förlustvärdering. Om den reaktiva belastningen är stor och jämt fördelad

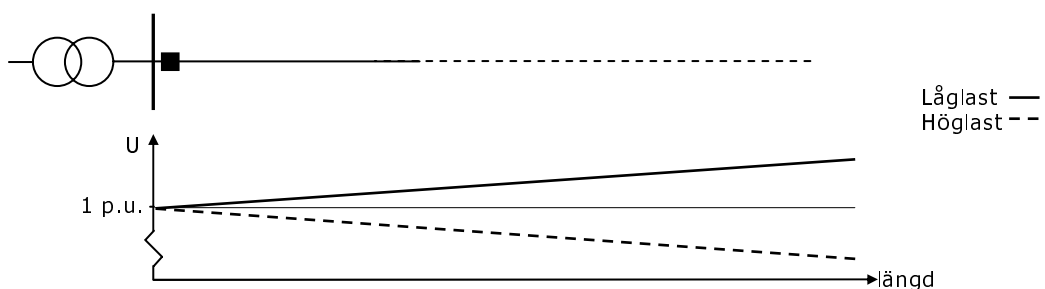
under året kan förlusterna t o m bli lägre jämfört med om nätet är ett rent luftledningsnät eftersom kabelns kapacitans kompenserar för den reaktiva belastningen.

Att bygga nät med kabel som har lägre kapacitans, t ex med 24 kV-kabel i 12 kV-nät, kan också minska förlusterna och det reaktiva effektöverskottet till överliggande nät. En tomgående kabelradial med 24 kV-kabel i stället för 12 kV kabel ger förluster på ca 15 kW (bilaga A.15) eller en reduktion på ca 20 kW jämfört med om 12 kV-kabel används.

2.2.3 Driftspänning

Spänningen längst ut i nätet blir högre då näten går i tomgång och när belastningen är liten, se Figur 2.2. Beräkningar visar att för en 12 kV ledning med 20 km luftledning närmast stationen och 40 km kabel längst ut, fås ca 4 % högre spänning längst ut jämfört med i matande station. Fördelningen med en tredjedel luftledning närmast matande station och två tredjedelar kabel längs ut visar sig ge den största påverkan på spänningshöjningen. Motsvarande spänningshöjning för en ren kabelradial på 60 km ger ca 1 % högre spänning längst ut. Kabelns stora generering av reaktiv effekt och luftledningens höga reaktans har störst betydelse i fråga om spänningshöjningen utefter radialen.

I de fall då luftledning används närmast den matande stationen och långa kablar längre ut, kan omsättningen på distributionstransformatorerna behöva ändras. Problem kan uppstå om den reaktiva belastningen varierar eller om driftläggningen ändras. I värsta fall kan en driftomläggning innebära att nivån på lågspänningssidan påverkas mer än vad som är acceptabelt.



Figur 2.2 Spänningsprofil över en ledningssträcka vid hög- och låglast.

Spänningen i matande station regleras normalt med lindningskopplare och automatisk spänningsregulator. Beroende på underliggande näts reaktiva effektgenerering och transformatorns reaktans, kan en relativ spänningshöjning över transformatorn erhållas. Denna spänningshöjning måste kunna kompenseras inom transformatorns reglerområde för att driftspänningen i stationen skall kunna hållas på oförändrad spänningsnivå. Enligt beräkningar ger ett obelastat 12 kV 300 km kabelnät en spänningshöjning över transformatorn på ca 7 % då en 10 MVA transformator med kortslutningsreaktansen 9 % används. Om nätet är större och transformatorn mindre kan det hända att inte transformatorns reglerområde inte räcker till. Shuntreaktorer placerade på lämpliga ställen kan i så fall vara en möjlig lösning.

2.3 Kortslutningar

En kabel har två till tre gånger mindre seriereaktans än motsvarande luftledning. Det innebär att två- och trefasiga kortslutningar ger upphov till större felströmmar ute i ett kablfierat ledningsnät. Detta kan i många avseenden ses som en gynnsam effekt. Man får ett starkare nät som ger mindre problem med spänningsvariationer. Felbortkopplingen förenklas också i och med att nätet blir starkare. Exempel på kortslutningsströmmar återfinns i B.2.

Emellertid bör man vara observant på att befintliga nätstationer och kundanläggningar inte får utsättas för större felströmmar än vad de är dimensionerade för.

2.4 Jordfel

Den största förändringen vid kablfiering av luftledningsnät visar sig vid jordfel. Det är allmänt känt att kabel tillför nätet väsentligt mer kapacitiv jordfelsström än luftledning. Hittills har problemet lösts genom att öka kompenseringsströmmen från Petersenspolen i den matande stationen. I det följande visas på fenomen som kommer att kräva en del uppmärksamhet i framtiden.

2.4.1 Teori

I samband med enfasiga jordfel uppstår nollföljdsströmmar och nollföljds-spänningar. Strömmen i felstället kan ställa till problem eftersom den kan förorsaka spänningssättningar av utsatta delar. Strömmar och spänningar har en stationär komponent och en övergående transient komponent. Dessa komponenter beräknas på olika sätt.

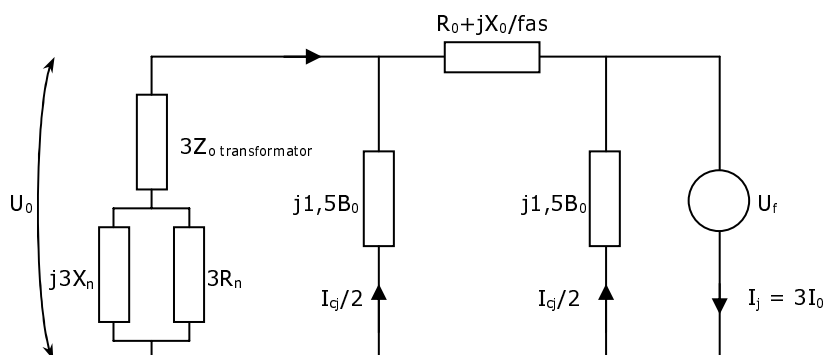
Den stationära jordfelsströmmen i felstället kan beräknas enligt (1), där U_{fas} är den bakomliggande fasspänning, Z_1 , Z_2 och Z_0 är systemets plus-, minus- och nollföljdsimpedanser och Z_{fel} är impedansen i felstället.

$$I_j = \frac{U_{fas}}{\frac{1}{3}(Z_1 + Z_2 + Z_0) + Z_{fel}} \quad (1)$$

Eftersom Z_1 och Z_2 är mycket mindre än Z_0 i högomigt jordade nät kan dessa försummas och vid stumma jordfel kan uttrycket förenklas till följande:

$$I_j = \frac{U_{fas}}{\frac{1}{3}(Z_0)} \quad (2)$$

Z_0 sett från felstället kan vara rent resistiv förutsatt att nätet är helt avstämt. För kabelnät som har stora nollföljdsströmmar och serieimpedanser innebär avstämning för fel på ett ställe inte att det är avstämt för alla fel som kan förekomma i nätet. För kabelnät kan inte heller nollföljds serieimpedanserna försummas till skillnad från luftledningsnäten.



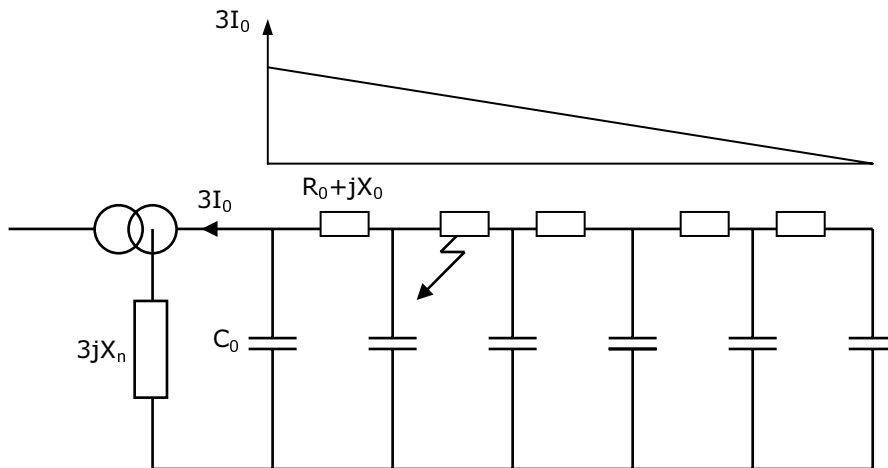
Figur 2.3 Impedansers och admittansers inverkan på felströmmen.

Figur 2.3 visar ett exempel på hur impedanserna inverkar vid fel i ett nät med en enkel radial. Kapacitanserna är uppdelade med hälften på vardera sidan om radialen och angivna som susceptanser. Längsimpedansen är angiven i ohm/fas och övriga impedanser angivna som fasimpedanser. Nollpunktsresistansen är tre gånger högre vid beräkningar per fas jämfört med dess verkliga resistans.

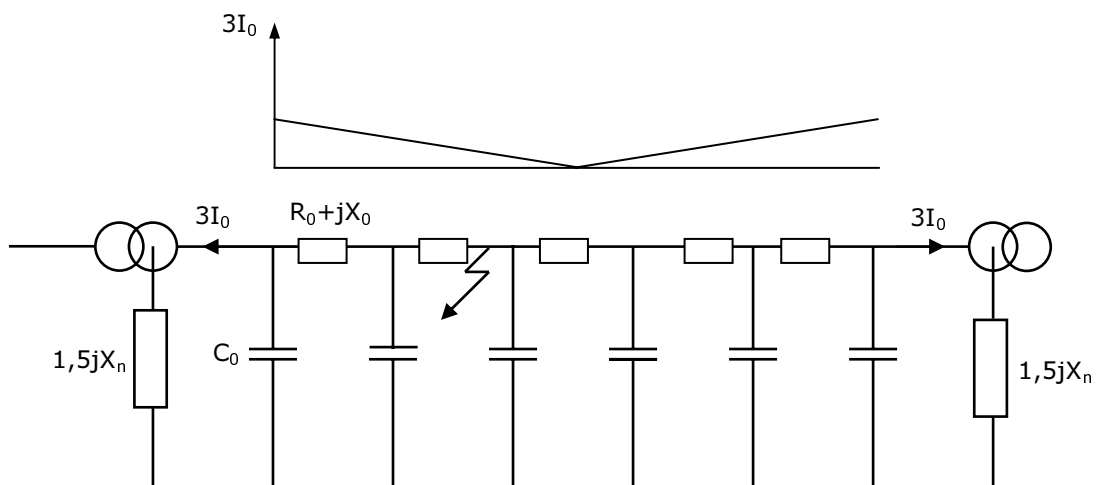
Strömmen i felstället beror på hur väl nätet är kompenserat. För ett nät som är fullständigt kompenserat finnas det kvar ett aktiv strömbidrag som beror på nollföljdseffekten i systemet i samband med jordfelet.

Effektutveckling i nollföljdssystemet uppstår som $(U_0)^2/R_0$ eller $(3I_0)^2 \times R_0$ där U_0 och I_0 är nollföljdsspänningar och nollföljdsströmmar och R_0 är ledningens nollföljdsresistans. Nollföljdseffekten som uppstår i samband med jordfel visar sig var ett bra hjälpmedel för att förstå vad som påverkar den spänningssättande jordfelsströmmen i felstället. I luftledningsnät där kompenseringen och nollföljdströmmen är liten uppstår nollföljdseffekt i huvudsak som U_0^2/R_n där R_n är systemets nollpunktsmotstånd.

Summan av nollföljdseffekterna ger sig till känna som ett aktivt strömbidrag i felstället där även nollföljdseffekterna i nollpunktsreaktorn och transformatorn bidrar. Vid kabelnät där strömmarna i kablarna pga det kapacitiva bidraget inte är försumbara, uppstår nollföljdseffekt även här. Dessa effekter kan vara betydande om näten är stora, har långa ledningar och där kompensering enbart sker centralt. Nollföljdseffekterna leder till ökad felström eftersom de inte kan kompenseras bort och kan innebära problem med höga beröringsspänningar. Dessa strömmar kan minskas genom att kompensera med utlokaliserade nollpunktsreaktorer i nätet. De strömberoende nollföljdseffekterna kan också påverkas via val av dimensioner på ledare, skärmar, jordtag och eventuella medföljande jordlinor. Förläggningssätt och markförhållanden inverkar också. Figur 2.4 och Figur 2.5 visar hur fördelningen av nollföljdsström ser ut i ett nät med en och fler nollpunktsreaktorer. I och med att nollföljdsströmmarna kan bli stora påverkas också spänningsfallet och därmed också nollföljdspänningen i nätet. Om nollföljdspänning blir hög i delar av nätet kan det innebära problem för isolationen i anslutna apparater och ledningar med ökad risk för ytterligare fel.



Figur 2.4 Nollföljdsströmmen med en central reaktor.



Figur 2.5 Nollföljdsströmmen med två reaktorer på olika platser i nätet.

Figur 2.4 och Figur 2.5 visar hur kompensering kan fördelas på flera ställen i nätet. Figurerna visar också hur nollföljdsströmmen minskar utefter radialen.

Nollföljdseffekten och den spänningssättande jordfelsströmmen reduceras med ungefär en faktor fyra då kompensering sker enligt Figur 2.5 jämfört med Figur 2.4. Att använda kompensering på flera ställen reducerar alltså den spänningssättande jordfelsströmmen. Frågan är i vilka fall de behövs och i så fall hur dessa lämpligast placeras i nätet. I figurerna åskådliggörs de strömberoende nollföljdseffekterna som uppkommer beroende på nollföljdsresistansen och nollföljdsströmmen. En minskning av

nollföljdsströmmen och nollföljdsresistansen ger en reducering av nollföljdseffekten.

Att minska nollföljdsresistansen i de delar av nätet där nollföljdsströmmen är som störst ger den största förbättringen. I ett nät utan utlokaliserad kompensering är nollföljdsströmmen som störst i närheten av matande station där central kompensering sker. Det är också i dessa områden som reducering av nollföljdsresistans gör bäst nytta.

I samband med fel inträffar alltid ett transient övergångsförlopp. För fel i luftledningsdelen i ett blandat nät kan den transienta jordfelsströmmen ses som en dämpad sinusvåg.

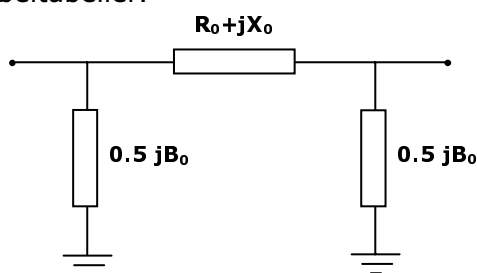
Amplituden för transienten sett från felstället beror på spänningen över felstället då felet inträffar samt kablarnas och luftledningarnas nollföljdsinduktanser och nollföljdskapacitanser. Beroende på kabelns högre nollföljdskapacitans ger ett kabelnät ca tio gånger högre amplitud jämfört med ett rent luftledningsnät. Egenfrekvensen är också betydligt lägre för kabelnätet.

För fel i kabeldelen av ett blandat nät fås också ett transient förlopp med en tydlig "spik" varje halvperiod då nollföljdsspänningen är maximal och det upprepat tändar i felstället.

2.4.2 Nollföljdsimpedanser i kablar och ledningar

Vid beräkningar med pi-länkar används plusföljdsimpedanser och nollföljdsimpedanser där ekvivalent pi-länk för nollföljdsimpedanserna visas i Figur 2.6, där admittansen $B_0 = \omega C_0$ och impedansen $R_0 + jX_0$ ingår.

Svårigheten ligger att få fram värden på nollföljdsresistans och nollföljdsreaktans. Värdena är också viktiga för beräkningarna av de olika näten och speciellt i de nät där centralkompensering sker till stor del. Plusföljdstorheter som kapacitans, reaktans och resistans finns angivna i leverantörernas kabeltabeller.



Figur 2.6 Ekvivalent pi-länk

För beräkningar av påverkan av långsgående jordlina till luftledning kan beräkningsprogrammet TMLC, som är en tilläggsmodul till PSS/E, användas. Programmet beräknar plusföljds- och nollföljdstorheter för luftledningar med och utan långsgående jordlinor och topplinor.

För de beräknade värden för 12 kV kablar och ledningar enligt bilaga A.16 har jordtagsresistanserna inte medräknats. För att få en fullständig beräkning krävs att hänsyn tas till alla typer och längder av kablar och ledningar,

inbördes avstånd mellan jordtagen, jordtagsresistanser, jordlinor etc. Även den kapacitiva strömkomponent som shuntas ner genom jordtagen kan påverka värdena för nollföljdsresistans och nollföljdsreaktans.

Kabelvärdena är framtagna från leverantörens datablad. Plusföljdsimpedanserna för enledarkabel skiljer sig något jämfört med treledarkabel vilket inte angivits men har ingen betydelse i fråga om de beräkningar som utförts. Olika typer av PEX-kablar finns men deras impedansdata skiljer sig inte mycket åt när samma typ och dimensioner av ledare och skärmar används.

R_0 och X_0 för kablarna är framtagna från ABB HVC Cables formelsamlingar [1] där jordtagsresistanserna försummas. Geometriska avstånd enligt kabelleverantörernas uppgifter och markresistivitet 3000 ohm·m har använts för beräkningarna. Markresistiviteten skiljer sig inom landet. Beräkningar med olika markresistiviteter mellan 600-10 000 ohm·m visar att resultaten för R_0 och X_0 kan variera uppåt och neråt med max 5 % för R_0 och max 15 % för X_0 . R_0 blir lägre då markresistiviteten minskar. X_0 blir högre för båda ytterlighetsfallen. Beräkningar i kabelmodellen visar också att markresistiviteten har liten betydelse i förhållande till övriga onoggrannheter såsom jordtagsvärden, värde på ytterjordtag etc. För påverkan på slutberäkningarna kan onoggrannheten pga. markresistiviteten antas vara liten. I syfte att analysera på vilket sätt onoggrannheten i framtagna formler påverkar slutresultatet, föreslås att detta problemområde bör utredas ytterligare.

För luftledning har alla beräkningar gjorts i TMLC där linhöjden är satt till 9 meter, fasavstånd 1,1 meter och längsgående jordlina placerad 1,5 meter under faslinorna. Denna geometri är hämtad från EBR standard. För BLX har fasavståndet 0,5 m används.

Som jämförelse har beräkningar också utförts i EMTDC där kabelmodellen används och kablarna byggts upp som 12 kV enledarkablar liggande i triangel. Treledarmodell saknas i EMTDC. Beräkningarna finns redovisade i bilaga A.17. Som exempel har en 50 km ledning uppdelat i 1 st 50 km kabel, 2 st 25 km kablar, 5 st 10 km kablar och 10 st 5 km kablar använts med och utan jordlina. Nätet är helt avstämt vid stumt jordfel och nollpunktsmotståndet är frånkopplat. 35 mm² jordlina har använts i beräkningarna. Även Pi-länkar för enledarkablar med beräknad data enligt ABB Cables har använts för jämförande beräkningar.

2.4.3 Inverkan av jordtag och längsgående jordlina

Utifrån gjorda beräkningar i EMTDC redovisade i bilaga A.17 visar det sig att längsgående jordlina minskar nollföljdsresistansen med ca 5-20 % beroende på nätkonfiguration, avstånd mellan jordtagen, jordtagsvärden, area på skärmen och area på jordlina. Även nollföljdsreaktansen reduceras i samma storleksordning. Jordlinan har placerats alldeles intill kabeln. Påverkan för enledarkabel resp. treledarkabel antas vara i ungefär samma storleksordning, baserat på likartade geometriska förhållanden.

Uppdelning av kabeln i kortare sektioner innebär mindre nollföljdsresistans och spänningssättande jordfelsström. Bra jordtag i områden närmast matande station där central kompensering sker, har stor betydelse på nollföljdsresistansen, spänningssättande jordfelsströmmen och skillnaden i

nollföljdspänning utefter kabelradialen. Med öppen skärmkrets reduceras nollföljdsresistansen och jordfelsströmmen, medan skillnaden i nollföljdspänning ökar markant.

Resultaten visar också att motsvarande pi-länkar med data enligt ABB-formler ger högre värden för nollföljdsresistans och spänningssättande jordfelsströmmar. Kabelmodellen representerar de olika fenomen som påverkas av skärmarean, nätstorleken, avstånd mellan jordtagen, jordtagsvärden och inbördes förhållanden dessemellan, längsgående jordlina, var och hur felet inträffar etc.

Pi-länksmodellen med värden enligt ABB-formlerna ger högre spänningssättande jordfelsström än kabelmodellen i alla typer av konfigurationer förutom de fall då jordtagen är höga i närheten av matande station.

Vid uppdelning av många kortare pi-länkar ökar jordfelsströmmen något men stabiliserar sig då längderna uppgår till mindre än 10 km. För de pi-länkar som används i de fortsatta beräkningar är avstånden aldrig längre än 10 km, vilket innebär att värdena för de jämförande beräkningar stämmer överens.

Beräkningar visar att spänningssättande jordfelsström inte påverkas beroende på om jordfelet sker direkt mot ett eget jordtag eller om det sker mot gemensam jord med kabelskärmen. Själva felströmmen som normalt är liten tar sig snabbt ner i jorden via de närmaste jordtagen. Däremot induceras strömmar i skärmkretsarna. Denna ström är mindre än den nollföljdstöm som går i de gemensamma fasledarna. Typiska värden för skärmströmmarna är att de utgör ca 70 % av den totala nollföljdstömmen i fasledarna vilket då också innebär att nollföljdsresistansen nästan halveras jämfört med de system där hela nollföljdstömmen tvingas gå via skärmen. Eftersom skärmresistansen nästan helt dominerar i jämförelse med fasledarnas resistans innebär 70 % skärmström att nollföljdeffekten och därmed också nollföljdsresistansen nästan halveras jämfört med om 100 % av den totala nollföljdstömmen går via skärmen.

Att använda sig av pi-länksmodellen med data enligt ABB-formlerna i beräkningar av de fullständiga näten kan betraktas som ett konservativt beräkningssätt där nollföljdsresistansen och jordfelsströmmarna blir högre jämfört med kabelmodellen. Detta innebär att näten kan byggas något större innan utlokaliserad kompensering behöver användas.

2.4.4 Traditionellt luftledningsnät

De kapacitiva jordfelsströmmarna i traditionella luftledningsnät är förhållandevis små. I det ursprungliga 24 kV-nätet uppgår t ex strömmen till knappt 25 A (se B.5). De förhållandevis små strömmarnas påverkan på reläskyddens känslighet finns det idag tekniska lösningar på.

2.4.5 Ökad kablifiering

I takt med att andelen kabel ökar i näten så ökar behovet av kompensering av den kapacitiva jordfelsströmmen. Detta kan åstadkommas med större nollpunktsreaktorer. Reaktorerna har emellertid en inbyggd egenskap som är

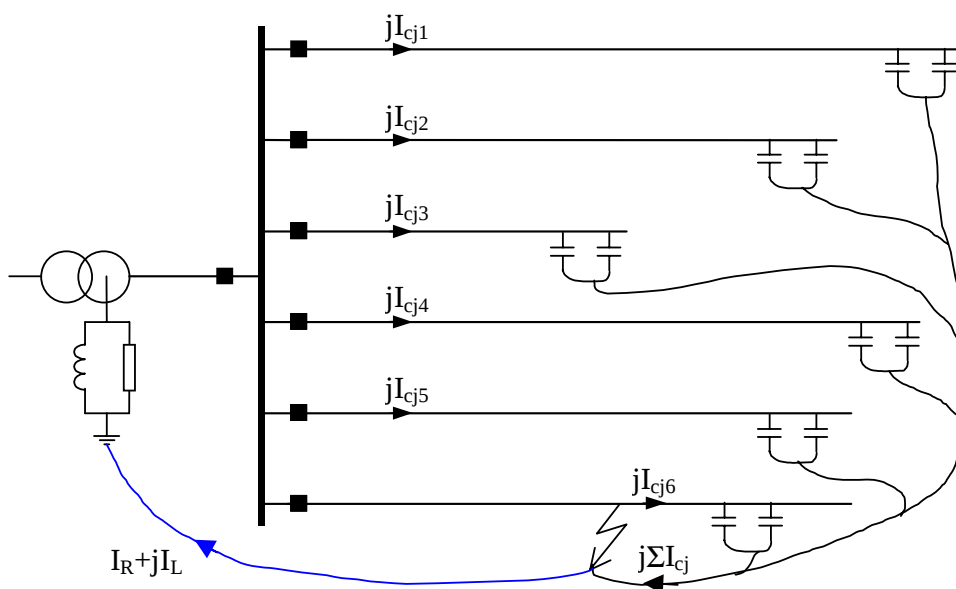
svår att komma runt: Dess *resistans*. I en typisk reaktor uppgår förlusteffekten till ungefär två procent av märkströmmen.

I ett 24 kV-kabelnät på 130 km behövs en spole på 250 A för att kompensera den kapacitiva jordfelsströmmen. Det medför en aktiv ström (beroende av resistansen i spolen) på 5 A, som ska adderas till strömmen från nollpunktsmotståndet. I ett 12 kV-nät med samma utbredning blir den kapacitiva strömmen mindre (ungefär hälften så stora), varför problemet blir mindre omfattande. Men när 12 kV-näten växer så blir problematiken påtaglig även i dessa nät. Se t.ex. B.5 - B.8.

Problemet med aktiva strömmar är att de inte kan kompenseras bort. I exemplet ovan med 130 km kabel i 24 kV-nät, ökar den aktiva strömmen med 50 % från de tänkta 10 A från stationens nollpunktsmotstånd. Det ställer motsvarande krav på nätets jordtag.

2.4.6 Aktiva bidrag från radialer vid jordfel

Vid jordfel söker sig strömmar från olika platser i nätet till felstället. I Figur 2.7 nedan visas dessa strömvägar översiktligt.



Figur 2.7 Olika strömvägar vid ett jordfel. De friska faserna bidrar med kapacitiv ström från alla ledningar.

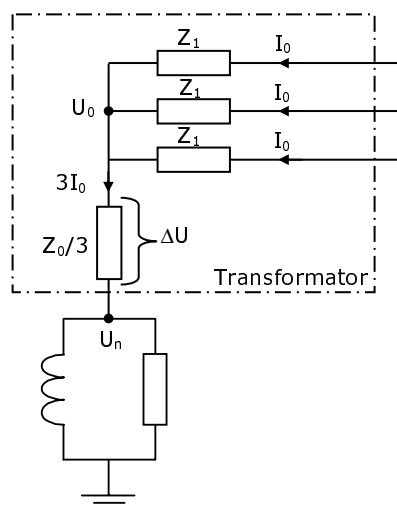
De kapacitiva strömmarna drivs av de friska fasernas huvudspänning genom ledningarna. För varje meter av ledningen läcker en liten del av strömmen ut till jord och söker sig till felstället. Men innan den når fram har den passerat ledningens nollföljdsimpedans och vridits något lite i vinkel. Annorlunda uttryckt kan man säga att det tillkommit en aktiv strömkomponent. Den resulterande strömmen passerar felstället där den reaktiva komponenten släcks ut av strömmen från reaktorn. Den aktiva komponenten överlagras på strömmen från motståndet och förlustströmmen från reaktorn.

Det hela resulterar i att den aktiva strömmen genom felstället har ökat ytterligare. Detta har visat sig vid beräkningar både i 12 och 24 kV-näten.

En kanske allvarligare konsekvens av fasvridningen är att reläskydden kanske inte mäter den ström som de är konstruerade och inställda för. Detta kan resultera i antingen utebliven felbortkoppling eller att fel ledning kopplas bort.

2.4.7 Spänningsfall över transformatorns nollföljdsimpedans

När Petersenspolens storlek ökar så ökar också strömmen genom transformatorns nollpunkt. Strömmen passerar härvid också transformatorns nollföljdsimpedans, vilket leder till ett spänningsfall. Se Figur 2.8.



Figur 2.8 Spänningsfall över transformatorns nollföljdsimpedans.

Petersenspolen är avstämmd vid nätets naturliga nollföljdsspänning (som beror på osymmetrier i nätet). Denna spänning är låg och ger inte upphov till någon större ström genom nollpunktsutrustningen. Förhållandet mellan spänning över transformator och nollpunktsutrustning är lika för normal drift resp. vid jordfel, men huvuddelen av spänningen återfinns över nollpunktsutrustningen. Vid ett lågohmigt jordfel ökar strömmen i nollpunkten dramatiskt och spänningen över spolen sjunker relativt nollföljdsspänningen. Ekvation 3 beskriver sambandet mellan spänningen och kompenseringsströmmen från spolen.

$$I_L = \frac{U_n}{2\pi f \cdot L} \quad (3)$$

Det framgår av ekvationen att om spänningen över nollpunktsutrustningen minskar med 10 % så kommer också kompenseringsströmmen minskas i samma grad. Följdaktligen så kommer strömmen i felstället att öka i motsvarande grad (observera att hänsyn måste tas till strömmarnas vinklar vid addition).

Ett annat allvarligt problem med spänningsfallet över transformatorn är den fasvridning som strömmen genom nollföljdsimpedansen ger upphov till. Om spänningsreferensen till jordfelsskydden hämtas från transformatorns nollpunkt uppstår ett vinkelfel som kan få skydden att felfunkera.

Transformatorernas nollföljdsimpedans beror på storlek, kopplingsart och om transformatorn är försedd med utjämningslindning eller inte. För vanliga trebenta transformatorer finns ungefärliga förhållanden mellan nollföljds- och plusföljdsreaktanser angivna i Tabell 2-1, [2]. Observera att skillnaderna inom samma kopplingsart kan vara stora. Kontroll av ett antal nya levererade YNyn transformatorer visar också att värdena kan variera högst påtagligt.

Kopplingsart	X_0/X_1
Yyn X/12 kV	3-10
Yynd X/12 kV	1-2,4
Dyn X/12 kV	0,7-1
YNy 12/X kV	3-10
YNz 12/X kV	3-10
ZNy 12/X kV	0,1-0,15

Tabell 2-1 Ungefärliga förhållanden mellan noll- och plusföljdsreaktans för olika transformatorkopplingar.

Om transformatorns nollföljdsreaktans är stor jämfört med reaktansen som behövs för att kompensera nätets nollföljdskapacitans måste detta beaktas. Transformator och reaktor i serie motsvarar då reaktorns reaktans minus en tredjedel av transformatorns nollföljdsreaktans eftersom denna anges i ohm per fas.

En 10 MVA transformator har en plusföljdsreaktans på ca 1,2 ohm/fas vilket ger ett tillägg på ca 1,2-4 ohm i serie med reaktorn om transformatorn är Yyn kopplad och enligt värdena i tabell 2-1.

Plusföljdsreaktansen för en 100 kVA distributionstransformator uppgår till ca 50 ohm/fas. Väljs en ZNy transformator uppgår nollföljdsreaktansen till ca 2 ohm och till 50-165 ohm om någon av de andra transformatorerna väljs.

Eftersom nollföljdsreaktansen är strömberoende kan det innebära problem då en viss del av reaktansen påverkas beroende på om felet är höghohmigt eller inte. Att välja så låg nollföljdsreaktans som möjlig är att föredra, dock bör den ställas i relation till nollpunktsreaktors reaktans.

Om nollpunktsreaktorn i matande station är dimensionerad för stora kompenseringströmmar kan en extra deltalindning i matande transformator vara en möjlig lösning eftersom dess nollföljdsreaktans och nollföljdsresistans normalt är betydligt mindre jämfört med en transformator med kopplingsart YNyn. Som jämförande exempel har en 200 A reaktor med en reaktans på ca 32 ohm används i serie med en 10 MVA YNyn transformator med nollföljdsreaktans på 4 ohm $\pm$ 10 %. 10 % antas vara den strömberoende variationen. Tillsammans ger detta en maximal snedavstämning på ca 4,5 A pga. transformatorns strömberoende nollföljdsreaktans. Motsvarande snedavstämning för en 100 A reaktor innebär då ca 2,2 A.

Snedavstämningen bör ställas i relation till övriga bidrag till snedavstämning som t ex skillnad i avstämning vid 20 000 ohm och stumt jordfel samt reaktorns regleronoggrannhet. I beräkningarna som utförts används 20 000 ohm avstämning men i verkligheten används oftast nätets osymmetrier för att stämma av reaktorn som också motsvarar ett högre ohmtal.

I det fall då nollpunktsreaktorn har stor märkström, transformatorn är liten samt nätets jordtagsvärden är höga bör transformatorn kontrolleras med avseende på nollföljdsreaktans och nollföljdsresistans.

I Figur 2.9 visas fasströmmarna i en transformator vid jordfel i nätet. Om transformatorn är högt lastad vid feltillfället och om nätet har mycket kapacitiv jordfelsström finns det en risk att transformatorns överströmskydd n löser ut. Detta begränsar hur stora kapacitiva strömmar som kan hanteras av en viss transformatorstorlek.



Motsvarande problem som i avsnitt 2.4.8 kan också dyka upp i ledningsfacken. I ledningsfack med mycket kapacitivt bidrag räcker det inte med att beakta lastströmmen vid inställning av överströmsskyddets startsteg. För att erhålla den största strömmen, som uppstår vid höglastsituationer och samtidigt jordfel i angränsande fack, måste också en tredjedel av den kapacitiva jordfelsströmmen från det egna facket adderas till lastströmmen. Startsteget bör inte ställas lägre än:

15

2.4.10 Nollföljdsspänningen är inte lika i hela nätet

Beräkningarna har visat att nollföljdsspänningen i stora kabelnät inte är lika stor i alla punkter, varken till belopp eller till vinkel. Detta framgår i bilaga B.7. Anledningen är att nollföljdsströmmarna i de olika ledningarna i samband med jordfel ger upphov till spänningsfall över ledningarnas nollföljds-impedanser.

En praktisk konsekvens av olika nivåer på nollföljdsspänning i nätet kan vara understationer där de riktade jordfelsskyddens frigivningsspänning blir något annat än vad det spänningsmätande jordfelsskyddet i den matande stationen mäter.

2.4.11 Utlokaliserad kompensering – lösningen på alla problem?

Många av de problem som uppstår när luftledningsnät kablifieras har förmodats kunna lösas med lokal kompensering av de kapacitiva jordfelsströmmarna. Under arbetet har det lagts stor vikt vid att utreda konsekvenserna av utlokaliserad kompensering.

Problem uppstår då stora jordfelsströmmar ska hanteras centralt i den matande stationen. Tex gör spänningsfall över transformatorns nollföljds-impedans att de kapacitiva strömmarna inte kan kompenseras fullt ut. Precis som reaktiv effekt vid normaldrift ger upphov till förluster ger de reaktiva jordfelsströmmarna upphov till nollföljdeffekt och spänningsfall. Tanken att hantera problemet vid källan, precis som med reaktiv effekt, är inte långsökt.

En aspekt med utlokaliserad kompensering är att de också bidrar med nollföljdeffekt precis som de traditionella reaktorerna. Mätningar på installerade reaktorer visar på avgiven nollföljdeffekt i storleksordningen 1,5 %. I 24 kV nät med 15 A utlokaliserade reaktorer motsvarar det ungefär 0,2 A aktiv strömkomponent. Så länge R/X är samma för alla reaktorer i nätet har detta emellertid ingen större betydelse. Storleksordningen på den nollföljdeffekt som genereras är ungefär densamma oberoende av var reaktorerna sitter.

För $R/X=2,5$ % ger detta vid 12 kV (10 A spole) ett aktivt strömbidrag som adderas till felströmmen vid stumt jordfel på 0,25 A. Motsvarande siffra för 24 kV (15 A spole) är 0,4 A.

Den stora skillnaden mellan lokal och central kompensering beror i stället på att lokal kompensering kraftigt minskar nollföljdeffekten i den matande transformatorn och i serieimpedansernas resistiva del. En första fråga som dyker upp när man börjar planera för lokal kompensering är hur mycket som ska kompenseras vid varje enhet. Tanken är att lokalkompenseringen ska anslutas till en nollpunkt i lämplig nätstation. Distributionstransformatorn behöver en utdragen nollpunkt och för att kunna balansera osymmetrier i lågspänningsnätet är z-kopplade transformatorer önskvärda. Storleken på transformatorn och nollföljdsimpedansen är avgörande för hur mycket ström som kan belasta nollpunkten.

Arbete, som legat utanför ramen för det här projektet, har visat att 10 A kompenseringsström för 12 kV-nät och 15 A för 24 kV-nät är rimliga värden för varje enskild lokalkompensering. Data för utrustningen som använts vid beräkningarna återfinns i bilaga B.1.5.

Vid dessa storleken på kompenseringen är det ungefärliga avståndet för placering mellan enheterna givet. Lämplig sträcka för båda näten är att de placeras var 5:e km. Beroende på val av kabeltyp kan avstånden variera eftersom kabelns kapacitans mot jord skiljer sig åt mellan olika kabeltyper.

Exempel hittas i bilaga B.8.

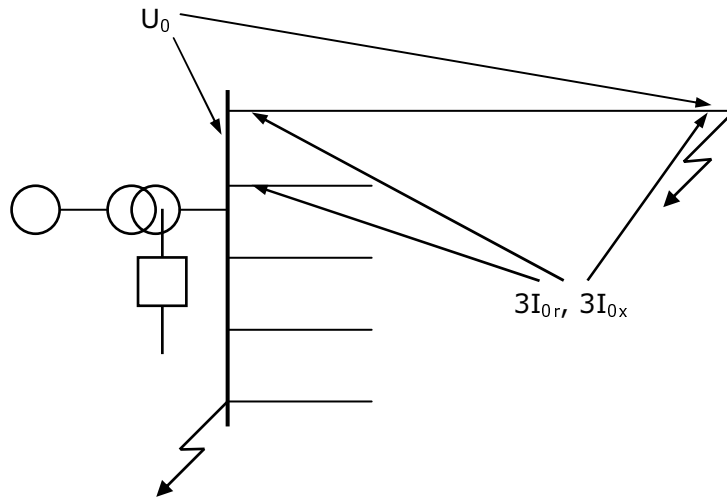
2.5 Sammanställning av beräkningarna

2.5.1 12 kV beräkningar

Beräkningar för de rent radiella 12 kV-näten har gjorts enligt följande och sammanställts i Tabell 2-2 och 2-3:

- Nollföljdsspänning vid matande station samt längst ut på längsta ledningen vid stumt jordfel i matande station. (Kolumn 1)
- Nollföljdsspänning i matande station vid jordfel på längsta linjen med 20 000 ohm övergångsresistans. (Kolumn 2)
- Nollföljdsström uppdelat i $3I_{r0}$ och $3I_{x0}$ ut på längsta linjen vid jordfel längst ut med 5 000 ohm övergångsresistans. (Kolumn 3)
- Nollföljdsström uppdelat i $3I_{r0}$ och $3I_{x0}$ på kortaste och längsta linjen för kontroll av sympatiutlösning och när stumt jordfel inträffar i närheten av matande station. (Kolumn 4 och 5)
- Nollföljdsström i felstället uppdelat i I_{r0} och I_{x0} och vid stumt jordfel i matande station och längst ut på längsta linjen för kontroll av spänningssättande jordfelsström. (Kolumn 6)
- Transienta strömmar i felstället då fel inträffar vid spänningens toppvärde. Jordtagsresistans 10 ohm och fel som inträffar i matande station och längst ut på längsta linjen. Max spänning inom parantes. (Kolumn 7)
- Nätet har stämts av vid 20 000 ohms fel i matande station.
- 5 A nollpunktsmotstånd har används om inte annat angivits.
- Nätet har varit i tomgång om inte annat angivits.
- Matande transformator 10 MVA, 9 % plusföljdsreaktans, plusföljdsresistans 1,8 %, YNyn-kopplad utan nollpunktsanslutning på uppspänningssidan. Nollföljdsvärden = $10 \times$ plusföljdsvärden. Vid fallen med utjämningslindning har nollföljdsvärden och plusföljdsvärden för reaktans och resistans satts lika.
- Utlokaliserad kompensering ansluten till 100 kVA transformatorer, $I_x=10$ A, $I_r=0,3$ A samt 400 kVA transformatorer med $I_x=40$ A, $I_r=1$ A. Uppgifter för 100 kVA transformatorn är för standardutrustningar som finns tillgängliga. Uppgifter för 400 kVA transformatorn med tillhörande nollpunktsreaktor är antagna värden där kvoten I_r/I_x antagits kunna bli lägre vid större storlekar.
- Driftspänning har reglerats till 11 kV.

- Kabel som använts har varit AXKJ 95/25 och luftledning FeAl 62 om inte annat angivits.



Figur 2.10 Figuren åskådliggör var beräkningarna i 12 kV nätet utförts.

Figur 2.10 visar var beräkningarna utförs i nätet. Beräkningarna görs för att kontrollera de värden som motsvarande reläskydd detekterat, nollföljdspänningar samt de spänningssättande jordfelsströmmarna i felstället. Nätet är systemjordat i transformatorns nollpunkt. Beräkningarna har utförts med avstämt nät och med olika värden på nollpunktsmotståndet.

Tabell 2-2 och 2-3 visar sammanställning av beräkningar. Beräkningarna finns i bilagorna A1-A15.

Nätkonfiguration, Bilaga	1 Max U_0, längst ut och i matande station	2 U_0, 20 000 ohm	3 I_{r0}, I_{x0}, 5000 ohm	4 I_{r0}, I_{x0} Back- riktning kortaste linjen	5 I_{r0}, I_{x0} Back- riktning längsta linjen	6 I_{r0}, I_{x0}, 0 ohm, matande station och längst ut	7 I_{max} transient, matande station och längst ut
5x50km FEAL 62, A1	6,35 kV, 6,35 kV	750 V (12%)	1 A , 0,35 A	-0,001A, 1,3 A	-0,001A, 1,3 A	5 A , 0,3 A	100 A (1000V) 40 A (400V)
4x(10+10)+ 40 km AXKJ 95/25, A2	7 kV, 6,35 kV	275 V (4,3%)	0,7 A 6,7 A	-0,1A, 20 A	- 8 A, 82 A	15 A , 0 A 12 A, -2 A	750 A (7500V) 420 A (4200V)
4x(10+10)+ 40 km AXKJ 95/25, Last 4 MW, 3 MVar, A3	7 kV, 6,35 kV	250 V (3,9%)				15 A , 0 A	710 A (7100V) 360 A (3600V)
4x(10+10)+ 30 km AXKJ 95/25, A4		400 V (6,3%)				10 A , 0 A 8 A, -2 A	
4x(10+10)+ 50 km AXKJ 95/25, A5		180 V (2,8%)				23 A , 0 A	
4x(10+10)+ 60 km AXKJ 95/25, A6	7,7 kV, 6,35 kV	120 V (1,9%)	0,3 A 5 A	-0,1A, 20 A	- 30 A, 130 A	40 A , 0 A 20 A, -12 A	860 A (8600V) 420 A (4200V)
4x(10+10)+ 60 km AXKJ 95/25, trafo utjämningsl. A6		135 V (2,1%)	0,2 A 5,5 A			35 A , 0 A	
4x(10+10)+ 80 km AXKJ 95/25, A7	8,4 kV , 6,35 kV	60 V (0,9%)	0,2 A 3,1 A	-0,1A, 20 A	- 80 A, 180 A	90 A , 0 A 28 A, -32 A	770 A (7700V) 420 A (4200V)

Tabell 2-2 Sammanställning av beräkningar.

Nätkonfiguration, Bilaga	1 Max U₀, längst ut och i matande station	2 U₀, 20 000 ohm	3 I_{r0}, I_{x0}, 5000 ohm	4 I_{r0}, I_{x0} Back- riktning kortaste linjen	5 I_{r0}, I_{x0} Back- riktning längsta linjen	6 I_{r0}, I_{x0}, 0 ohm, matande station och längst ut	7 I max transient, matande station och längst ut
4x(10+10)+ 20+2x30 km AXKJ 95/25, uppdelad, A7			0,3 A 4,3 A			60 A , 0 A	
4x(10+10)+ 80 km AXKJ 95/25, 10x10A Komp. A8	6,5 kV, 6,35 kV	300 V (4,7%)	0,7 A 5,5 A	-0,1A, 20 A	- 6 A, 62 A	13 A , 0 A 11 A, -1 A	770 A (7700V) 240 A (2400V)
4x(10+10)+ 60 km AXKJ 95/25, öppna skärmkretsar A9	10,8 kV , 6,35 kV	230 V (3,6%)	0,8 A 12 A	-0,1A, 20 A	- 15 A, 170 A	25 A , 0 A 10 A, -2 A	760 A (7600V) 420 A (4200V)
4x(10+10)+ 60 km AXKJ 95/25, öppna skärmkretsar A9	10,8 kV , 6,35 kV	230 V (3,6%)	0,8 A 12 A	-0,1A, 20 A	- 15 A, 170 A	25 A , 0 A 10 A, -2 A	760 A (7600V) 420 A (4200V)
4x(10+10)+ 60 km AXKJ 3x1x95/25, A10	6,7 kV, 6,35 kV	158 V (2,5%)	0,4 A 5,8 A	-0,1A, 20 A	- 20 A, 120 A	27 A , 0 A 20 A, -8 A	
4x(10+10)+ 160 km reservm. AXKJ 95/25, 20x10 Komp. Mittk. A11	7 kV, 6,35 kV	65 V (1 %)	0,2 A 2,2 A			80 A , 0 A	
4x(10+10)+ 160 km reservm. AXKJ 95/25, 32x10 Komp. Fullk. A11	5,9 kV, 6,35 kV	250 V (3,9%)	0,4 A 0,35 A			15 A , 0 A	
5x30 km AXKJ 95/25, A12	6,1 kV, 6,2 kV	135 V (2,1%)	1,1 A 2,5 A	-3 A 60 A	-3 A 60 A	27 A , 0 A 22 A, 0 A	740 A (7400V) 400 A (4000V)
5x30 km AXKJ 95/25, utan nollpm. A12			1,1 A 2,8 A				
5x60 km AXKJ 95/25, A13	7,8 kV , 6,3 kV	24 V (0,4%)	1,3 A 0,9 A	-28 A 130 A	-28 A 130 A	200 A , 0 A 75 A, -20 A	770 A (7700V) 420 A (4200V)
5x60 km AXKJ 95/25, 5x8x10 A Komp. A14	6,35 kV, 6,35 kV	150 V (2,4%)	1 A 1,9 A	-4 A, 40 A	- 4 A, 40 A	25 A , 0 A 22 A, 0 A	770 A (7700V) 240 A (2400V)
4x(10+10)+ 60 km AXKJ 95/25, 24kV A15	7,2 kV, 6,35 kV	240 V (3,8%)	0,5 A 5,8 A	-0,1 A, 20 A	- 10 A, 82 A	19 A , 0 A 13 A, -4 A	750 A (7500V) 390 A (3900V)

Tabell 2-3 Sammanställning av beräkningar.

Utifrån sammanställningen enligt Tabell 2-2 och 2-3 har bl.a. följande framkommit:

- Hög nollföljdspänning ger normalt inga problem förutom i de fall då långa kabelradialer används eller då öppna skärmkretsar används. Problem med luftledningar belyses i en separat analys
- Problem att detektera 20 000 ohm vid långa kabelradialer utan utlokaliserad kompensering, samt för stora nät med många långa kabelradialer.
- God förmåga att detektera 5 000 ohm i stora kabelnät med många kabelradialer samt även för nät med enstaka långa kabelradialer som är kompenserade.
- Motriktat Ir för kabelradialer ger ökad säkerhet mot sympatiutlösningar för de riktade jordfelsskydden.
- Belastningens påverkan på resultaten är liten
- Resulterande jordfelsströmmar är högre i närheten av matande station jämfört med längre ut i nätet
- Beroende på nätets jordtagsresistanser, kablarnas nollföljdsresistanser och nollföljdskapacitanser kan gränser för nätstorlekar fastställas. Enligt beräkningarna och med jordtagsresistanser på 6-7 ohm och med förutsättning max 100 V beröringsspänning visar det sig att en enkel kabelledning på ca 40 km kan byggas utan att utlokaliserad kompensering behöver användas. 20 000 ohms fel kan dock vara svåra att detektera.
- Enligt beräkningar och med jordtagsresistanser på 4-5 ohm kan ett kabelnät på 5x30 km byggas utan att utlokaliserad kompensering behöver användas. 20 000 ohms fel kan dock inte detekteras med traditionella nollpunktsspänningsskydd.
- Enligt beräkningar med utlokaliserad kompensering och jordtagsresistanser på 7-8 ohm kan exempelvis en ren kabelradial på ca 80 km byggas.
- Enligt beräkningar med utlokaliserad kompensering och jordtagsresistanser på 4-5 ohm kan ett kabelnät på 5x60 km byggas. 20 000 ohms fel kan dock inte detekteras.
- Transienta spänningsättande jordfelsströmmar är genomgående höga och är högre i matande station jämfört med längst ut på ledningarna.
- Nollpunktsmotståndet har liten påverkan för nät med flera relativt långa kabelledningar och för nät med stor central kompensering.
- Utjämningslindning förbättrar förmågan att detektera 20 000 ohms fel, försämrar förmågan att detektera 5 000 ohm fel samt minskar resulterande jordfelsström. För transformatorer med utjämningslindning har nollföljdsresistansen och nollföljdsreaktans förutsatts lika transformatorns plusföljdsvärden i beräkningarna. Att använda utjämningslindning innebär minskad nollföljdseffekt och påverkar

förmågan att detektera jordfel på samma vis som när nollpunktsmotståndet tas bort eller ersätts med ett motstånd med högre resistans.

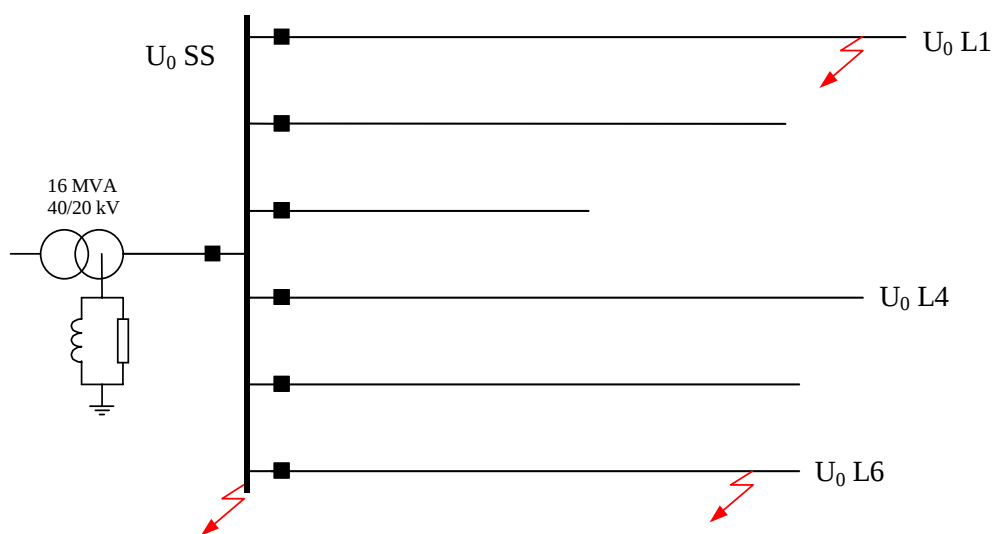
- Att utnyttja stor eller liten spoleffekt för utlokaliserad kompensering har marginell betydelse i fråga för de storlekar på lokalkompensering som använts.
- En utgrenad radial med samma totallängd som en radial utan utgreningar ger bättre förmåga att detektera 5 000 ohms fel samt ger mindre resulterande jordfelsström.
- Med användande av kabel med lägre värden på nollföljdsresistansen t ex treledarkabel med högre area och med lägre nollföljdskapacitans t ex 24 kV kabel förbättras möjligheten till att detektera 5 000 och 20 000 ohms fel, samt att resulterande jordfelsström reduceras.
- Reservdriftläggning med matning från annan matande station eller från egen slinga kan innebära problem om inte hela ledningen har utlokaliserad kompensering.
- För okompenserad ledning där kompenseringen sker centralt är resulterande resistiva jordfelsströmmen ungefär kvadratisk beroende av kabelledningens nollföljdskapacitans och ungefär linjärt beroende av nollföljdsresistansen.
- För ledningar och nät som har utlokaliserad kompensering minskar inverkan av nollföljdsresistansen och nollföljdskapacitansen och den spänningssättande jordfelsströmmen beror då i huvudsak på det aktiva strömbidraget från all utlokaliserad kompensering, centralkompensering, nollpunktsmotstånd och transformator om denna saknar utjämningslindning.

2.5.2 24 kV beräkningar

Beräkningarna i 24 kV-näten utgår från typnätet som framgår av Figur 2.1. Det ursprungliga luftledningsnätet har därefter kablifierats i två omgångar. I det slutliga kabelnätet har därefter de reaktiva jordfelsströmmarna kompenserats lokalt.

Det ursprungliga nätet har en modest kapacitiv jordfelsström på drygt 24 A. I nästa steg uppgår strömmen till 244 A. När nätet har som mest kabel slutar strömmen på 525 A. Det ska i sammanhanget nämnas att ett så pass stort kabelnät i verkligheten knappast kan anslutas till en 16 MVA transformator – med en märkström på 440 A –, men som åskådliggörande exempel tjänar det sitt syfte. I det kablifierade nätet har beräkningar gjorts med lokal kompenserings. Reaktorer med 15 A märkström har placerats utspridda i nätet för att så väl som möjligt kompensera de olika nätavsnitten. Se bilaga B.8.

I nätmodellerna har en rad olika jordfel applicerats. Figur 2.11 åskådliggör var i nätet som jordfelen har applicerats. Vid varje felställe har felresistansen varierats mellan 0 ohm och 20 000 ohm. I bilagor B.5 till B.8 redovisas varje simulerat fall i överskådliga enlinjescheman. I det följande redovisas de huvudsakliga resultaten från beräkningarna.



Figur 2.11 Jordfel har applicerats på olika platser i nätet.

Nollföljdsspänningen i nätet

Den klassiska läran om jordfel i icke direktjordade nät säger att nollföljdsspänningen är densamma i hela nätet. Beräkningarna visar att detta är en sanning med modifikation. Den reaktiva strömmen som uppstår vid jordfel orsakar spänningsfall över nollföljdsimpedansen i ledningarna. I små nät kan dessa spänningsfall i princip försummas, men när näten växer ökar problematiken. I Tabell 2-4 presenteras nollföljdsspänningen för olika platser i nätet vid stumma jordfel applicerade enligt Figur 2.10.

Det är intressant att notera att nollföljdsspänningen i en del fall överstiger fasspänningen som i 24 kV näten uppgår till 12,5 kV.

Nät	Felläge	U ₀ SS, [kV]	U ₀ L1, [kV]	U ₀ L4, [kV]	U ₀ L6, [kV]
Ursprungligt nät 6 km kabel och 177 km luftledning	Samlingsskenan	12,5	12,6	12,6	12,6
	Slutet av ledning 1	12,3	12,4	12,3	12,3
	Slutet av ledning 6	12,3	12,4	12,4	12,5
Delkablifierat nät 93 km kabel och 105 km luftledning	Samlingsskenan	12,6	12,7	12,7	13,1
	Slutet av ledning 1	12,0	12,5	12,4	12,0
	Slutet av ledning 6	12,3	12,3	12,7	12,3
Kablifierat nät 243 km kabel och 17 km luftledning	Samlingsskenan	12,9	12,9	12,2	12,9
	Slutet av ledning 1	7,0	10,5	6,6	7,0
	Slutet av ledning 6	8,2	8,3	7,8	11,7
Kablifierat nät med lokal kompensering 243 km kabel och 17 km luftledning	Samlingsskenan	12,8	12,8	12,7	12,8
	Slutet av ledning 1	12,1	12,7	12,0	12,1
	Slutet av ledning 6	12,1	12,1	12,0	12,7

Tabell 2-4 Nollföljdsspänningen vid olika stumma jordfel.

Nollpunktsutrustningens verkningsgrad

Nollpunktsutrustningens uppgift är, förutom att förbinda systemets nollpunkt till jord, att tillförsäkra en lagom stor jordfelsström. Detta sker genom att motståndet dimensioneras för en viss ström vid *fasspänning* och att reaktorn ges en viss induktans. Vid ett jordfel är tanken att reaktorn ska generera en reaktiv ström som är motriktad den ström som genereras av kablarna.

Beräkningarna har visat att reaktorn, framförallt vid stora strömmar, inte kan leverera den tänkta kompenseringssströmmen. Anledningen är det spänningsfall som hamnar över transformatorns nollföljdsimpedans, vilket leder till att reaktorn genererar en mindre kompenseringssström. I Tabell 2-5 presenteras siffror för simulerade jordfel på samlingsskenan i de olika näten. I dessa simuleringar används en modell av en transformator utan utjämningslindning. Samma felfall presenteras i Tabell 2-6 med enda skillnaden att beräkningarna nu gjorts med en modell av en transformator med utjämningslindning.

Nät	U ₀ vid samlingsskenan	U ₀ över reaktorn	Inställd reaktorström	Faktisk reaktorström
Ursprungligt nät 6 km kabel och 177 km luftledning	12,5 kV	12,5 kV	24,5 A	24,3 A
Delkablifierat nät 93 km kabel och 105 km luftledning	12,6 kV	12,3 kV	244 A	239 A
Kablifierat nät 243 km kabel och 17 km luftledning	12,9 kV	12,0 kV	525 A	502 A
Kablifierat nät med lokal kompensering 243 km kabel och 17 km luftledning	12,8 kV	12,7 kV	13,5 A	13,8 A

Tabell 2-5 Nollpunktsutrustningens verkningsgrad är beroende av felfströmmen. Tabellen visar beräknade värden för en transformator utan utjämningslindning.

Nät	U ₀ vid samlingsskenan	U ₀ över reaktorn	Inställd reaktorström	Faktisk reaktorström
Ursprungligt nät 6 km kabel och 177 km luftledning	12,5 kV	12,5 kV	24,5 A	34,2 A
Delkablifierat nät 93 km kabel och 105 km luftledning	12,6 kV	12,4 kV	255 A	255 A
Kablifierat nät 243 km kabel och 17 km luftledning	12,8 kV	12,3 kV	640 A	627 A
Kablifierat nät med lokal kompensering 243 km kabel och 17 km luftledning	12,8 kV	12,8 kV	14 A	19,9 A

Tabell 2-6 Nollpunktsutrustningens verkningsgrad är beroende av felströmmen. Beräkningarna är gjorda med transformatorn modellerad med utjämningslindning.

Som framgår av skillnaden mellan Tabell 2-5 och Tabell 2-6 har utjämningslindningen en inte helt oväsentlig inverkan.

Fasvridning över transformatorns nollföljdsimpedans

En annan konsekvens av strömmen genom transformatorns nollföljdsimpedans är den fasvridning av spänningen som uppstår. I Tabell 2-7 presenteras fasvridningen för de olika näten vid stumt jordfel på samlingsskenan. Om de riktade jordfelsskydden i stationen hämtar referensspänning från transformatorns nollpunktsuttag kan vinkelvridningen inverka menligt på skyddens tillförlitlighet.

Nät	Transformator med utjämningslindning	Transformator utan utjämningslindning
Ursprungligt nät 6 km kabel och 177 km luftledning	0,0°	0,8°
Delkablifierat nät 93 km kabel och 105 km luftledning	0,2°	7,9°
Kablifierat nät 243 km kabel och 17 km luftledning	0,6°	16,4°
Kablifierat nät med lokal kompensering 243 km kabel och 17 km luftledning	0,0°	0,5°

Tabell 2-7 Fasvridningen över transformatorns nollföljdsimpedans kan påverka reläskyddsfunktionen om referensspänning hämtas från nollpunkten.

Fasvridning av de kapacitiva jordfelsströmmarna i ledningarna

När de kapacitiva jordfelsströmmarna som genereras i ledningarna söker sig till reaktorn passerar de ledningarnas nollföljdsimpedanser. Härvid uppstår en fasvridning som i ledningsfacken framstår som att en aktiv komponent tillkommit. Denna aktiva strömkomponent kan av naturliga skäl inte kompenseras bort av reaktorn utan kommer att adderas till strömmen i felstället. Det är framförallt stora kapacitiva bidragsgivare (långa kablar) som är placerade bortanför höga nollföljdsimpedanser (luftledning utan längsgående jordlina) som ger upphov till fasvridningen. I Tabell 2-8 visas beräknade fasvridningar vid stumt jordfel i det fullt kablifierade nätet. Ytterligare exempel kan hittas i framförallt bilagor B.6 och B.7.

Felläge	Fack 1 [A]	Fack 2 [A]	Fack 3 [A]	Fack 4 [A]	Fack 5 [A]	Fack 6 [A]
Samlings-skenan	58,9 $\angle 87,3^\circ$	38,6 $\angle 83,1^\circ$	2,7 $\angle 90^\circ$	63,7 $\angle 71,0^\circ$	27,7 $\angle 86,7^\circ$	23,4 $\angle 87,6^\circ$
Slutet av ledning 1	43,9 $\angle 8,4^\circ$	20,8 $\angle 83,1^\circ$	1,4 $\angle 90^\circ$	34,3 $\angle 71,0^\circ$	14,9 $\angle 86,7^\circ$	12,6 $\angle 87,6^\circ$
Slutet av ledning 6	37,6 $\angle 87,3^\circ$	24,6 $\angle 83,1^\circ$	1,7 $\angle 90^\circ$	40,6 $\angle 71,0^\circ$	17,6 $\angle 86,7^\circ$	56,0 $\angle 20,3^\circ$

Tabell 2-8 Fasvridning i ledningsfacken vid stumt jordfel i det fullt kablifierade nätet.

När de riktade jordfelsskydden utsätts för fasvinklar som går ner mot 70 grader så är risken att skydden felfungerar överhängande.

En lösning är att ta bort det som ger upphov till problemet. Om de kapacitiva jordfelsströmmarna inte söker sig hela vägen in till den matande stationen så uppstår inte fasvridningarna. Därmed minskas de aktiva strömmarna i felstället samtidigt som den för reläskydden så problematiska vinkelvridningen försvinner. I Tabell 2-9 visas beräknade värden från samma system som i tabellen ovan, med den skillnaden att de kapacitiva jordfelsströmmarna kompenseras lokalt i nätet.

Felläge	Fack 1 [A]	Fack 2 [A]	Fack 3 [A]	Fack 4 [A]	Fack 5 [A]	Fack 6 [A]
Samlings-skenan	2,2 $\angle 82^\circ$	1,5 $\angle 81^\circ$	2,7 $\angle 90^\circ$	2,5 $\angle 76^\circ$	2,7 $\angle 83^\circ$	3,2 $\angle 85^\circ$
Slutet av ledning 1	6,6 $\angle 45^\circ$	1,5 $\angle 70^\circ$	2,5 $\angle 90^\circ$	2,3 $\angle 66^\circ$	2,6 $\angle 77^\circ$	3,0 $\angle 82^\circ$
Slutet av ledning 6	2,0 $\angle 67^\circ$	1,5 $\angle 70^\circ$	2,5 $\angle 90^\circ$	2,3 $\angle 67^\circ$	2,6 $\angle 77^\circ$	7,6 $\angle 49^\circ$

Tabell 2-9 Utlokaliserade reaktorer förbättrar situationen.

3 Upptäckta problemområden

3.1 Nollpunktsutrustningens verkningsgrad.

När strömmen genom transformatorns nollpunkt blir stor på grund av att nollpunktsreaktorn är avstämd för ett stort kabelnät ändras spänningen över reaktorn. Amplituden sjunker och vinkeln ändras gentemot nätets symmetriska nollpunkt. Konsekvensen blir att kompenseringströmmen inte blir så stor som det var tänkt och att den aktiva strömmen från nollpunktsutrustningen skenbart ökar, se avsnitt 2.5.2.

Problemet uppmärksammades redan 1936 av Willheim i boken *Das Erdschlußproblem in Hochspannungsnetzen*, [4], samt 1957 av herrarna Waters och Willheim i boken *Neutral Grounding in High-Voltage Transmission*, [5]. En tumregel presenterades i sammanhanget som sa att den största reaktor som kan anslutas till en viss transformator inte får överstiga 20 % av transformatorns märkström samtidigt som spänningsfallet över nollföljdsimpedansen inte får överstiga 10 % av fasspänningen.

Exempel på spänningsfall återfinns t ex i bilaga B.7.

3.2 Fasvridning över transformatorns nollföljdsimpedans

Fasvridningen över transformatorns nollföljdsimpedans innebär att reläskydd som hämtar referensspänning från transformatorns nollpunkt utsätts för ett vinkelfel som kan resultera i felfunktion, se avsnitt 2.5.2. Storleken på beräknad fasvridning för olika strömmar återfinns i Tabell 3-1 för transformatorer med och utan utjämningslindning.

	Transformator med utjämningslindning	Transformator utan utjämningslindning
Ursprungligt nät 6 km kabel och 177 km luftledning	0,0°	0,8°
Delkablifierat nät 93 km kabel och 105 km luftledning	0,2°	7,9°
Kablifierat nät 243 km kabel och 17 km luftledning	0,6°	16,4°

Tabell 3-1 Fasvridning över nollföljdsimpedansen på transformatorer med och utan utjämningslindning vid fullt utbildat jordfel i olika nät.

3.3 Val av transformatorer

3.3.1 Krafttransformatorer

När central kompensering används ställer det krav på att krafttransformatorns nollföljdsimpedans är tillräckligt låg. Vid upphandling av nya transformatorer är det möjligt att påverka. Det gäller att hitta en bra

avvägning i fråga om vid vilka storlekar som utjämningslindning kan vara aktuellt. Små transformatorer som matar små nät är i regel inte behov av utjämningslindning. Men om samma transformator flyttas till ett nät med större utbredning kan plötsligt nollföljdsimpedansen vara för stor.

3.3.2 Distributionstransformatorer

På samma vis som för krafttransformatorer ställs det krav på distributionstransformatorer när lokal kompenserings ska anslutas. För att få en låg nollföljdsimpedans väljs ZNyn(d)- alternativt ZNzn-kopplade transformatorer för ändamålet. Dessa kopplingsarter ger låg nollföljdsimpedansen sett från både upp och nedspänningssidan.

3.4 Feldetektering, skyddsfilosofi för jordfel

I rena kabelnät kommer de typer av jordfel som skall detekteras att vara annorlunda än i luftledningsnät. De flesta fel kommer att vara lågohmiga jordfel och bestå i överslag mellan fas och skärm eller mellan faser i samband med kabelskador. Man kan däremot inte bortse från högohmiga fel, till exempel på grund av dåliga skarvar eller ändavslutningar. Många kommande kablifieringar av nät kommer att resultera i blandade nät med kvarstående krav på hög känslighet vid bortkoppling av högohmiga fel samtidigt som lågohmiga fel säkert och snabbt ska bortkopplas i kablifierade delar av nätet.

Skyddsutrustning baserad på $I_0 \cos(\varphi - \alpha)$ mätande skydd med vinkelkorrigering betraktas vara användbara för de stationära förloppen och i stora kabelnät. Dess förmåga att klara stationära fel betraktas vara acceptabelt. Däremot finns osäkerhet för dess förmåga att klara de intermittenta felen som sannolikt blir allt vanligare i och med utbyggnaden av kabelnät. Visserligen har nyare skydd mer flexibla inställningsmöjligheter vilket kan vara till fördel. Skydden har dessutom olika mätprinciper. Förmågan att klara att selektivt lösa de intermittenta felen kommer att vara en av de viktigare funktionerna vid val av skydd.

Andra typer av skydd som t ex admittansmätande skydd kan vara en möjlig lösning om kraven på känslighet ökar eller att traditionella jordfelsskydd inte klarat selektiviteten efter driftomläggningar. I och med att näten ändras i samband med driftomläggning påverkar det också hur jordfelsskydden behöver vara inställda. Detta gäller speciellt för kabelnät där mätande storheter som nollföljdspänning och den aktiva strömkomponenten kan ändras stort beroende på driftläggning.

3.5 Avledare och isolationsmarginaler

Vid utbyggnad med långa radialer kan höga nollföljdspänningar uppstå. Frågan är vilka krav som detta i så fall ställer på ventilavledare och apparater anslutna till elnätet. Skall t ex ventilavledarna ha andra avledningsnivåer och hur klarar de att avleda energi? Dessa frågor rekommenderas att undersöka närmare.

3.6 Detekteringar av höghomiga jordfel

Detektering av jordfel på minst 20 000 ohm fel är en rekommendation men inget krav. Det är dock alltid önskvärt att ha så hög känslighet som möjligt. I nät med många utgående ledningar kan det i vissa fall bli så att strömdetekteringen är känsligare än spänningsdetektering.

Bortkoppling vid 5 000 ohm fel är dock ett krav och frågan är hur känsligt skydden kan ställas. I traditionella riktade jordfelsskydd är möjlig inställningsnivå beroende på typ av skydd och mättransformatorernas noggrannhet. Skydden får inte ställas så lågt med risk för sympatiutlösning i samband med jordfel på annan ledning eller att de löser för de osymmetrier som kan uppstå vid normaldrift.

Osymmetrin förväntas minska i och med att kablifieringen utökas och luftledningsandelen minskar.

Vid driftomläggningar där långa kabelradialer ingår bör särskild hänsyn tas till inställningarna för de riktade jordfelsskydden.

Att klara felbortkoppling för kabelledningar i 12 kV nät utan utlokaliserad kompensering upp till 60-70 km bedöms vara möjligt. När det gäller sympatiutlösningar vid jordfel på annan ledning är detta inget stort problem eftersom kabelradialerna bidrar till en motriktad aktiv strömkomponent som ger ökad säkerhetsmarginal. I de fall då luftledning utan plastbelagt ledare användas minskas känslighetskraven till 3 000 ohm och inställningsnivån för reläskydden kan ställas högre. I samband med många utgående kabelledningar kan det bli problem med att få upp hög nollföljdspänning för frigivningssignal vilket måste beaktas.

4 Slutsatser

4.1 Problem med kablifieringen

Som framgår av föregående kapitel så finns det en rad olika problem som visar sig i samband med att stora luftledningsnät kablifieras. Krav från olika håll gör dock att arbetet med att kablifiera näten fortgår. Inom en relativt kort tidsperiod kommer sannolikt stora delar av de befintliga luftledningsnäten antingen att grävas ner helt och hållet eller att delkablifieras, allt beroende på de lokala förutsättningarna.

De flesta problemen kretsar kring jordfel. Det som styr hur dessa ska hanteras är starkströmsföreskrifterna ELSÄK-FS 2004:1 5 kap §7 (tidigare §B73). Här ställs krav på felbortkopplingstider och största tillåtna spänningssättning. Kraven får anses ställda på goda grunder och det finns i dagsläget ingenting som talar för att de skulle mildras.

Det återstår följdaktligen för nätägarna att hantera problemen i samband med kablifieringsprojekten. De flesta problemen kan lösas, frågan är bara till vilket pris. De bästa lösningarna är i vanlig ordning de som kostar mest, det gäller därför att veta när dessa ska tillämpas och när det räcker med enklare metoder.

4.2 Reaktiv effekt

Den reaktiva genereringen ökar då man byter ut luftledning mot kabel. Störst generering uppstår då näten är lågt lastade. Ett 300 km långt 12 kV-nät i tomgång genererar 4 Mvar. Ett 260 km långt 24 kV-nät alstrar knappt 8 Mvar vid samma låga belastning.

Även om produktionen av reaktiv effekt minskar när kablarna lastas hårdare så innebär kablifieringen en förändring. I vissa nät kan man överväga att avveckla kondensatorbatterier för att helt förlita sig på vad kablarna genererar. I andra nät, som ständigt är lågt lastade, måste man kanske installera shuntreaktorer för att hantera de reaktiva flödena. Ett övervägande som bör göras i det sammanhanget är var man lämpligast placerar reaktorerna. Är det i den matande stationen, där man kan hindra flödet till överliggande nät? Eller är det ute i nätet där man också kan motverka de förluster som är förknippade med transport av reaktiv effekt?

Om man väljer att kompensera den reaktiva effekten ute i nätet kanske det är lämpligt att kombinera shuntreaktorerna med en nollpunktsreaktor som kan ta hand om de reaktiva strömmarna som uppstår vid jordfel.

Hur man bör hantera de reaktiva effekterna är väldigt beroende av hur nätet ser ut och vilka laster man har. Därför måste varje fall studeras för sig.

4.3 Fler radiala matningar

Att bygga ut med flera radialer innebär att den spänningssättande jordfelsströmmen ökar. Flera ledningar kräver också stor kompenseringsström vilket kan påverka transformatorns bidrag till den spänningssättande jordfelsströmmen i de fall central kompenserings används. Flera radialer påverkar också möjlighet att detektera 5 000 ohm fel och kan i vissa fall också innebära att nollpunktsmotståndet i matande stationen inte behöver användas.

Tabell 4-1 visar hur spänningssättande jordfelsström i matande 12 kV-station varierar beroende på antal ledningar samt hur 5 000 ohms fel kan detekteras vid fel längst ut på en av ledningarna. Värdena anges med och utan nollpunktsmotstånd samt med en transformator med hög nollföljdsresistans lika den som används i tidigare beräkningar. Även transformator med låg nollföljdsresistans används i de fall då nollpunktsmotståndet är borttaget.

Antal ledningar 30 km kabel AXKJ 95/25	5 st	4 st	3 st	2 st
Spänningssättande jordfelsström med nollpunktsmotstånd och transformator med hög nollföljdsresistans Ir, Ix	28 A, 0 A	22 A, 0 A	16 A, 0 A	11 A, 0 A
Spänningssättande jordfelsström utan nollpunktsmotstånd och transformator med låg nollföljdsresistans Ir, Ix	14 A, 0 A	11 A, 0 A	8 A, 0 A	6 A, 0 A
Detektering 5 000 ohm med nollpunktsmotstånd och transformator med hög nollföljdsresistans, Ir, Ix	-1,1 A, -2,5 A	-1,05 A, -3,5 A	-0,95 A, -4,5 A	-0,8 A, -6,5 A
Detektering 5 000 ohm utan nollpunktsmotstånd och transformator med låg nollföljdsresistans, Ir, Ix	-0,9 A, -5 A	-0,85 A, -6 A	-0,75 A, -7 A	-0,5 A, -11 A

Tabell 4-1 Spänningssättande jordfelsström och förmågan att detektera 5 000 ohm beroende på antal radialer och nollpunktsutrustning. Negativt tecken anger riktning ut från station mot felet.

Tabellen visar att spänningssättande jordfelsström och förmågan att detektera 5 000 ohm påverkas av antal radialer, nollpunktsutrustning och transformatorns nollföljdsresistans. I nät med många utgående radialer och med längder över 30 km behöver inte nollpunktsmotstånd användas för möjlighet att känna 5 000 ohm fel. Transformator med låg nollföljdsresistans

påverkar också detekteringsförmågan och kan tillsammans med borttaget nollpunktsmotstånd bidra till betydligt lägre spänningssättande jordfelsströmmar. Två 30 km radialer motsvarar ungefär ett 5 A motstånd. Beräkningarna baseras på att all kompensering sker centralt. Vid utlokaliserad kompensering ändras förutsättningarna.

4.4 Utlokaliserad kompensering

Lokalkompensering är en fungerande lösning på problem med hantering av jordfel i stora kabelnät.

4.4.1 När måste man tillämpa utlokaliserad kompensering

En central frågeställning i samband med kablifieringsprojekt är när man måste tillämpa utlokaliserad kompensering. Nedan följer några slutsatser:

- Om den kapacitiva jordfelsströmmen i systemet är så stor att central kompensering leder till att reaktorn inte kan leverera tillräcklig kompenseringsström pga spänningsfall i transformatorns nollföljdsimpedans. Härvid bör man överväga om en ny transformator eller en nollpunktsbildare (lägre nollföljdsimpedans) kan vara ett alternativ.
- Om vinkelvridning i transformatorns nollföljdsimpedans eller långa ledningar äventyrar tillförlitlig (pålitlig och säker) felbortkoppling.
- De aktiva jordfelsströmmarna från central spole och ledningsfacken totalt är så stora att kravet på maximal spänningssättning inte kan innehållas.
- Vid långa kabelradialer som innebär att 5 000 ohm fel inte kan detekteras eller där det finns risk för förhöjd nollföljdspänning i samband med jordfel.

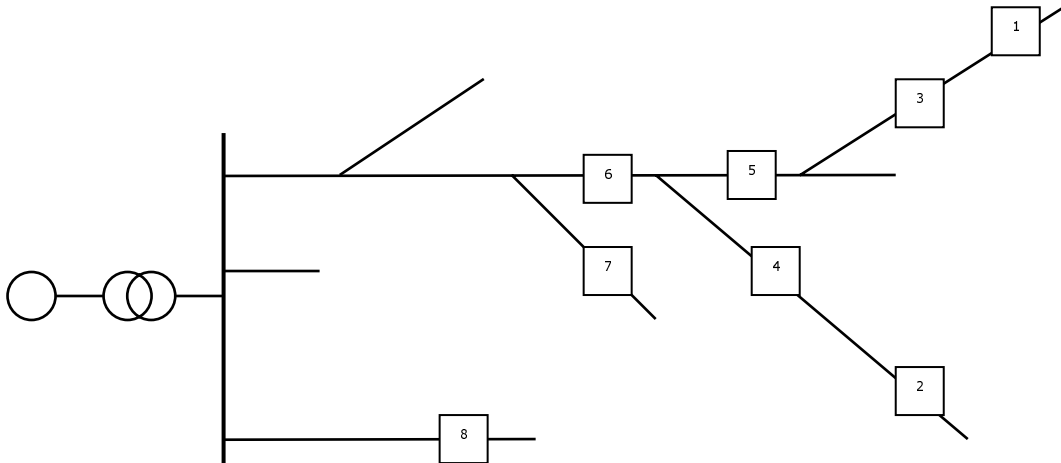
4.4.2 Optimal kompensering med utlokaliserade spolar

Den stora fördelen med utlokaliserad kompensering är att de aktiva strömmarna, som uppkommer på grund av nollföljdströmmarna, kan minimeras. Med rätt placering av de lokala reaktorerna kan man få ned de aktiva strömmarna förorsakade av kablarnas nollföljdsresistanser till ett minimum.

Prioriteringen görs från nätets ytterkanter och in mot matande station med lämplig avvägning mellan central och utlokaliserad kompensering. Varje utlokaliserad reaktor placeras för att så nära som möjligt kompensera respektive kabelavsnitt, t ex bör placering inte göras allra längst ut i en kabelradial. Figur 4.1 visar schematiskt hur en prioritering kan göras. Området närmast den matande stationen behöver inte kompenseras lokalt utan kan hanteras från den centrala reaktorn.

Naturligtvis ska de reservdriftfall som kan förutses beaktas. Ledningsavsnitt som ligger nära en station kan t ex hamna längst ut vid en driftomläggning. Det är också fördelaktigt om man kan placera kompenseringen med hänsyn

till hur frångiljare i nätet är placerade. På så vis kan man få nätet att bli avstämt även efter att en delsträcka har sektionerats bort.



Figur 4.1 Utplacering av lokal kompensering bör göras i nätets ytterområden först.

4.4.3 Utlokaliserad kompensering längs en radial

Tabell 4-2 visar hur lokal kompensering påverkar den spänningssättande jordfelsströmmen. Beräkningarna har gjorts med ett 12 kV-nät med fyra utgående ledningar med 10 km kabel och 10 km luftledning och med en 80 km lång kabelradial. Kabelradialen har successivt kompenserats utifrån och in med 10 km åt gången.

När det gäller spänningssättande jordfelsström visar det sig att det inte är någon mening att ha utlokaliserad kompensering närmast matande station. Om det finns behov av reservmatningsvägar och för att lokalkompensera i stället för att centralkompensera kan det dock finnas skäl att även kompensera närmast matande station.

Kompenserad del av ledning	Jordfelsström
0 km	90 A
10 km	62 A
20 km	41 A
30 km	27 A
40 km	18 A
50 km	13 A
60 km	11 A
70 km	10 A
80 km	11 A

Tabell 4-2 Delar av en 80 km kabelradial har kompenserats lokalt (med början längs ut). Tabellen visar hur det påverkar jordfelsströmmen vid stumt jordfel.

Tabellen visar att spänningssättande jordfelsström ökar då den okompenserade ledningslängden ökar. Förklaringen till den stora ökningen är att strömmen som går från centralkompenseringen (reaktiv transport) utvecklar stor nollföljdseffekt i kabeln. Denna nollföljdseffekt ökar ungefär kvadratisk beroende på nollföljdsströmmen. Nollföljdseffekten ökar också linjärt beroende på nollföljdsresistansen i kabeln. För resultaten i tabellen ingår också aktiva bidrag från all kompenseringsutrustning centralt som lokalt.

4.4.4 Storlek för utlokaliserad kompenserings

Hur mycket kompenseringsström som varje utlokaliserad reaktor ska bidra med kan väljas på olika sätt. Med tanke på omfattningen av de pågående kabelfieringsprojekten i landet torde standardiserad utrustning vara att föredra.

Att utnyttja 100 kVA transformatorer för att ansluta reaktorerna är fördelaktigt eftersom det är en vanligt förekommande storlek. Man bör dock tänka på att matcha transformator och reaktor så att inte transformatorn löser ut för reaktorns bidrag till kompenserings vid jordfel i nätet.

Att välja större distributionstransformatorer med större spoleffekt är också en möjlig lösning. Beräkningarna visar att utlokaliserad kompenserings upp till 50 A inte innebär någon skillnad jämfört med om mindre spolar används. 50 A innebär ca tio km kabel som kompenserar i varje riktning. Nollföljdsresistansen i kabeln påverkar mer då spolarna placeras glest. I beräkningarna har förutsatts att kvoten mellan nollföljdsresistans och nollföljdsreaktans minskar något med ökad storlek på lokalkompenseringen och tillhörande distributionstransformator.

Att använda mindre storlekar för den utlokaliserade kompenseringen innebär tätare placering vilket underlättar vid driftomläggningar och sektioneringar.

På samma vis som för krafttransformatorerna bör distributionstransformatorer med ansluten lokal kompensering ha en så låg nollföljdsresistans som möjligt. För 100 kVA transformatorer med tillhörande 10 A spolar har nollföljdsresistansen reducerats till ett lågt värde. Att ytterligare reducera värdet för nollföljdsresistansen innebär att större kabelnät kan byggas.

Om ZNzn-transformatorer väljs i distributionsnätet bör utlösning villkoren i lågspänningsnätet ses över eftersom transformatorns nollföljdsreaktans sett ifrån lågspänningssidan blir lägre jämfört med då Dyn-transformatorer används.

4.5 Särjordning

Normalt förutsätts att mellanspännings- och lågspänningsnätet har gemensam jordning. I de fall då särjordning används kan en högre spänningssättande jordfelsström accepteras. För och nackdelar med särjordning jämfört med samjordning utreds inte inom detta arbete.

4.6 Snedavstämning

Normalt bör näten vara så bra avstämda som möjligt och det ställs stora krav på att nollpunktsutrustningen har säker funktion eftersom en snedavstämning kan få stora konsekvenser för personsäkerheten pga. de spänningssättande jordfelsströmmarna. I och med att större centralkompensering används ökar också riskerna. Beroende på jordtag kan olika grad av snedavstämning accepteras. I vissa fall med långa ledningar kan en viss reaktiv strömkomponent uppstå i felstället även då nätet centralt är fullt avstämt. Om jordtagen är sämre långt ut kan detta kompenseras med att en viss överkompensering sker centralt. Detta berör enbart de fall med långa okompenserade ledningar.

Felbortkoppling försämras om nätet är dåligt avstämt. Beräkningar visar dock på att förmågan att detektera 5 000 ohm påverkas marginellt även om nätet är snedavstämt med 10 %. Den resistiva strömkomponenten som skyddet detekterar påverkas inte nämnvärt.

4.7 Bortfall av central kompensering

Utebliven central kompensering kan ställa till problem med extremt stor spänningssättande jordfelsström. Vid fel på en stor central kompensering kan spänningssättande jordfelsström innebära personfara och bli betydligt högre än vad som är angivet i normer och föreskrifter. Jämför med befintliga stadsnät där jordtagsvärdena normalt är låga kommer problemen i landsbygdsnäten bli betydligt större eftersom jordtagen normalt är sämre. Att minska felbortkopplingstider för skydden i samband med bortfall av den centrala kompenseringen kan öka personsäkerheten. Om den centrala kompenseringen är stor kan det krävas redundans för att kunna driva nätet med betryggande säkerhet vid ett eventuellt haveri. Fasta och reglerbara nollpunktsreaktor kan användas tillsammans och kan delas mellan flera

transformatorstationer. Frågan bör givetvis avvägas med möjlighet att utöka lokalkompenseringen.

4.8 Kortare felbortkopplingstider

Kortare felbortkopplingstider innebär mindre risk för personfara samt att påkänningar på berörda apparater i systemet minskar. Felbortkopplingstider väljs med hänsyn till selektivitet och risker för obefogade felbortkopplingar.

Normen SS 421 01 01, utgåva 2 anger maximal beröringsspänning som funktion av tiden vid jordfel i högspänningsnät. Maximal beröringsspänning är tidsberoende och uppgår till 500 V vid 0,2 sekunder, 200 V vid 0,5 sekunder och 100 V vid 1 sekund. Om varaktigheten är lång får beröringsspänningen uppgå till 75 V.

Frågan är om kortare felbortkopplingstider kan ge utrymme för högre spänningssättning än vad Starkströmsföreskrifterna tillåter idag. Det skulle kunna ge fördelar i hur stora nät som kan byggas, krav på jordtag och bättre reservdriftsmöjligheter.

Elsäkerhetsverket har under projektets genomförande medverkat i diskussioner i denna fråga och beskedet är att kortare bortkopplingstider alltid skall eftersträvas, men branschen ska inte förvänta sig att nivåerna beskrivna ovan kommer att ändras under överskådlig tid. Nya rön har påvisat ökad personfara, vilket snarare kan ses som indikation på skärpta krav.

4.9 Förhöjd nollföljdspänning

Att bygga långa radialer utan lokal kompensering innebär risk för förhöjd spänning mellan fas och jord. I samband med jordfel får de friska faserna huvudspänning till jord. Beräkningar i det här projektet har visat att fasspänningarna kan öka ytterligare i slutet på långa radialer pga av höga nollföljdsströmmar och stora nollföljdsreaktanser för luftledningar eller kablar.

Tabell 4-3 visar hur nollföljdspänningen i slutet på en lång radial påverkas beroende på fördelning mellan luftledning och kabel. Beräkningar har gjorts med 12 kV typnät, fyra utgående linjer med 10 km kabel och 10 km luftledning samt en lång radial på 60 km som varierar mellan 10 och 40 km luftledning närmast matande station och resterande del med kabel längst ut. För 24 kV-näten återfinns motsvarande värden i bilaga B.

Luftledningslängd närmast station	10 km	20 km	30 km	40 km
Max, nollföljdspänning längst ut	8,05 kV	8,25 kV	8,18 kV	7,7 kV
Spänningssättande jordfelsström närmast matande station I_r , I_x	34 A, 0 A	26 A, 0 A	18 A, 0 A	10 A, 0 A
Spänningssättande jordfelsström längst ut på längsta ledningen I_r , I_x	17 A, -8 A	13 A, -7 A	10 A, -4 A	7 A, -2 A
Detektering vid 5 000 ohm, I_r , I_x	-0,4 A, -6 A	-0,5 A, -6 A	-0,6 A, -6,3 A	-0,7 A, -6 A

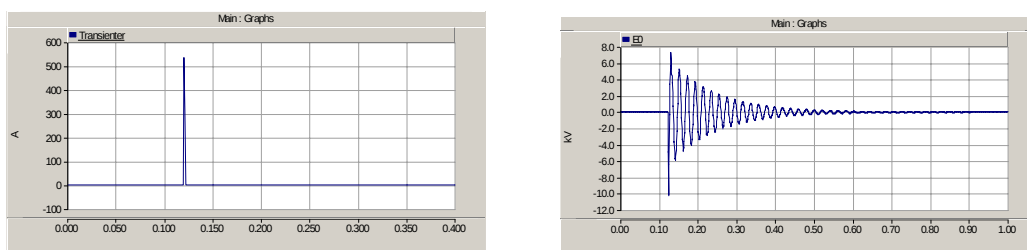
Tabell 4-3 Nollföljdsspänningen i slutet på en lång radial.

Tabellen visar bl.a. att nollföljdspänning längst ut blir som högst då en tredjedel närmast matande station är luftledning. Samtidigt minskar också relativt sett jordfelsströmmarna längst ut. Den spänningssättande jordfelsströmmen närmast matande station samt förmågan att detektera 5 000 ohm försämras, då luftledning ersätts med kabel för en lång radial.

Om luftledning med längsgående jordlina används förbättrar det i fråga om förhöjd nollföljdspänning. Förhöjd nollföljdspänning innebär ökad påkänning för isolationen på apparater och isolatorer. Ventilavledare behöver också väljas med högre avledningsspänning jämfört med om nollföljdspänningen kan hållas konstant. Skyddet för åsköverspänningar försämras i och med att avledningsnivån behöver höjas.

I samband med jordfel i kabelnät, där avstånden mellan fas och jord är korta, uppstår ofta intermittenta fel med upprepade strömspikar som kan ge upphov till höga nollföljdspänningar och risker med obefogade felbortkopplingar. Figur 4.2 visar ett exempel på ett fel i ett 12 kV-nät med en strömspik som tänds och sedan släcks vid strömmens nollgenomgång. I och med att nätet via strömimpulsen får en nettoladdning skapas en nollföljdsspänning som dämpas ut med nätets egenfrekvens som normalt ligger runt 50 Hz för ett väl avstämt nät. Med upprepade strömladdningar som övervägande sker i samma riktning kan nollföljdspänningen bli ännu högre. Riktningen för strömladdningarna beror på nätets avstämning vilket ytterligare ställer krav på att den automatiska avstämningen av nollpunktsreaktorn fungerar på ett betryggande sätt.

Reläskyddsystemens förmåga att mäta in intermittenta fel i kabelnät bör kontrolleras i varje enskilt fall.



Figur 4.2. Strömpuls och utdämpad nollföljdspänning vid övergående jordfel.

4.10 Reservdriftläggning

Att reservmata ett område från en annan station eller via en slinga kan innebära problem med hög spänningssättande jordfelsström och möjligheten att detektera 5 000 ohms fel. Är slingan lång krävs det att hela slingan kompenseras lokalt för att möjliggöra detektering av 5 000 ohm. I fråga om spänningssättande jordfelsström kan kortare felbortkopplingstider vara en möjlig lösning om inte jordtagen är tillräckliga. Innehåller slingan delar med luftledningar kan det också innebära problem med spänningar som ur elkvalitetssynpunkt avviker från normenliga nivåer. Även höga nollföljdspänningar skulle kunna uppstå i samband med eventuella jordfel.

4.11 Olika kabeltyper

Att välja 24 kV-kabel i 12 kV-nät innebär fördelar för felbortkoppling och spänningssättande jordfelsström. Fördelarna är som störst då långa kabelradialer byggs och då utlokaliserad kompensering inte används. Kabeln ger också mindre förluster vid utbyggnad av långa kabelradialer och ger minskat överskott av reaktiv effekt.

Enledarkabel jämfört med treledarkabel och kabel med större area jämfört med mindre area, innebär också fördelar och då framförallt i närheten av matande station där central kompensering används. Kablarna ger fördelar för felbortkoppling, spänningssättande jordfelsström och förhöjd nollföljdspänning eftersom kablarna har lägre värden på nollföljdsresistans och nollföljdsreaktans. En strävan bör dock vara att välja standardiserade kablar i så stor utsträckning som möjligt.

5 Förslag till fortsatt arbete

5.1 Shuntreaktorer

När långa kabelradialer byggs finns det anledning att kompensera för det reaktiva effektöverskottet. Det är allmänt accepterat att kompensering bör ske i närheten av där den reaktiva effekten alstras. På motsvarande sätt är det både teoretiskt och praktiskt möjligt att placera shuntreaktorer för reaktiv effektkompensering ute i nätet. Det är även möjligt att kombinera dessa enheter med lokalkompensering av kapacitiva jordfelsströmmar. Vilka krav som ska ställa på utrustningen och var den lämpligen placeras är frågor som bör utredas vidare.

5.2 Jordtagsutformning

Vid utbyggnad av stora nät är bra jordtag viktigt, inte minst ur personsäkerhetssynpunkt. Är dagens metoder för utformning av jordtag optimala ur ekonomiska och tekniska perspektiv? Finns det utrymme för förbättringar? Dessa frågor bedöms som mycket viktiga och bör utredas vidare.

5.3 Risker med förhöjd nollföljdspänning vid transienta förlopp och intermittenta jordfel

Kan utlokaliserad kompensering innebära några andra problem som inte upptäckts i detta arbete? Några problem har ännu inte identifierats, men frågan har bara studerats ytligt. Problemen skulle t ex kunna vara kopplingsöverspänningar, resonansproblem vid intermittenta jordfel eller kritiskt odämpade transienta förlopp. Att göra en djupare undersökning kring de problem som eventuellt kan uppstå i samband med jordfel rekommenderas.

5.4 Känslighetsanalys formler

I formler för nollföljdsdata från ABB HVC ingår ett stort antal storheter som påverkar. På vilket sätt storheterna påverkar resulterande nollföljdsdata bör utredas.

6 Riktlinjer för nätplanerare

6.1 Nätstorlek för kabelnät

Begränsningen i utbyggnad av näten styrs av jordtagsvärden, möjlighet att detektera 5 000 ohm fel och att klara nätets isolationsnivåer i samband med jordfel.

Reaktiv effekt vid normaldrift kan i värsta fall innebära begränsningar, men det är huvudsakligen de kapacitiva jordfelsströmmarna som ställer till med problem. Beräkningarna för 24 kV-näten visar t.ex. att problemen börjar göra sig gällande vid ca 100 A kapacitiv jordfelsström. Vid mindre nät bör det därför inte vara några problem, men det är naturligtvis det enskilda nätets förutsättningar som är avgörande, t.ex. jordtagsmotsånd och nollföljdsdata.

6.2 Jordtagsvärden

Kostnaden för att få bra jordtag varierar inom olika områden i landet. Frågan är hur bra markresistiviteten är inom det aktuella området. Vid bra jordförhållanden kan större nät byggas till lägre kostnad och befintlig nätstruktur kan användas. Sämre jordförhållanden kan leda till att näten om möjligt måste delas upp på fler matande stationer.

Jordtagsvärdena inom området kan också påverka val av kompenseringmetoder; enbart central kompensering eller en kombination med central och lokal kompensering.

Jordtagsvärdena ändras allteftersom nätet kablifieras. Det är det **sämsta** resulterande jordtagsvärdet i nätet som är dimensionerande för hur stor spänningssättande jordfelsström som kan tillåtas.

6.3 Central kompensering eller en kombination av central och lokal kompensering

Kostnaden för central kompensering är lägre jämfört med om kompenseringen görs lokalt. I första hand får frågan om hur stor centralkompensering som är möjlig ställas samt hur ett eventuellt fel i centralkompenseringen hanteras. Begränsningen i centralkompensering beror bl.a. på transformatorns nollföljdsimpedans och nätens jordtag. På grund av transformatorns och rektorns nollföljdsresistans tillkommer ett aktivt bidrag till den spänningssättande jordfelsströmmen som jordtagen måste vara dimensionerade för.

För 12 kV YNyn-kopplade transformatorer i storlekar kring 10 MVA tillkommer en spänningssättande aktiv jordfelsström på ca 4-6 A vid 200 A kompenseringsström. Vid 300 A tillkommer ett bidrag på ca 12-18 A. Bidraget ökar kvadratisk med kompenseringsströmmen. Det tillkommer också någon eller några ampere för nollpunktsreaktorn (ca 2 % av spolströmmen), vilket inte är medtaget i de beräkningar som gjorts. Denna aktiva strömkomponent

måste också adderas till övriga strömbidrag för att få den totala spänningssättande jordfelsströmmen.

Upp till 200 A är rimligt att hantera för denna typ och storlek på transformatorer. Mindre och större transformatorstorlekar påverkar spänningssättande jordfelsström i proportion till dess storlek eftersom nollföljdsresistansen ökar med minskad transformatorstorlek.

För transformatorer med utjämningslindning eller deltakoppling kan upp till 2-3 gånger högre kompenseringssströmmar hanteras eftersom nollföljdsresistansen är ca 5-10 gånger lägre jämfört med en YNyn transformator. Skillnaden i nollföljdsreaktans och nollföljdsresistans kan dock var betydligt lägre och beror på hur transformatorn är konstruerad.

Att investera i transformatorer med utjämningslindning innebär ökade möjligheter att centralkompensera. Riskerna med utebliven kompensering och att det finns tillgång på reservtransformator med lägre nollföljdsimpedans måste i så fall beaktas.

Upp till 100 km 12 kV-kabel fördelade på 5 radialer med motsvarande ca 200 A kompenseringssströmmar är möjligt att kompensera centralt förutsatt en 10 MVA YNyn matande transformator, 5 A nollpunktsmotstånd och 8 ohm jordtag.

Transformatorns nollföljdsresistans kan i vissa fall också ersätta nollpunktsmotståndet. Frågan om att ta bort nollpunktsmotståndet blir extra motiverad i de fall nätet har många relativt långa kabelradialer.

För att ersätta ett nollpunktsmotstånd på 5 A och där transformatorn förutsätts ha låg nollföljdsresistans krävs minst 5x25 km, 2x30 km eller 1x38 km kabel. Kabeln förutsätts vara kompenserad centralt. Kabellängderna behöver vara uppfyllda för alla driftfall.

6.4 Maximala nätstorlekar då endast central kompensering används

Tabell 6-1 visar hur långa kabelradialer i 12 kV-nät som kan byggas vid olika jordtagsvärden då all kompensering sker centralt. Vanligt förekommande jordtagsvärden uppgår till 8-16 ohm. De lägre jordtagsvärdena visar hur stora nät som kan byggas förutsatt att jordtagen redan är låga eller om de kan förbättras.

Näten är de 12 kV typnät som tidigare beräknats, med matande transformator utan utjämningslindning, med en lång radial och med flera lika långa radialer. Värsta fallet är då nätet är ett rent kabelnät med någon enstaka luftledning. Därför har ett rent kabelnät använts för att visa hur stora nät som kan byggas med hänsyn till olika jordtagsvärden. Byggs all luftledning bort kommer kraven på 3 000 och 5 000 ohm felbortkoppling att försvinna.

Vid inslag av luftledning måste alltid risk för förhöjd nollföljdspänning beaktas. Max 100 V beröringsspänning har förutsatts. Korrigeringar kan göras med avseende på felbortkopplingstider, kablarnas nollföljdsresistanser eller om nätet är särjordat.

Om risker för höga nollföljdsspänningar eller svårighet att kunna detektera 5 000 ohm finns har detta angivits. Begränsningarna är uppskattade värden till 120 % nollföljdsspänning och 0,5 A resistiv felström. Normalt får de friska faserna huvudspänning mot jord vid stumt jordfel. Med 20 % överspänning innebär det att friska faserna får ytterligare 20 % högre spänning mot jord.

Vid detektering av 5 000 ohm jordfel och användande av 5 A nollpunktsmotstånd skall riktade jordfelsskydd normalt detektera ca 1 A som resistiv komponent av nollföljdsströmmen. Används strömtransformatorer och reläskydd med god noggrannhet anses detektering av 0,5 A inte vara några problem förutsatt att felet inte är intermittent och att det transienta insvängningsförloppet dämpats ut. Graden av noggrannhet måste bedömas från fall till fall beroende på reläskydd och strömtransformatorer.

Nät-konfiguration/ jordtag	En lång kabelradial övriga korta. Begränsningar :Spänningssättande jordfelsström, risk för utebliven detektering, risk med förhöjd nollföljdsspänning	Fem lika kabelradialer Begränsningar: Spänningssättande jordfelsström, risk för utebliven detektering, risk förhöjd nollföljdsspänning	Fem lika kabelradialer Transformator med låg nollföljdsresistans och nollpunktsmotstånd borttaget. Begränsningar: Spänningssättande jordfelsström, risk för utebliven detektering, risk förhöjd nollföljdsspänning
2 ohm ($I_j=50$ A)	65 km, ja, ja	5x37 km, nej, nej	5x44 km, nej, nej
4 ohm ($I_j=25$ A)	50 km, nej, nej	5x30 km, nej, nej	5x37 km, nej, nej
8 ohm ($I_j=12,5$ A)	38 km, nej, nej	5x20 km, nej, nej	5x30 km, nej, nej
16 ohm ($I_j=6,25$ A)	20 km, nej, nej	5x18 km, nej, nej	5x26 km, nej, nej

Tabell 6-1 Största möjliga nätstorlekar då kompensering enbart sker centralt för 12 kV-nät.

Nollpunktsmotståndet påverkar speciellt i de fall då jordtagsvärdena är höga. Om nollpunktsmotståndet tas bort kan teoretiskt längre ledningslängder accepteras och även då transformator med lägre nollföljdsresistans används, vilket visas i kolumnen längs till vänster. Däremot försämrar möjligheten till felbortkoppling i fallen med enbart en lång kabelradial. För de fall då flera lika kabelradialer används kan nollpunktsmotståndet tas bort och påverkar då framförallt möjligheten att öka storleken för de mindre näten. I de fall luftledning används tillsammans i kabelnätet kan det påverka överspänningarna i samband med jordfel vilket har vistats i tidigare delar av denna rapport.

Korrigeringar med hjälp av tabellen kan enkelt göras. En halvering av nollföljdsresistansen innebär att längderna kan ökas med ca 40 % i fråga om spänningssättande jordfelsström och möjligheten till att detektera 5 000 ohm. På samma vis kan förhöjd nollföljdsspänning reduceras om nollföljdsreaktansen minskas. En halvering av nollföljdsresistansen kan vara möjlig enligt gjorda beräkningar med kabelmodellen och i de fall jordtagsvärden i närheten av matande station är låga.

Om nollföljdsresistansen och nollföljdsreaktansen kan påverkas görs de lämpligen i närheten av centralkompenseringen vid matande station. Att åtgärderna gör mest nytta närmast matande station kan förklaras med att nollföljdsströmmen är störst närmast centralkompenseringen och sjunker sedan utefter radialen. Att förbättra den närmaste tredjedelen intill

centralkompenseringen är ungefär dubbel så mycket värt som att förbättra de yttersta två tredjedelarna. Som exempel innebär förläggning av AXKJ 240/35 närmaste tredjedelen intill centralkompenseringen att ekvivalent nollföljdsresistans för kabeln som helhet minskar från 1,5 till 1,3 ohm/km och att kabellängderna kan ökas med ca 7 %. På samma vis ger enledarkablar och längsgående jordlina möjlighet till ökade kabellängder. Enledarkabel har lägre nollföljdsresistans jämfört med treledarkabel. Kabelvärdena finns i Tabell A-5. Även längsgående jordlina reducerar nollföljdsresistansen vilket kan härledas ur Tabell A-2 där nollföljdsresistansen står i proportion till den spänningssättande jordfelsströmmen.

Förutom beröringsspänningen påverkar också jordtagen nollföljdsresistansen och nollföljdsreaktansen. Jordtagen i närheten av där centralkompenseringen sker skall vara tätt placerade och ha låga värden. Stationer där förbindelse med skärm eller jordlina upphör skall också ha låga jordtagsvärden för att reducera nollföljdsresistansen.

Att jordtagsvärdena hålls låga i närheten av centralkompenseringen vid matande station är viktigt på samma vis som för kablarnas påverkan av nollföljdsresistansen i dessa områden. Vid ökad värden för nollföljdsströmmar ut på radialer ställs högre krav på jordtagen. Eftersom spänningssättande jordfelsström är som störst i närheten av matande station bör jordtagsvärdena även av detta skäll hållas låga.

Att använda jordlina längre ut i nätet ger ingen förbättring i betydelse av reduktion av den spänningssättande jordfelsströmmen. Däremot kan jordlina vara till hjälp för att förbättra jordtagen. Andra metoder att få bra jordtag är t ex att utnyttja lågspänningsnätet och jordspett, att dra kortare jordlinor åt olika håll där jordspett används på lämpliga platser. Även andra jordningsmetoder t ex djupjordning kan vara en möjlig lösning.

Då jordlinor används för förbättring av jordtagen beaktas jordtagets påverkan som funktion av jordlinans längd och markresistiviteten för att uppnå maximal lönsam längd. Denna finns bl.a. angivet i VAST-rapport [3] där det visar sig att bättre markresistivitet innebär att kortare jordlinor ger maximal lönsam längd. Om den gemensamma kabelgraven utnyttjas kan maximal lönsam längd antas vara längre eftersom jordlinan kan samförläggas med kabeln.

I området i närheten av centralkompenseringen kan de olika fördelarna med jordlina vägas samman. Ur elektrisk synvinkel bör den ligga tätt ihop med kabeln medan den ur jordningssynpunkt kan tänkas placeras separat för bästa jordkontakt. Längre ut från matande station kan jordlinans fördelar betraktas som förbättring av jordtagen och förläggs i så fall med hänsyn till detta.

Nackdelar med jordlinan är bl a att den sprider spänningshöjningar över ett större område om det uppträder jordfel i ett direktjordat system i närheten. måste beaktas. Att använda heldragen jordlina i ytterområdena är i så fall inte att rekommendera. Skärmkretsen behöver i så fall öppnas vilket är acceptabelt om nollföljdströmmen är låg i ytterområdet och därmed också risken för förhöjd nollföljdspänning.

Ytterligare en aspekt att beakta är de krav som ställs på jordtagsmätningarna i de fall nätet har jordningsförbindelser via skärmar eller jordlinor.

Om central kompensering används med långa radialer och där kablar närmast matande station är långa med stora avstånd mellan jordtagen, kan det påverka nollföljdsresistansen och därmed också de spänningssättande jordfelsströmmarna. Jordtagen bör då hållas extra låga och speciellt för de jordtag där skärm eller gemensamma jordförbindelse upphör.

Vid utbyggnad av enstaka långa kabelradialer kan 24 kV kabel med lägre nollföljdskapacitans vara en möjlig lösning i 12 kV nät. Dessa påverkar mest med placering utifrån och in mot matande station och gör bäst nytta i de yttre delarna. Exempelvis påverkas spänningssättande jordfelsström med kvadraten av förhållandet mellan nollföljdskapacitanserna för 24 kV respektive 12 kV kabel, vilket uppgår till ca 2,5. Att ersätta långa kabelradialer med 24 kV kabel ger då samma resultat som att förbättra jordtaget med samma faktor och där utbyggnadslängderna korrigeras därefter. Fördelarna vägs ihop med fördelarna av 24 kV kabel vid normaldrift som finns angivna tidigare i denna rapport samt de fördelar som extra isolering kan innebära. Avvägning görs mot de högre kostnader som investering i 24 kV-kabel innebär.

I de fall då långa kabelradialer byggs minskas den spänningssättande jordfelsströmmen längst ut i radialen vilket innebär att lägre jordtagsvärden kan accepteras längre ut. Exempelvis kan nästan dubbla jordtagsvärden accepteras längst ut jämfört med i matande station för radialer över 60 km. Anledning till den lägre spänningssättande jordfelsströmmen beror på ledningens nollföljdsreaktans. Här ligger då en konflikt mellan hög nollföljdsspänning och låg spänningssättande jordfelsström.

Att ha kvar luftledning längs ut i nätet innebär givetvis att näten kan byggas betydligt större. Inverkan av luftledningens bidrag till nollföljdströmmen utefter radialen är försumbar eftersom kapacitansen mot jord är i storleksordningen en hundradel jämför med kabelns kapacitans mot jord. Någon eller några mil längst ut i nätet med luftledning har då marginell påverkan. Däremot måste alltid reservdriftfall beaktas eftersom luftledning bidrar till förhöjd nollföljdsspänning.

I Tabell 6-2 nedan redovisas de spänningssättande jordfelsströmmarna i olika 24 kV-nät. I det ursprungliga nätet med litet inslag av jordkabel är strömmarna små och ställer inte till med problem.

Men redan när en del av nätet är kablfierat (knappt nio mil kabel har tillkommit, vilket motsvarar ca 200 A) uppstår problem med kompenseringen. Spänningsfallet över transformatorns nollföljdsimpedans gör att reaktorn inte kan kompensera fullt ut och fasvridning i kablarnas längsreaktans ökar ytterligare strömmen i felstället.

Om hela det ursprungliga nätet kablfieras med traditionella metoder blir situationen ohållbar. Kraven på jordtagen skulle bli så stora att de i praktiken inte skulle gå att uppnå. Redan då den kapacitiva strömmen uppgår till 100 A är det rekommendabelt att studera konsekvenserna närmre.

Det är också värt att notera skillnaden mellan en transformator utan och med utjämningslindning (data återfinns i bilaga B). Vid små nät har utjämningslindningen ingen praktisk betydelse, men när näten växer får den större inverkan. Det här åskådliggör också hur de olika komponenterna i

anläggningarna påverkar systemet. Det är därför viktigt att för varje enskilt nät ta reda på vilka förutsättningar som råder.

Nät	kabel	Luft- ledning	Matande transformator	
			Utan utjämnings- lindning	Med utjämnings- lindning
Ursprungligt	6 km	177 km	11 A	11 A
Delkablifierat	93 km	105 km	59 A	44 A
Kablifierat	243 km	17 km	297 A	120 A

Tabell 6-2 Största spänningssättande ström i felstället vid stumt jordfel. Beräkningarna är gjorda för 24 kV-nät med central kompensering. Näten åskådliggörs i bilaga B.

6.5 Max nätstorlekar vid central kompensering tillsammans med lokal kompensering

Lokal kompensering väljs då näten blir stora samt då det kan innebära problem med att ha en stor central kompensering. Att kompensera det närmaste området kring matande station har, som tidigare nämnts, visat sig ha liten betydelse. Däremot kan det vara ett sätt att ersätta en del av den centrala kompenseringen och ha viss betydelse vid reservdriftsfall.

Lokalkompenseringen inverkar med ett aktivt bidrag på ca 0,7-0,8 A per 10 km. Det viktiga är att kompenseringen görs så att område för område kompenseras på bästa sätt så att nollföljdström inte transporteras över långa avstånd. Att finna exakt rätt ställe för placering är inte alldeles enkelt vilket då ger ett viss spelrum på hur stort nät som kan byggas. Även möjligheten att få ner nollföljdsresistansen för de utlokaliserade spolarna har stor betydelse.

Maximal nätstorlek enligt Tabell 6-3 har angetts då den utlokaliserade kompenseringen startar 20 km ut från matande station och med ett resulterande aktivt bidrag på 0,8 A per 10 km utbyggnad. Detta bidrag kan givetvis påverkas av typ av utlokaliserad kompensering och hur de placeras i nätet.

Vid utplaceringar som avviker stort från det optimala kan påverkan på spänningssättande jordfelsström öka markant och därigenom också möjligheten att bygga stora nät. Även problem med förhöjd nollföljdsspänning och felbortkoppling kan uppstå om lokalkompensering placeras felaktigt. På samma vis som vid central kompensering är värsta fallet ett rent kabelnät i fråga om maximal nätstorlek.

Om större lokalkompenseringen används och om placering dessemellan görs glesare, med mer än 15-20 km avstånd kan kablarnas nollföljdsresistans påverka något mera eftersom nollföljdströmmens inverkan ökar. Hänsyn till

jordtag behöver då tas enligt samma resonemang som för centralkompensering.

Nätkonfiguration/ jordtag	En lång kabelradial övriga korta. Kompenserad 20 km ut från matande station Begränsningar :Spänningssättande jordfelsström, risk för utebliven detektering, risk med förhöjd nollföljdspänning	Fem lika kabelradialer Kompenserad 20 km ut från matande station Begränsningar spänningssättande jordfelsström, risk för utebliven detektering, risk förhöjd nollföljdspänning
2 ohm ($I_f=50$ A)	530 km, ja, ja	5x127 km, nej, nej
4 ohm ($I_f=25$ A)	220 km, ja, ja	5x65 km, nej, nej
8 ohm ($I_f=12,5$ A)	100 km, nej, nej	5x51 km, nej, nej
16 ohm ($I_f=6,25$ A)	35 km, nej, nej	5x18 km, nej, nej

Tabell 6-3 Största möjliga nätstorlekar då utlokaliserad kompensering används för 12 kV-nät.

Eftersom centralkompenseringen är relativt liten i det fallet då enbart de närmaste 20 km intill matande station kompenseras, kommer dess påverkan på spänningssättande jordfelsström vara liten enligt de beräkningar som gjorts. Transformtors nollföljdsresistans har liten påverkan när en 10 MVA, YNyn transformator används i beräkningarna, eftersom enbart 100 A centralkompenseras. Nollpunktsmotståndet kan tas bort om summan av alla lokalkompenseringarnas aktiva strömbidrag uppgår till minst nollpunktsmotståndets märkström och där den längsta ledningen inte medräknas. Om nollpunktsmotståndet tas bort kan det påverka utbyggnad med motsvarande bidrag från de lokalkompenserade nätdelarna vilka antas uppgå till 0,8 A och 10 km. Ett 5 A motstånd innebär då att nätet kan utökas med ytterligare ca 60 km. Om motståndet tas bort skall alla driftfall inräknas på samma vis som för nät där lokalkompensering inte används.

Längsgående jordlina kommer enbart att behövas för att förbättra jordtagsvärdena. Vid eventuella reservdriftläggningar kan dock värdet av lägre nollföljdsresistans behöva beaktas eftersom nollföljdström kan behöva transporteras långa sträckor.

Att bygga så långa ledningar som angivits i tabellen är i realiteten inte aktuellt, utan anges bara för att visa vad som är möjligt. Andra begränsningar uppstår tidigare. För de längsta radialerna kan det uppstå ett resistivt spänningsfall pga. summan av alla utlokaliserade spolars aktiva strömbidrag och kabelns nollföljdsresistans. Nollföljdspänningen blir i så fall lägre längst ut på ledningen jämfört med i matande station. Vid nät med långa ledningar ökar alltid problematiken vilket innebär att placering av spolarna blir allt viktigare i och med att längderna ökar.

Lokalkompensering behöver inte nödvändigtvis sluta vid 20 km intill matande station. Om det finns förutsättningar för mer centralkompensering kan

lokalkompensering flyttas längre ut i nätet. Samma resonemang som för när centralkompensering enbart används kan då användas med tillägg för ett aktivt strömbidrag från varje lokalkompenserad del. Reservdriftfall måste dock alltid beaktas.

I Tabell 6-4 jämförs de spänningssättande jordfelsströmmarna för ett kablifierat 24 kV-nät med central respektive utlokaliserad kompensering. Beräkningarna visar att det är möjligt att innehålla kraven på maximal spänningssättning med relativt små krav på jordtagen (i det studerade fallet ca 4 Ω). Att strömmen inte minskar ytterligare (det centrala motståndet ger 10 A) beror på att de utlokaliserade spolarna har förlustströmmar som summeras i felstället.

Kompenseringsmetod	kabel	Luftledning	Matande transformator	
			Utan utjämningslindning	Med utjämningslindning
Central	243 km	17 km	297 A	120 A
Lokal	243 km	17 km	24 A	27 A

Tabell 6-4 Största spänningssättande ström i felstället vid stumt jordfel. Beräkningarna är gjorda för 24 kV-nät med utlokaliserad kompensering.

6.6 Egna beräkningar

Eftersom nät byggs på olika sätt har inte alla nätkonfigurationer analyserats. Nätplaneraren behöver själv kunna göra enklare kontrollräkningar. Att användas sig av effektsummeringsmetoden är ett enkelt sätt att göra dessa beräkningar och på så vis kunna kontrollera hur stor den spänningssättande jordfelsströmmen blir förorsakad av den aktiva strömkomponenten. Det är nollföljdseffekten (P_0) som beräknas. Nollföljdseffekten dividerat med fasspänningen ger sedan den spänningssättande jordfelsströmmen. För varje okompenserad radial eller del av radial som inte är lokalkompenserad beräknas P_0 och I_r enligt nedanstående uttryck där I_0 är nollföljdsströmmen per fas och R_0 är hela radialens nollföljdsresistans räknat per fas. Formeln kan härledas från Figur 2.4 och Figur 2.5 där kvadraten av nollföljdsströmmen integreras utefter radialen. Det visar sig skilja sig en faktor tre jämfört med om nollföljdströmmen inte minskar utefter radialen.

$$P_0 = \frac{1}{3} \cdot I_0^2 \quad (4)$$

$$I_r = \frac{P_0}{U_{fas}} \quad (5)$$

Exempelvis innebär en 60 km lång 12 kV kabelradial ett I_0 lika med 40 A. I_0 är en tredjedel av ledningen totala kapacitiva generering, vilket uppgår till ca 2 A/km för en AXKJ 95/25. R_0 för ledningen uppgår till 90 ohm/fas, räknat med 1,5 ohm/fas och km. Resultatet ger P_0 lika med 143 kW och I_r lika med

23 A. Fassspänningen är 6,35 kV. Resultaten stämmer också överens med tidigare resultat från beräkningarna gjorda i EMTDC.

Tabell 6-5 visar hur stort resistivt bidrag som olika längder av kabelradialer ger. Tabellen visar också att lokalkompensering i närheten av matande station inte ger någon effekt i fråga om reducering av spänningssättande jordfelsström. Utlokaliserad kompensering 100 kVA, 12 kV med ca 0,8 A per 10 km inkluderat aktivt strömbidraget från den kompenserade kabelavsnittet beräknas brytpunkten ligga någonstans kring 20 km intill matande station. Placering av den utlokaliserade kompenseringen görs i detta fall lämpligen ca 22-23 km ifrån matande station där den kompenserar 2,5 km i vardera riktningen. Räknat med ett bidrag på 0,6 A per 10 km blir brytpunkten 17 km och placering 19-20 km ifrån matande station.

Längd AXKJ 95/25, 12 kV	10 km	15 km	20 km	30 km	40 km	50 km	60 km
Bidrag till jordfelsström (I_r)	0,11 A	0,35 A	0,8 A	2,8 A	6,7 A	13 A	23 A

Tabell 6-5 Aktiva strömbidrag är beroende av kabelradialens längd.

Nollföljdseffekten för nollpunktsmotståndet och nollpunktsreaktor beräknas enligt samma resonemang. Hänsyn till eventuellt spänningsfall över transformatorn beaktas vid stora kompenseringsströmmar. Nollföljdseffekterna i transformatorerna beräknas på samma vis då transformatorns nollföljdsresistans och aktuell nollföljdsström är kända.

Det är möjligt att utnyttja utförda beräkningar på alla typer av nät-konfigurationer. Som värsta fall beräknas ett rent kabelnät. Om inslag av luftledning finns kan denna försummas om den är längst ut på ledningen. Om luftledning finns närmast matande station reduceras den totala spänningssättande jordfelsströmmen. Nollföljdströmmen utefter luftledningar kan betraktas som konstant och nollföljdseffekten för detta delavsnitt kan enkelt räknas fram om nollföljdsresistansen också är känd. Exempel på luftledningars nollföljdsresistans finns angivet i tabell A-1.

I det fall då varje kabelavsnitt lokalkompenseras underlättas beräkningarna avsevärt och där det resistiva strömbidragen från lokalkompenseringarna summeras. Dessa uppgår till ca 0,6 - 0,8 A per 10 km och kan variera beroende på hur de placerats och dess typ.

Metoden kan också användas för att beräkna nollföljdspänningsfallen då I_0 och X_0 är kända.

Enstaka långa ledningar måste alltid kontrolleras i fråga om detektering av 5 000 ohm och risk för förhöjd nollföljdsspänning.

Reservdriftfall behöver också beaktas.

6.7 Planeringshorisont

Nätplaneraren bör ha en kortsiktig och långsiktig planeringshorisont. Under tiden nätet kablifieras kommer det att finnas jordtagsvärden som är höga. Efterhand som nätet kablifierats kommer jordtagsvärden för de delar som kablifierats att bli bättre allteftersom kabelskärmar binds samman.

Frågan är hur nätet lämpligen byggs upp och vad skall man göra med de sämsta jordtagen. Tillsammans med prioriteringen att kablifiera luftledningar i skogsområden kan prioritering också göras för de delar som påverkar den spänningssättande jordfelsströmmen minst, t ex utledningar närmast matande station som inte reservmatas. Kablifiering fram till första frånskiljaren kan dock alltid göras. I prioriteringen vägs också andra delar in såsom störningsbenägenhet, underhåll, ålder på nätet etc. Utifrån nätets befintliga jordtagsvärden och den långsiktiga planeringshorisonten väljs typ och placering av kompenseringsutrustning.

En långsiktig plan för nätområdena måste finnas för att kunna avgöra om alla kabelavsnitt skall lokalkompenseras eller inte. Om nätdelarna inte skall reservmatas kan de också byggas utan lokal kompensering närmast matande station vilket i så fall också är till viss fördel för den spänningssättande jordfelsströmmen. Befintliga jordtagsvärden kan också behöva förbättras efterhand som nätet kablifieras, vilket ställer krav på kännedom om alla jordtagsvärden i nätet.

6.8 Reservdriftläggning

Att finna några generella riktlinjer för reservdrift är inte alldeles enkelt. En mängd avvägningar måste göras i varje enskilt fall. Resonemanget kring olika jordtagsvärden och nätkonfigurationer vägs in med möjliga reservdriftsfall. Om man ligger nära gränsen för vad central kompenseringen klarar av kan det finnas anledning att kompensera med lokal kompensering ända in till den matande stationen för att på så vis förbättra situationen om reservdrift blir aktuellt.

7 Tumregler

Nedan tumregler bygger på resultat som kommit fram i studien kompletterat med erfarenheter från expertgruppen.

7.1 Begränsningar

Ett antal begränsningar styr hur stora kabelnät som kan byggas. Dessa ges enligt följande:

- Förhöjd tomgångsspänning
- Möjlighet att kunna kompensera kapacitiv felström
- Max beröringsspänning 100 V
- Felbortkoppling av 5 000 ohm jordfel

7.2 Förhöjd tomgångsspänning

Vid långa radialer kontrolleras tomgångsspänningen såväl i plus- som nollföljd. För kabelsystem kan man grovt anta att det inga problem trefasmässigt är det heller inga större problem i nollföljd. Enstaka långa okompenserade radialer med längder över 40 km sammanhängande totallängd bör dock undersökas närmare. Alla utgreningar ingår.

Följande påverkar:

- Luftledning närmast matande station påverkar negativt
- Öppen skärmkrets påverkar negativt i nollföljd
- Nätets isolationsnivå påverkar
- Avledningsnivån för ventilavledare påverkar
- Utgrenad radial påverkar positiv förutsatt att totala längden då alla utgreningar är medräknade inte ökar

Utifrån bedömning av alla dessa faktorer bestäms maximal längd. Hänsyn till eventuella reservmatningsvägar beaktas. Om problem uppstår redan här så kommer säkerligen problem uppstå i fortsättningen varför man antingen får dela upp nätet eller kompensera med direkt jordade trefas-reaktorer.

7.3 Möjlighet att kunna kompensera kapacitiv felström

Första frågeställning är hur stor kapacitiv ström kan jag kompensera med en viss transformator ? Detta beror bl.a på matande transformators nollföljdsimpedans och därmed behovet av utjämningslindning.

Från (Willheim, R. & Waters, M.: "Neutral Grounding in High-Voltage Transmission", Elsevier, New York, 1956) ges att nollpunktsutrustningens märkeffekt bör vara max 20 % av märkeffekten hos en ren Yy-transformator

sett ur transformorteknisk synvinkel. Om nätets kapacitiva felström i huvudsak beror på kablar kan man direkt jämföra nätets kapacitiva generering i MVA med transformatorns märkeffekt.

Dessutom måste transformatorns egen nollföljdsimpedans anpassas till nollpunktsutrustningens. Enligt bl.a förarbetena till den fd svenska standarden angående behov av utjämningslindning så rekommenderas att transformatorns nollföljdsimpedans i serie med nollpunktsutrustningen bör uppgå till högst 5 % av totala nollföljdsimpedansen. Uppfylls detta så är man på säkra sidan.

För mindre transformatorer kan man om man har ett hyfsat grepp om transformatorns nollföljdsdata hantera betydligt högre strömmar än vad som ges ovan och är feltiden kort så blir inte 20 %-regeln tvingande. För riktigt stora transformatorer (> 40 MVA) kan man inte strikt följa 20 % regeln utan närmare studier eftersom man då inte längre kan anse transformatorn som isolerad (höghmigt jordad) i nollpunkten.

Vid transformatorupphandlingar bör man framgent beakta hur pass stor ström man avser vilja kompensera för att bedöma ifall utjämningslindning är motiverat. Detta är viktigare ju mindre transformatorn är.

Klaras inte önskad kompensering i en befintlig anläggning så får man antingen byta transformator, skaffa separat nollpunktsbildare eller kompensera lokalt i större utsträckning.

7.4 Max beröringsspänning 100 V

Uppfyllandet skall alltid ske vid normaldrift. Kravet skall också uppfyllas under en längre utbyggnadshorisont allteftersom nätet kablifieras. Beröringsspänningen styrs av resulterande jordfelsström och nätets jordtagsvärden. Jordfelsströmmen fås fram genom att summera alla aktiva strömbidrag från nätet, nollpunktsmotståndet, nollpunktsreaktorerna, transformatorerna och den utlokaliserade kompenseringsutrustningen.

Det bör poängteras att rätt placerad utlokalisering visserligen innebär ett aktivt bidrag via reaktorns förluster men dessa är normalt betydligt mindre än den resulterande minskningen i de strömberoende förlusterna.

Uppfyllandet skall alltid ske vid normaldrift. Kravet skall också uppfyllas under en längre utbyggnadshorisont allteftersom nätet kablifieras. Beröringsspänningen styrs av resulterande jordfelsström och nätets jordtagsvärden. Jordfelsströmmen fås fram genom att summera alla aktiva strömbidrag från nätet, nollpunktsmotståndet, nollpunktsreaktorerna, transformatorerna och den utlokaliserade kompenseringsutrustningen.

Exempel på överslagberäkningar för att kontrollera hur olika aktiva strömbidrag påverkar ges enligt följande:

12 kV

- 10 MVA, Yyn transformator ger ca 3-5 A, I_r vid 200 A I_c
- 10 MVA, Yynd transformator ger ca 0,5-1 A, I_r vid 200 A I_c

- 200 A reaktor ger ca 2-4 A, vid 200 A I_c
- 10 A utlokaliserad reaktor ger ca 0,3-0,4 A, totalt transformator och reaktor
- Nollpunktsmotstånd 5 A eller 10 A
- Okompenserad kabelradial AXKJ95/25 ger ca:
 - 0,11 A vid 10 km
 - 0,8 A vid 20 km
 - 2,8 A vid 30 km
 - 6,7 A vid 40 km
 - 13 A vid 50 km
 - 23 A vid 60 km

24 kV

- 16 MVA, Yyn transformator ger ca 3-5 A, I_r vid 200 A I_c
- 16 MVA, Yynd transformator ger ca 0,5-1 A, I_r vid 200 A I_c
- 200 A reaktor ger ca 4 A, vid 200 A I_c
- 15 A utlokaliserad reaktor ger ca 0,3 A totalt transformator och reaktor
- Nollpunktsmotstånd 10 A
- Bidrag från de olika facken beräknas lämpligen med de metoder som beskrivs i Kapitel 6.6.

Korrigeringar till andra apparatstorlekar, kompenseringssströmmar, utgrenade radialer etc. görs med hjälp av gjorda beräkningar eller med hjälp av effektsummeringsmetoden. Strömbidragen summeras ihop för att sedan kontrollera att max 100 V beröringsspänning uppfylls.

$$\Sigma I_r \cdot R_{j\max} \leq 100 \text{ V} \quad (6)$$

Snedavstämning kontrolleras speciellt då transformatorer med hög nollföljdsreaktans används och då stora strömmar över 200 A kompenseras centralt. Säkerhetsmarginal för eventuell snedavstämning beaktas då den resulterande jordfelsströmmen beräknas.

Risk för utebliven centralkompensering och eventuella reservmatningsvägar kontrolleras.

7.5 Felbortkoppling 5 000 ohm jordfel

Enstaka långa okompenserade radialer med längder över 40 km sammanhängande totallängd, undersöks närmare. Alla utgreningar ingår.

Följande påverkar:

- Nollpunktsmotstånd påverkar positivt
- Övriga långa radialer påverkar positivt
- Utgrenad radial påverkar positivt förutsatt att totala längden då alla utgreningar är medräknade inte ökar
- Mättransformatorer och reläskydd med hög noggrannhet påverkar positivt
- Nollföljdsspänningens storlek

Utifrån bedömning av alla dessa faktorer bestäms maximal längd. Hänsyn till eventuella reservmatningsvägar beaktas.

7.6 Varierande känslighet vid reläinställning av 5000 ohm

Beroende på driftläggning kan känsligheten variera vilket kan innebära att bortkoppling inte sker som den skall eller att fel med högre felresistans kopplas bort.

Följande påverkar:

- Längre ledning där felet inträffar innebär att den aktiva strömkomponenten minskar
- Flera långa ledningar anslutna till gemensamma stationen innebär att den aktiva strömkomponenten ökar
- Flera långa ledningar anslutna till gemensamma stationen innebär att nollföljdspänningen minskar vilket påverkar inställningsnivåer för skydden
- Utlokaliserad kompensering innebär att ledningslängderna och antal ledningars påverkan minskar i fråga om den aktiv strömkomponenten och nollföljdspänningen

7.7 Placering av utlokaliserad kompensering

Placeras jämt fördelade utifrån och in mot matande station tills man nått önskat resultat. Man bör inte kompensera hela behovet lokalt utan lämna om möjligt minst 20 A för central kompensering. Följande faktorer innebär fördel att placera den utlokaliserade kompensering närmare matande station.

Följande påverkar:

- Reservmatningsväg från annat håll
- Stor centralkompensering i förhållande till matande transformators nollföljdsresistans
- Risk för utebliven central kompensering (avbrott i transformatornollpunkten)
- Utlokaliserad kompensering fördel ur kostnadsskäl
- Förhållandet mellan I_r/I_c kvoten för den centrala och den utlokaliserade kompenseringen

Brytpunkt längre ut från matande station kan väljas om ovan angivna skäl påverkar på motsatt sätt eller inte stämmer överens. Hänsyn till att spänningssättande jordfelsström och risk för sämre möjlighet att känna 5 000 ohm behöver i så fall också beaktas.

7.8 Jordlina

Används i huvudsak för att förbättra jordtagen. Används som en del i att förbättra stationsjordtagen för att uppnå planeringsnivån för de resulterande jordtagsvärdena. Får i vissa fall inte förbinda områden där det finns direktjordade system eftersom risk för att spänningshöjning kan sprida sig

över större område. Längsgående jordlina påverkar även nollföljdsresistansen positivt och därmed den aktiva icke kompenserbara strömkomponenten. Detta är av mindre betydelse i nätets perifera delar men gör desto större nytta ju närmare matande station man är. Jordlinan bör om den skall påverka R_0 ligga så nära kabeln som möjligt.

7.9 Central kompensering

Beror på antal utgående linjer, matande transformators nollföljdsresistans och avståndet mellan den utlokaliserad kompensering och den matande stationen. Hänsyn tas på samma vis till de faktorer som påverkar den utlokaliserade kompenseringen. Maximalt c:a 20 km eller motsvarande I_c på ca 40 A per utgående 12 kV kabelradial behöver centralkompenseras. Motsvarande värden för 24 kV är att c:a 8-10 km närmast matande station kan kompenseras med traditionella metoder då resten av nätet lokalkompenseras.

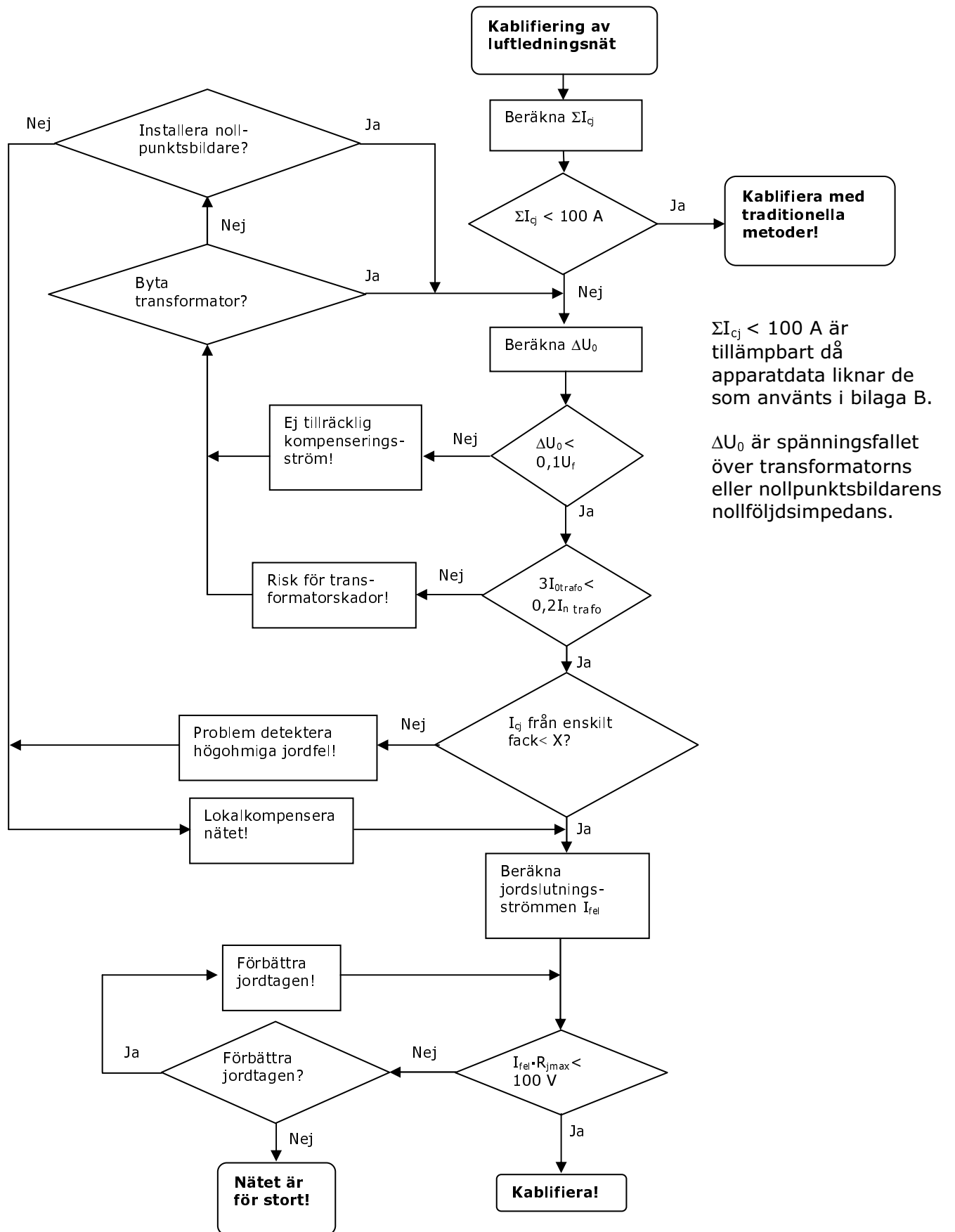
7.10 Flödesschema

För att åskådliggöra processen i samband med planering av kabelfieringsprojekt har ett flödesschema med de viktiga kriterierna tagits fram, Figur 7.1. Schemat har en ingång och tre möjliga utgångar.

Vid relativt små nät kan traditionella metoder användas. Gränsen har för 24 kV-nät satts till 100 A, men det är viktigt att poängtera att kraven på spänningssättning mm måste vara uppfyllda. Vid tveksamhet bör hela flödet följas till någon av de andra utgångarna.

Med lite arbete kan man komma fram till den andra utgången. Under vägen dit har en del kostnader uppstått. Det kan givetvis vara så att det finns ekonomiskt fördelaktigare alternativ som bör studeras.

Den tredje utgången innebär att nätet blir för stort för de jordfelsströmmar som uppstår. Alternativa lösningar måste tas fram. Nätet kan kanske delas upp flera delar som drivs sektionerat. En ny inmatningsväg från högre spänningsnivå måste kanske övervägas.



Figur 7.1 Flödesschema för planering av kablifieringsprojekt.

8 Referenser

- [1] ABB High Voltage Cables, Gunnar Henning, 1988-08-22
- [2] ABB Switchgear Manual 8th edition
- [3] Rapport från VAST - Vattenfalls jordningskommitté, juni 1987
- [4] Willheim, R.: "Das Erdschlußproblem in Hochspannungsnetzen", Springer, Berlin, 1936.
- [5] Willheim, R. & Waters, M.: "Neutral Grounding in High-Voltage Transmission", Elsevier, New York, 1956.

A Beräkningar utförda av Vattenfall Power Consultant AB

Graferna anger effekter, nollföljdstömmar och nollföljdspänningar som effektivvärden. Effektivvärdet utläses längst ut till höger i grafen där det stabiliserat sig till en stationär nivå. Referensriktningarna för nollföljdstömmarna är negativa värden sett utifrån matande station och ut i nätet och felstället. Exempelvis innebär $I_r = -5\text{ A}$ att skyddet i matande station detekterar en riktad aktiv strömkomponent på 5 A ut i nätet.

Transienterna visas med sin kurvform.

A.1 Simuleringsdata

A.1.1 Matande nät

S_k	100	MVA
$U_{\text{drift } 40\text{kV}}$	45	kV
$U_{\text{drift } 10\text{kV}}$	11	kV
f	50	Hz

Tabell A-1 Huvudsaklig data för det matande nätet.

A.1.2 Krafttransformator utan utjämningslindning

Kopplingsart	YNyn	
Märkspänning	45/11,5 kV	
S_n	10	MVA
Z_k	9	%
X/R	15	
$X_{11,5\text{kV}}$	1,2	Ω /fas
$R_{11,5\text{kV}}$	0,08	Ω /fas
$X_{011,5\text{kV}}$	12	Ω /fas
$R_{011,5\text{kV}}$	2,4	Ω /fas
$Z_{011,5\text{kV}}$	12,2	Ω /fas

Tabell A-2 Transformator utan utjämningslindning.

A.1.3 Krafttransformator med utjämningslindning

Kopplingsart	YNynd	
Märkspänning	45/11,5 kV	
S_n	10	MVA
Z_k	9	%
X/R	15	
$X_{11,5\text{kV}}$	1,2	Ω /fas
$R_{11,5\text{kV}}$	0,08	Ω /fas
$X_{011,5\text{kV}}$	1,2	Ω /fas
$R_{011,5\text{kV}}$	0,24	Ω /fas
$Z_{011,5\text{kV}}$	1,22	Ω /fas

Tabell A-3 Transformator med utjämningslindning.

A.1.4 Nollpunktsutrustning

Nollpunktsreaktor

Värdet på nollpunktsreaktorn varierar mellan de olika studerade näten. Näten har stämts av med ett 20 k Ω -fel på samlingsskenan. Reaktorn har i beräkningarna varit förlustfri.

Nollpunktsmotstånd

Nollpunktsmotståndet är dimensionerat för att generera 5 A vid fullt utbildat jordfel.

R 1270 Ω

Tabell A-4 Nollpunktsmotstånd

A.1.5 Lokalkompensering

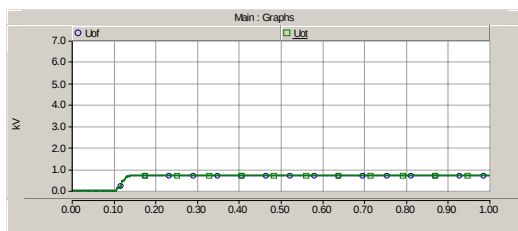
De utlokaliserade nollpunktsreaktorerna (lokalkompensering) har i 12 kV-näten kompenserat 10 A vardera. Resistivt strömbidrag uppgår till 3 A. Nollföljdsdata i beräkningsprogrammet har anpassats så att transformator och reaktor tillsammans ger upphov till ovan angivna strömbidrag.

Transformator	Omsättning	11,5/0,42 kV
	Kopplingsart	ZNyn
	S_n	100 kVA
	$R_{11,5kV}$	58 Ω /fas
	$X_{11,5kV}$	58 Ω /fas

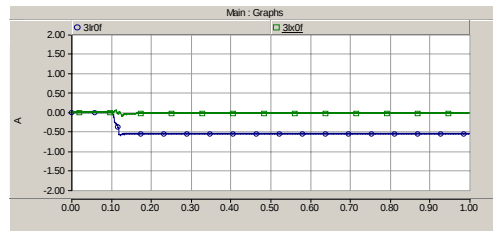
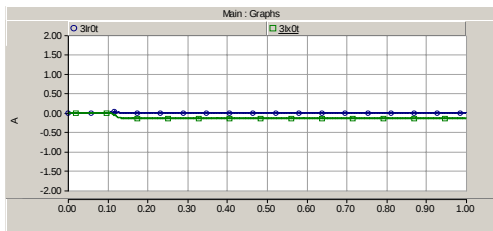
Tabell A-4 Lokaltransformator

A.2 Rent luftledningsnät

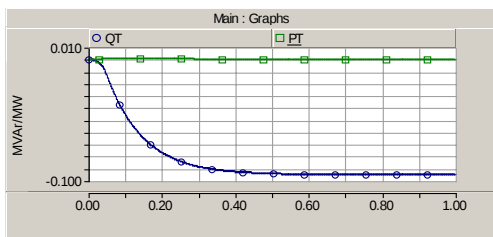
Fem utgående linjer med FeAl 62, 50 km per linje totalt 250 km, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd.



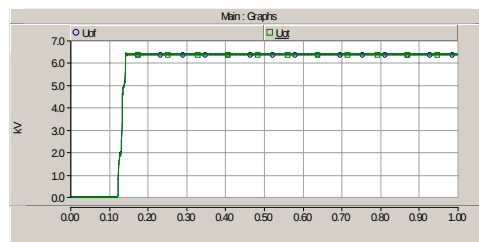
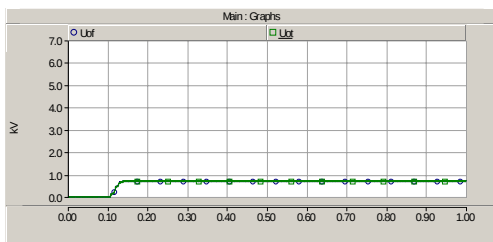
Nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och (U_{0f}). 20 000 ohm fel i samlingskenan matande station.



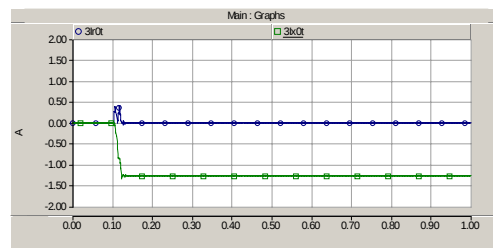
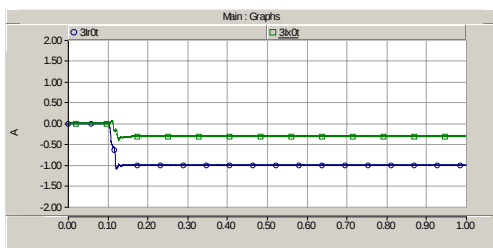
Nollföljdström vid 20 000 ohm uppdelad i I_r och I_x , (t) = ström ut från matande station på en av linjerna, (f) = fel i samlingskena matande station.



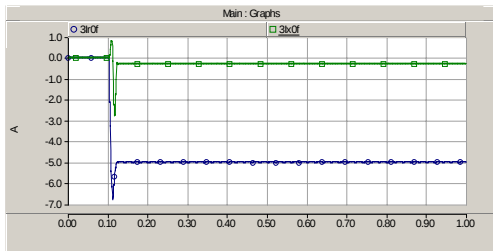
Aktiv och reaktiv effekt med effektriktning från 10 MVA transformatorn och ut i distributionsnätet.



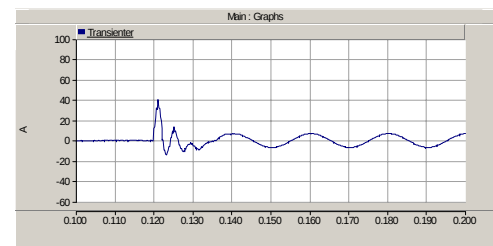
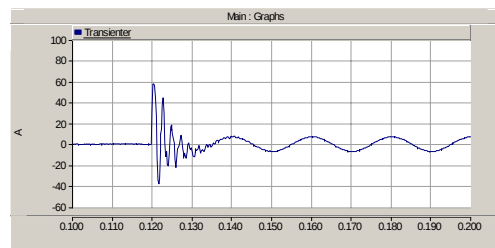
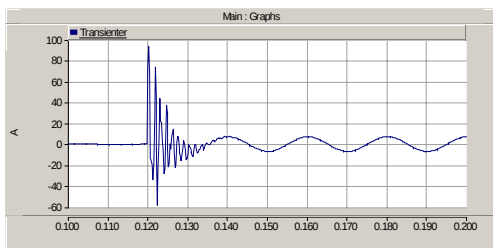
Vänstra bilden nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på en av linjerna. Högra bilden nollföljdspänning i matande station och längst ut på en av linjerna vid stumt jordfel i matande station.



Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , vänstra bilden ström ut från matande station på felbehäftad linje, 5 000 ohm fel längst ut. Högra bilden ström på en av de friska linjerna och stumt jordfel längst ut på en annan linje.



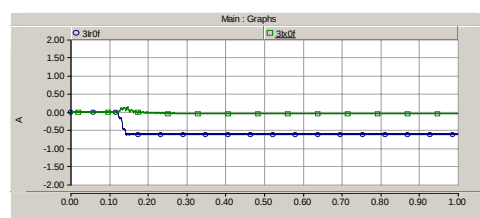
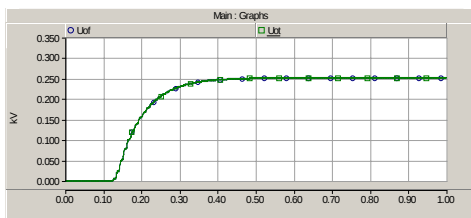
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , Maximal spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel i matande station.



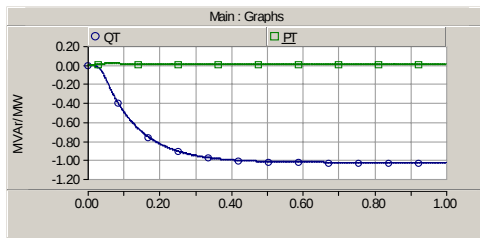
Transienta strömmar vid stumt jordfel och jordtagsresistans 10 ohm. Fel i matade station, 10 km ut på ledningen samt 50 km ut på ledningen.

A.3 Kabelradial 40 km

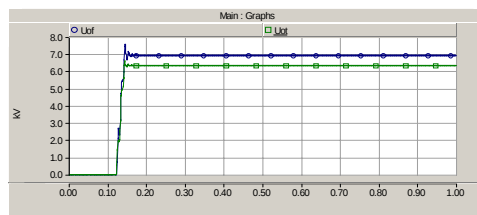
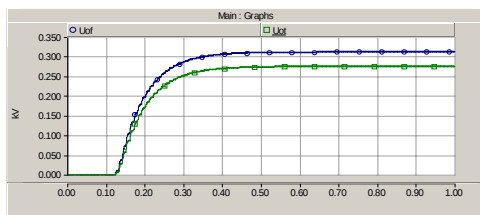
Fyra utgående linjer med 10 km FEAL 62 och 10 km AXKJ 95/25. En utgående linje 40 km AXKJ 95/25, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd.



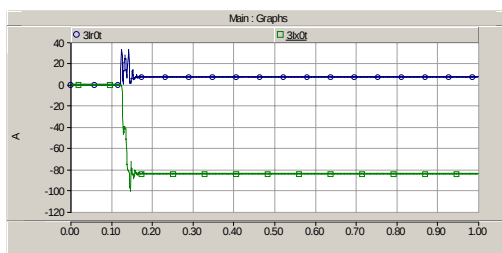
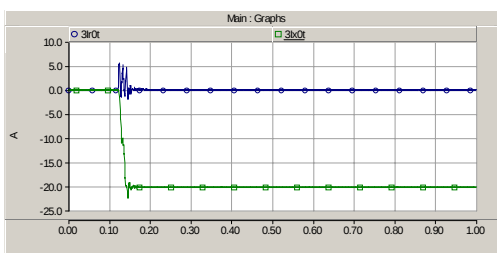
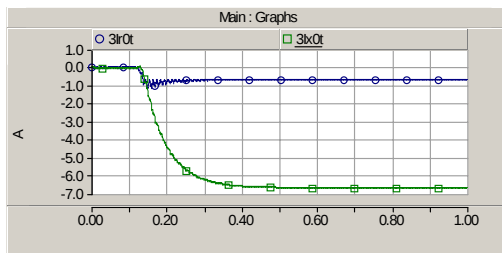
Nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och (U_{0f}) och nollföljdström uppdelat i I_r och I_x . 20 000 ohm fel i samlingskenan matande station.



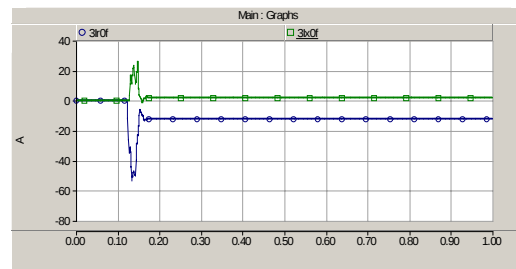
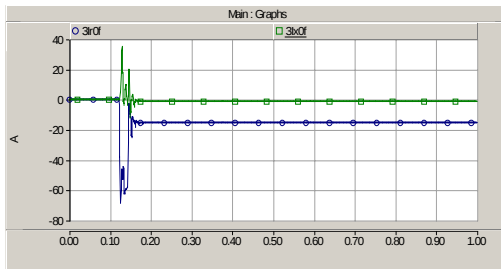
Aktiv och reaktiv effekt med effektriktning från 10 MVA transformatorn och ut i distributionsnätet.



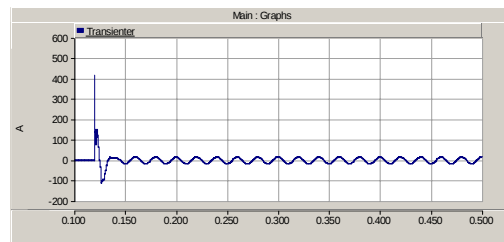
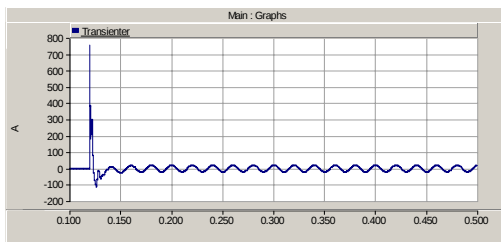
Vänstra bilden nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på längsta linjen. Högra bilden stumt jordfel i matande station, nollföljdspänning i matande station och längst ut på längsta linjen.



Nollföljdstöm uppdelad i I_r och I_x , vänstra bilden högst upp, ström ut från matande station, 5 000 ohm fel längs ut på längsta linjen. Högra bilden högst upp, ström på en av de korta linjerna och stumt jordfel nära station på den längsta linjen. Vänstra bilden längst ner ström ut på den längsta linjen vid stumt jordfel nära station på någon av de övriga linjerna.



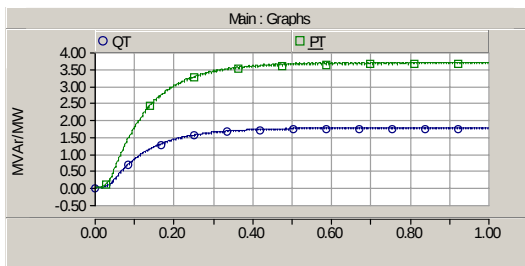
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel. Vänstra bilden fel i matande station. Högra bilden fel längst ut på längsta linjen.



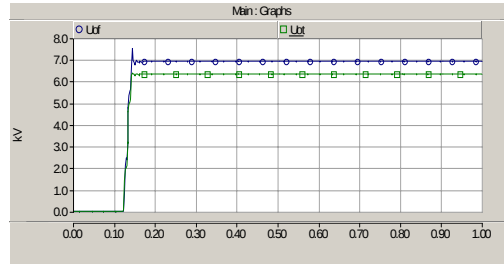
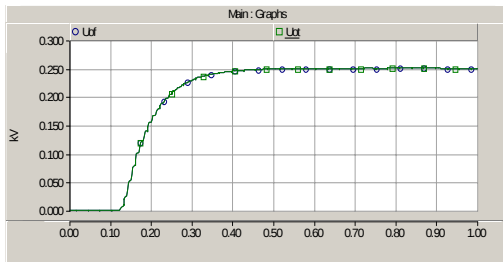
Transienta strömmar vid stumt jordfel och jordtagsresistans 10 ohm. Fel i matade station samt längst ut på längsta linjen.

A.4 Kabelradial 40 km med last

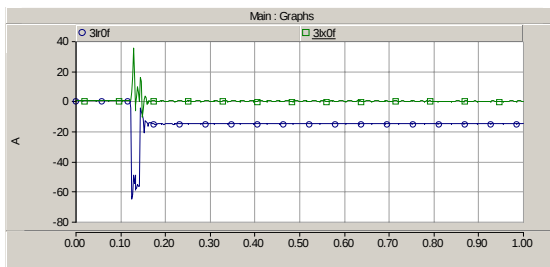
Fyra utgående linjer med 10 km FEAL 62 och 10 km AXKJ 95/25. En utgående linje 40 km AXKJ 95/25, avstämt vid 20 000 ohm, belastat nät med 4 MW och 3 MVar, 5 A nollpunktsmotstånd.



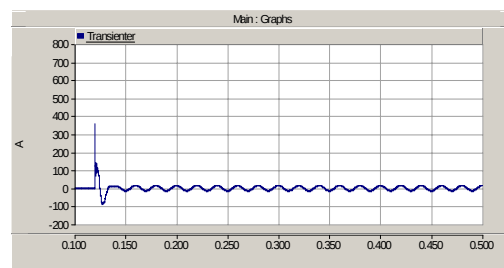
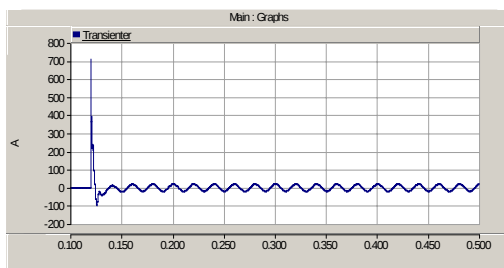
Aktiv och reaktiv effekt med effektriktning från 10 MVA transformatorn och ut i distributionsnätet.



Nollföljdspänning i matande station (U_{ot}) och längst ut på en av linjerna (U_{of}). 20 000 ohm fel längs ut på längst linjen. Högra bilden stumt jordfel i matande station, nollföljdspänning i matande station och längst ut på längst linjen.



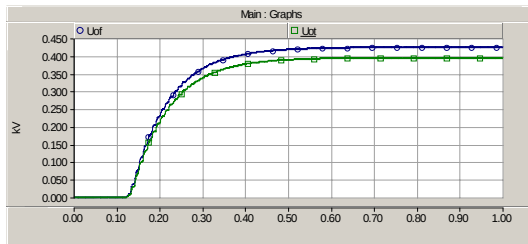
Nollföljdstöm uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel i matande station.



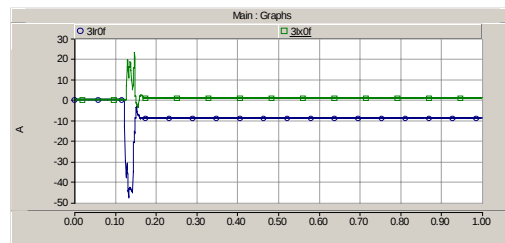
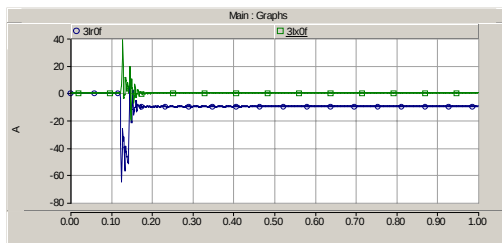
Transienta strömmar vid stumt jordfel och jordtagsresistans 10 ohm. Fel i matade station samt längst ut på längst linjen.

A.5 Kabelradial 30 km

Fyra utgående linjer med 10 km FEAL 62 och 10 km AXKJ 95/25. En utgående linje 30 km AXKJ 95/25, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd.



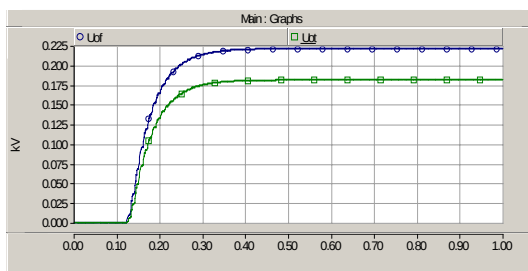
Nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på längsta linjen.



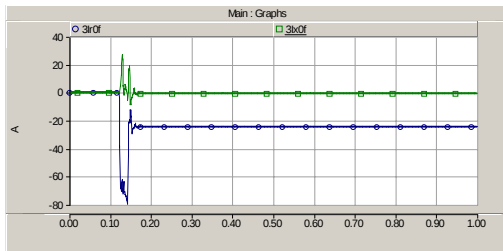
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel. Vänstra bilden fel i matande station. Högra bilden fel längst ut på längsta linjen.

A.6 Kabelradial 50 km

Fyra utgående linjer med 10 km FEAL 62 och 10 km AXKJ 95/25. En utgående linje 50 km AXKJ 95/25, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd.



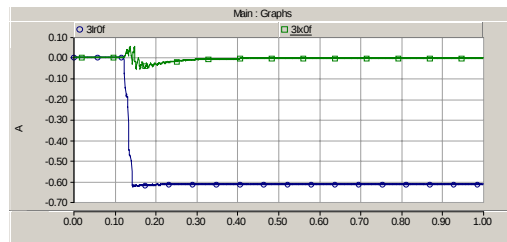
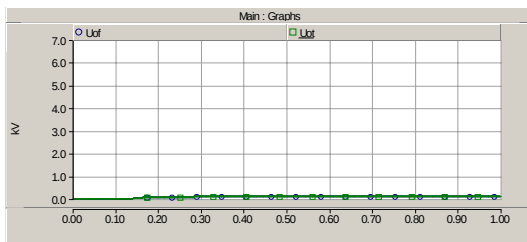
Nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på längsta linjen.



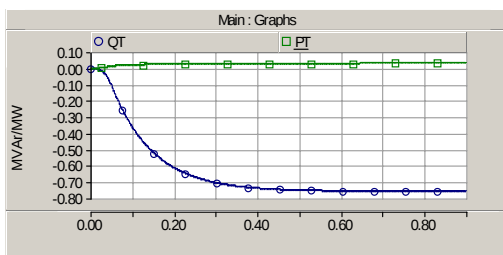
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel i matande station.

A.7 Kabelradial 60 km

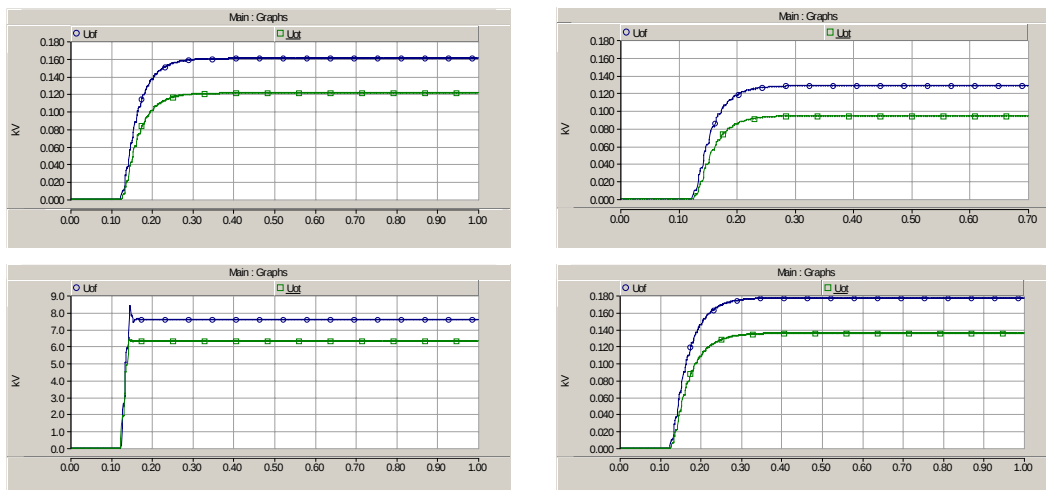
Fyra utgående linjer med 10 km FEAL 62 och 10 km AXKJ 95/25. En utgående linje 60 km AXKJ 95/25, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd.



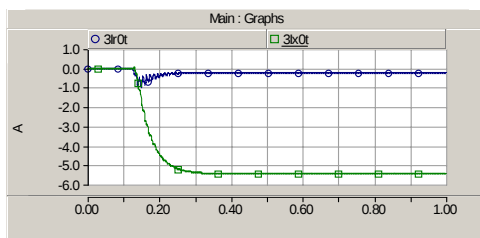
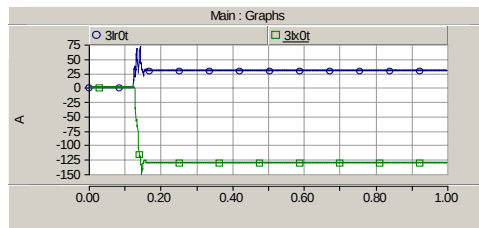
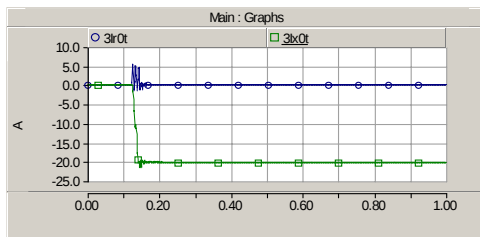
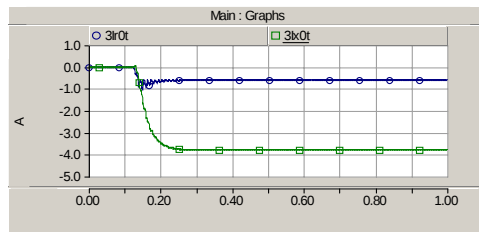
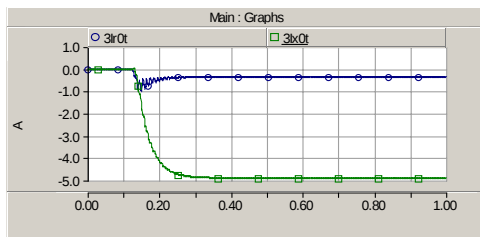
Nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och (U_{0f}) och nollföljdström uppdelad i I_r och I_x . 20 000 ohm fel i samlingsskenan matande station.



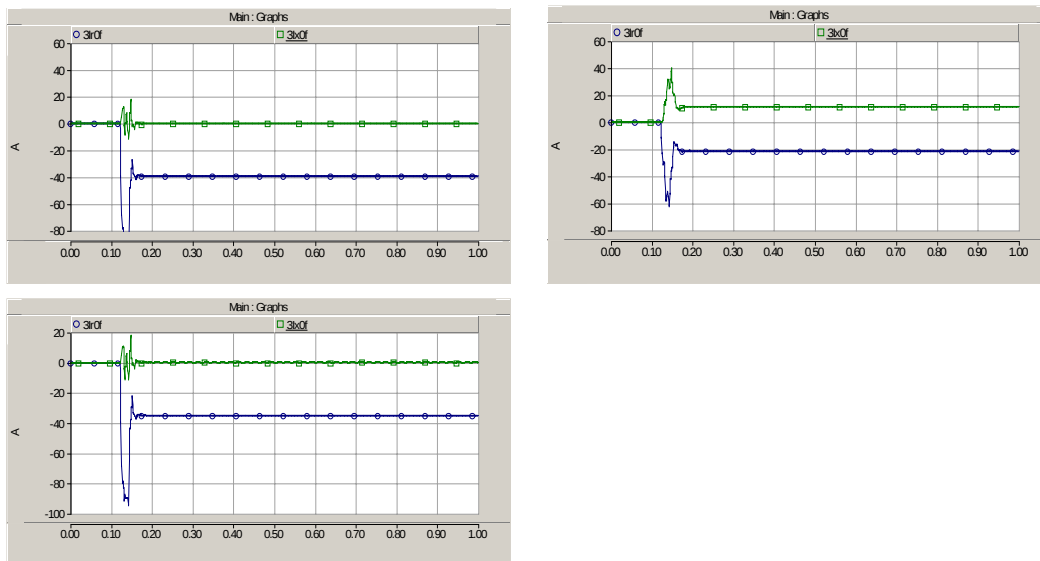
Aktiv och reaktiv effekt ut på den längsta linjen



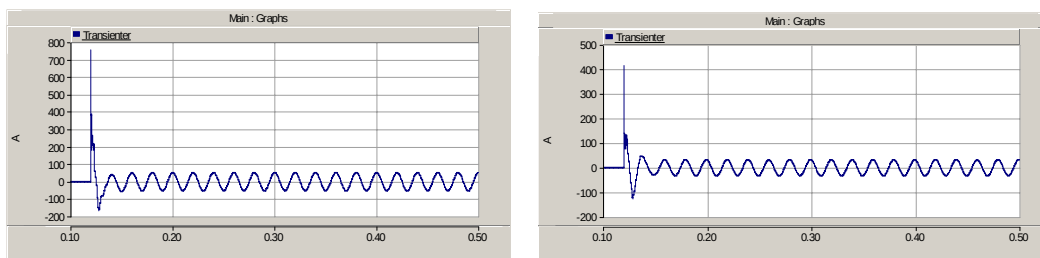
Vänstra bilden högst upp nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}), 20 000 ohm fel längs ut på längst linjen. Högra bilden högst upp lika föregående men med 20 A nollpunktsmotstånd i stället för ett 5 A nollpunktsmotstånd. Vänstra bilden längst ner, stumt jordfel i matande station, nollföljdspänning i matande station och längst ut på längst linjen. Högra bilden längst ner, matande transformator utrustad med utjämningslindning, 20 000 ohm fel längs ut på längst linjen.



Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , vänstra bilden högst upp, ström ut från matande station, 5 000 ohm fel längst ut på längsta linjen. Högra bilden högst upp, lika föregående bild med där ett 20 A nollpunktsmotstånd används i stället för ett 5 A nollpunktsmotstånd. Vänstra bilden näst längst ner, ström på en av de korta linjerna och stumt jordfel nära station på den längsta linjen. Högra bilden näst längst ner ström ut på den längsta linjen vid stumt jordfel nära station på någon av de övriga linjerna. Vänstra bilden längst ner, matande transformator utrustad med utjämningslindning, 5 000 ohm fel längst ut på längsta linjen.



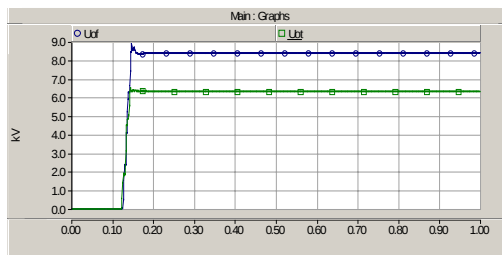
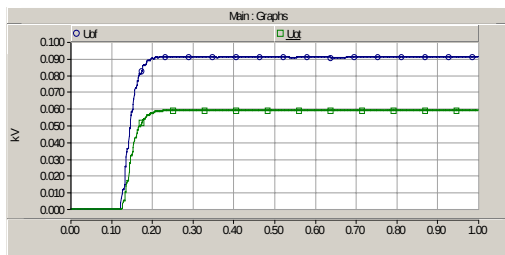
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel. Vänstra bilden fel i matande station. Högra bilden fel längst ut på längsta linjen. Vänstra bilden längst ner, matande transformatorn utrustad med utjämningslindning, stumt jordfel i matande station.



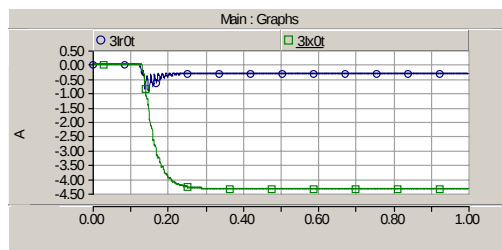
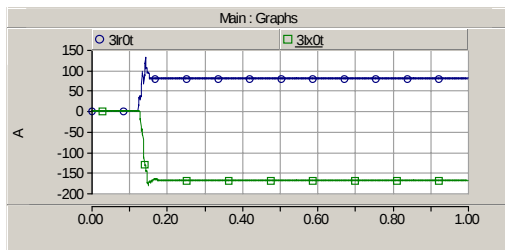
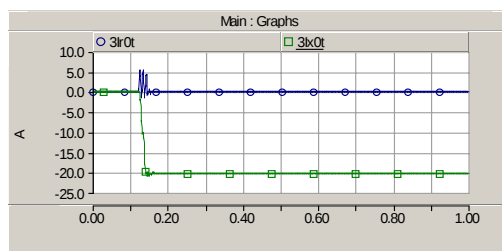
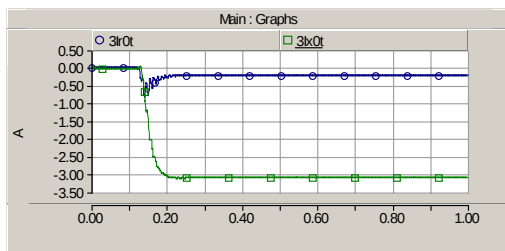
Transienta strömmar vid stumt jordfel och jordtagsresistans 10 ohm. Fel i matade station samt längst ut på längsta linjen.

A.8 Kabelradial 80 km

Fyra utgående linjer med 10 km FEAL 62 och 10 km AXKJ 95/25. En utgående linje 80 km AXKJ 95/25, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd.



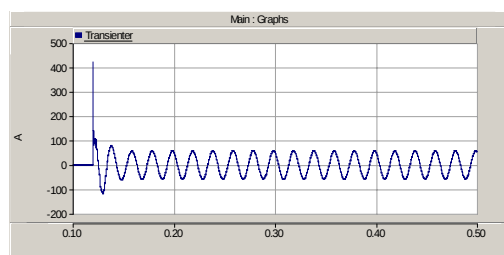
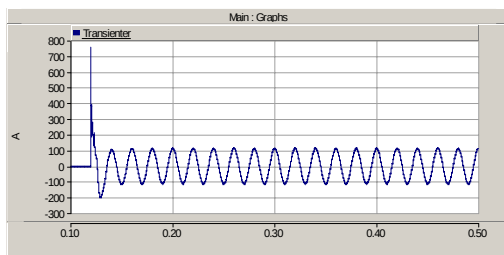
Vänstra bilden nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på längsta linjen. Högra bilden stumt jordfel i matande station, nollföljdspänning i matande station och längst ut på längsta linjen.



Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , vänstra bilden högst upp, ström ut från matande station, 5 000 ohm fel längst ut på längsta linjen. Högra bilden högst upp, ström på en av de korta linjerna och stumt jordfel nära station på den längsta linjen. Vänstra bilden längst ner ström ut på den längsta linjen vid stumt jordfel nära station på någon av de övriga linjerna. Högra bilden längst ner 5 000 ohm fel längst ut på längsta linjen. Längsta linjen uppdelas efter 20 km i två 30 km linjer.



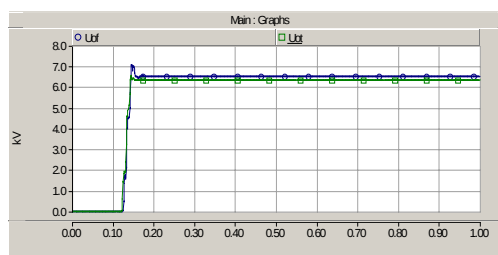
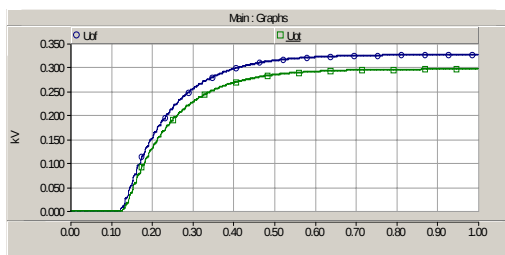
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel. Vänstra bilden fel i matande station. Högra bilden fel längst ut på längsta linjen. Vänstra bilden längst ner stumt fel i matande station och längsta linjen uppdelas efter 20 km i två 30 km linjer.



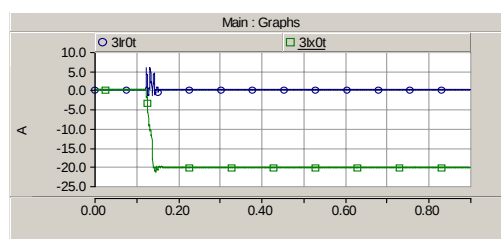
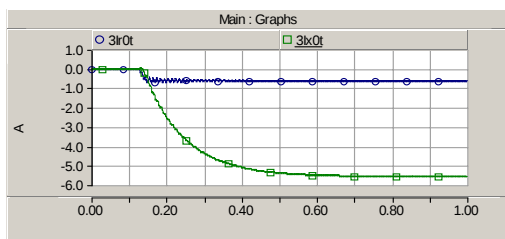
Transienta strömmar vid stumt jordfel och jordtagsresistans 10 ohm. Fel i matade station samt längst ut på längsta linjen.

A.9 Kabelradial 80 km med utlokaliserad kompensering

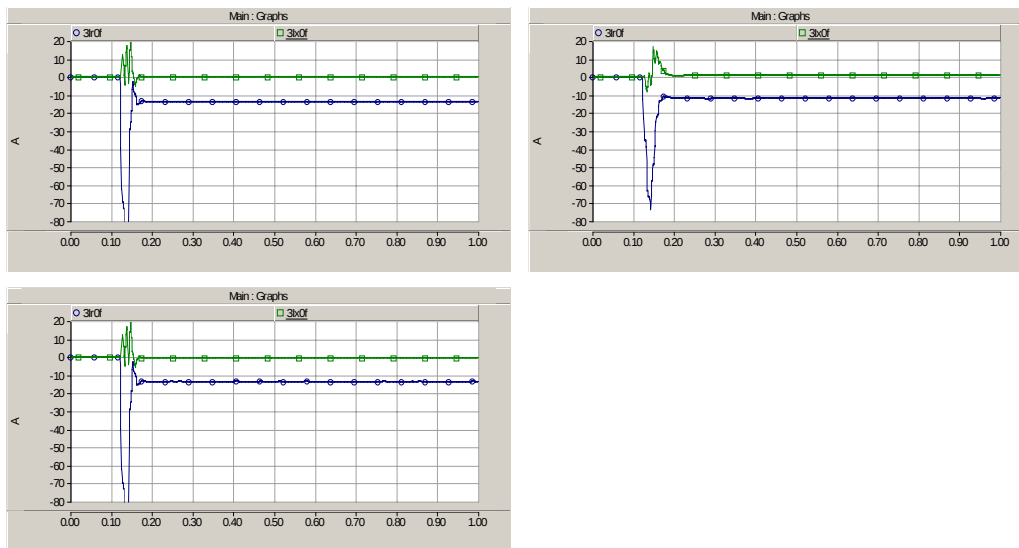
Fyra utgående linjer med 10 km FeAl 62 och 10 km AXKJ 95/25. En utgående linje 80 km AXKJ 95/25, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd. Utlokaliserad kompensering 10x10 A. Jämt fördelade på 50 km av den yttre delen av längsta linjen.



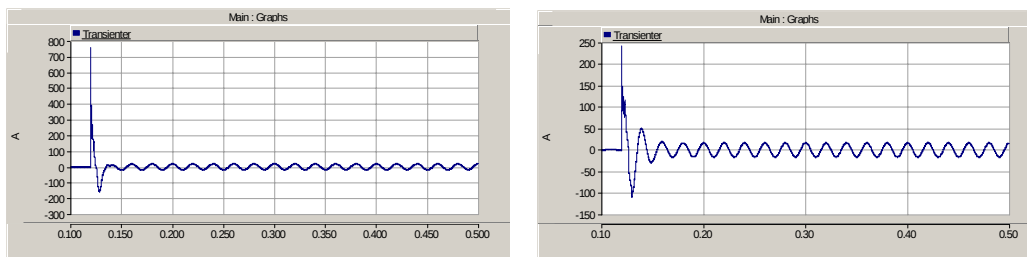
Vänstra bilden nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på längsta linjen. Högra bilden stumt jordfel i matande station, nollföljdspänning i matande station och längst ut på längsta linjen.



Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , vänstra bilden högst upp, ström ut från matande station, 5 000 ohm fel längst ut på längsta linjen. Högra bilden högst upp, ström på en av de korta linjerna och stumt jordfel nära station på den längsta linjen. Vänstra bilden längst ner ström ut på den längsta linjen vid stumt jordfel nära station på någon av de övriga linjerna. Högra bilden längst ner ström ut från längsta linjen, 5 000 ohm fel på längsta linjen nära matande station.



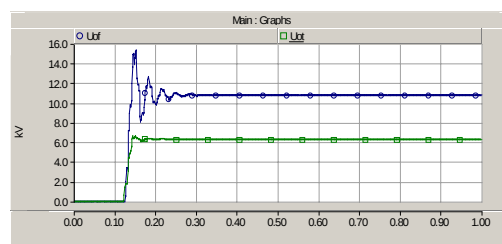
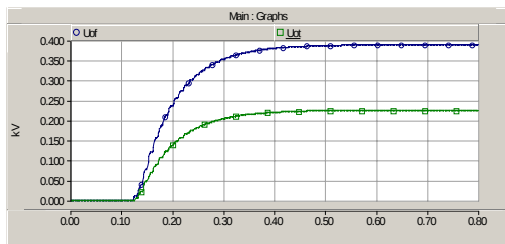
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel. Vänstra bilden fel i matande station. Högra bilden fel längst ut på längsta linjen. Vänstra bilden längst ner fel i matande station, 8 stycken 10 A spolar ersatta med 2 stycken 40 A spolar.



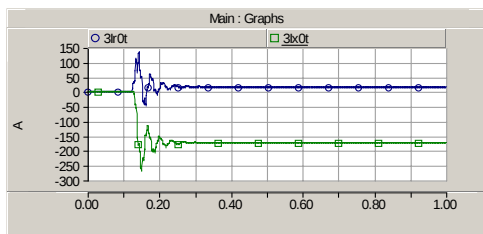
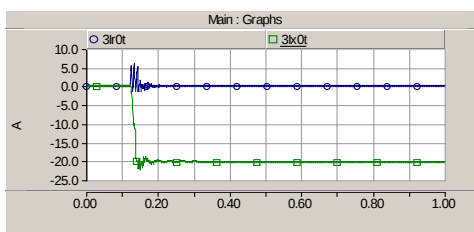
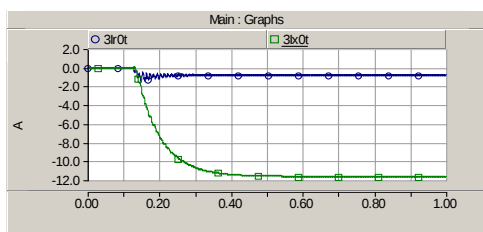
Transienta strömmar vid stumt jordfel och jordtagsresistans 10 ohm. Fel i matade station samt längst ut på längsta linjen.

A.10 Kabelradial 60 km med öppna skärmkretsar

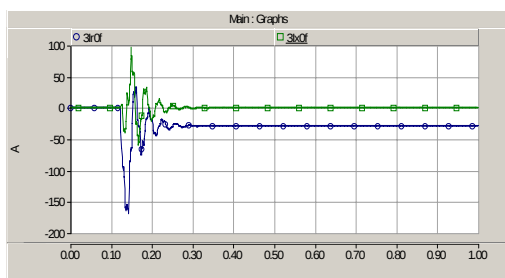
Fyra utgående linjer med 10 km FEAL 62 och 10 km AXKJ 95/25. En utgående linje 60 km AXKJ 95/25 med öppna skärmkretsar, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd.



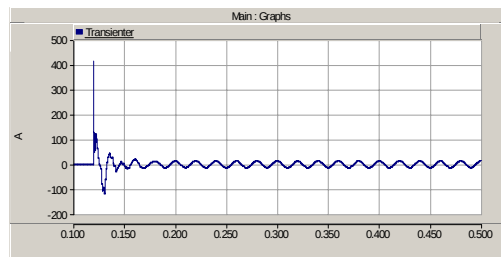
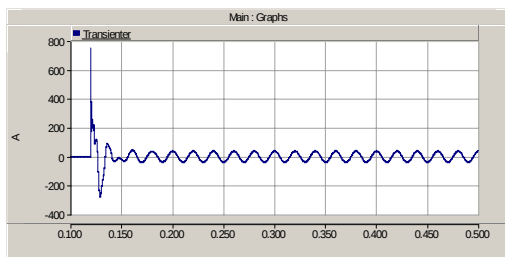
Vänstra bilden nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på längsta linjen. Högra bilden stumt jordfel i matande station, nollföljdspänning i matande station och längst ut på längsta linjen.



Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , vänstra bilden högst upp, ström ut från matande station, 5 000 ohm fel längst ut på längsta linjen. Högra bilden högst upp, ström på en av de korta linjerna och stumt jordfel nära station på den längsta linjen. Vänstra bilden längst ner ström ut på den längsta linjen vid stumt jordfel nära station på någon av de övriga linjerna.



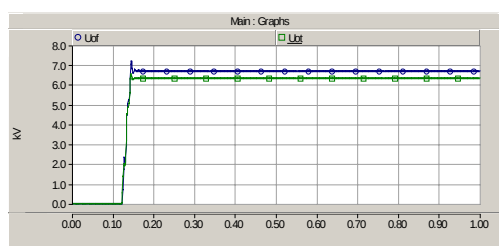
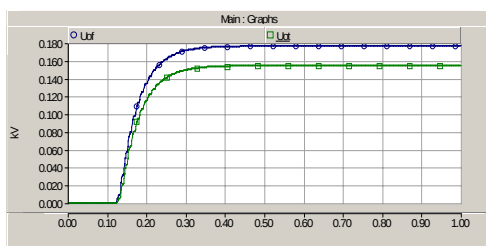
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel. Vänstra bilden fel i matande station. Högra bilden fel längst ut på längsta linjen.



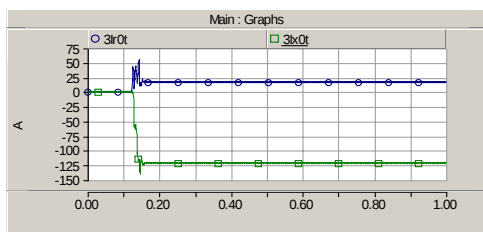
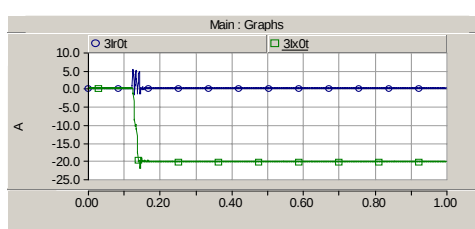
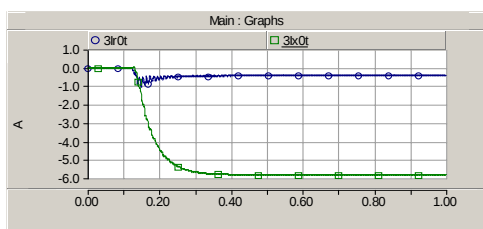
Transienta strömmar vid stumt jordfel och jordtagsresistans 10 ohm. Fel i matade station samt längst ut på längsta linjen.

A.11 Kabelradial 60 km med enledarkabel

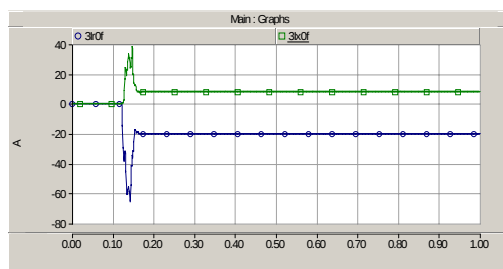
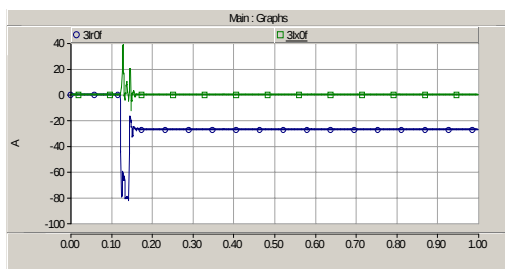
Fyra utgående linjer med 10 km FEAL 62 och 10 km AXKJ 95/25. En utgående linje 60 km AXKJ3x1x95/25, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd.



Vänstra bilden nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på längsta linjen. Högra bilden stumt jordfel i matande station, nollföljdspänning i matande station och längst ut på längsta linjen.



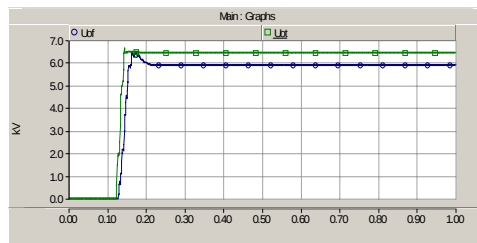
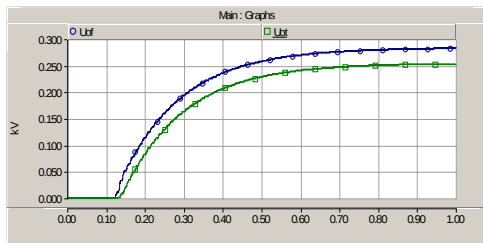
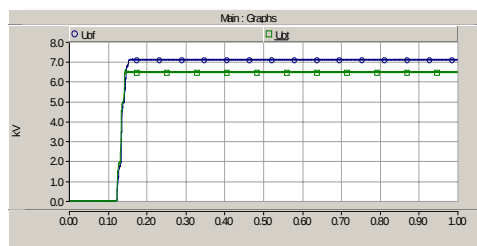
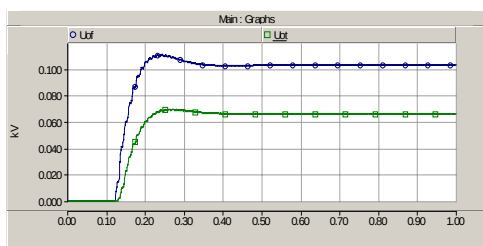
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , vänstra bilden högst upp, ström ut från matande station, 5 000 ohm fel längs ut på längsta linjen. Högra bilden högst upp, ström på en av de korta linjerna och stumt jordfel nära station på den längsta linjen. Vänstra bilden längst ner ström ut på den längsta linjen vid stumt jordfel nära station på någon av de övriga linjerna.



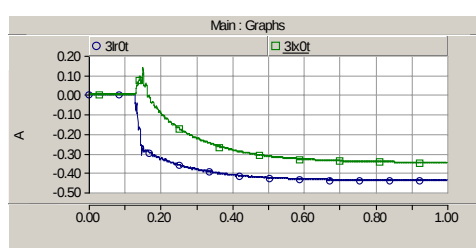
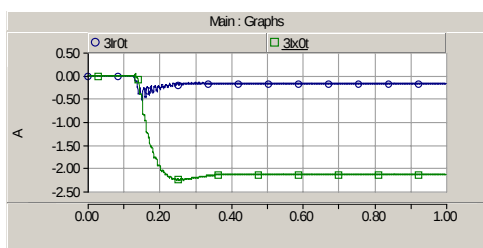
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel. Vänstra bilden fel i matande station. Högra bilden fel längst ut på längsta linjen.

A.12 Reservmatning med utlokaliserad kompensering

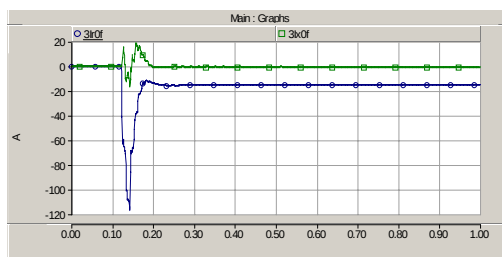
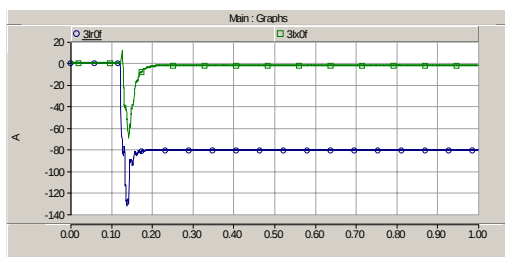
Fyra utgående linjer med 10 km FEAL 62 och 10 km AXKJ 95/25. En utgående linje reservmatning 160 km AXKJ 95/25, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd. Utlokaliserad kompensering 20x10 A. Jämt fördelade på 100 km av mittersta delen av längsta linjen respektive 32x10 A jämt fördelade över hela linjen.



Vänstra bilden nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på längsta linjen. Högra bilden stumt jordfel i matande station, nollföljdspänning i matande station och längst ut på längsta linjen. Övre bilderna 100 km kompenserat med utlokaliserade spolar och undre bilderna hela längsta linjen kompenserad.



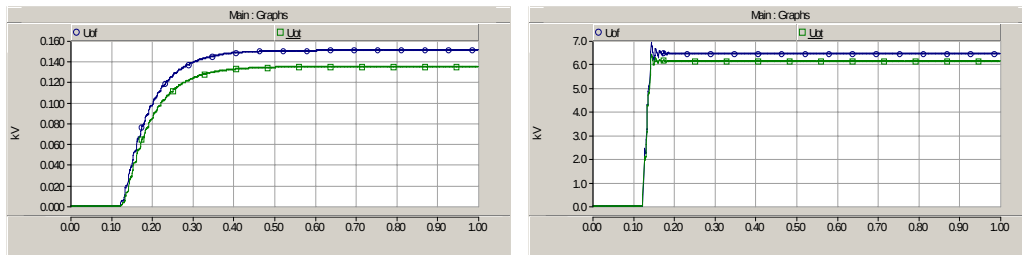
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , ström ut från matande station, 5 000 ohm fel längst ut på längsta linjen. Vänstra bilden delkompenserad linje, högra bilden linjen fullkompenserad.



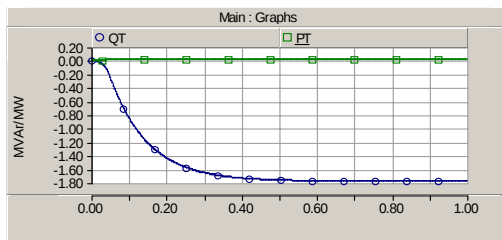
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel vid fel i matande station. Vänstra bilden delkompenserad linje, högra bilden linjen fullkompenserad.

A.13 Kabelradialer 5x30 km

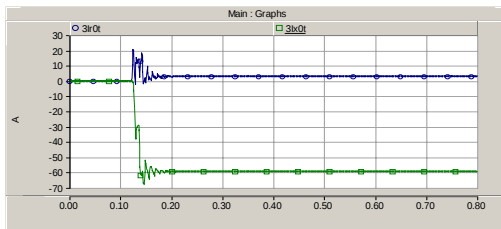
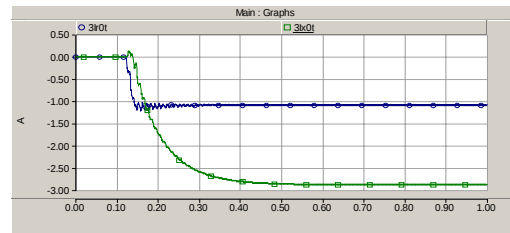
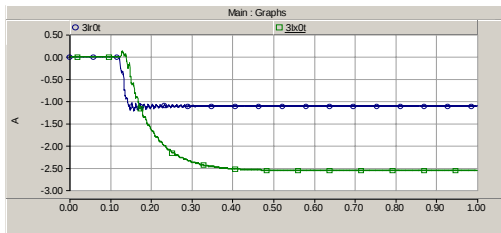
Fem utgående linjer med 30 km AXKJ 95/25, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd.



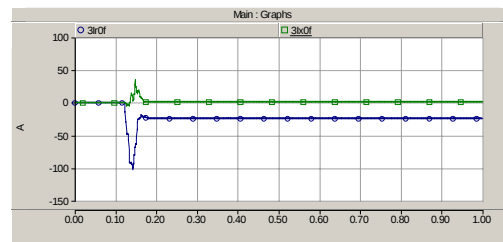
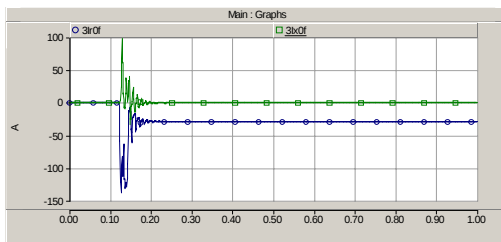
Vänstra bilden nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på längsta linjen. Högra bilden stumt jordfel i matande station, nollföljdspänning i matande station och längst ut på längsta linjen.



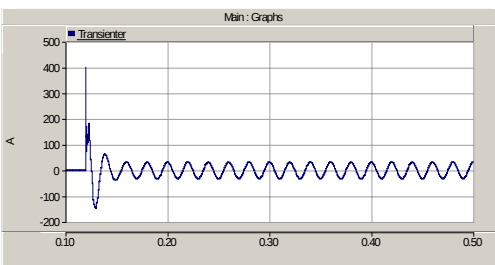
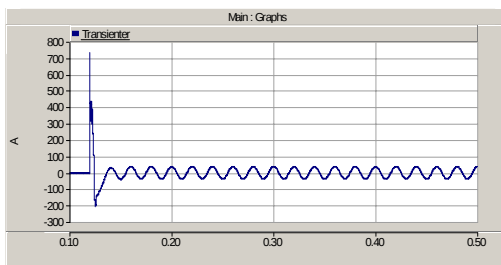
Aktiv och reaktiv effekt med effektriktning från 10 MVA transformatorn och ut i distributionsnätet.



Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , vänstra bilden högst upp, ström ut från matande station, 5 000 ohm fel längst ut på en av linjerna. Högra bilden högst upp, lika föregående bild men med urkopplat nollpunktsmotstånd. Vänstra bilden längst ner ström på en av linjerna och stumt jordfel nära station på någon av övriga linjer.



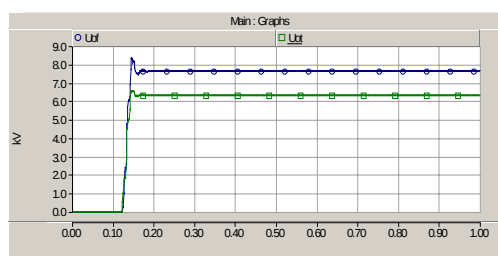
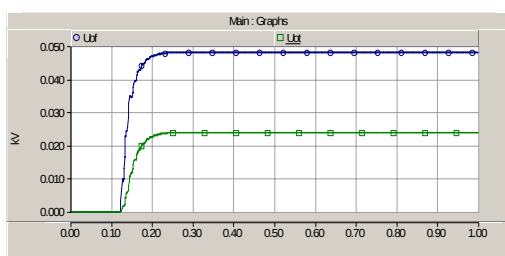
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel. Vänstra bilden fel i matande station. Högra bilden fel längst ut på en av linjerna.



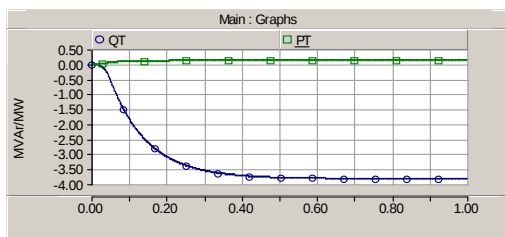
Transienta strömmar vid stumt jordfel och jordtagsresistans 10 ohm. Fel i matade station samt längst ut på längsta linjen.

A.14 Kabelradialer 5x60 km

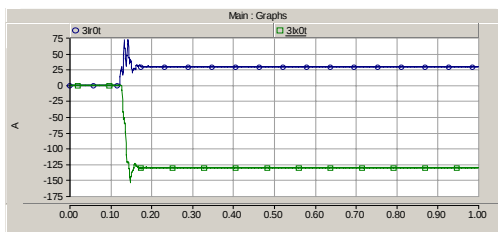
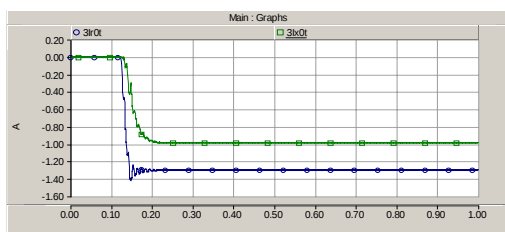
Fem utgående linjer med 60 km AXKJ 95/25, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd.



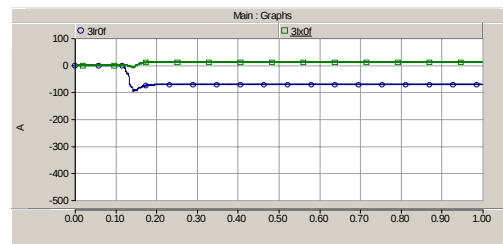
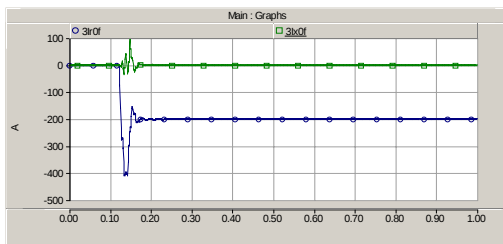
Vänstra bilden nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på längsta linjen. Högra bilden stumt jordfel i matande station, nollföljdspänning i matande station och längst ut på längsta linjen.



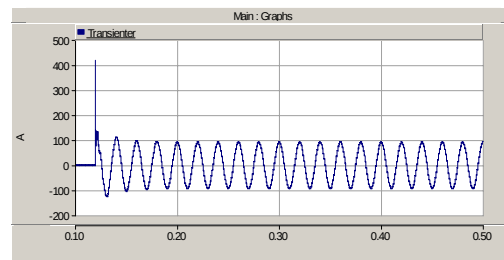
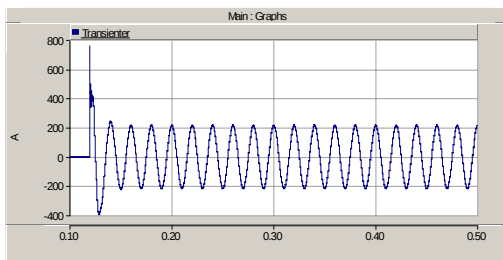
Aktiv och reaktiv effekt med effektriktning från 10 MVA transformatorn och ut i distributionsnätet.



Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , vänstra bilden, ström ut från matande station, 5 000 ohm fel längs ut på en av linjerna. Högra bilden, ström på en av linjerna och stumt jordfel nära station på någon av övriga linjer.



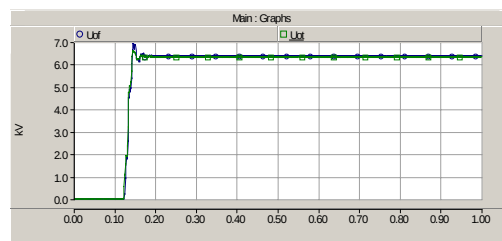
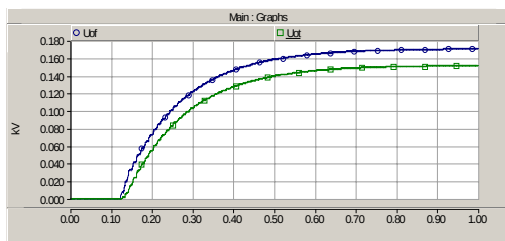
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel. Vänstra bilden fel i matande station. Högra bilden fel längst ut på en av linjerna.



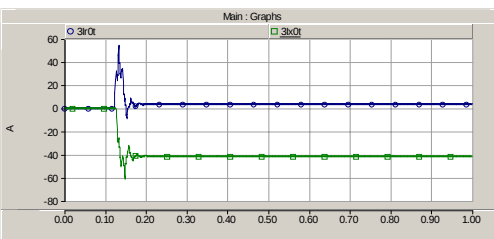
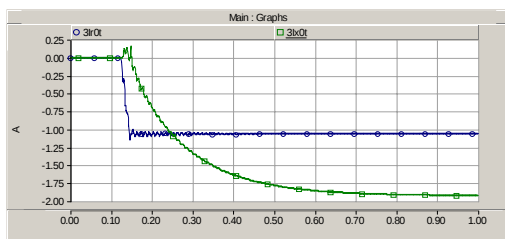
Transienta strömmar vid stumt jordfel och jordtagsresistans 10 ohm. Fel i matade station samt längst ut på längsta linjen.

A.15 Kabelradialer 5x60 km med utlokaliserad kompensering

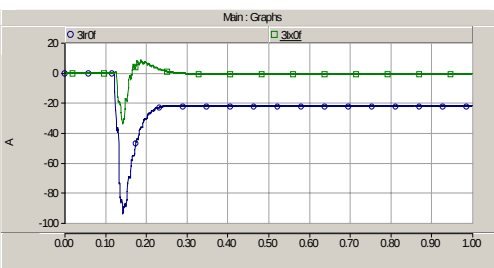
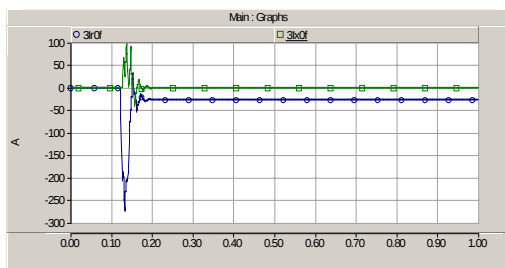
Fem utgående linjer, 60 km AXKJ 95/25, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd. Utlokaliserad kompensering 8x10 A på alla linjer. Jämt fördelade på 40 km av den yttre delen av linjerna.



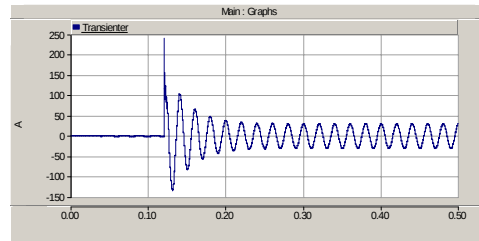
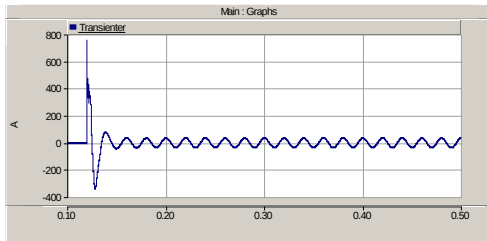
Vänstra bilden nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på längsta linjen. Högra bilden stumt jordfel i matande station, nollföljdspänning i matande station och längst ut på någon av linjerna.



Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , vänstra bilden, ström ut från matande station, 5 000 ohm fel längst ut på någon av linjerna. Högra bilden, ström på en av linjerna och stumt jordfel nära station på någon av övriga linjer.



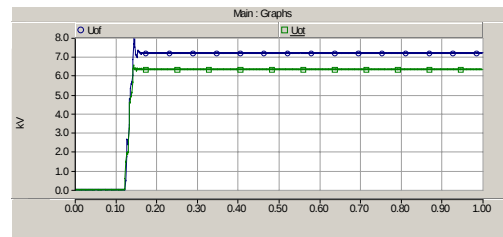
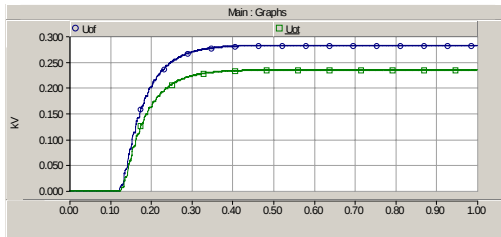
Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel. Vänstra bilden fel i matande station. Högra bilden fel längst ut på en av linjerna.



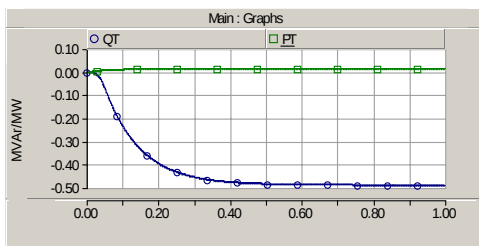
Transienta strömmar vid stumt jordfel och jordtagsresistans 10 ohm. Fel i matade station samt längst ut på en av linjerna.

A.16 Kabelradial 60 km med 24 kV kabel

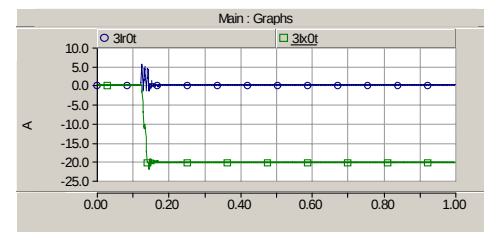
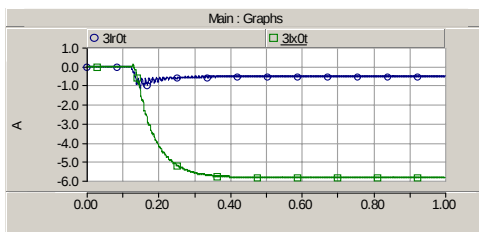
Fyra utgående linjer med 10 km FEAL 62 och 10 km AXKJ 95/25. En utgående linje 60 km AXKJ 95/25 med isolationsnivån 24 kV, avstämt vid 20 000 ohm, tomgående nät, 5 A nollpunktsmotstånd.

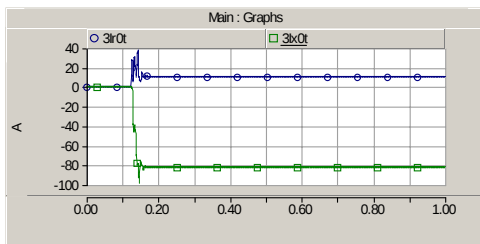


Vänstra bilden nollföljdspänning i matande station (U_{0t}) och längst ut på en av linjerna (U_{0f}). 20 000 ohm fel längs ut på längsta linjen. Högra bilden stumt jordfel i matande station, nollföljdspänning i matande station och längst ut på längsta linjen.



Aktiv och reaktiv effekt ut på den längsta linjen

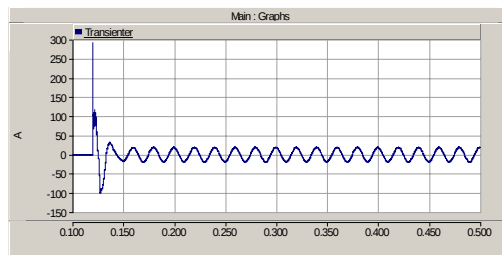
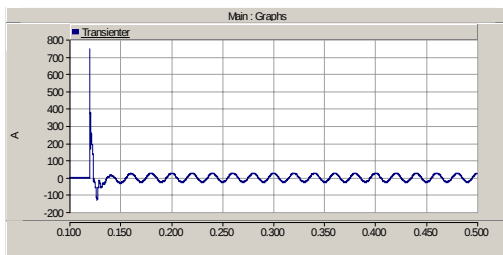




Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , vänstra bilden högst upp, ström ut från matande station, 5 000 ohm fel längst ut på längsta linjen. Högra bilden högst upp, ström på en av de korta linjerna och stumt jordfel nära station på den längsta linjen. Vänstra bilden längst ner ström ut på den längsta linjen vid stumt jordfel nära station på någon av de övriga linjerna.



Nollföljdström uppdelad i I_r och I_x , spänningssättande jordfelsström vid stumt jordfel. Vänstra bilden fel i matande station. Högra bilden fel längst ut på längsta linjen.



Transienta strömmar vid stumt jordfel och jordtagsresistans 10 ohm. Fel i matande station samt längst ut på längsta linjen.

A.17 Kabeldata

Kabel/ledningstyp	R ₁ ohm/km	X ₁ ohm/km	C ₁ µF/km	R ₀ ohm/km	X ₀ ohm/km	C ₀ µF/km
AXKJ 95/25 utan jordlina, jordad i båda ändrar	0,32	0,097	0,33	1,5	1,1	0,33
AXKJ 95/16 utan jordlina, jordad i båda ändrar	0,32	0,097	0,33	1,4	1,6	0,33
AXKJ 95/25 utan jordlina, öppen skärmkrets	0,32	0,097	0,33	0,47	2,4	0,33
AXKJ 3x1x95/25 utan jordlina, jordad i båda ändrar	0,32	0,097	0,33	1,1	0,4	0,33
AXKJ 95/25, 24 kV utan jordlina, jordad i båda ändrar	0,32	0,12	0,21	1,5	1,1	0,21
AXKJ 240/35 utan jordlina, jordad i båda ändrar	0,125	0,085	0,45	1,2	0,8	0,45
FeAl 62	0,52	0,42	0,0099	0,67	2,0	0,0043
FeAl 62 med längsgående jordlina	0,52	0,42	0,0099	0,92	1,3	0,0048
FeAl BLX 62	0,52	0,37	0,011	0,67	2,1	0,0039

Tabell A-5 Kabeldata

A.18 Beräkningar med kabelmodellen i EMTDC

Kabel 12 kV	Felström, stunt fel längst ut	Nollföljdspänning, längst ut på ledningen	Nollföljdspänning, matande station
AXKJ 3x1x95/25, 1x50 km, utan jordlina, 0 ohm jordtag vid alla kabeländar	7 A	6,7 kV	6,5 kV
AXKJ 3x1x95/25, 2x25 km, utan jordlina, 0 ohm jordtag vid alla kabeländar	7 A	6,7 kV	6,5 kV
AXKJ 3x1x95/25, 2x25 km, utan jordlina, 8 ohm jordtag vid alla kabeländar	14 A	7 kV	6 kV
AXKJ 3x1x95/25, 5x10 km, utan jordlina, 0 ohm jordtag vid alla kabeländar	7 A	6,7 kV	6,4 kV
AXKJ 3x1x95/25, 5x10 km, med jordlina, 0 ohm jordtag vid alla kabeländar	6,5 A	6,7 kV	6,5 kV
AXKJ 3x1x95/25, 5x10 km, utan jordlina, 8 ohm jordtag vid alla kabeländar	11 A	6,7 kV	5,9 kV
AXKJ 3x1x95/25, 10x5 km, utan jordlina, 0 ohm jordtag vid alla kabeländar	4 A	6,9 kV	6,5 kV
AXKJ 3x1x95/25, 10x5 km, med jordlina, 0 ohm jordtag vid alla kabeländar	3 A	6,9 kV	6,6 kV
AXKJ 3x1x95/25, 10x5 km, utan jordlina, 8 ohm jordtag vid alla kabeländar	8 A	6,8 kV	5,9 kV
AXKJ 3x1x95/25, 10x5 km, utan jordlina, 2 ohm jordtag vid alla kabeländar	6 A	6,9 kV	6,3 kV
AXKJ 3x1x95, 10x5 km, utan jordlina, 2 ohm jordtag vid matade station alla övriga 8 ohm	6,5 A	6,8 kV	6,2 kV
AXKJ 3x1x95/25, 10x5 km, utan jordlina, 0 ohm jordtag vid matade station alla övriga 8 ohm	4 A	6,9 kV	6,5 kV

Tabell A-6 Felström och Nollföljdsspänning vid olika konfigurationer av kabelledning

Kabel ,12 kV	Felström, stunt fel längst ut	Nollföljdspänning, längst ut på ledningen	Nollföljdspänning, matande station
AXKJ 3x1x95/25, 10x5 km, utan jordlina, 3 st 20 ohm jordtag närmast station och 3 st 0 ohm längst ifrån, övriga jordtag 8 ohm	11 A	6,8 kV	5,8 kV
AXKJ 3x1x95/25, 10x5 km, utan jordlina, 3 st 0 ohm jordtag närmast station och 3 st 20 ohm längst ifrån, övriga jordtag 8 ohm	4 A	6,8 kV	6,3 kV
AXKJ 3x1x95/25, 10x5 km, utan jordlina, öppen skärmkrets	3 A	7 kV	4,4 kV
AXKJ 3x1x95/16, 10x5 km, utan jordlina, 0 ohm jordtag vid alla kabeländar	5 A	6,9 kV	6,5 kV
AXKJ 3x1x95/16, 10x5 km, med jordlina, 0 ohm jordtag vid alla kabeländar	4 A	6,9 kV	6,7 kV
AXKJ 3x1x95/16, 10x5 km, utan jordlina, 8 ohm jordtag vid alla kabeländar	8 A	6,9 kV	6,3 kV
Pi-länk AXKJ 3x1x95/25, 5x10 km	10 A	6,7 kV	6,3 kV
Pi-länk AXKJ 95/25, 5x10 km	13 A	6,6 kV	5,5 kV

Tabell A-2 Fortsättning

Tabellen visar att felströmmen längs ut varierar beroende på kabelledningens konfiguration. Felströmmen står i proportion till kabelledningens resulterande nollföljdsresistans och spänningsvariationen står i proportion till nollföljdsreaktansen. Nätet är avstämt så att felströmmen enbart har en aktiv strömkomponent. Ytterjordtagen är de jordtag där kabeln inte fortsätter med gemensam skärm eller jordlina. Jordtag i matande station är också ett ytterjordtag.

B Beräkningar utförda av Carl Bro AB

I det följande redovisas de beräkningar som genomförts av Carl Bro AB. Dessa beräkningar har gjorts med ett 24 kV luftledningsnät som har kablfierats i olika nivåer.

I bilaga B.1 redovisas data för de olika komponenterna som har modellerats i beräkningsverktyget PSCAD.

Kortslutningsströmmar för de olika näten visas i bilaga B.2.

I bilaga B.4 redovisas resultatet från beräkningar av de aktiva och reaktiva flödena i de olika näten. Det framgår att kablarnas driftkapacitans bidrar till ett minskat behov av kondensatorbatterier vid ökad kablfiering.

I bilagorna B.5 till B.8 presenteras felströmmar vid olika jordfel i de studerade näten.

B.1 Simuleringsdata

B.1.1 Matande nät

S_k	200	MVA
U_{drift}	43	kV
f	50	Hz

Tabell B-1 Huvudsaklig data för det matande nätet.

B.1.2 Krafttransformator utan utjämningslindning

Kopplingsart	YNyn	
Omsättning	40/20	kV
S_n	16	MVA
z_k	8	%
x/r	15	
x	2,00	Ω
r	0,13	Ω
x_0	20,0	Ω /fas
r_0	10,0	Ω /fas
z_0	22,3	Ω /fas

Tabell B-2 Transformator utan utjämningslindning.

B.1.3 Krafttransformator med utjämningslindning

Kopplingsart	YNyn	
Omsättning	40/20	kV
S_n	16	MVA
z_k	8	%
x/r	15	
x	2,00	Ω
r	0,13	Ω
x_0	2,49	Ω /fas
r_0	0,17	Ω /fas
z_0	2,50	Ω /fas

Tabell B-3 Transformator med utjämningslindning.

B.1.4 Nollpunktsutrustning

Nollpunktsreaktor

Värdet på nollpunktsreaktorn varierar mellan de olika studerade näten. Näten har stämts av med ett 20 k Ω -fel på samlingsskenan, avstämningsskurvor återfinns i B.5.1, B.6.1, B.7.1 och B.8.1. Förlusten i reaktorn har uppgått till 2 %.

Nollpunktsmotstånd

Nollpunktsmotståndet är dimensionerat för att generera 10 A vid fullt utbildat jordfel.

R 1270 Ω

Tabell B-4 Nollpunktsmotstånd

B.1.5 Lokalkompensering

De utlokaliserade nollpunktsreaktorerna (lokalkompensering) har i 24 kV-näten kompenserat 15 A vardera. Förlusten i reaktorerna har uppgått till 1,55 %.

Transformator	Omsättning	22/0,4 kV	
	Kopplingsart	ZNyn	
	S_n	160	kVA
	R_0	19,4	Ω/fas
	X_0	16,3	Ω/fas
Reaktor	R	13,1	Ω
	X	845	Ω

Tabell B-5 Lokalkompensering

B.1.6 Ledning

Ledningarna har modellerats med pi-länkar både i plus- och i nollföljden.

Kabel

För kabel påverkas nollföljdsdata av hur kabelns skärm ansluts i ändarna och hur en eventuellt medföljande jordlina förläggs intill kabeln. Jordtagsresistansen i de båda ändarna inverkar också på nollföljdsimpedansen. I studien av 24 kV-näten har följande antagits:

Markresistiviteten har antagits vara 2 500 Ωm och de enskilda jordtagmotstånden i näten har satts till 8 Ω . En typisk kabel har antagits vara AXCES 95/25. För att få ett genomsnittligt värde på nollföljdsimpedansen har kabeln antagits vara jordad i en nätstation (eller motsvarande) var tusende meter.

Medföljande jordlina, Cu 35	R_1 ohm/m	X_{L1} ohm/m	X_{C1} Mohm·m	R_0 ohm/m	X_{L0} ohm/m	X_{C0} Mohm·m
Ingen jordlina	0,00032	0,000126	14,48	0,002606	0,00013	14,48
Tejpad på mantel	0,00032	0,000126	14,48	0,001295	0,000184	14,48
10 cm från mantel	0,00032	0,000126	14,48	0,001382	0,000356	14,48
50 cm från mantel	0,00032	0,000126	14,48	0,001499	0,000484	14,48

Tabell B-6 Impedanser för kablar använda vid beräkningarna.

Friedning

Data för både FeAl och BLL är beräknade för horisontellt monterade 99 mm² fasledare med en stolphöjd på 9 m. Fasavståndet har satts till 0,6 m. Markresistiviteten har antagits vara 2 500 Ωm.

Ledningstyp	R_1 ohm/m	X_{L1} ohm/m	X_{C1} Mohm·m	R_0 ohm/mohm/m	X_{L0} ohm/mohm/m	X_{C0} Mohm·m
BLL	0,000336	0,000314	270,35	0,000484	0,001947	802,19
FeAl	0,000336	0,000345	305,05	0,000484	0,001884	733,80

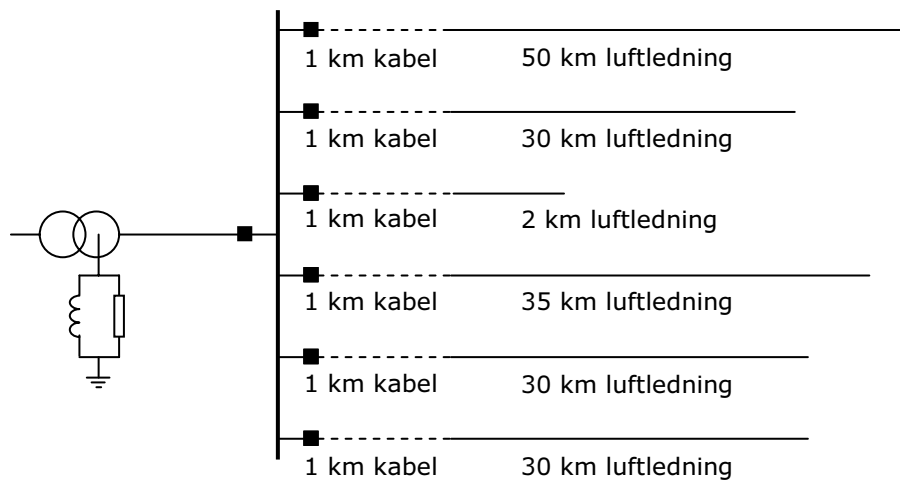
Tabell B-7 Impedanser för friledningar använda vid beräkningarna.

B.1.7 Belastning

Belastningen ansluten till de olika ledningarna har modellerats med D-kopplad konstant resistans och induktans. Effektfaktorn har varit 0,8. Belastningens storlek har valts så att spänningsfallet i ledningarna inte överstiger fem procent. En samlad bild av belastningarna i nätet återfinns i Figur B.7.

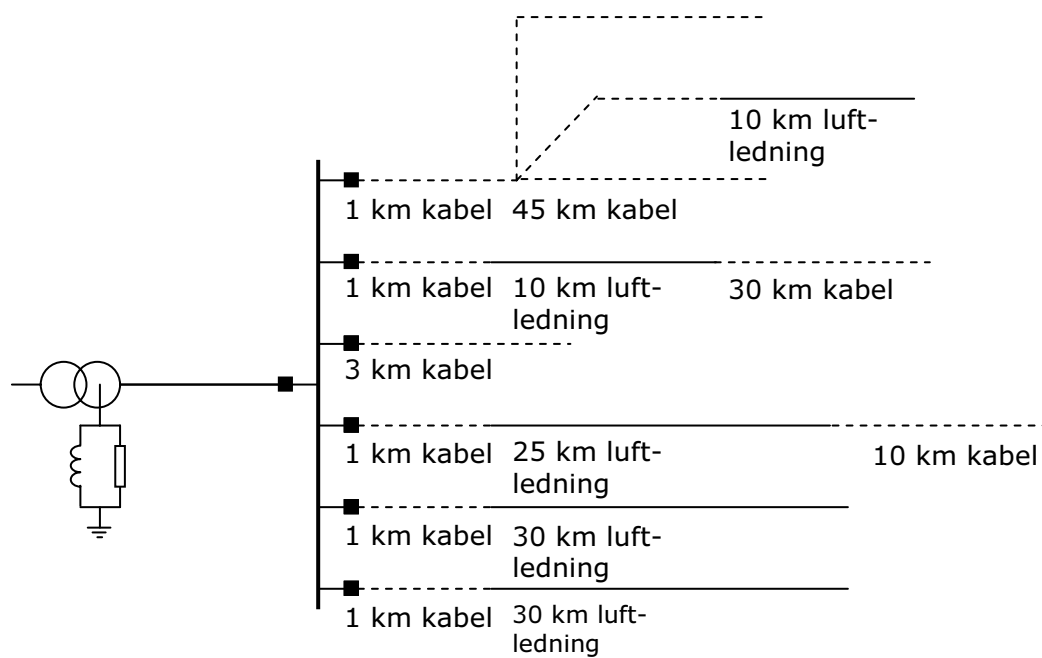
B.2 De olika näten

B.2.1 Ursprungligt nät

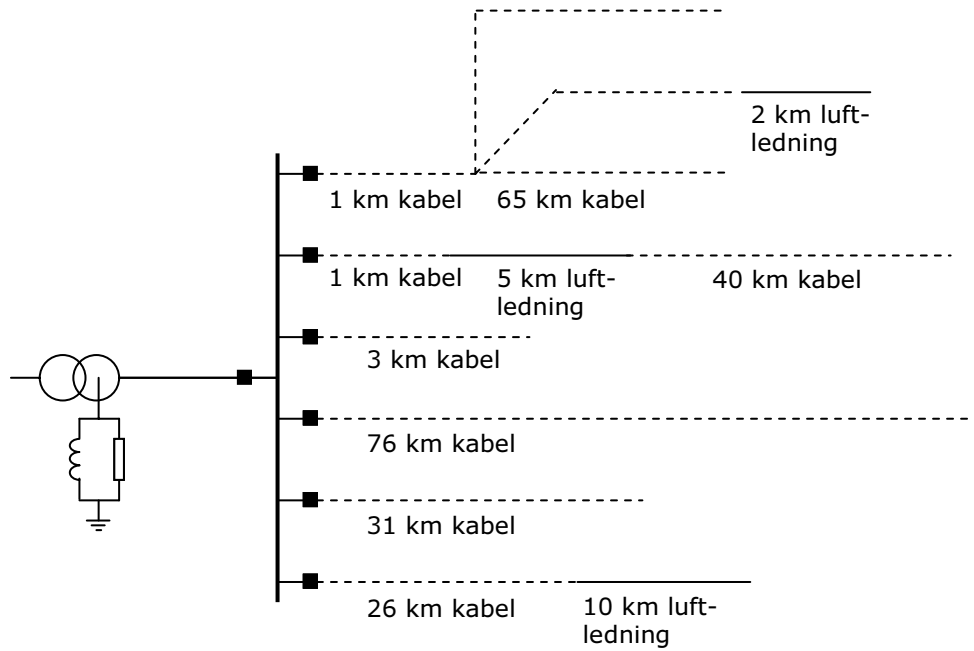


Figur B.1 Det ursprungliga nätet.

B.2.2 Delkablifierat nät

**Figur B.2 Delkablifierat nät.**

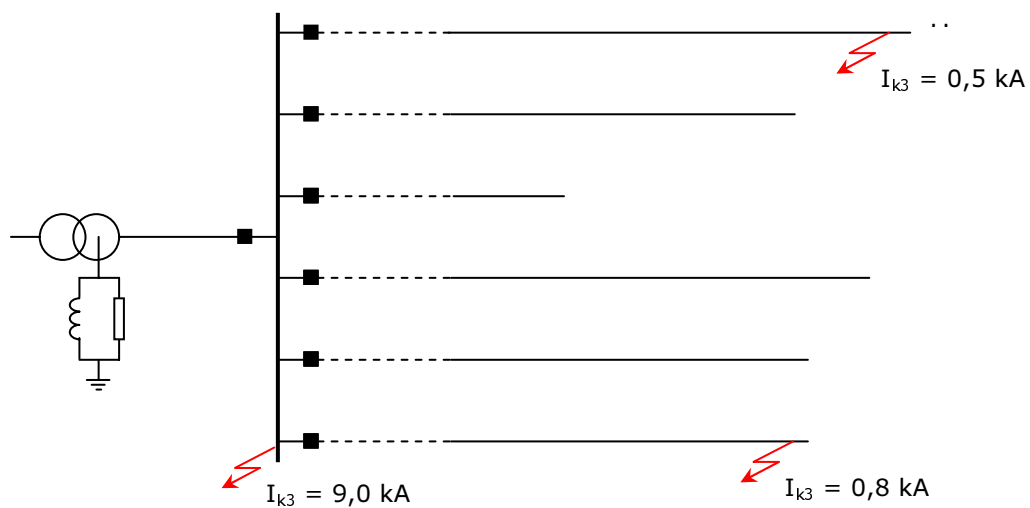
B.2.3 Kablifierat nät



Figur B.3 Kablifierat nät.

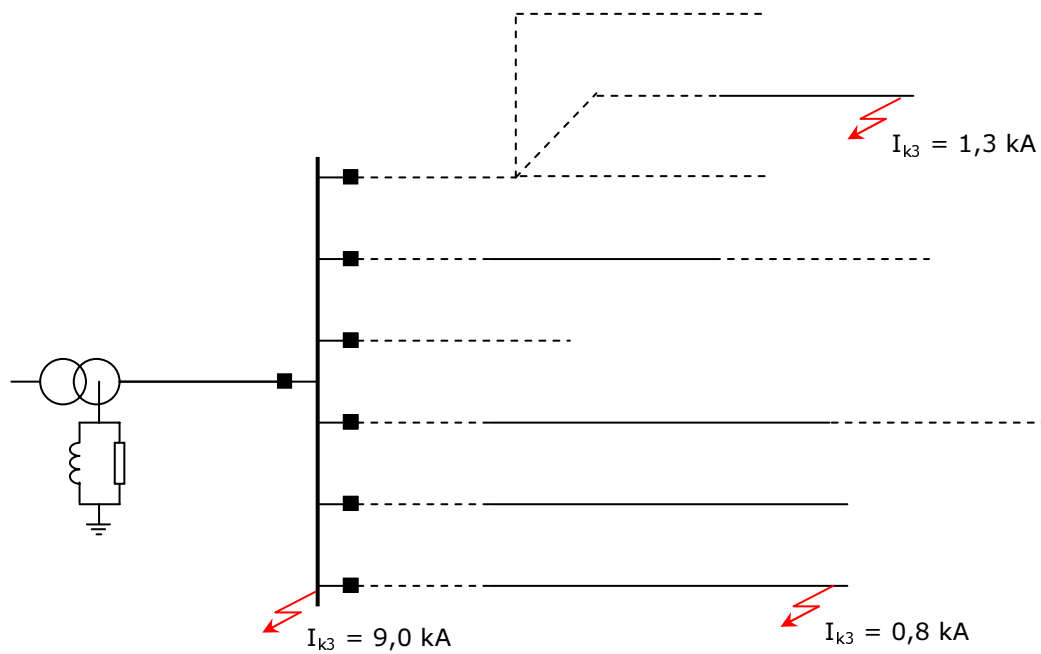
B.3 Kortslutningsströmmar

B.3.1 Ursprungligt nät



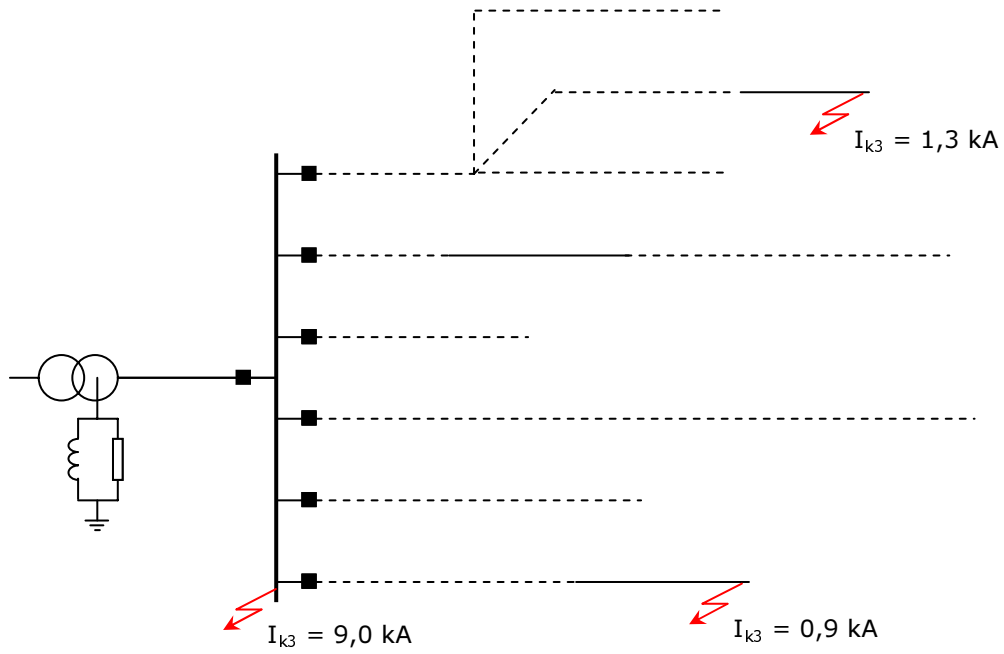
Figur B.4 Kortslutningsströmmar i det ursprungliga nätet.

B.3.2 Delkablifierat nät



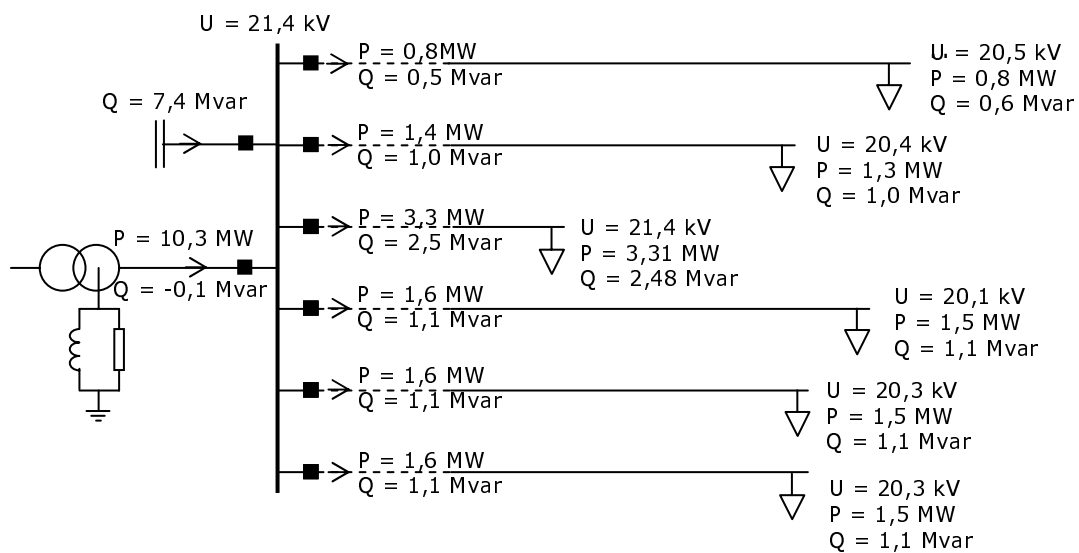
Figur B.5 Kortslutningsströmmar i det delvis kablifierade nätet.

B.3.3 Kablifierat nät

**Figur B.6 Kortslutningsströmmar i det fullt kablifierade nätet.**

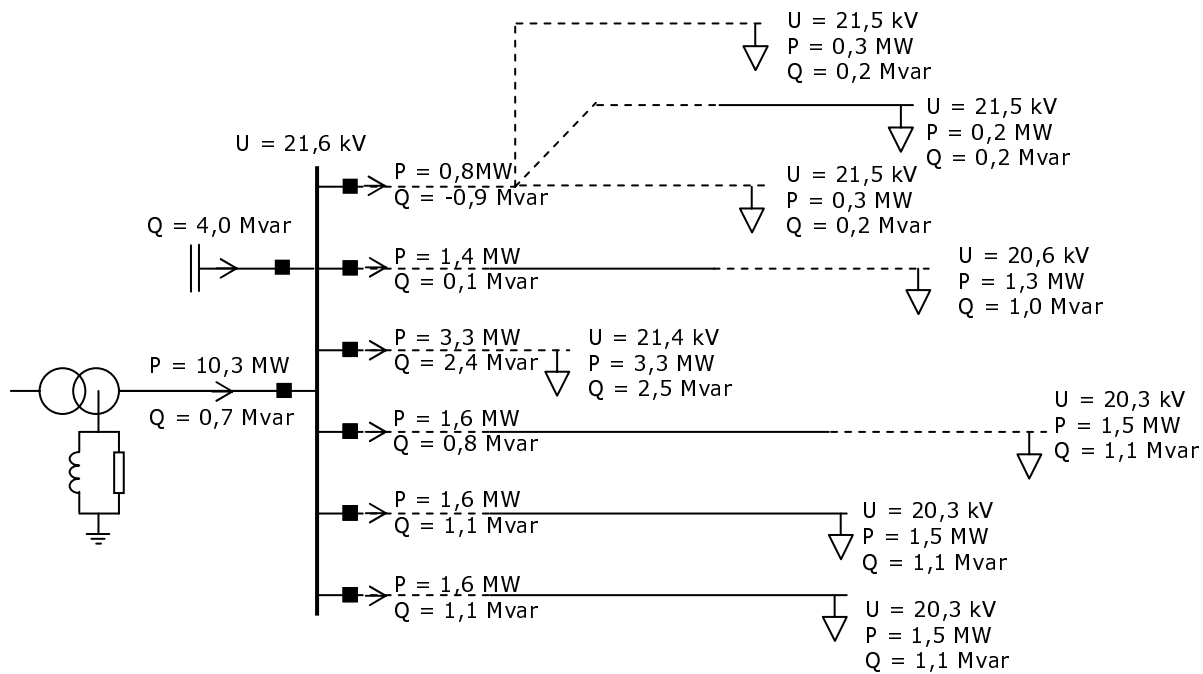
B.4 Lastflöden

B.4.1 Ursprungligt nät



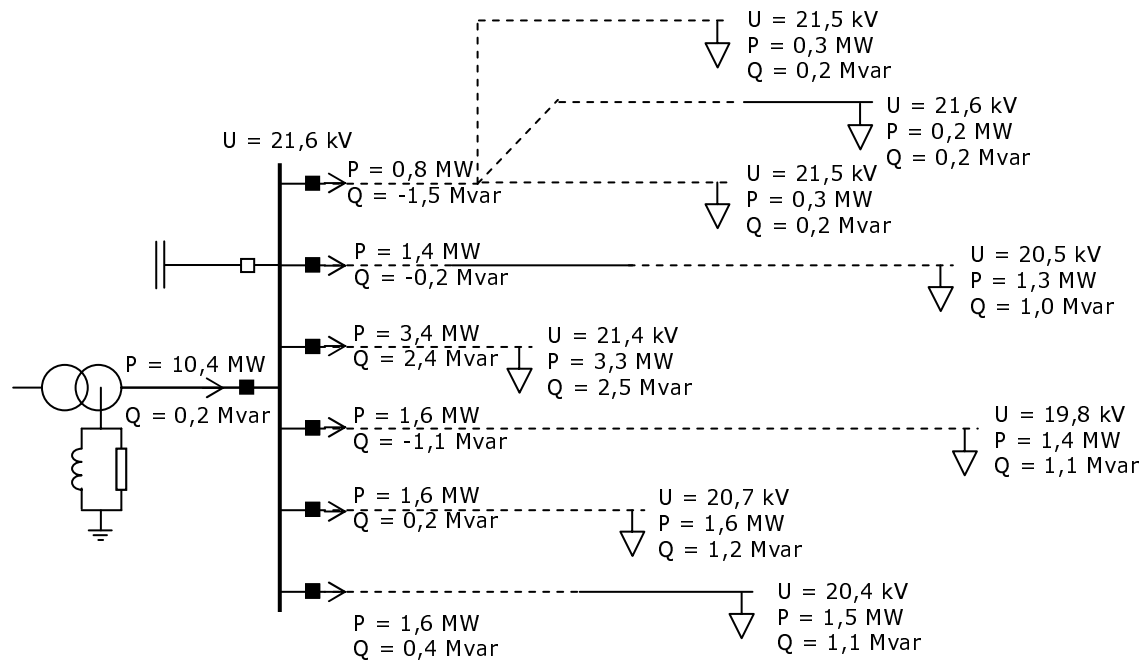
Figur B.7 Lastflöden i det ursprungliga nätet.

B.4.2 Delkablifierat nät



Figur B.8 Lastflöden i det delkablifierade nätet.

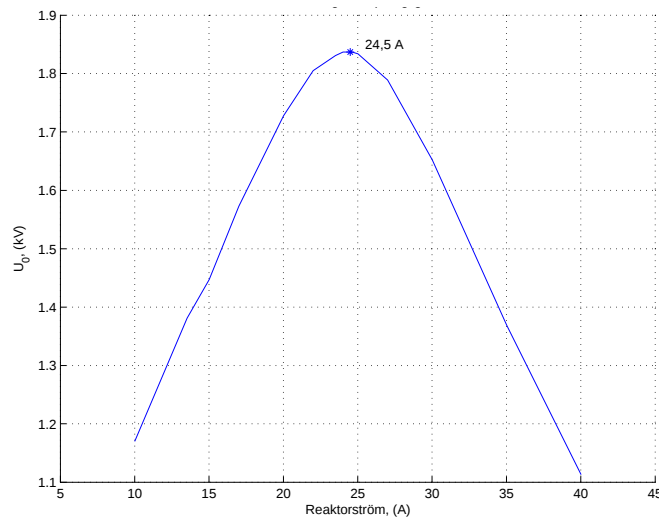
B.4.3 Kablifierat nät



Figur B.9 Lastflöden i det kablifierade nätet.

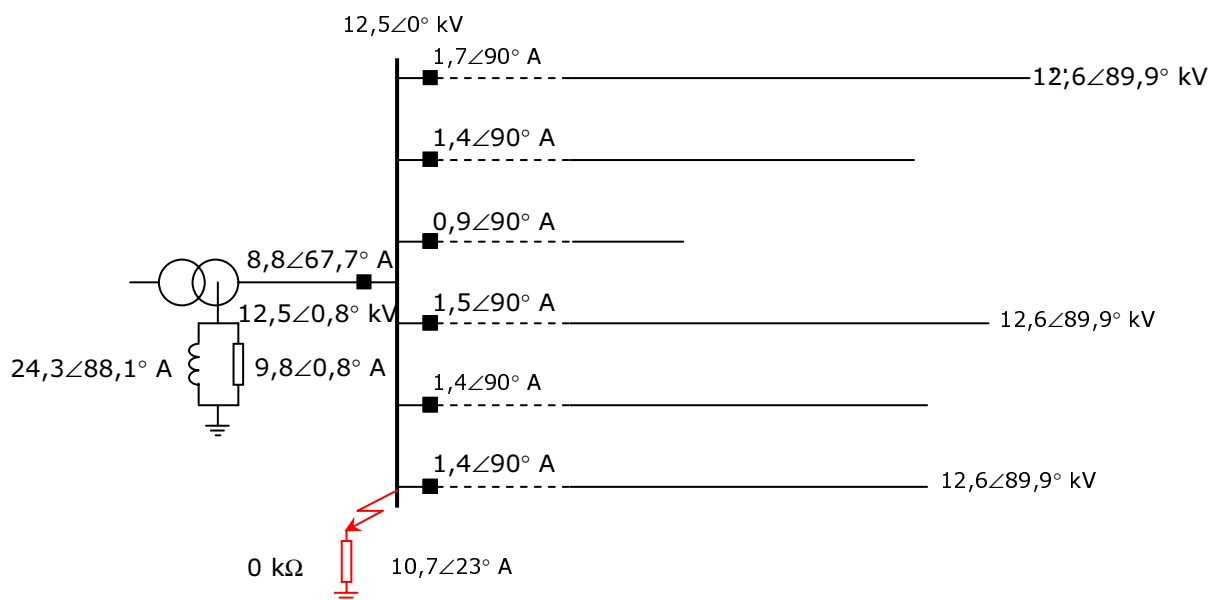
B.5 Jordfel i det ursprungliga nätet

B.5.1 Avstämningsskurva

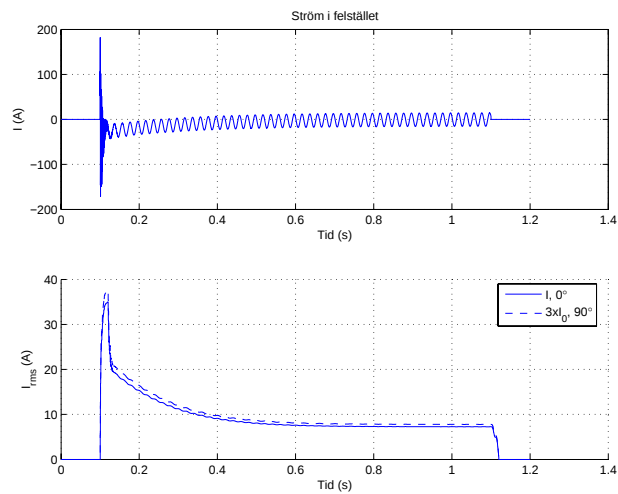


Figur B.10 Avstämningsskurva för det ursprungliga nätet.

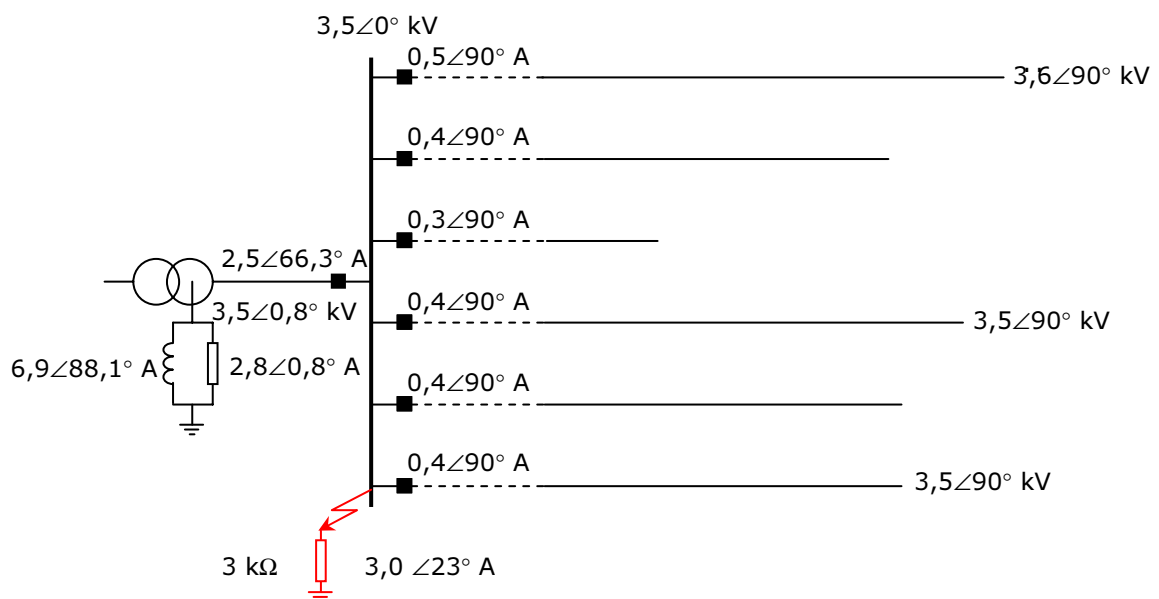
B.5.2 Jordfel vid samlingsskenan



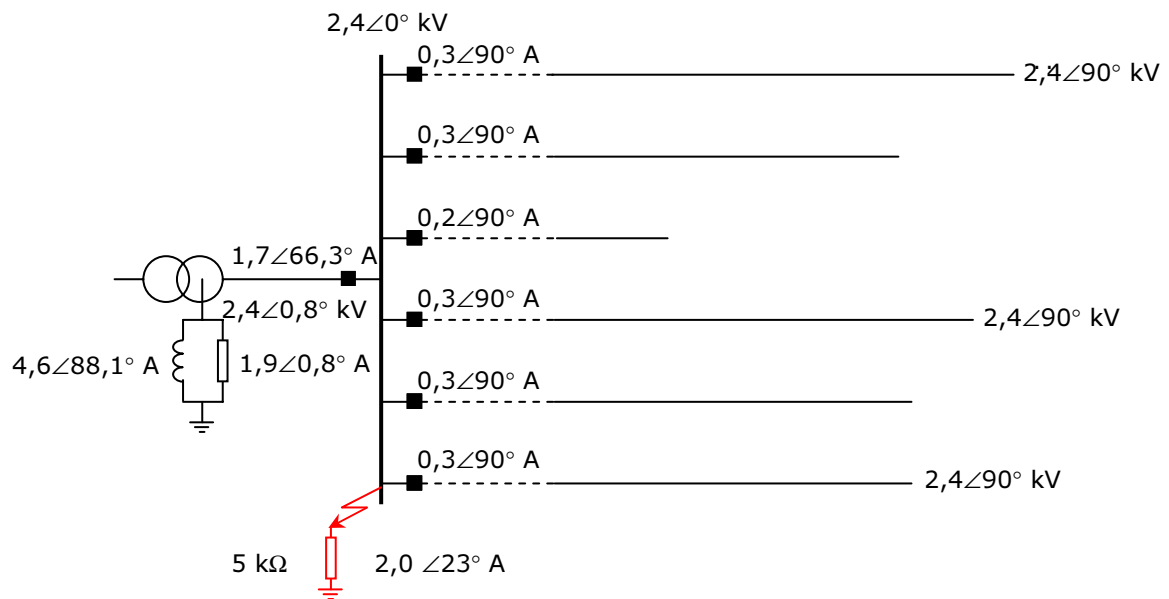
Figur B.11 Stumt jordfel vid samlingsskenan. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.



Figur B.12 Strömmen i felstället vid stumt jordfel på samlingsskenan i det ursprungliga nätet.

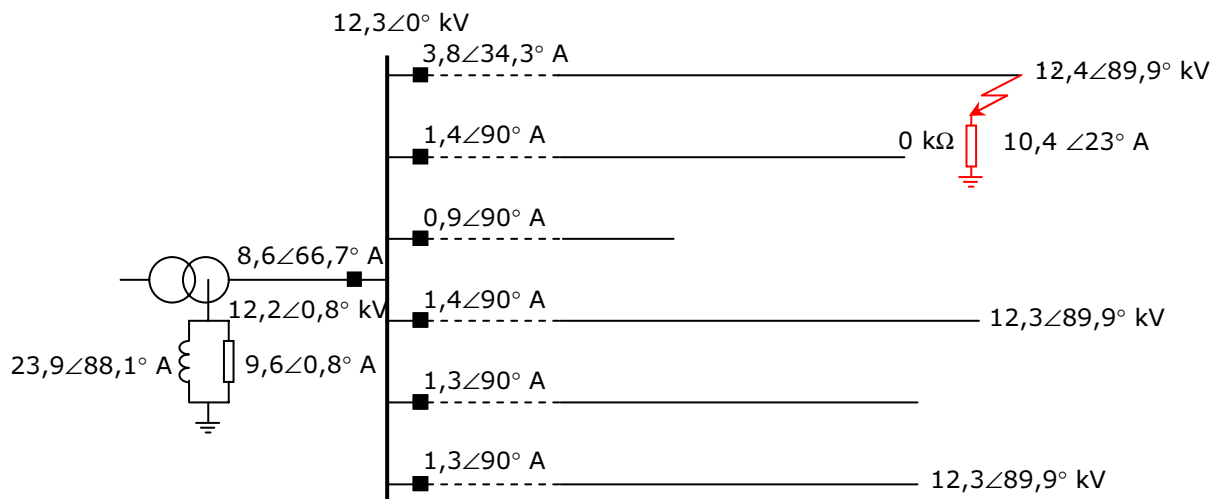


Figur B.13 Jordfel på samlingsskenan med 3 kΩ övergångsmotstånd. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.

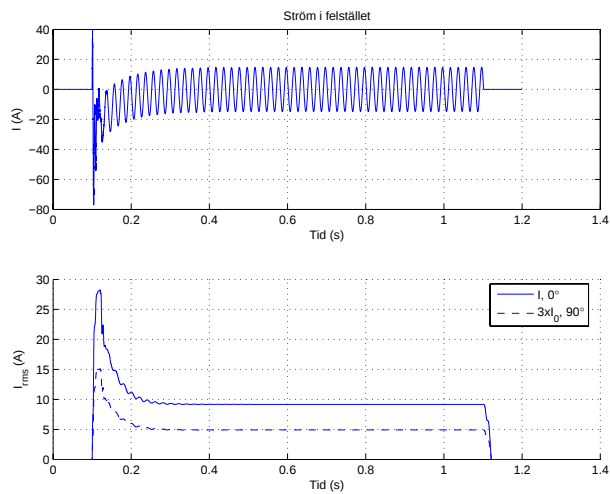


Figur B.14 Jordfel på samlingsskenan med 5 kΩ övergångsmotstånd. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.

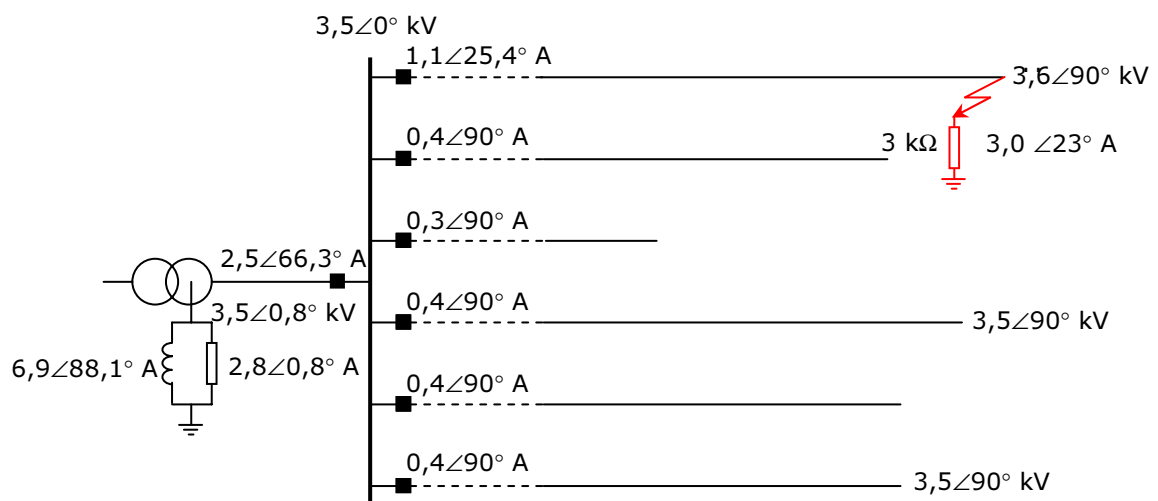
B.5.3 Jordfel längst ut på ledning 1



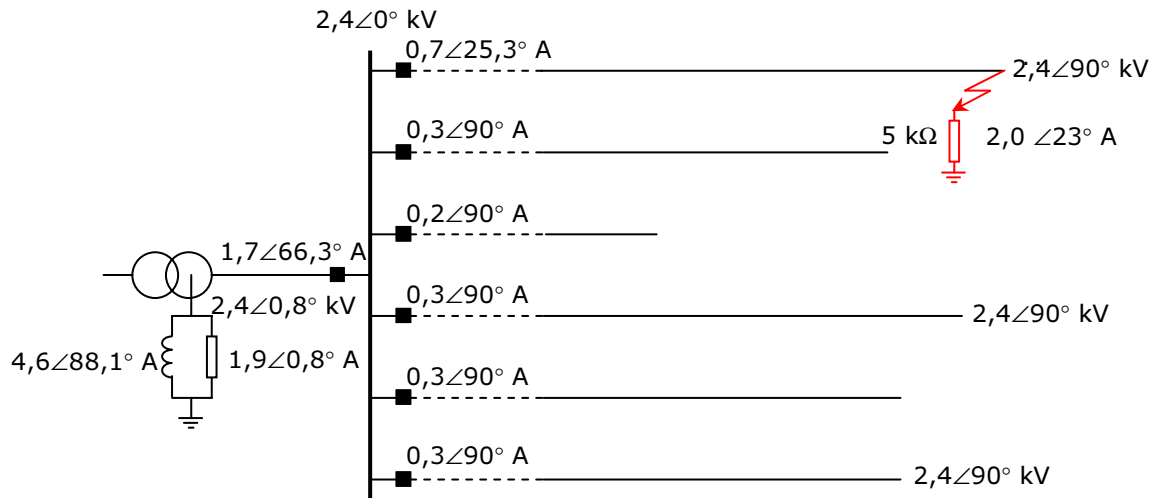
Figur B.15 Stumt jordfel längs ut på ledning 1. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.



Figur B.16 Strömmen i felstället vid stumt jordfel längst ut i ledning 1.

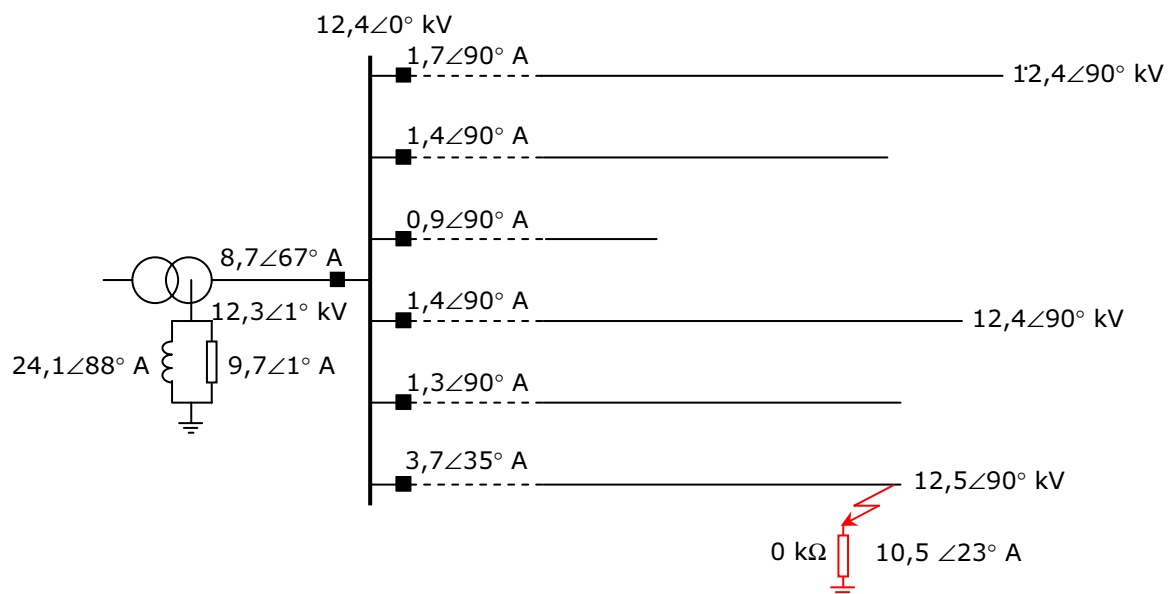


Figur B.17 Jordfel längst ut på ledning 1 med 3 kΩ övergångsmotstånd. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.

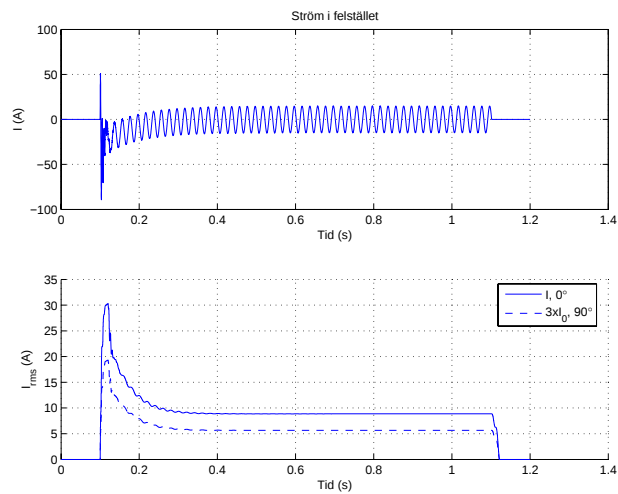


Figur B.18 Jordfel längst ut på ledning 1 med 5 kΩ övergångsmotstånd. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.

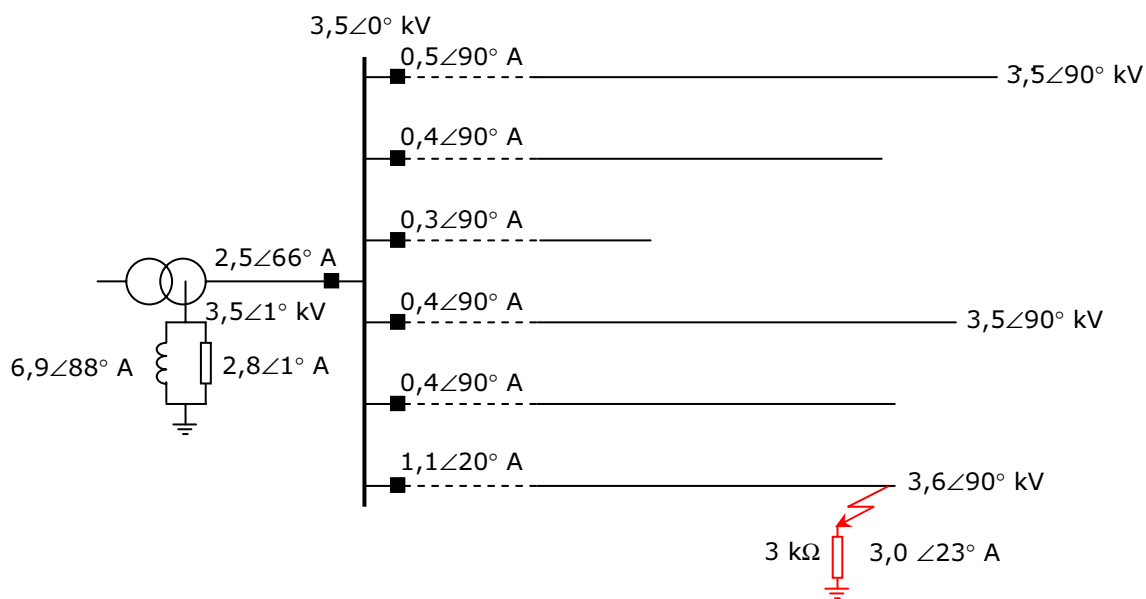
B.5.4 Jordfel längst ut på ledning 6



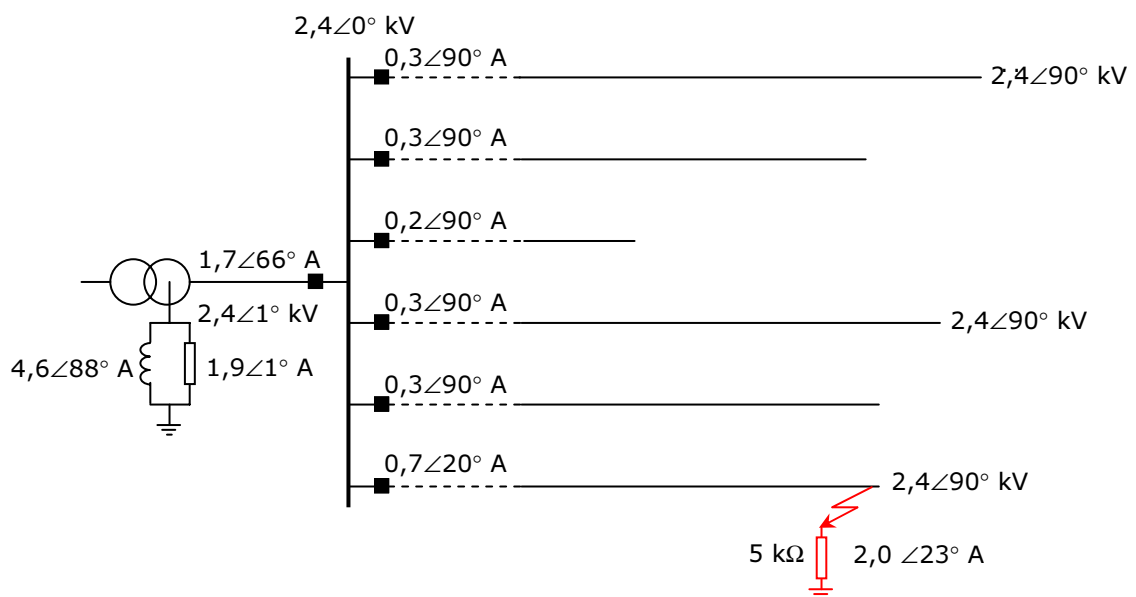
Figur B.19 Stumt jordfel längst ut på ledning 6. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.



Figur B.20 Strömmen i felstället vid stumt jordfel längst ut i ledning 6.



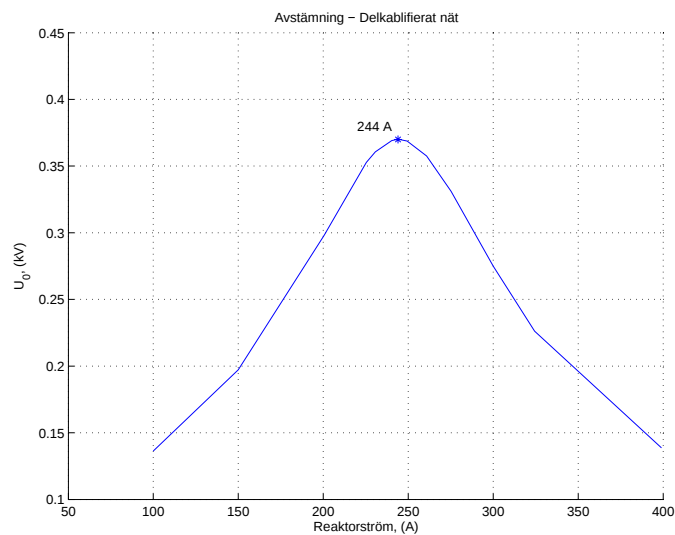
Figur B.21 Jordfel längst ut på ledning 6 med $3 \text{ k}\Omega$ övergångsmotstånd. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.



Figur B.22 Jordfel längst ut på ledning 6 med $5 \text{ k}\Omega$ övergångsmotstånd. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.

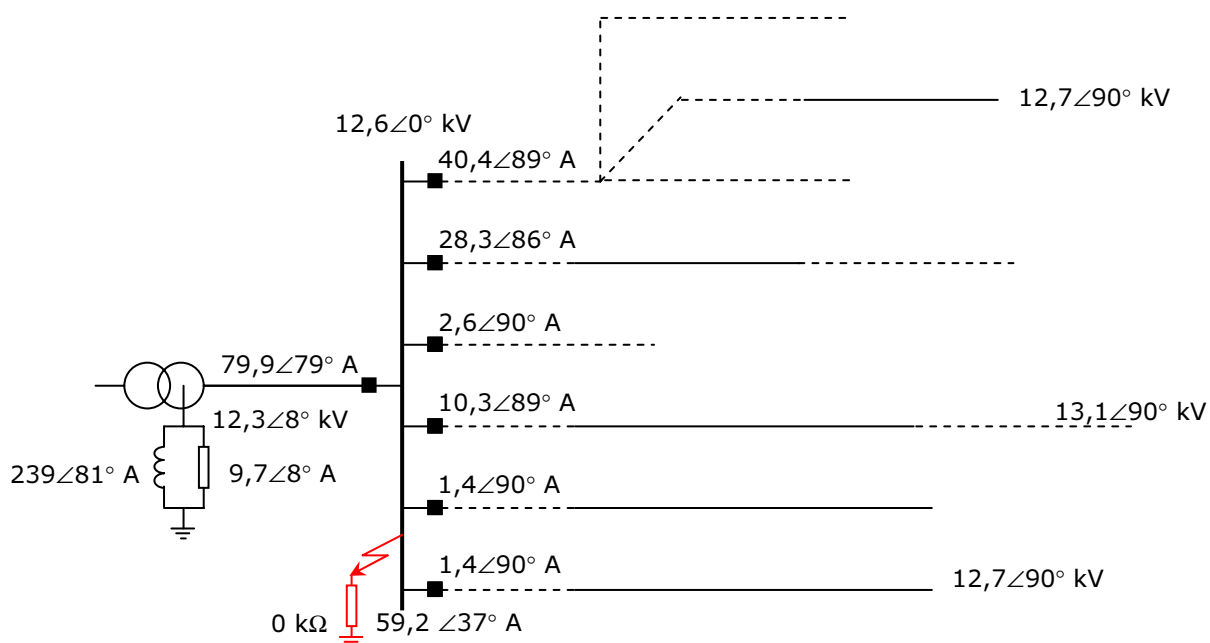
B.6 Jordfel i det delkablifierade nätet

B.6.1 Avstämningsskurva

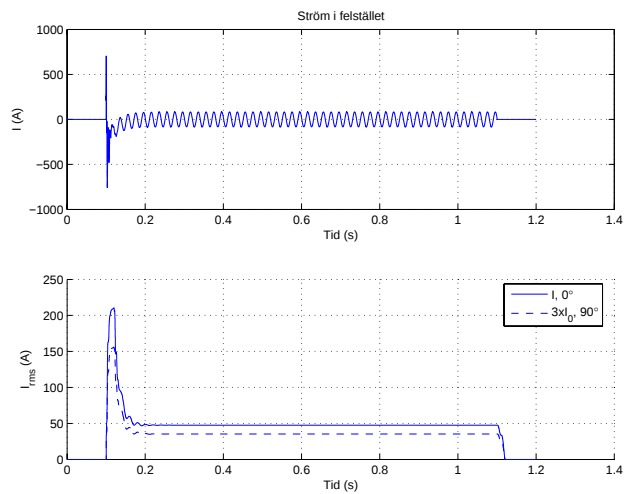


Figur B.23 Avstämningsskurva för det delkablifierade nätet.

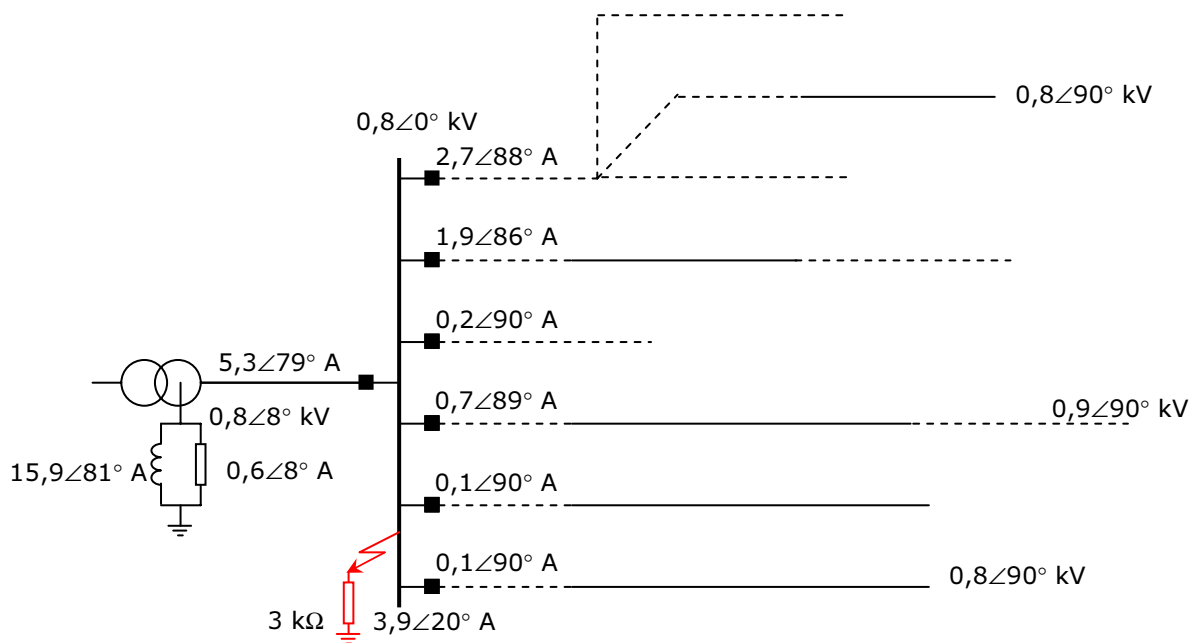
B.6.2 Jordfel vid samlingsskenan



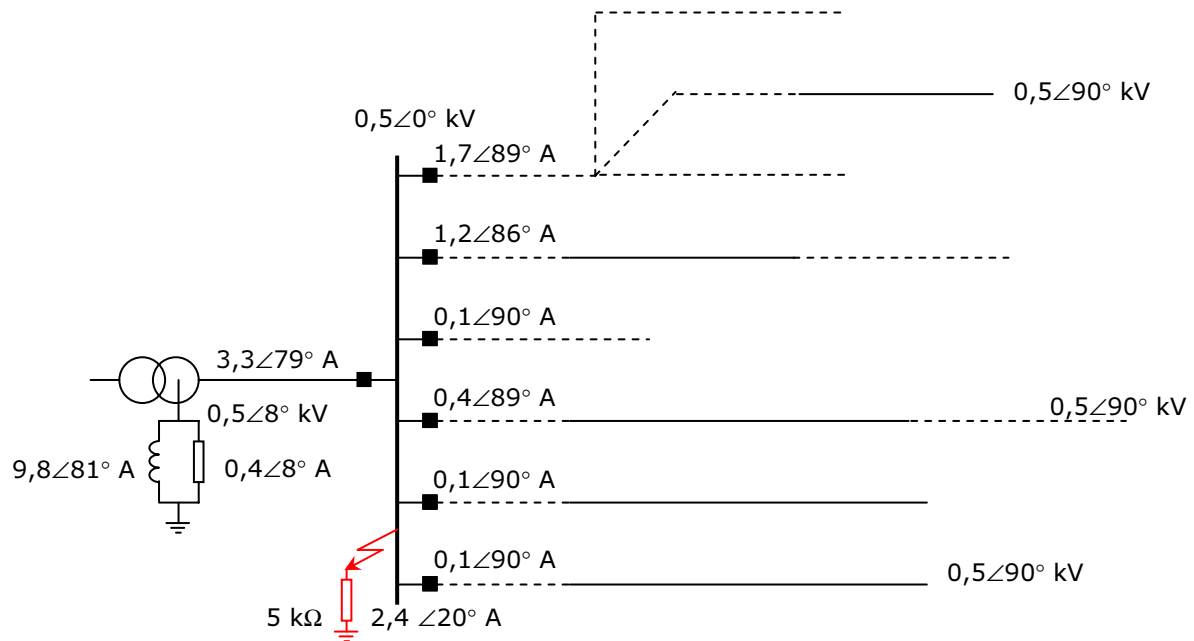
Figur B.24 Stumt jordfel på samlingsskenan i det delkablifierade nätet. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.



Figur B.25 Stumt jordfel på samlingsskenan i det delkablifierade nätet. Grafen visar strömmen i felstället.

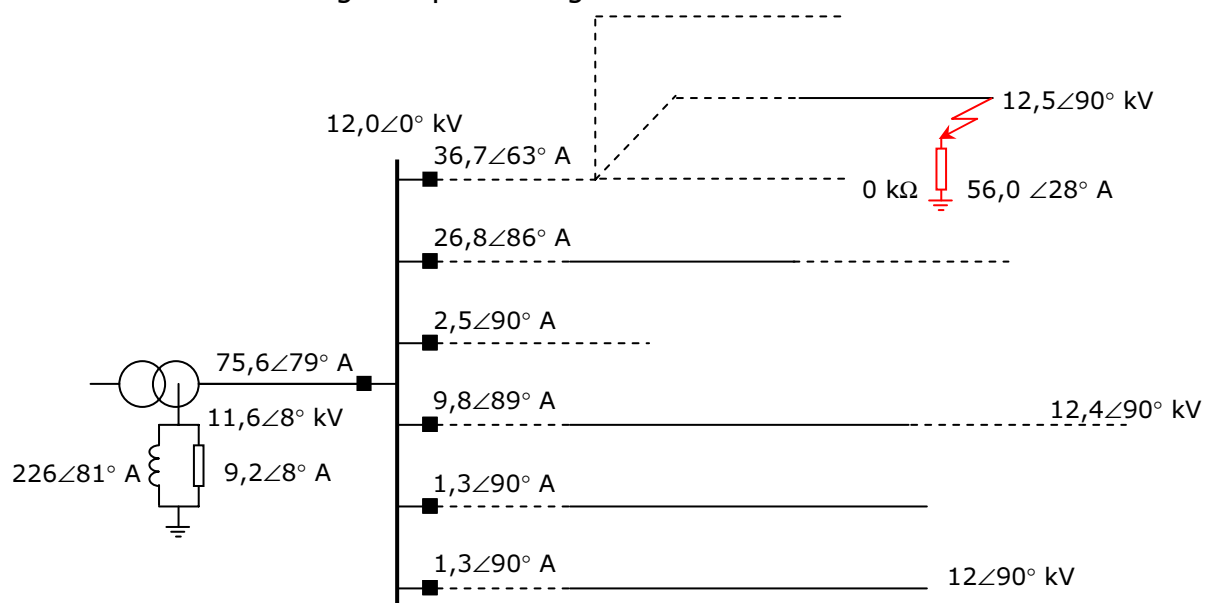


Figur B.26 Stumt jordfel på samlingsskenan i det delkablifierade nätet. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.

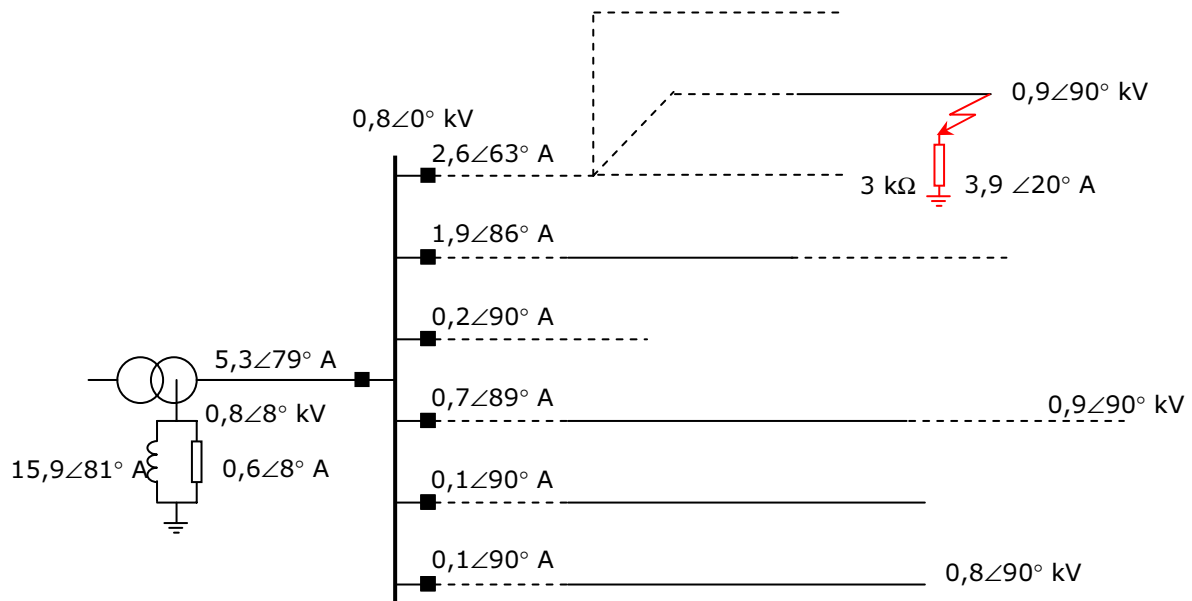


Figur B.27 Stumt jordfel på samlingsskenan i det delkablifierade nätet. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.

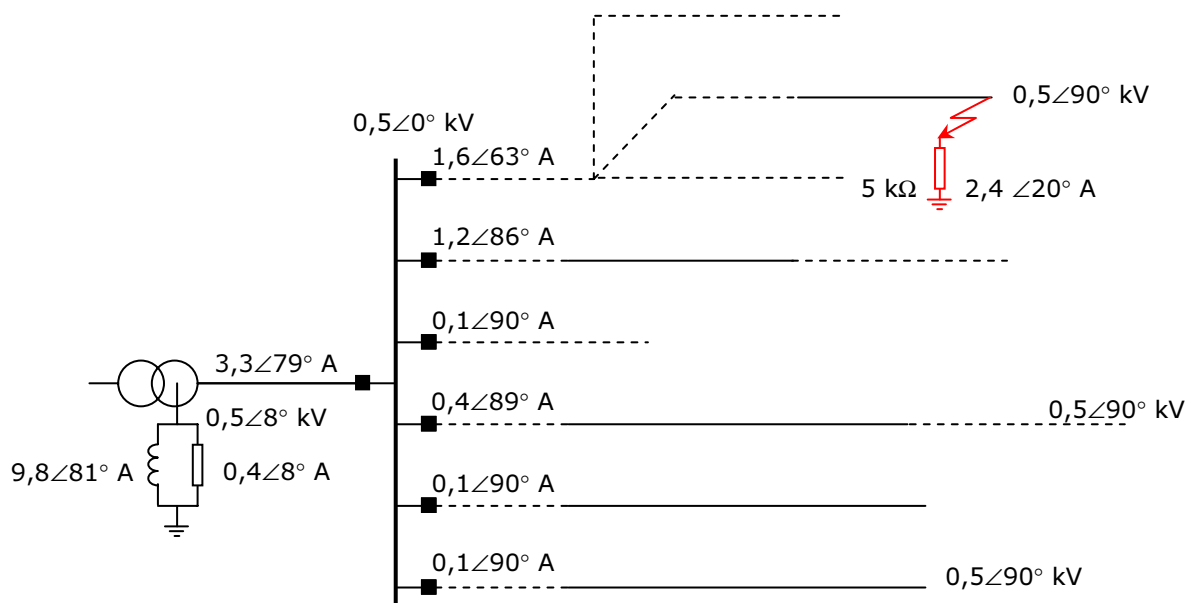
B.6.3 Jordfel längst ut på ledning 1



Figur B.28 Stumt jordfel längst ut på ledning 1 i det delkablifierade nätet. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.

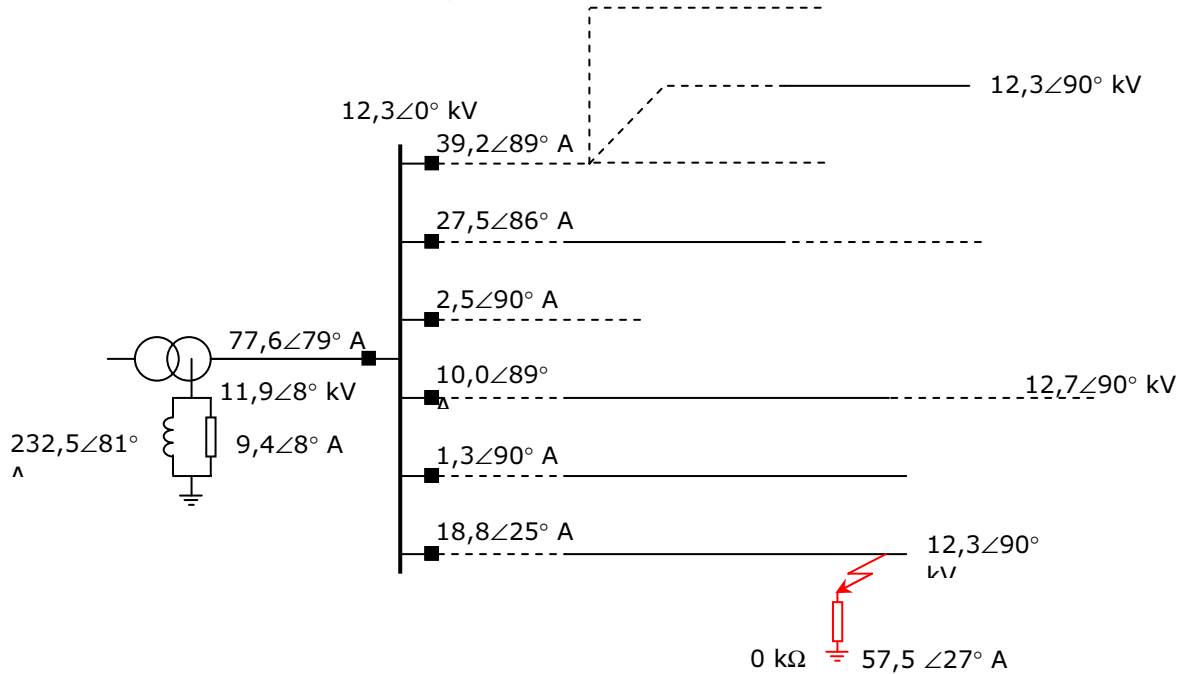


Figur B.29 Jordfel längst ut på ledning 1 i det delkablifierade nätet. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.

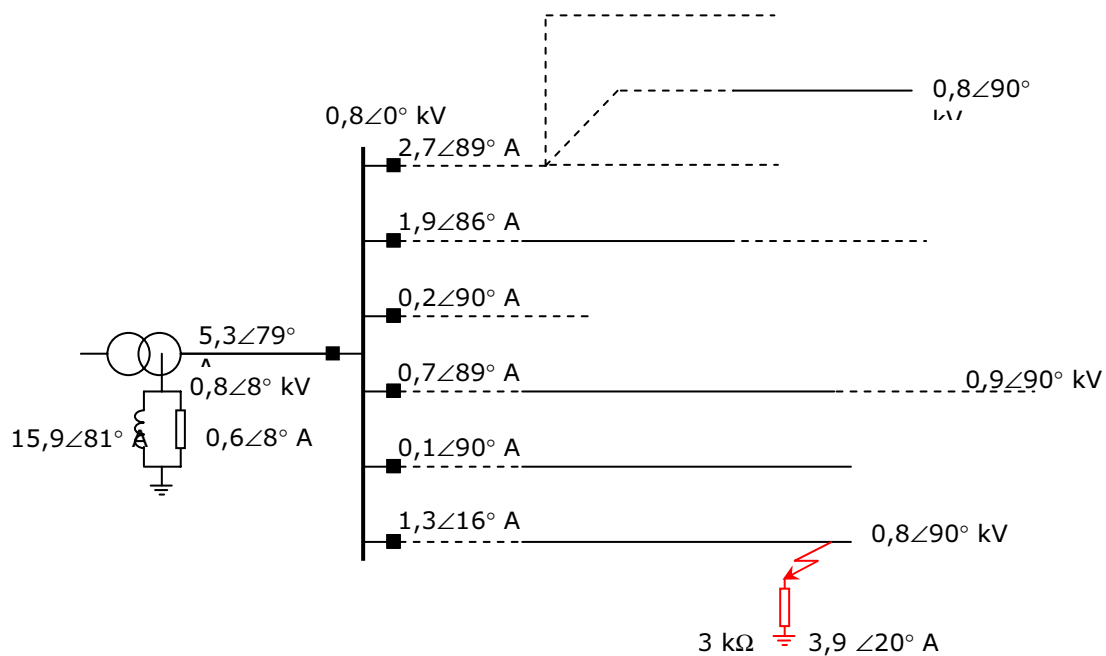


Figur B.30 Jordfel längst ut på ledning 1 i det delkablifierade nätet. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.

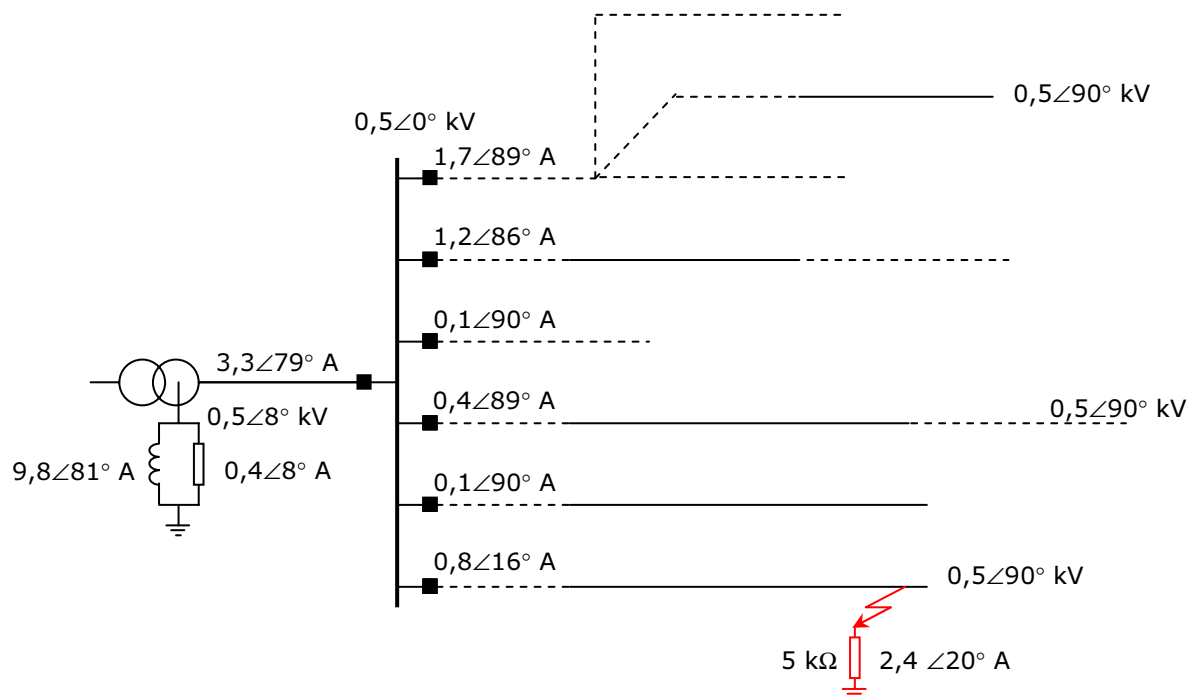
B.6.4 Jordfel längst ut på ledning 6



Figur B.31 Stumt jordfel längst ut på ledning 6 i det delkablifierade nätet. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.



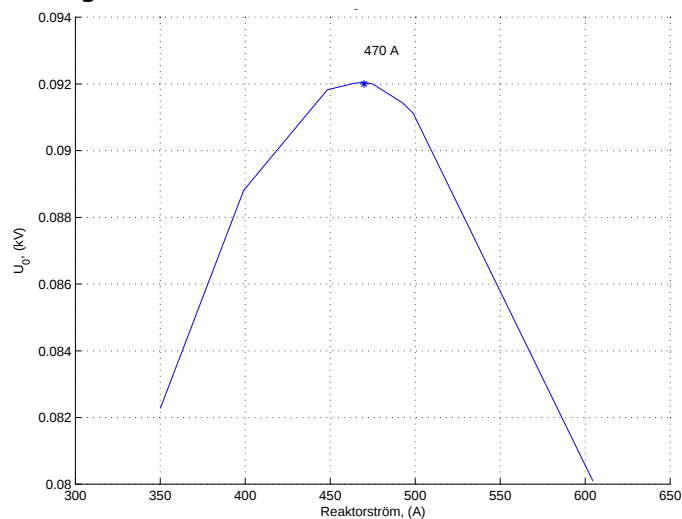
Figur B.32 Jordfel längst ut på ledning 6 i det delkablifierade nätet. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.



Figur B.33 Jordfel längst ut på ledning 6 i det delkablifierade nätet. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.

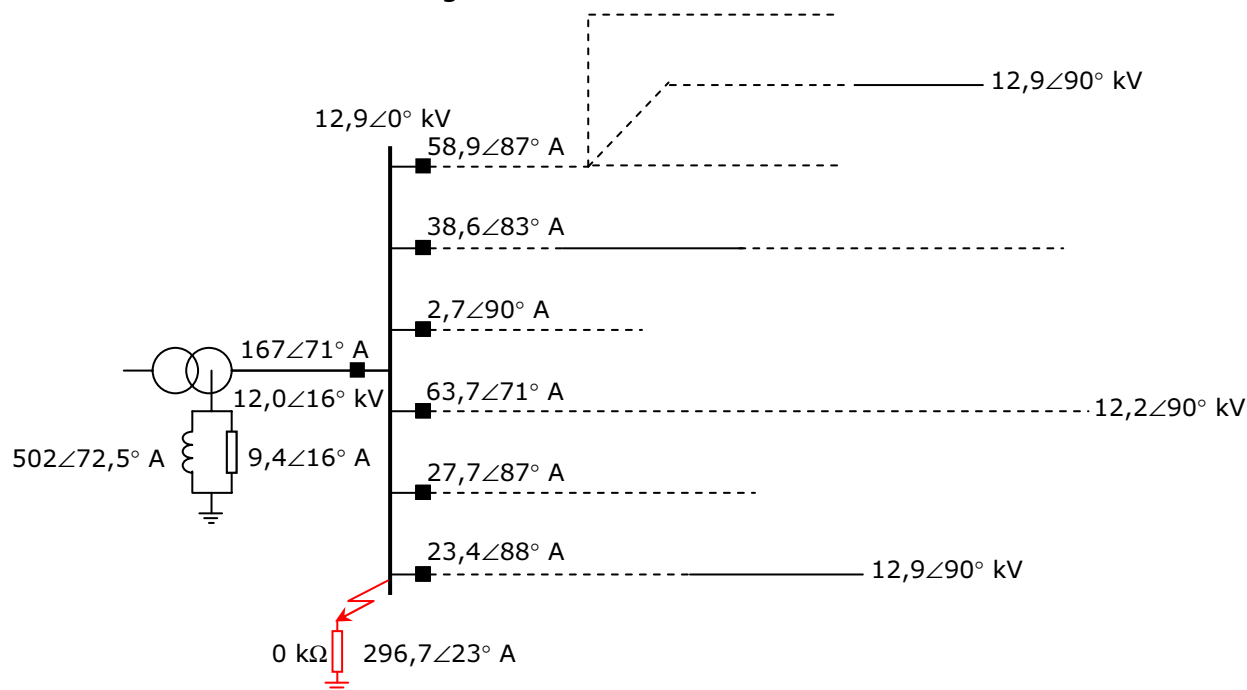
B.7 Jordfel i det kablifierade nätet

B.7.1 Avstämningskurva

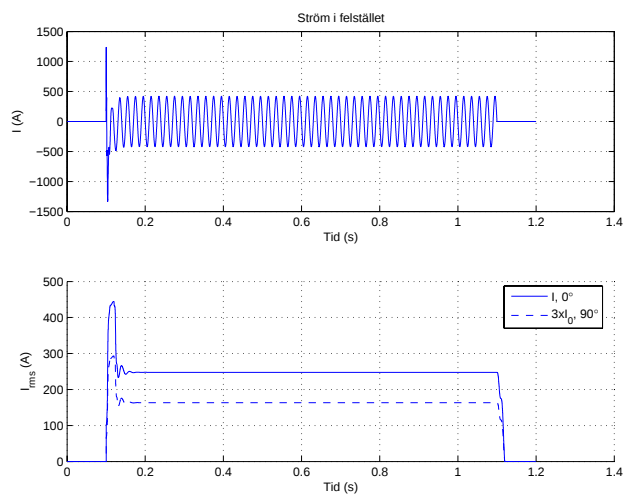


Figur B.34 Avstämningskurva för det kablifierade nätet.

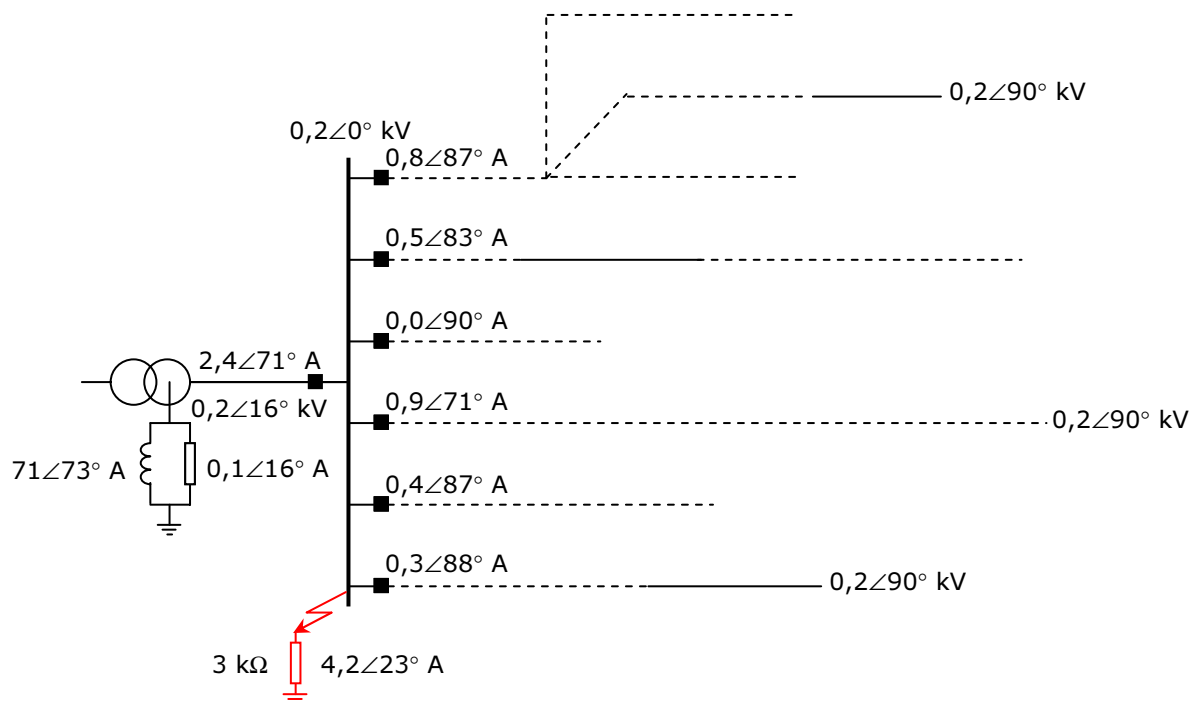
B.7.2 Jordfel vid samlingsskenan



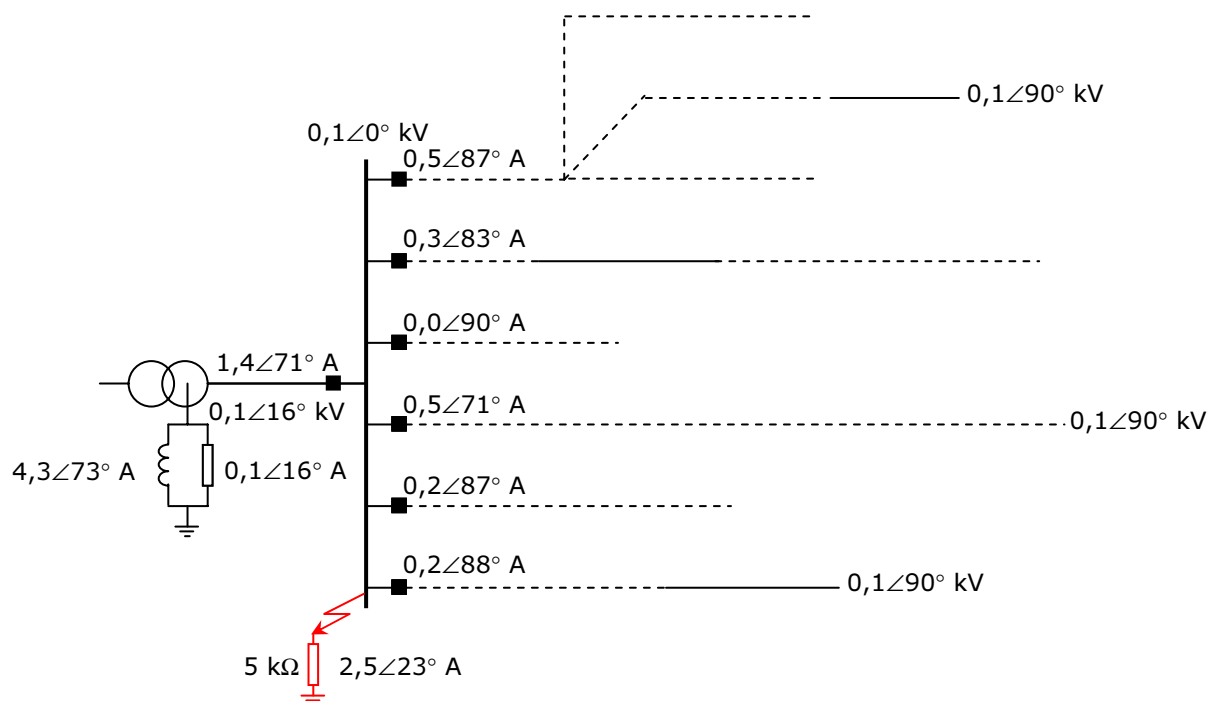
Figur B.35 Stumt jordfel vid samlingsskenan.



Figur B.36 Felströmmen vid stumt jordfel på samlingsskenan i det fullt kablifierade nätet.

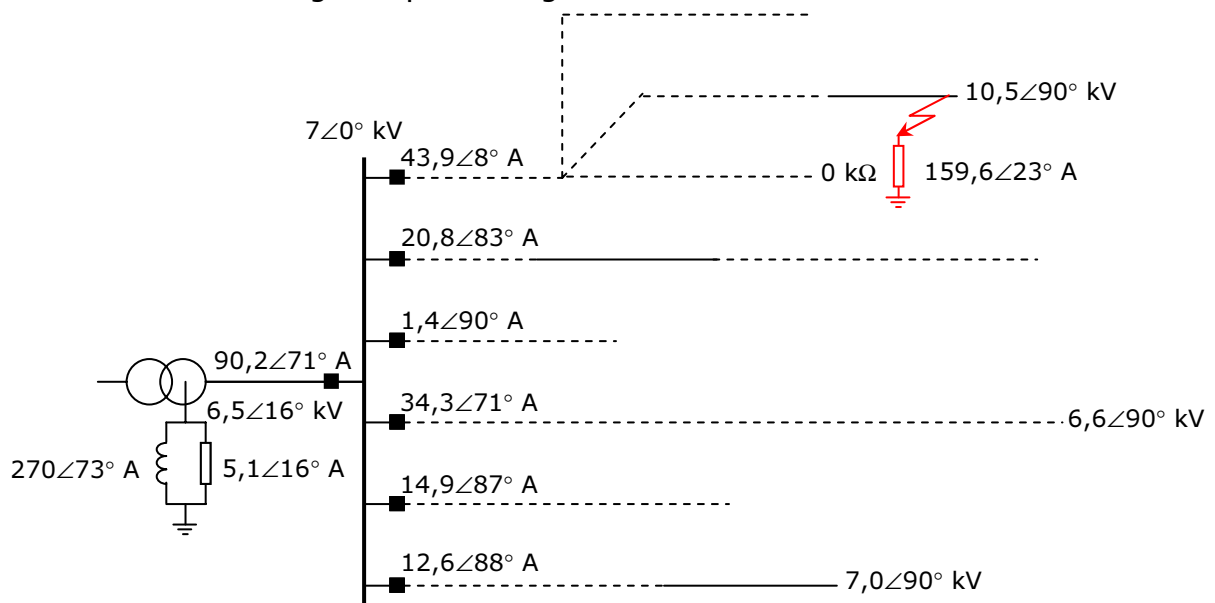


Figur B.37 Jordfel på samlingsskenan i det kablifierade nätet.

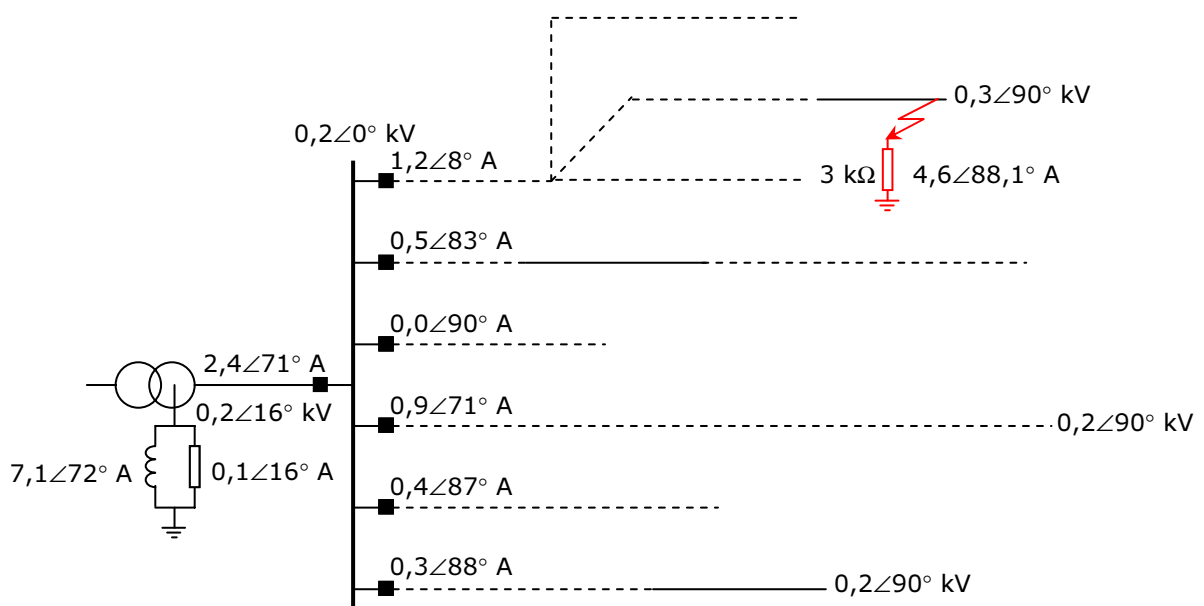


Figur B.38 Jordfel på samlingsskenan i det kablifierade nätet.

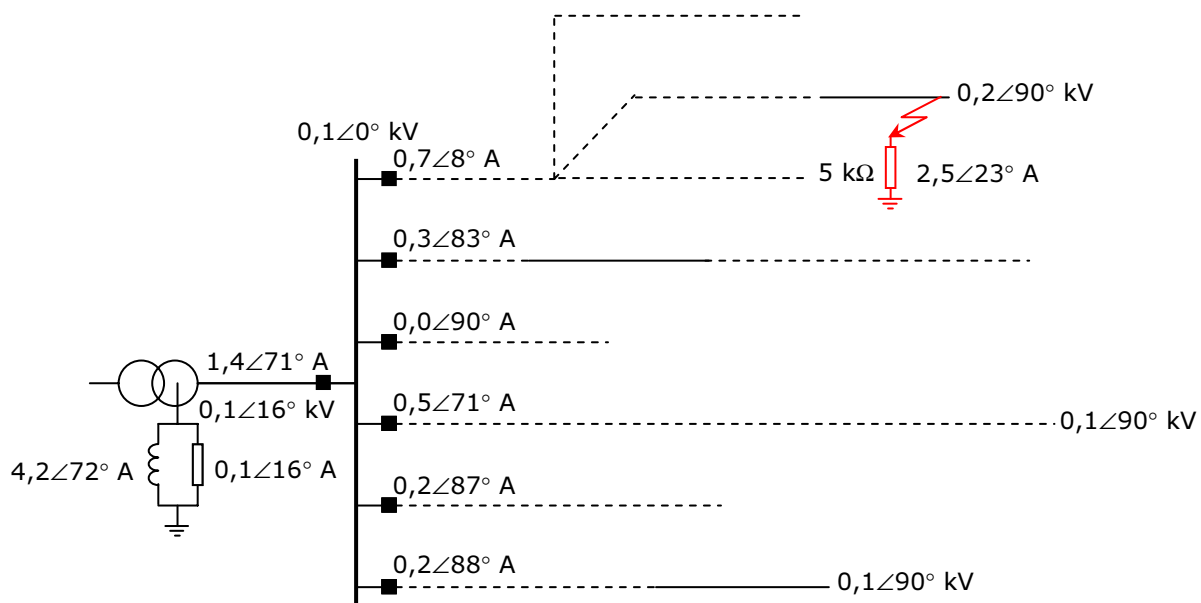
B.7.3 Jordfel längst ut på ledning 1



Figur B.39 Stumt jordfel längs ut på ledning 1. Beräknade U_0 och I_0 är angivna i figuren.

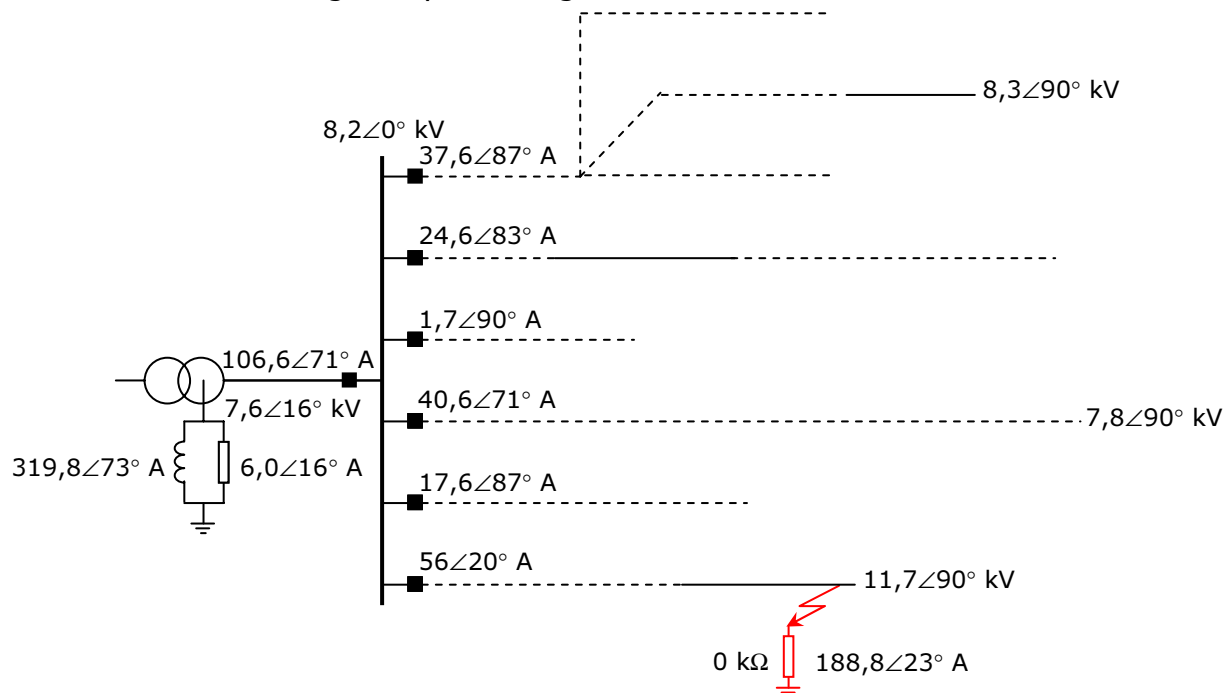


Figur B.40 Jordfel längs ut på ledning 1 i det kablifierade nätet.



Figur B.41 Jordfel längs ut på ledning 1 i det kablifierade nätet.

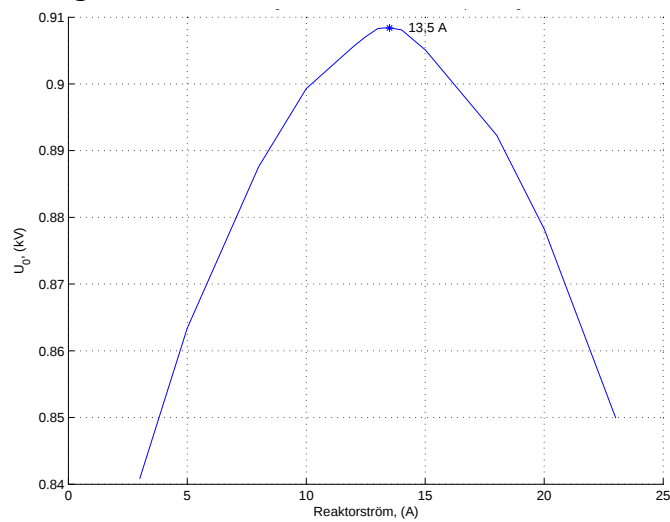
B.7.4 Jordfel längst ut på ledning 6



Figur B.42 Stumt jordfel längs ut på ledning 6 i det kablifierade nätet.

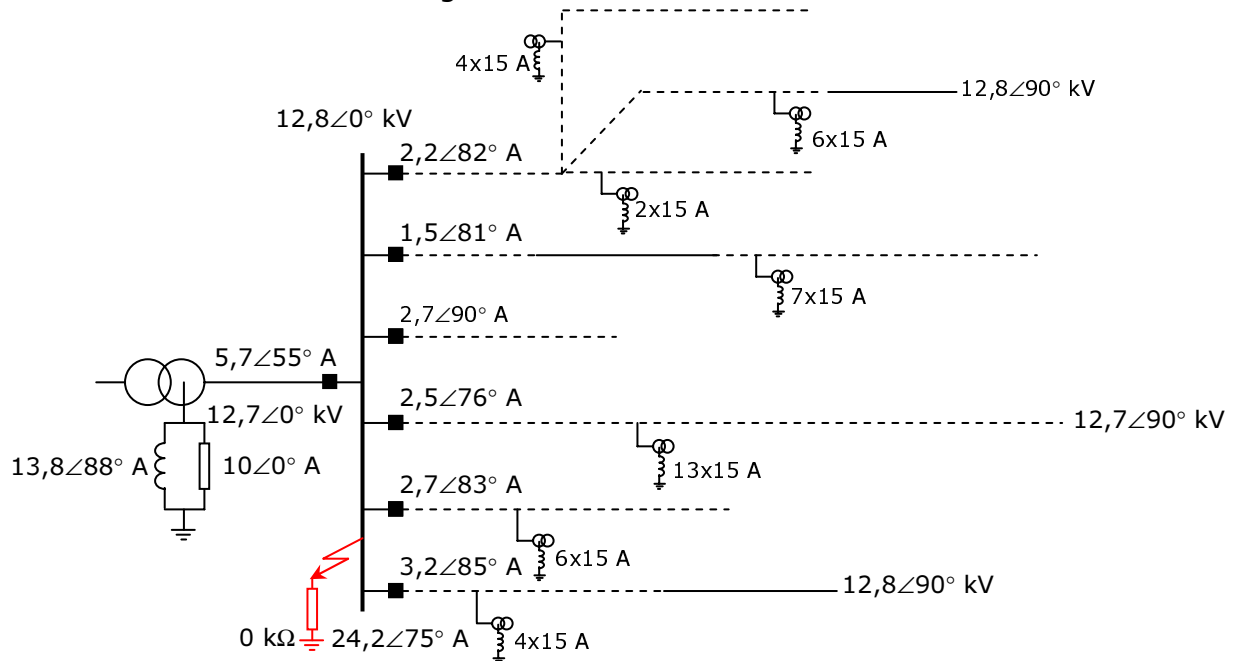
B.8 Jordfel i det kablfierade nätet med lokalkompensering

B.8.1 Avstämningskurva

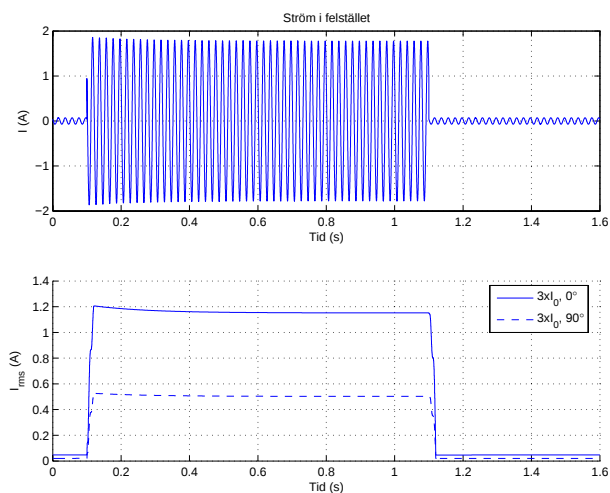


Figur B.45 Avstämningskurva för kablfierat nät med lokal kompensering.

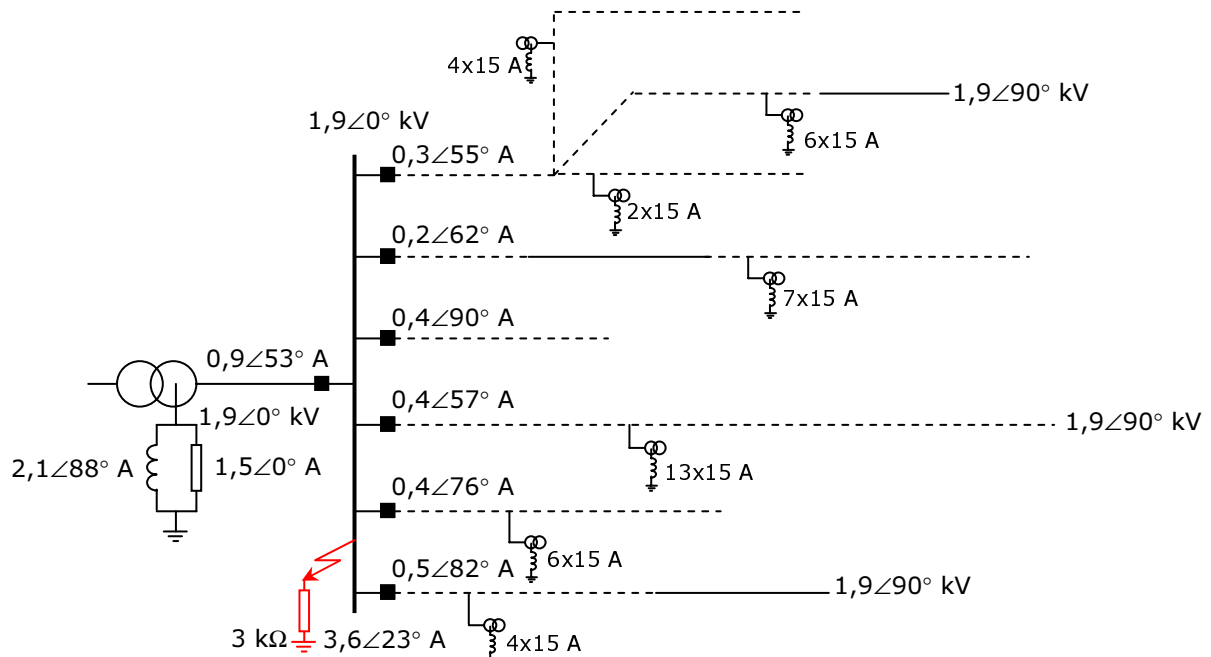
B.8.2 Jordfel vid samlingsskenan



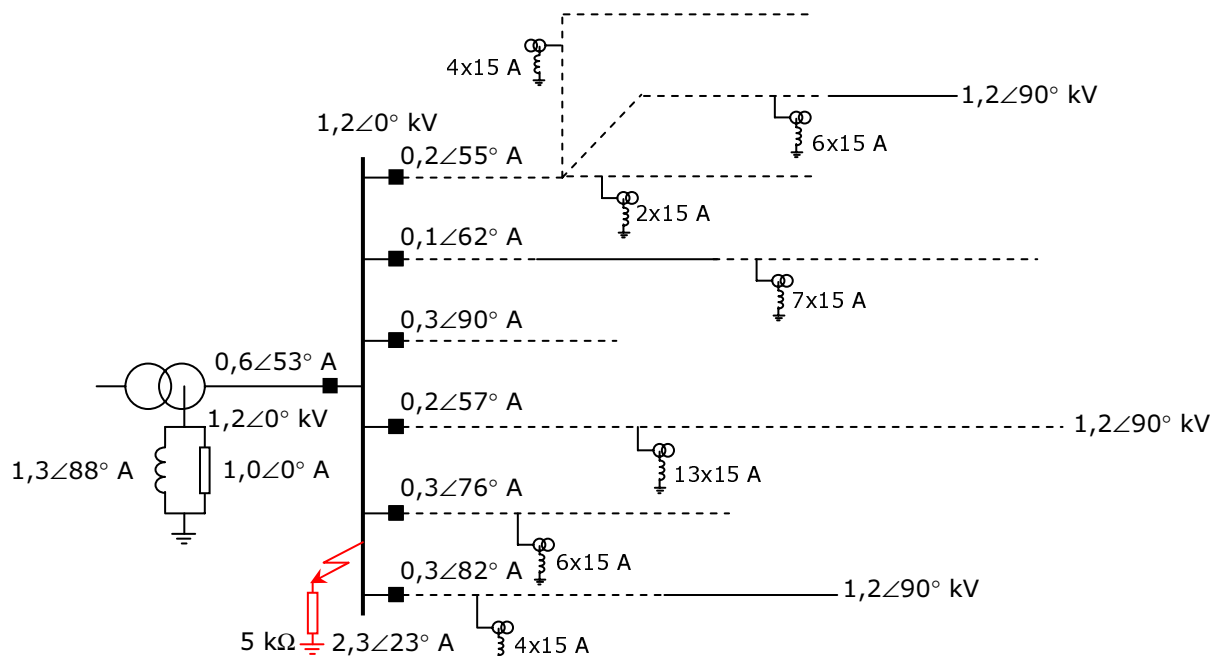
Figur B.46 Stumt jordfel på samlingsskenan i det kablifierade nätet med lokal kompensering. Knappt 10 A av den aktiva strömmen i felstället härstammar från förluster i de utlokaliserade reaktorerna.



Figur B.47 Strömmen i felstället vid stumt jordfel på samlingsskenan i det kablifierade nätet med lokal kompensering. Notera avsaknaden av de inledande transienterna.

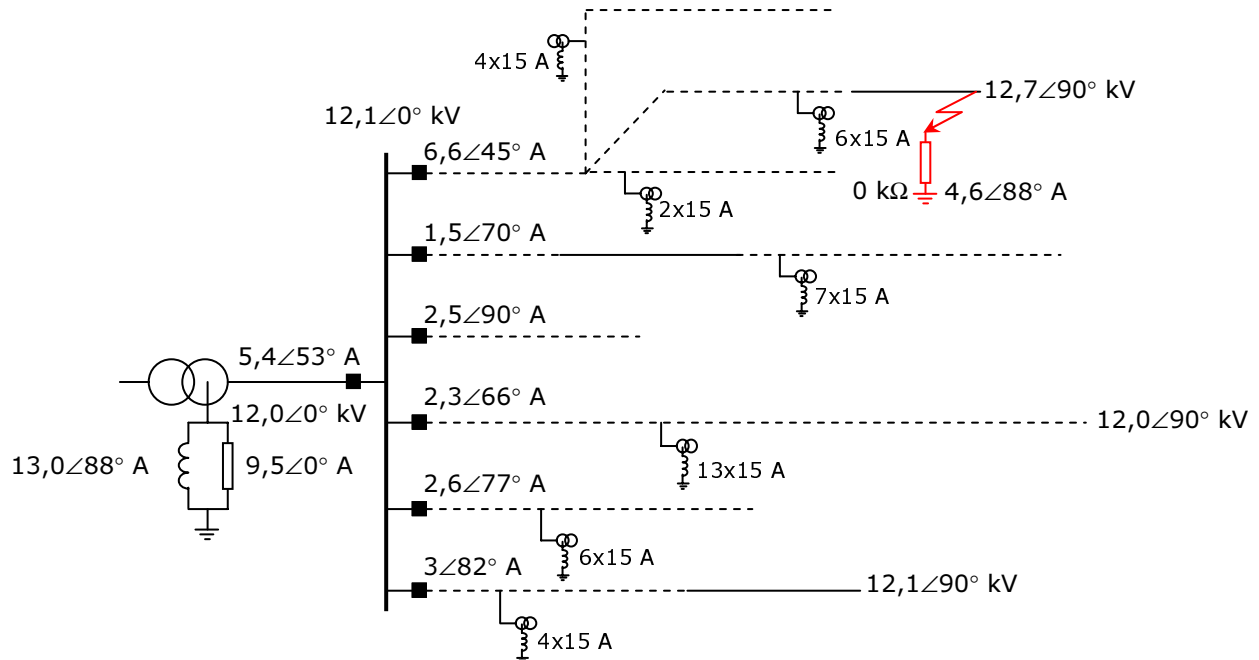


Figur B.48 Jordfel på samlingsskenan i det kablfierade nätet med lokal kompensering.

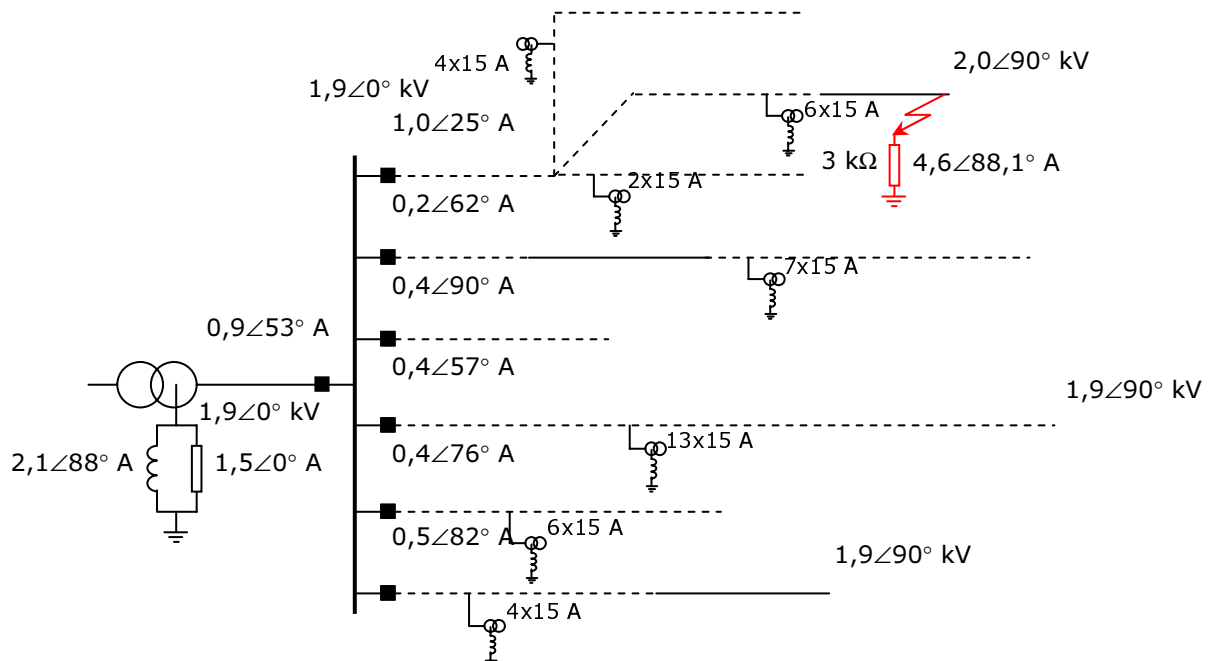


Figur B.49 Jordfel på samlingsskenan i det kablfierade nätet med lokal kompensering.

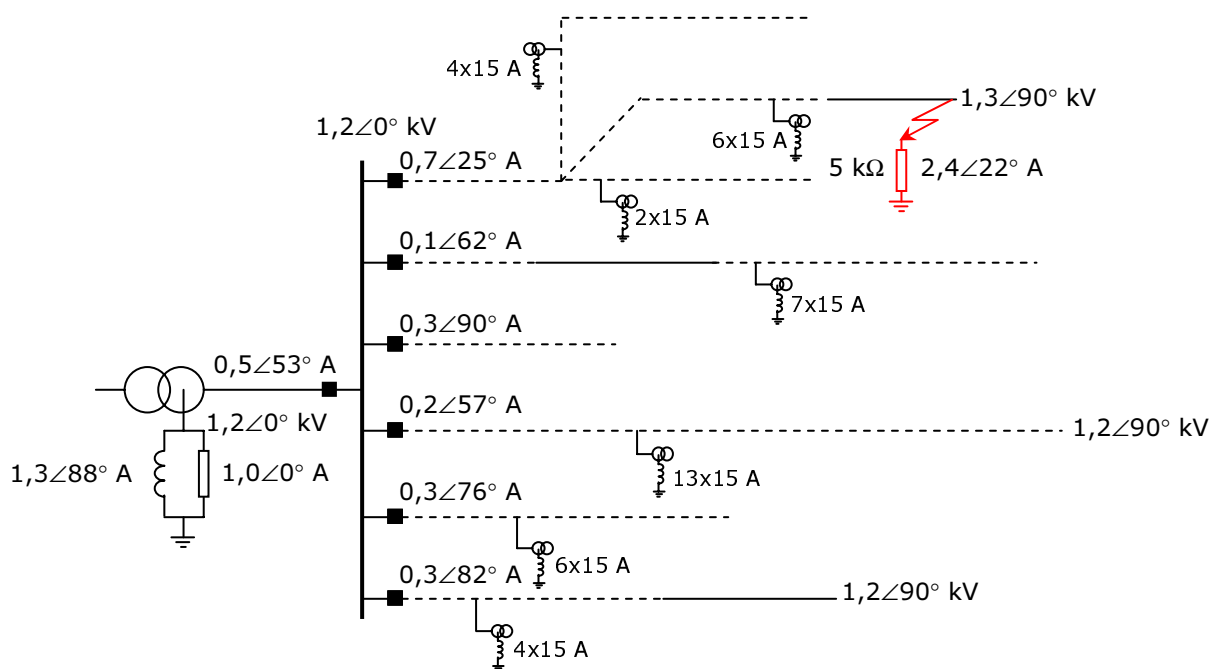
B.8.3 Jordfel längst ut på ledning 1



Figur B.50 Stumt jordfel längst ut på ledning 1 i det kablifierade nätet med lokal kompensering.

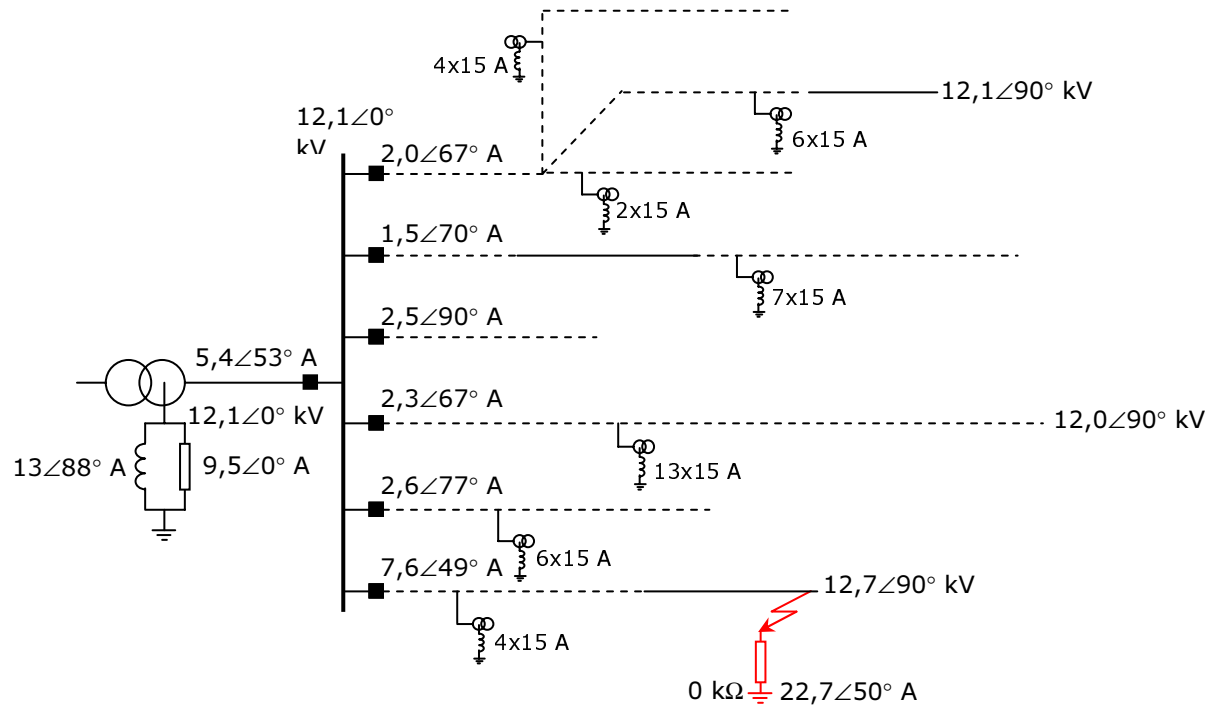


Figur B.51 Jordfel längst ut på ledning 1 i det kablifierade nätet med lokal kompensering.

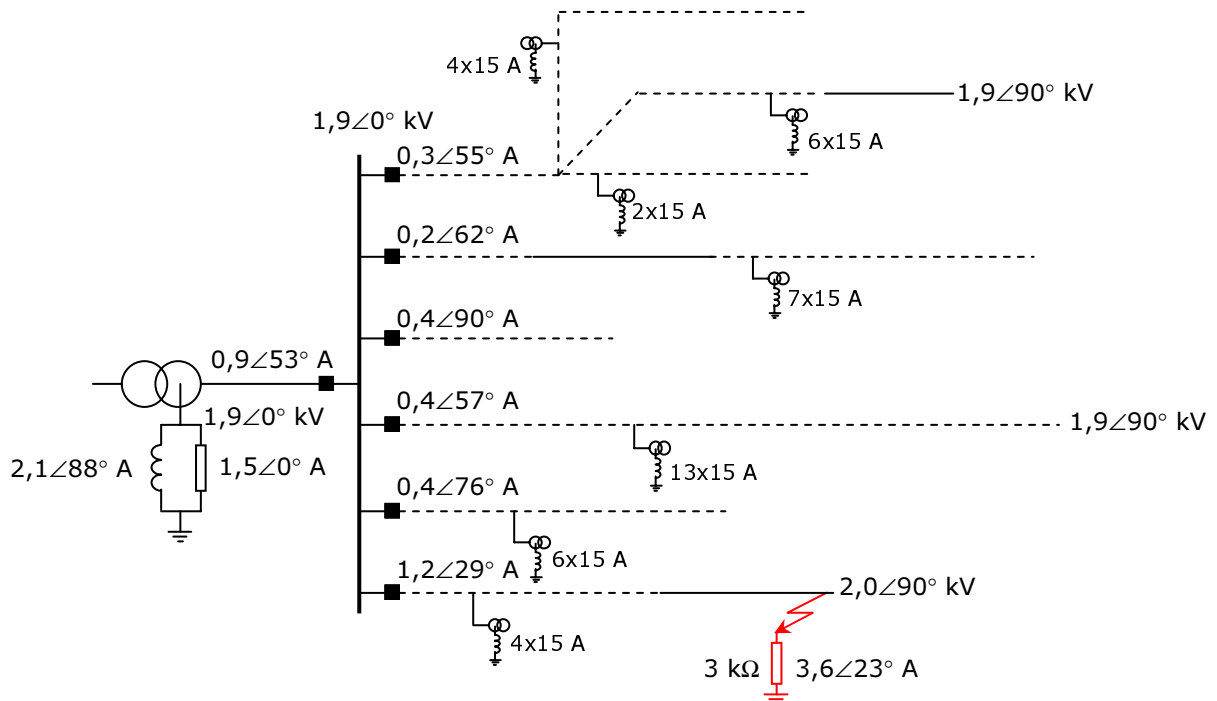


Figur B.52 Jordfel längst ut på ledning 1 i det kablfierade nätet med lokal kompensering.

B.8.4 Jordfel längst ut på ledning 6



Figur B.53 Stumt jordfel längst ut på ledning 6 i det kablifierade nätet med lokal kompensering.



Figur B.54 Jordfel längst ut på ledning 6 i det lokalkompenserade nätet.

