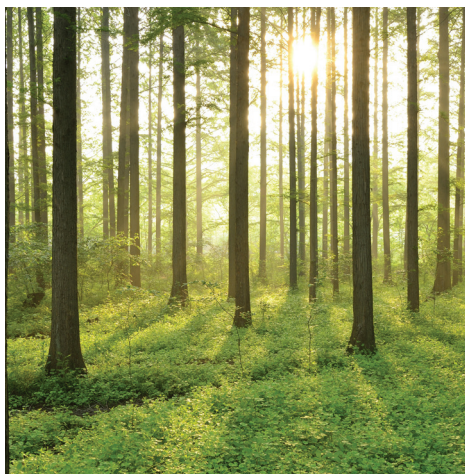


KABLARS NOLLFÖLJDSIMPEDANS

RAPPORT 2015:101



Kablars nollföljdsimpedans

Beräkning och mätning av 36 kilovoltskablar

MARIA MALM, ANNA PETTERSSON, JENS SLOTH, MORTEN HEMMINGSSON, DANIEL KARLSSON

ISBN 978-91-7673-101-7 | © 2015 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Projektet *Beräkning och mätning av 36 kV kablers nollföljdsimpedans* har initierats och drivits av programmet Risk- och Tillförlitlighetsanalys. Programstyrelsen ansåg att det fanns ett stort behov att uppdatera tekniska riktlinjer gällande kabelnät vid 36 kV och dessa specifikationer för att bättre kunna möta utbyggnaden av förnyelsebar produktion.

Projektet omfattar beräkningar och mätningar på befintliga driftsatta kablar, för att klarställa 36 kV kablers nollföljdsimpedans och vilken inverkan den långsgående jordlinan har. Flera olika mätningar har utförts på kablar med varierande storlek, vid olika markförhållanden och med och utan jordlina, för att få ett tillförlitligt resultat som kan användas som approximationsmodell.

Maria Malm och Anna Pettersson på E.ON Elnät Sverige har varit ansvariga för projektet.

Stort tack till programstyrelsen och samtliga intressenter i programmet Risk- och Tillförlitlighet för stödet för projektet.

Programstyrelsen bestod av följande personer:

- Horst Blüchert/Per Höjevik/Anders Richert, Elsäkerhetsverket
- Peter Söderström, Vattenfall Eldistribution
- Kjell Oberger, Fortum Distribution
- Ola Ivarsson, E.ON Elnät
- Jenny Paulinder, Göteborg Energi
- Najib Mirkhani, Svk
- Pär-Erik Petrusson, Jämtkraft
- Sven-Åke Polfjärd, FIE
- Tommy Johansson, Energimarknadsinspektionen (adjungerad)

Programmet Risk- och Tillförlitlighetsanalys samtliga intressenter:

- | | |
|-----------------------------|--------------------------|
| • Elsäkerhetsverket | • Umeå Energi Elnät |
| • Vattenfall Eldistribution | • Gävle Energi |
| • Fortum Distribution | • Jönköping Energi Nät |
| • E.ON Elnät Sverige | • Sundsvall Energi Elnät |
| • Göteborg Energi | • Härjeåns Nät |
| • Svenska kraftnät | • AB Borlänge Energi |
| • Jämtkraft | • C4 Elnätjkk |
| • Skellefteå Kraft Elnät | • Borås Energi |
| • Öresundskraft | • FIE |

Energiforsk vill också passa på att framföra ett tack till samtliga deltagare i referensgruppen som bidragit med både kunskap och engagemang.

Referensgruppen bestod av:

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| • Joakim Aaxelsson, Vattenfall | • Magnus Akke, Dlaboratory |
| • Henrik Eelfving, Vattenfall | • Lars Messing, Gothia Power |
| • Christer Flood, Fortum | • Daniel Karlsson, Gothia Power |

April 2015

Susanne Olausson (programansvarig)

Sammanfattning

Till följd av ökad kablifiering finns det ett behov av att öka förståelsen för kablars nollföljdsegenskaper då dessa i hög grad påverkar möjligheten till detektering och snabb bortkoppling av jordfel. Det finns en farhåga att avsaknaden av långsgående jordlina kan öka kablarnas nollföljdsresistans till en nivå som gör att dess betydelse inte längre är försumbar. I värsta fall leder de högre värdena på nollföljdsresistansen för kablarna till att föreskrifternas krav på känslighet inte kan uppfyllas.

I syfte att öka förståelsen kring kablars nollföljdsimpedans och betydelsen av medföljande jordlina presenteras i föreliggande rapport två mätningar som genomförts på befintliga treledarkablar (36 kV) under hösten 2014. Vidare har en ny beräkningsmodell tagits fram för beräkning av en kabellednings nollföljdsimpedans. För att bekräfta att modellen fungerar har jämförelser gjorts mellan beräknade och uppmätta resultat.

Resultaten från framtagna modell skiljer sig från mätresultaten. Problemet ligger inte i modelleringen utan diskrepansen mellan resultaten grundar sig i svårigheter att kartlägga markförhållandena där kabeln är förlagd. Där exempelvis varierande markresistivitet, jordtagsresistanser, närliggande kablar och jordlinor, om och hur kabeln och skärmen är skarvade är faktorer som har inverkan på nollföljdsimpedansen.

Beräkningsmodellen ger en möjlighet till ökad förståelse för nollföljdsimpedansen där den inte bara ger ett slutgiltigt värde utan det finns möjlighet att studera strömmens väg via de olika markåterledarna mellan jordtagen. På så vis kan det konstateras att jordlinan har som störst betydelse nära jordtagen. För att minska nollföljdsimpedansen skulle man därför inte behöva gräva ner jordlina längs hela kabelledningen utan det räcker nära jordtagen.

Resultaten från modellen och mätningarna visar att jordlinan har större inverkan på nollföljdsresistansen än på nollföljdsreaktansen. Där mätningarna och beräkningarna visade en minskning av nollföljdsresistansen med 70 % (från 2 till 0.6 Ω /fas) respektive 50 % (från 4 till 2 Ω /fas) då kabeln har långsgående jordlina.

Mätningarna har genomförts enligt off-line metoden, vilket betyder att kabeln är ur drift då mätningen görs. Mätningarna har inte varit problemfria och det kan konstateras att off-line metoden är känslig för störningar från omgivningen. I rapporten föreslås därför att ytterligare mätningar bör göras enligt on-line metoden vilket innebär att mätningar görs då kabeln är i drift.

Summary

As a result of the increased amount of underground cables, there is a need to increase the understanding of the zero-sequence characteristics of these cables as these significantly affect the possibility to detect and rapidly disconnect earth faults. There is a worry that the lack of a parallel earth wire can increase the resistive part of the zero-sequence impedance of the cable to a level that is no longer negligible. In worst case, the higher values can make it impossible to meet the regulatory requirements for sensitivity.

In order to increase the knowledge about the zero sequence impedance of cables and the importance of the earth wire two field measurement projects have been carried out on existing cables (36 kV) in the autumn of 2014. In addition, a new model for zero-sequence calculation has been developed that is more detailed than former models. To confirm the model accuracy, comparisons have been made between the calculated and measured results.

The results have shown that the new model does not fit well with the measurements. The problems is not related to the new model the difference between the results is based on having too little knowledge about the ground conditions where the cable is routed. Where, for example changes in the earth resistivity, nearby cables and earth wires, whether and how the cable and the screen is spliced are factors that have influence on the zero sequence impedance

The model provides an opportunity for increased understanding of the zero sequence impedance. The model not only provides a total value of the zero sequence impedance, it also provides the possibility to study the distribution of the zero-sequence current through the different earthing conductors. Thus it can be concluded that the earth wire has the largest significance near the earth electrode. With this in mind one should not have to put the earth wire all along the entire cable, since it is most efficient to bury it near the earth electrode.

The results from the model and measurements show that the earth wire have more impact on the resistance than the reactance of the zero-sequence impedance of the cable. The measurements and calculations showed a reduction of the resistive part of 70 % (from 2 to 0.6 Ω/fas) and 50 % (from 4 to 2 Ω/fas) respectively when the earth wire was connected in parallel with the cable.

The measurements were carried out according to the off-line method, which means that the cable is out of service when the measurement is made. It can be concluded that the off-line method is sensitive to environmental interference. It is therefore suggested, that further measurements should be made according to the on-line method, which means that measurements are made when the cable is in operation.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och mål	1
1.3	Omfattning och förutsättningar	2
2	Kabelteori och beräkningsmodeller utifrån kabeldata	3
2.1	Kabelledningens impedans gentemot nollföljdsström	3
2.1.1	Modellering av en kabellednings nollföljdsimpedans	3
2.1.2	Ett jordtag	4
2.1.3	Två jordtag	6
2.1.4	Resistans i mark och återledare (jordlina)	6
2.1.5	Induktans	8
2.1.6	Beräkningsmodeller för nollföljdsimpedans för treledarkabel	10
2.2	Kabelledningens kapacitans gentemot nollföljdsspänning	15
2.2.1	Modellering av kabelledningars nollföljdskapacitans	15
2.2.2	Beräkningsmodell för kabelledningens nollföljdskapacitans	18
3	Beräkning utifrån kabeldata	20
3.1	Modell 1 - retur i skärm	20
3.2	Modell 2 - retur i skärm och jord	22
3.3	Modell 3 - retur i kabelskärm och jord samt medföljande jordlina	23
3.4	Nollföljdskapacitans	24
4	Mätmetoder	25
4.1	On-line metoden	25
4.2	Off-line metoden	25
4.2.1	Mätmetod för kablers nollföljdsimpedans	27
4.2.2	Mätmetod för kablers nollföljdskapacitans	28
5	Fältmätningar – Genomförande och Resultat	29
5.1	Knäred C (KRDC) – Björkered (BRD)	29
5.1.1	Karakteristik för kablar och övriga förhållanden	30
5.1.2	Mätning av nollföljdsimpedans för treledarkabel - med jordlina ..	31
5.1.3	Mätning av nollföljdsimpedans för treledarkabel - bortkopplad jordlina	33
5.1.4	Mätning av kabelledningens nollföljdsadmittans	35
5.2	Millettorp (MLTP) – Vrången Södra (VS)	38
5.2.1	Karakteristik för kablar och övriga förhållanden	38
5.2.2	Mätning av nollföljdsimpedans för treledarkabel - med jordlina ..	38
5.2.3	Mätning av nollföljdsimpedans för treledarkabel - bortkopplad jordlina	41
5.2.4	Mätning av kabelledningens nollföljdsadmittans	43
5.3	Övriga erfarenheter och lärdomar	46
6	Analys	47
6.1	Beräkningsresultat	47
6.1.1	Modell 1 - Nollföljdimpedans för retur i skärm [3]	47
6.1.2	Modell 2 - Nollföljdsimpedans för retur i skärm och mark [3]	47
6.1.3	Modell 3 - Nollföljdsimpedans för retur i skärm, mark och medföljande jordlina	49
6.2	Sammanställning av mätresultat	51
6.2.1	Kommentarer	51
6.3	Jämförelser mellan mätresultat och beräkningar	52

6.3.1	Modell 1 - Retur i skärm	52
6.3.2	Modell 2 - Retur i skärm och jord.....	52
6.3.3	Modell 3 - Retur i skärm, jord och jordlina	52
7	Slutsatser och rekommendationer	54
7.1	Fältmätningar med off-line metoden	54
7.1.1	Jämförelser mellan on-line och off-line metoden	55
7.2	Beräkningsmodell.....	56
7.3	Jordlinans inverkan på nollföljdsimpedansen.....	57
8	Fortsatt arbete	59
9	Referenser	60
	Appendix A	61
	Appendix B	64
	Bilaga 1	68
	Bilaga 2	69
	Bilaga 3 Markresistivitet[9]	70

1 Inledning

Den angelägna vädersäkringen av mellanspänningsnät (10 – 20 kV) efter stormarna Gudrun och Per har inneburit att omfattande jordkabelnät har ersatt tidigare friledningar och nya nät byggs nästan uteslutande som markförlagd kabel. Dessutom har utvecklingen och införandet av stora vindkraftsparker medfört att stora och ibland utbredda kablade 30 kV nät fått läggas.

Kabelsystem har emellertid i vissa väsentliga avseenden andra egenskaper än de tidigare använda friledningsnäten. Ledningssystemets nollföljdsegenskaper påverkar möjligheterna att detektera och koppla bort jordfel i systemet samt att minimera riskerna för skada under feltiden.

Därför är kunskaperna om utbredda jordkabelsystemens egenskaper väsentliga för utformningen av skydds- och felbortkopplingssystemen.

1.1 Bakgrund

Kablars nollföljdsimpedans är inte en given storhet som enkelt kan erhållas från tillverkarens datablad. Flera parametrar såsom förläggningssätt, dimension på ledaren, skärmen, jordtag och medföljande jordlina påverkar nollföljdsimpedansen. Enligt Elforskrapporten 06:64 från 2006 minskar nollföljdsresistansen med ca 5-20 % medan nollföljdsreaktansen ökar i samma storleksordning om 12/24 kV kabeln har en längsgående jordlina. I Elforskrapporten 06:66 från 2006 presenteras nollföljdsimpedansen till en 1 km lång AXCES 95/25 kabel, med och utan längsgående jordlina. Med längsgående jordlina visar sig nollföljdsresistansen därvid minska med ca 44 % medan nollföljdsreaktansen ökar med 360 % jämfört med förhållandena utan längsgående jordlina.

Vid beräkningar av krav på resulterande jordtag samt inställning av reläskydd bortses oftast från inverkan av kablarnas nollföljdsimpedans. Det finns en farhåga att avsaknaden av längsgående jordlina kan öka kablarnas nollföljdsresistans till en nivå som gör att dess betydelse inte längre är försumbar. Även avsaknaden av lokal kompensering av långa kablar innebär att deras nollföljdsimpedans får en större påverkan vid jordfel i systemet. I värsta fall leder de högre värdena på nollföljdsresistansen för kablarna till att föreskrifternas krav på känslighet inte kan uppfyllas. Det finns även en osäkerhet kring beräknade värden för nollföljdsimpedansen på 36 kV kablar.

1.2 Syfte och mål

Projektets syfte är att mäta och beräkna 36 kV kablars nollföljdsimpedans så att elnätsföretagen får bättre underlag och metoder att på ett kostnadseffektivt sätt kunna ansluta förnyelsebar elproduktion och därmed medverka till den miljövänliga energiomställningen med minskade koldioxidutsläpp och ökad energieffektivitet.

Målet för projektet är att skapa en större kunskap kring kablarnas nollföljdsimpedans och betydelse av medföljande jordlina.

1.3 Omfattning och förutsättningar

Föreliggande rapport omfattar både beräkningar och mätningar på befintliga driftsatta kablar för att klarställa 36 kV kablarnas nollföljdsimpedans och inverkan av den långsgående jordlinan. För att få ett tillförlitligt resultat som kan användas i senare kabelprojekt har intentionen varit att genomföra ett antal mätningar med varierande storlek på kablarna, olika markförhållanden, samt med och utan jordlina. Det har dock inte varit möjligt att på ett metodiskt sätt kunna särskilja olika parametrars inverkan. Idealet vore likartade förhållanden där inverkan av en parameter åt gången kunde studerats. För kabelnät med stor utsträckning kan inverkan från omgivande kablar vara betydande. Vidare har det inte gått att uppbringa en kabel som helt saknat medföljande jordlina. Då utrustning saknats för att genomföra mätning enligt on-line metoden (kapitel 4.1) har två mätningar gjorts med off-line metoden (kapitel 4.2) där markförhållandena varierade men där kabelstorlek (förutom skärm) varit samma. Mätningar med och utan jordlina har eftersträfvats, men alla kabelförband har någon form av medföljande jordlina.

För samtliga genomförda uppmätningar av en kabellednings impedans och admittans gentemot nollföljdsström respektive nollföljdsspänning utförs motsvarande teoretiska beräkningar för den betraktade kabeln. Resultaten från mätningarna och de korresponderande beräkningarna jämförs och diskuteras i rapporten.

2 Kabelteori och beräkningsmodeller utifrån kabeldata

För att ha fungerande jordfelsskydd och att kunna säkerställa de säkerhetsföreskrifter som finns är det av stor betydelse att kunna beräkna kablers nollföljdsimpedans och nollföljdsadmittans på ett korrekt sätt. I detta kapitel presenteras modellering samt beräkningsmodeller för nollföljdsimpedans och nollföljdsadmittans utifrån den kabeldata som finns tillgänglig. I kapitel 3 redovisas tillämpningar av beräkningsmodellerna på befintlig kabeldata från utförda mätningar och i kapitel 6.1 presenteras en sammanställning av resultaten.

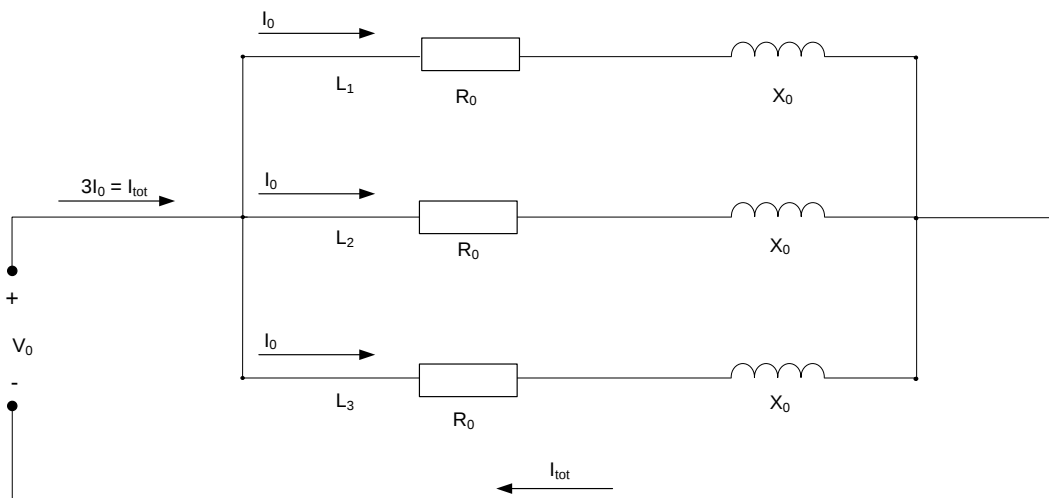
2.1 Kabelledningens impedans gentemot nollföljdsström

Då nollföljdsströmmen är lika stor i alla tre fasledarna och ligger i fas summeras den till skillnad från plus- och minusföljdsströmmar inte till noll i återledaren [3]. Nollföljdsimpedansen utgörs således av en seriekoppling mellan ledare och återledare, där återledarna om det är flera stycken parallellkopplas. Detta innebär att en kabellednings nollföljdsimpedans påverkas av en rad olika parametrar såsom kabelns geometri, förläggningssätt, val av återledare m.m. Följande information krävs vid beräkning av en kabellednings nollföljdsimpedans [1].

- Typ av kabelförband: trefaskabel eller 3 enfaskablar
- Ledarmaterial: koppar eller aluminium
- Ledararea och ledarradie för fasledare
- Ledararea och medelradie för skärmledare
- Geometrisk uppbyggnad för trefaskabel
- Förläggningssätt för kabelförband med enledarkablar: triangel- eller plan förläggning samt avstånd mellan fasledarna
- Markresistivitet och jordtagsresistanser
- Ledarmaterial, ledararea och förläggning av eventuell längsgående jordlina

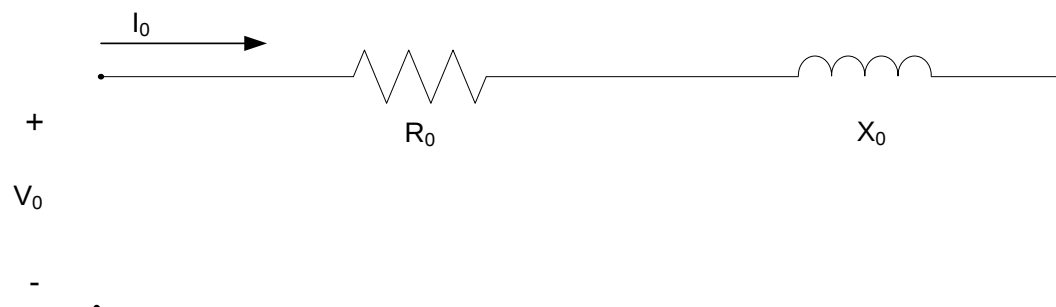
2.1.1 Modellering av en kabellednings nollföljdsimpedans

En resistans i serie med en induktans (per fas) kan användas för att modellera nollföljdsimpedansen för en treledarkabel med återledare (se nedanstående figur). Kabelledningens konduktans och susceptans har försumrats.



Figur 1 Modell för treledarkabel med återledare - kortsluten och jordad i motsatt ände.

Om bara en fas studeras kan ovanstående figur förenklas till:



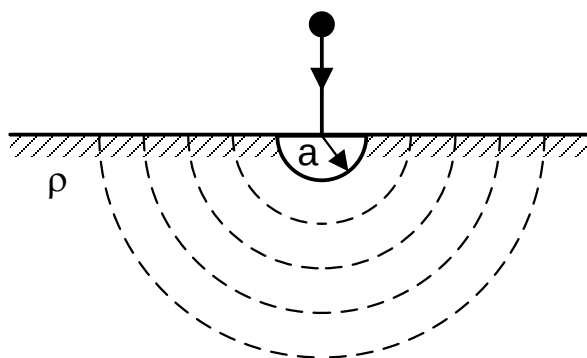
Figur 2 Modell för kabel (en fas) med återledare - kortsluten och jordad i motsatt ände.

Där nollföljdsimpedansen ges av:

$$\bar{Z}_0 = \frac{\bar{V}_0}{\bar{I}_0} = \frac{3 \cdot \bar{V}_0}{\bar{I}_{tot}} = R_0 + jX_0 \quad [\Omega/fas] \quad (1)$$

2.1.2 Ett jordtag

Jordtagen vid kabelledningens ändpunkter har betydelse för kabelledningens totala nollföljdsresistans. Låt oss betrakta ett halvsfäriskt jordtag i oändligt utbredd mark enligt Figur 3.



Figur 3 Halvfäriskt jordtag i oändligt utbredd mark med resistiviteten ρ .

Jordtagets area mot den omgivande marken är:

$$A = 2\pi a^2 [m^2] \text{ (arean av ett halvklot)} \quad (2)$$

Där a är jordtagets radie (i meter). Strömtätheten på avståndet r från jordtagets centrum blir då:

$$J(r) = \frac{I}{2\pi r^2} \vec{r} [A/m^2] \quad (3)$$

Den elektriska fältstyrkan blir:

$$E(r) = \rho J(r) [V/m] \quad (4)$$

Där ρ är markens resistivitet (i Ωm). Spänningen mellan jordtaget ($r = a$) och en godtycklig punkt på avståndet r_1 från jordtagets centrum blir:

$$V(a) - V(r_1) = \int_a^{r_1} E(r) dr = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r_1} \right) [V] \quad (5)$$

Om man antar att potentialen långt borta är noll och man låter $r_1 \rightarrow \infty$ får man att spänningen på jordtaget blir:

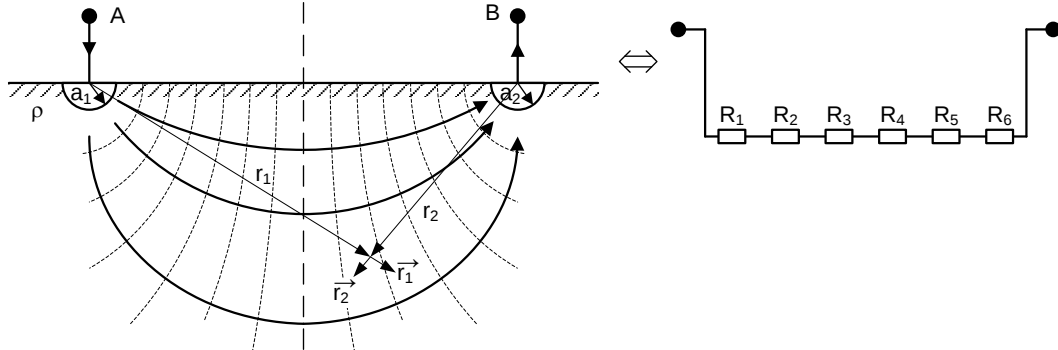
$$V = \frac{\rho I}{2\pi a} [V] \quad (6)$$

Ur detta definieras jordtagsresistansen som:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi a} [\Omega] \quad (7)$$

2.1.3 Två jordtag

Låt oss nu betrakta två halvsfäriska jordtag i oändligt utbredd mark enligt Figur 4.



Figur 4 Två halvsfäriska jordtag i oändligt utbredd mark med resistiviteten ρ . Avståndet mellan jordtagen är D [m].

Den elektriska fältstyrkan (E) för de två jordtagen ges av:

$$E = \frac{I\rho}{2\pi} \int \left(\frac{1}{r_1^2} \vec{r}_1 - \frac{1}{r_2^2} \vec{r}_2 \right) d\vec{r} \quad [V/m] \quad (8)$$

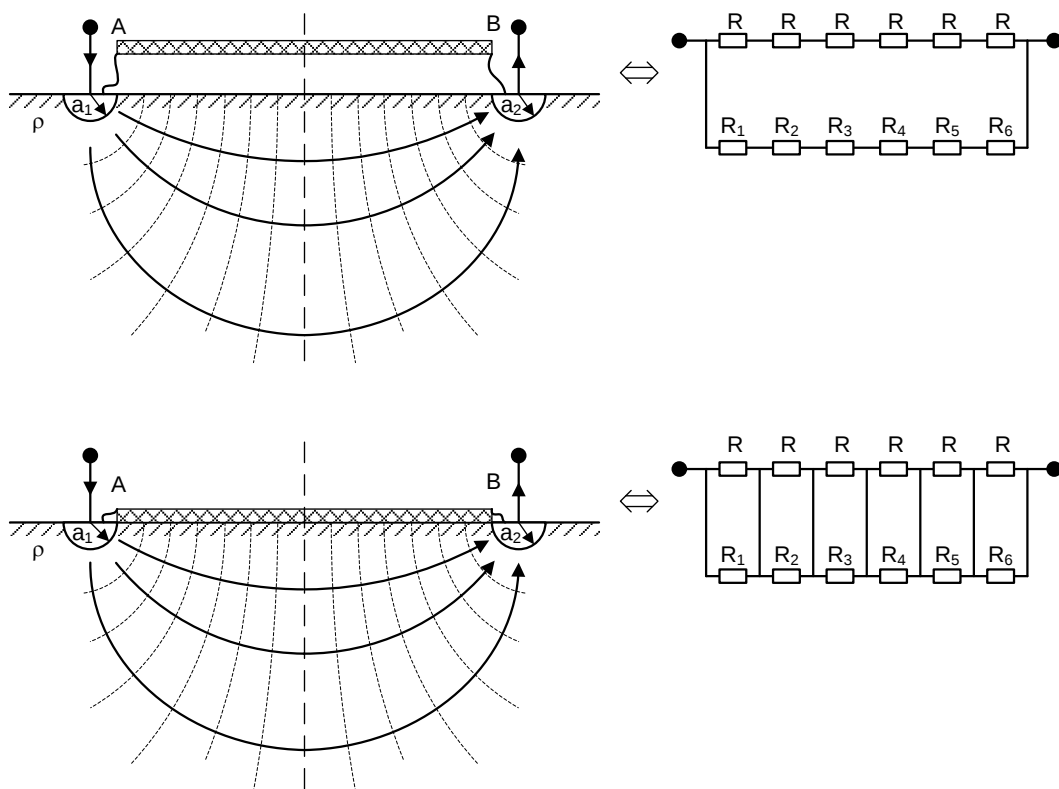
där r är avstånd och $\vec{r}$ är riktning. Mellan två jordtag på avståndet D från varandra och med radierna a_1 och a_2 får man:

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{D - a_2} + \frac{1}{a_2} - \frac{1}{D - a_1} \right) [\Omega] \quad (9)$$

För stora avstånd, D , och med jordtagsradier a_1, a_2 mycket mindre än D ser man att resistansen mellan två jordtag går mot resistansen för de två jordtagen i seriekoppling.

2.1.4 Resistans i mark och återledare (jordlina)

För att studera ett system med en isolerad ledare i mark (jordlina) tänker vi oss först en ledare i luft, alternativt en isolerad återledare i mark, se övre delen av Figur 5. Detta system kan då approximeras med ett antal seriekopplade resistanser för marken ($R_1, R_2, \dots$) och med ett antal seriekopplade resistanser (R) för ledaren. Resistanserna som representerar mark ($R_1, R_2, \dots$) blir för en bestämd längd (säg 1m) att vara olika stora beroende på vilken del av marken de representerar (ges av ekvation (8)). Resistanserna som representerar ledaren kommer däremot att vara lika stora per längdenhet. Den totala resistansen blir nu en parallellkoppling av markresistansen och ledarresistansen.



Figur 5 Bild av mark och återledare när återledaren är isolerad (överst) och med återledare i kontakt med mark (underst). Till höger syns hur den totala resistansen kan approximeras. Om $a_1 = a_2$ gäller att:

$R_1 = R_6$, $R_2 = R_5$ och $R_3 = R_4$, det gäller också att $R_1 > R_2 > R_3$.

När man lägger till den oisolerade ledaren (medföljande jordlina) i marken mellan jordtagen kan man se det som en kontinuerlig parallellkoppling av den extra ledaren och marken, se nedre delen av Figur 5. Den totala resistansen mellan de två jordtagen, med inbördes avstånd D , ges då av:

$$R = \int_A^B \frac{1}{\frac{1}{\frac{\rho_j}{A_j}} + \frac{1}{\frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(D-x)^2} \right)}} dx \quad [\Omega] \quad (10)$$

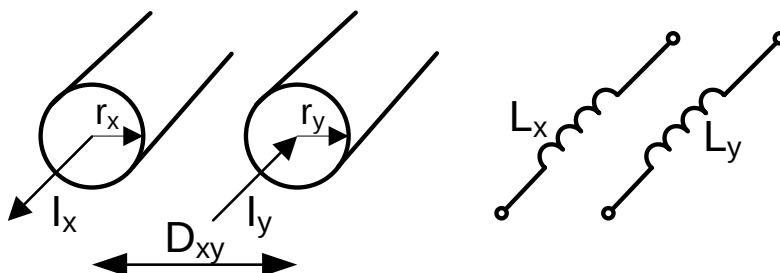
Man känner här igen en del av uttrycket från ekvation (8). Den andra delen representerar medföljande ledare. A, B är start och slutpunkt för ström mellan jordtagen (Figur 5), ρ_j och A_j är resistivitet och area för medföljande jordlina. Resultatet är oberoende av väg och numeriskt enklast blir integrationen om man håller sig längs marken ($y = 0$). I kapitel 6.1.3 redovisas resultatet då ovanstående integral används för att beräkna den totala markresistansen mellan mätstationerna Knäred C och Björkered.

2.1.5 Induktans

När man talar om induktans utgår man ofta från två ledare eller grupper som bildar två ledare. De två nedanstående avsnitten är en mycket kort sammanfattning av [4].

Två ledare

Två ledare modelleras som i Figur 6.



Figur 6 Geometri och induktans för två ledare, x respektive y. I_x och I_y är strömmen i respektive ledare och r_x och r_y är ledarnas radie. D_{xy} är avståndet mellan ledarna.

Det sammanlänkade flödet (λ) och den framräknade induktansen (L) för varje ledare kan då skrivas som i ekvation (11)-(13). D_{xx} och D_{yy} är $r_x e^{-1/4}$ respektive $r_y e^{-1/4}$, detta kan man få fram vid en noggrannare betraktelse av det sammanlänkade flödet i och utanför ledaren.

$$\lambda_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_x \ln \frac{1}{D_{xx}} + I_y \ln \frac{1}{D_{xy}} \right) [Wb - t/m]^1 \quad (11)$$

$$\lambda_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_x \ln \frac{1}{D_{yx}} + I_y \ln \frac{1}{D_{yy}} \right) [Wb - t/m] \quad (12)$$

$$L = L_x + L_y = \frac{\lambda_x}{I_x} + \frac{\lambda_y}{I_y} [H/m] \quad (13)$$

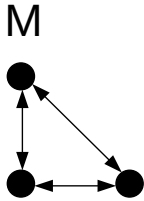
För ledare och skärm, extern återledare och jord kommer $I_x = -I_y = I$ medan det för de olika återledarna gäller att: $I_{ledare} = -\sum I_{återledare}$. Om det bara finns två återledare blir induktanserna lättare att uttrycka.

¹ Enheten för det sammanlänkade flödet λ är $[Wb - t/m]$ vilket kan tolkas som Weber-varv per meter. Där Wb är definierad som 1 voltsekund $[V \cdot s]$.

Fram och återledare med godtyckligt antal ledare

För att kunna utföra beräkningar definieras ett par begrepp:

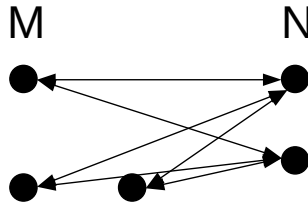
- GMR, geometrisk medelradie för ett antal ledare ges av det geometriska medelvärdet på avståndet mellan alla ledare i samma fas.



$$GMR = \sqrt[M]{\prod_{k=1}^M \prod_{l=1}^M d_{kl}}$$

På samma sätt som tidigare kommer d_{kk} (avståndet mellan en ledare och sig själv) att bli $r_m = r_k e^{-1/4}$.

- GMD, geometriskt medelavstånd ges av det geometriska medelvärdet av avståndet mellan två grupper av ledare.



$$GMD = \sqrt[MN]{\prod_{k=1}^M \prod_{l=1}^N d_{kl}}$$

Under förutsättning att strömmen i en grupp av ledare går tillbaka i den andra gruppen får man induktansen till:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{GMD}{GMR_N} + \ln \frac{GMD}{GMR_M} \right) [H/m] \quad (14)$$

Vilket är detsamma som i ekvation (13) men med avstånd och radie utbytt mot GMR och GMD .

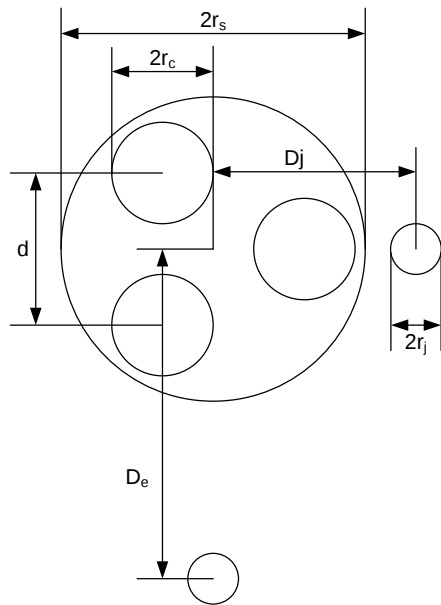
2.1.6 Beräkningsmodeller för nollföljdsimpedans för treledarkabel

Beroende på vilken eller vilka återledare man använder för nollföljdsströmmen finns det olika beräkningsmodeller att tillgå vid beräkning av en kabellednings nollföljdsimpedans. I kapitlet som följer presenteras tre beräkningsmodeller; de två första finns beskrivna sedan tidigare (läs exempelvis [3]) medan den sista är framtagen i samband med föreliggande projekt. Nedanstående tabell innehåller beskrivning av de olika parametrar som används i kapitlet.

Tabell 1 Beskrivning av beteckningar

r_s	Skärmsradie [m]
r_c	Ledarradie [m]
d	Avstånd mellan två ledares centrum [m]
D_e	Avstånd från kabelcentrum till fiktiv markåterledare [m]
D_j	Avstånd från kabelcentrum till jordlina [m]
r_j	jordlinans radie [m]
R_c	Resistans för ledaren [Ω/m]
R_s	Skärmresistans [Ω/m]
R_{j1}, R_{j2}	Jordtagsresistanser i respektive kabelände [Ω]
f	Frekvens [Hz]
ρ	Markresistivitet [Ωm]
$\omega = 2\pi f$	Vinkelhastighet [rad/s]
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	Permeabilitet för magnetfält i vakuum [Vs/Am]
$R_g = \frac{\omega \cdot \mu_0}{8}$	Längdberoende markresistans [Ω/m]

Geometrin för en treledarkabel med medföljande jordlina och återledare kan studeras i Figur 7.



Figur 7 Geometri för en 3-ledarkabel med fiktiv markåterledare och medföljande jordlina. Måtten kommer att användas för att beräkna impedanserna för en treledarkabel.

Dessa mått, eller mått som kan användas för härledning av måtten i Figur 7 finns ofta i datablad för kablarna. Om det inte finns lämpliga mått kan man använda approximationen:

$$r_s = d \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{1}{2} \right) = d \frac{2 + \sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \quad (15)$$

Approximationen bygger på att ledarna ligger i tät triangel och skärmen ligger så tätt inpå ledarna som möjligt.

Att en treledarkabel är symmetrisk innebär att induktansen mellan de olika fasledarna är lika stor, detta påverkar framförallt plus- och minusföljdsimpedansen.

GMR för en symmetrisk treledare fås som:

$$GMR_{\Delta} = [(r_m \cdot d \cdot d) \cdot (d \cdot r_m \cdot d) \cdot (d \cdot d \cdot r_m)]^{1/9} \quad (16)$$

Där r_m är den geometriska ledarradien som bildas av att multiplicera ledarens radie med en konstant (se ekvation (17)) för att ta hänsyn till ledarnas inre induktans.

$$r_m = r_c e^{-\frac{1}{4}} = r_c \cdot 0.779 \quad (17)$$

För en treledarkabel kan man nu beräkna nollföljdsimpedansen [3] och [5] för retur i enbart skärm och för retur i skärm och mark.

Modell 1 - hämtad från [3] för återledning i kabelskärm

Enligt Gunnar Henning författare till "Nollföljdsimpedans för kablar" ABB High Voltage Cables, återledes mer än 90% av jordfelsströmmen i kabelskärmar. För de flesta tillämpningar ska det därför räcka att ange nollföljdsimpedansen med endast skärmen som återledare (ojordad förbindelse eller enbart jordad i en ände). I sådant fall gäller följande ekvation:

$$\bar{Z}_0 = R_c + 3R_s + j3f\mu_0 \ln \frac{r_s}{\sqrt[3]{r_m \cdot d^2}} [\Omega/m \cdot fas] \quad (18)$$

Den reaktiva biten är reaktansen mellan ledare och skärm för en koaxialkabel och där $GMR_\Delta = \sqrt[3]{r_m \cdot d^2}$. Totala impedansen är ledaresistans i serie med 3 ggr skärmresistans och 3 ggr reaktans ledare till skärm. 3:an beror på att strömmen i skärmen är 3 gånger så stor som strömmen i en av fasledarna.

Modell 2 - hämtad från [3] för återledning i kabelskärm och jord

För återledning i både kabelskärm och jord blir det en parallellkoppling mellan skärmresistansen R_s och markresistansen R_g och reaktansen mellan skärm och mark som läggs till föregående ekvation, vilket ger:

$$\bar{Z}_0 = R_c + j3f\mu_0 \ln \frac{r_s}{\sqrt[3]{r_m \cdot d^2}} + \left(\frac{3R_s \left(R_g + jf\mu_0 \ln \frac{D_e}{r_s} \right)}{R_s + R_g + jf\mu_0 \ln \frac{D_e}{r_s}} \right) [\Omega/m \cdot fas] \quad (19)$$

Där D_e är markdjupet på den fiktiva markåterledaren som enligt Carson's formel bestäms av markresistiviteten och frekvensen [3].

$$D_e = 659 \cdot \ln \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (20)$$

För ett stort djup, D_e , får man samma resultat som i ekvation (18).

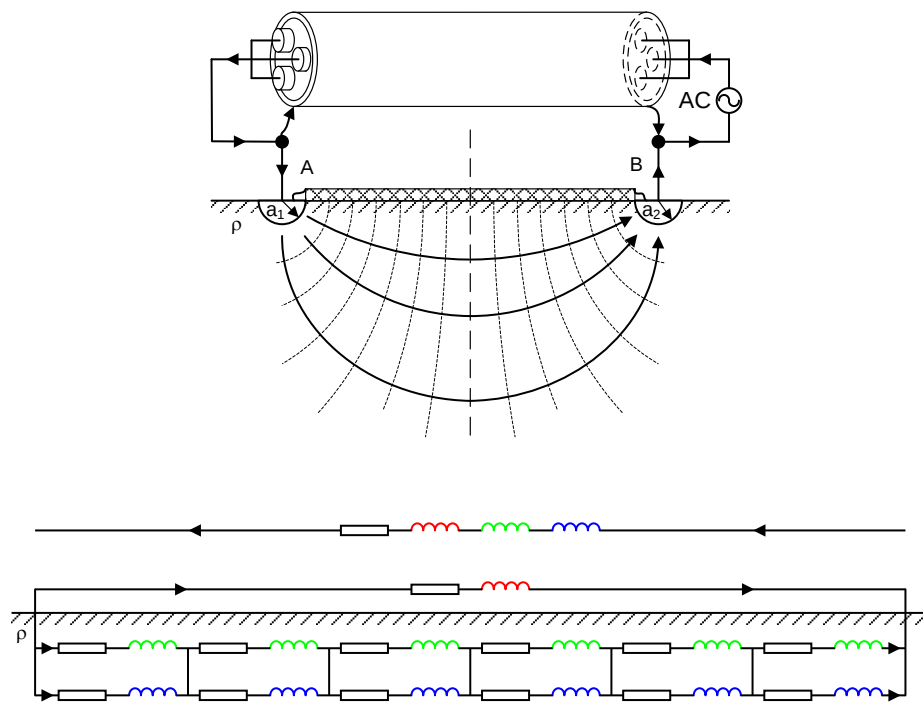
Om även aktuella jordtagsresistanser finns att tillgå ändras markåterledaren från R_g till $R_g + R_{j1} + R_{j2}$. Jordtagsresistanserna anges i $[\Omega]$ d.v.s de är oberoende av kabellängd. Detta ger följande ekvation:

$$\bar{Z}_0 = l \cdot \left(R_c + j3f\mu_0 \ln \frac{r_s}{\sqrt[3]{r_m \cdot d^2}} \right) + \left(\frac{l \cdot 3R_s \left(R_{j1} + R_{j2} + l \cdot (R_g + jf\mu_0 \ln \frac{D_e}{r_s}) \right)}{R_{j1} + R_{j2} + l \cdot (R_s + R_g + jf\mu_0 \ln \frac{D_e}{r_s})} \right) [\Omega/fas] \quad (21)$$

Där $l [m]$ är längden på kabeln.

Modell 3² – modell för återledning i kabelskärm och jord samt medföljande jordlina

Vi tänker oss nu nollföljds-kretsen bestående av ledare och återledare, se Figur 8.



Figur 8 Modell av systemet för impedansmätning med ledare och återledare. Återledaren är sammansatt av skärm (röd induktans), medföljande jordlina (grön induktans) och mark (blå induktans).

Vi har ledaren med isolerad skärm samt jordlina i direktkontakt med mark, totalt tre återledare. Induktanser finns mellan ledare och de tre återledarna. Induktanserna mellan ledare och återledare behöver inte vara lika stor i ledare som i återledare (jämför ekvation (22) och (29)).

När vi pratar om ledare och återledare ser man att induktansen delas upp på de två ledarna i ekvation (11)-(13). En viss försiktighet får iakttas när man beräknar de olika induktanserna. Om någon induktans blir oändlig finns det fortfarande en återledare men det blir avbrott i ledaren. Man kan se det som att man då har en modell som inte passar ihop med förutsättningarna. Modellen får då anpassas till förutsättningarna, oftast genom att ta bort någon ledare (jordlina, skärm, mark) då försvinner också den borttagna ledarens induktans i ledaren. Reaktansen per längdenhet för återledarna i ledare-jordlina (X_j) respektive ledare-jord (X_{jord}) kan beräknas som:

$$X_j = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_j}{r_j} \text{ [}\Omega/\text{m]} \text{ (reaktans i jordlina för ledare-jordlina)} \quad (22)$$

² Modell 3 är framtagen i samband med projektet och kommer att användas till att beräkna nollföljdsimpedansen för både med och utan jordlina.

där $r'_j = r_j e^{-1/4}$.

$$X_{jord} = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{\sqrt[3]{r_m d^2}} \quad [\Omega/m] \text{ (reaktans i mark för ledare-mark)} \quad (23)$$

Den totala markimpedansen för kabeln blir då:

$$Z_{mark} = \int_A^B \frac{1}{\frac{\rho_j}{A_j} + jX_j + \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(D-x)^2} \right) + jX_{jord}} dx \quad [\Omega] \quad (24)$$

Ekvation (24) är samma uttryck som (10) men med reaktanserna tillagda. Total impedans för återledaren blir då skärmimpedans parallellt med markimpedans:

$$Z_{\text{återledare}} = Z_{mark} \parallel Z_{skärm} \quad (25)$$

Impedansen för skärmen är:

$$Z_{skärm} = l \left(R_s + j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \frac{r_s}{\sqrt[3]{r_m d^2}} \right) [\Omega] \quad (26)$$

Notera att induktanserna endast stämmer för den specifika kombinationen av kabel, förläggning, mark och jordåterledare man har vid just detta ställe.

Den totala (sling)impedansen fås nu som:

$$Z_{tot} = Z_{ledare} + Z_{\text{återledare}} \quad [\Omega] \quad (27)$$

Där ledarimpedansen ges av:

$$Z_{ledare} = l \left(\frac{R_c}{3} + j(X_{skärm} + X_{jledare} + X_{jord}) \right) [\Omega] \quad (28)$$

Där X_{jord} fås av (23), $X_{skärm}$ av (26) och där $X_{jledare}$ skiljer sig något från X_j (ekvation(22)) och blir:

$$X_{jledare} = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_j}{\sqrt[3]{r_m d^2}} \quad [\Omega/m] \text{ (reaktans i ledare för ledare-jordlina)} \quad (29)$$

Nollföljdsimpedansen anges i Ω per fas vilket ger:

$$Z_0 = 3 \cdot Z_{tot} \quad [\Omega/fas] \quad (30)$$

Resultat från beräkningsmodellerna (presenterade ovan) med insatt kabeldata från mätningarna (se kapitel 5.1 och 5.2) presenteras i kapitel 6.1.

2.2 Kabelledningens kapacitans gentemot nollföljdsspänning

Kablars nollföljdskapacitans till jord anges ofta indirekt som kapacitiv jordfelström per km kabelledning vid angiven spänning och försumbar resistans i felstället. Modellering och beräkningsmetodik utifrån kabeldata för nollföljdskapacitansen beskrivs i detta kapitel.

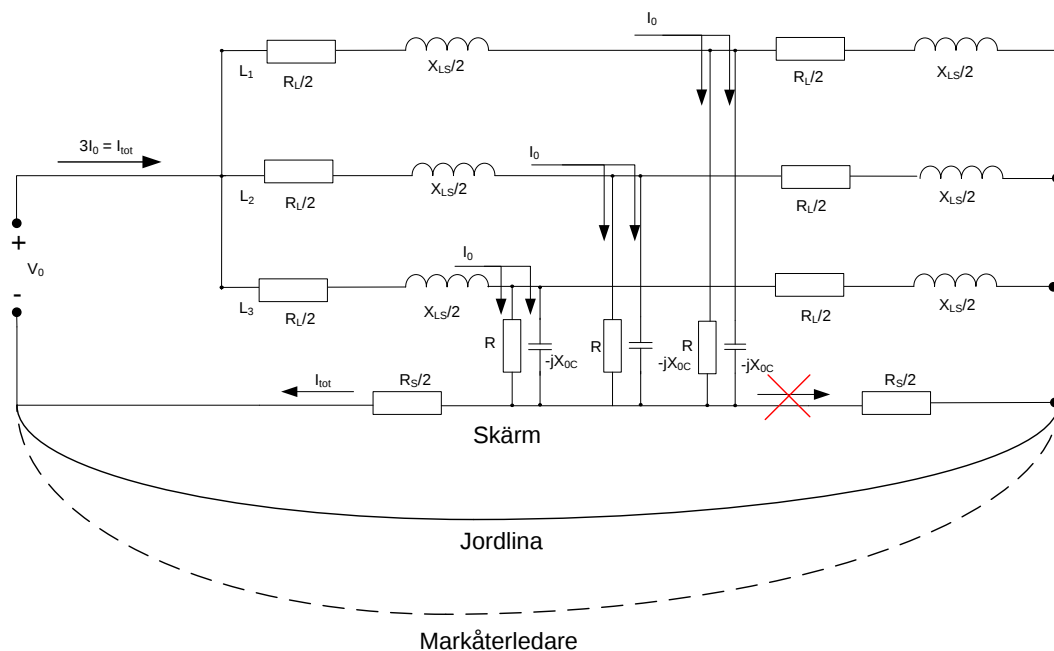
2.2.1 Modellering av kabelledningars nollföljdskapacitans

En kabelledning mellan två knutpunkter kan modelleras på olika sätt. Två vanligt förekommande är T-modellen (se Figur 10) och π -modellen (se Figur 11). T-modellen kommer att användas i föreliggande rapport.

T-modell

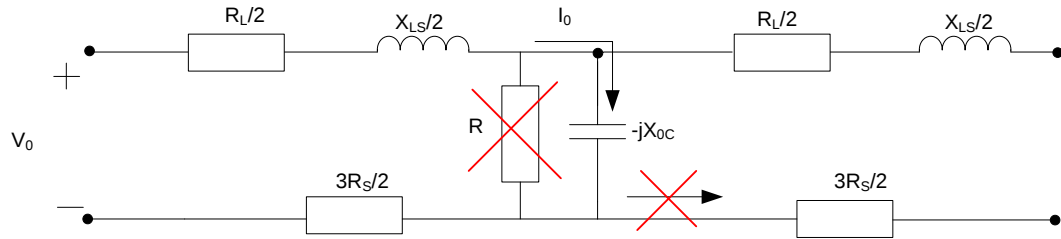
För T-modellen antas hela den injicerade strömmen med öppen ledningsände gå genom halva ledarimpedansen. Kapacitansen till jord är placerad mitt på kabelledningen enligt nedanstående figur. Som återledare antas halva skärmimpedansen då strömmen som tar vägen via jord och jordlina försummas.

En resistans är placerad parallellt med kapacitansen för att representera läckström. Normalt sett är denna ström väldigt liten och resistansen väldigt stor i förhållande till kapacitansen vilket gör att resistansen traditionellt sätt brukar exkluderas.



Figur 9 T-modell för treledarkabel med öppen ledningsände och med kapacitiv och resistiv koppling till skärm. All ström återleds i skärmen.

Om bara en fas studeras och läckströmmen försummas kan ovanstående figur förenklas till:



Figur 10 T-modell för en kabelledning (per fas).

Nedanstående ekvation påminner om ekvation (18). Skillnaderna är att nedanstående ekvation är dividerad med två eftersom strömmen återvänder vid halva kabellängden genom den kapacitiva reaktansen ($X_{0,c}$) som därmed adderas till den totala impedansen. Ledaresistansen (R_L), ömsesidiga reaktansen mellan skärm och ledare (X_{LS}) samt skärmens resistans (R_S) hämtas från datablad och är angivna per km:

$$\begin{aligned}\bar{Z}'_0 &= \frac{l(R_L + jX_{LS} + 3R_S)}{2} - jX_{0,c} \\ &= \frac{l(R_L + 3R_S)}{2} + j \left[\frac{l \cdot X_{LS} - 2X_{0,c}}{2} \right] [\Omega/(fas)]\end{aligned}\quad (31)$$

Real och imaginärdel identifieras som:

$$Re\{Z'_0\} = \frac{l(R_L + 3R_S)}{2} [\Omega/(fas)] \quad (32)$$

$$Im\{Z'_0\} = \frac{l \cdot X_{LS} - 2X_{0,c}}{2} [\Omega/(km \cdot fas)] \quad (33)$$

Den kapacitiva reaktansen ges av:

$$X_{0,c} = \frac{l \cdot X_{LS} - 2 \cdot Im\{Z'_0\}}{2} [\Omega/(fas)] \quad (34)$$

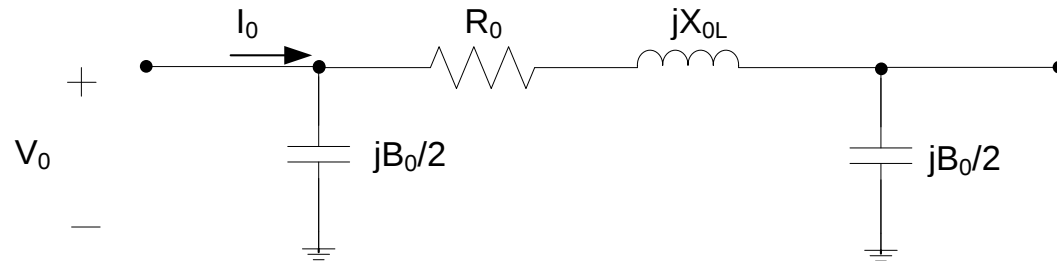
Nollföljds kapacitansen ges således av:

$$C_0 = \frac{2}{\omega \cdot (l \cdot X_{LS} - 2 \cdot Im\{Z'_0\})} [F/(km \cdot fas)] \quad (35)$$

Medan X_{LS} hämtas från datablad, erhålls $Im\{Z\}$ från mätningar (kapitel 5).

n-modell

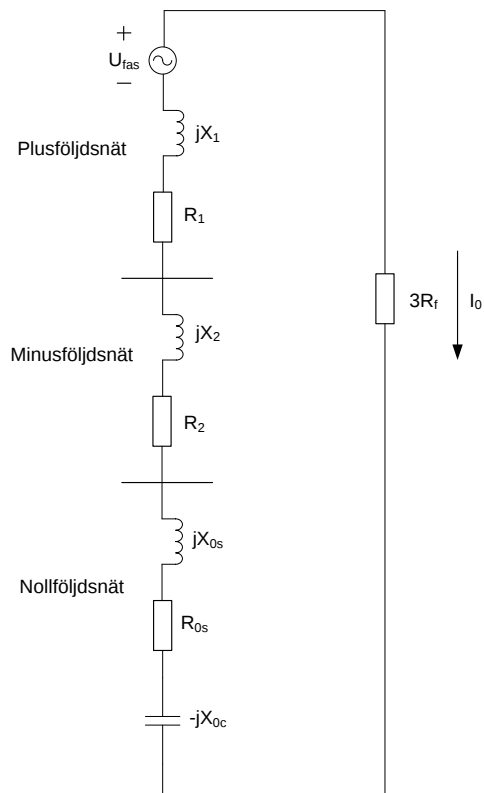
I n-modellen antas halva den kapacitiva strömmen gå genom hela längsimpedansen genom att kapacitansen till jord placeras i början samt i slutet på kabelledningen.



Figur 11 n-modell för en kabelledning(per fas).

2.2.2 Beräkningsmodell för kabelledningens nollföljdskapacitans

Sambandet mellan kapacitiv felström (fas till jord) som står angiven i datablad och nollföljdskapacitans kan för en kabel härledas genom att betrakta ett enfasigt jordfel för ett isolerat³ system.



Figur 12 Enfasigt jordfel beskrivet som seriekoppling av plus-, minus- och nollföljdsnät [1].

Nollföljdsströmmen kan uttryckas enligt följande:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_{fas}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f} \quad (36)$$

Då serieimpedanserna för plus- respektive minusföljd (Z_1 och Z_2) vanligtvis försummas kan den kapacitiva jordfelsströmmen uttryckas enligt nedanstående samband:

$$\bar{I}_{kapacitiv\ felström} = 3\bar{I}_0 = \frac{3\bar{U}_{fas}}{Z_0 + 3R_f} \quad (37)$$

³ Isolerat system är ett system utan apparater anslutna mellan transformatornollpunkter och jord [1].

För ett isolerat system och försumbara längsimpedanser (jX_{0s} och R_{0s}) för nollföljd kan ekvation (31) förenklas och den bakomliggande nollföljdsimpedansen skrivas [1]:

$$\bar{Z}_0 = -jX_c \rightarrow \frac{1}{|Z_0|} = |Y_0| = B_0$$

Vilket ger:

$$\begin{aligned} |I_{kapacitiv\ felström}| &= \frac{3 \cdot |U_{fas}|}{|Z_0| + 3R_f} = \left[R_f = 0, |Y_0| = \frac{1}{|Z_0|}, |U_{fas}| = \frac{|U_{fas-fas}|}{\sqrt{3}} \right] \\ &= \sqrt{3} \cdot |U_{fas-fas}| \cdot |Y_0| = \sqrt{3} \cdot |U_{fas-fas}| \cdot B_0 [A] \end{aligned} \quad (38)$$

Kapacitans (fas till jord) för nollföljd kan således uttryckas:

$$C_0 = \frac{|I_{kapacitiv\ felström}|}{\sqrt{3} \cdot |U_{fas-fas}| \cdot \omega} [F/fas] \quad (39)$$

3 Beräkning utifrån kabeldata

I kapitel 5 presenteras de mätningar som genomförts på treledarkabel mellan Knäred C (KRDC) och Björkered (BRD) samt mellan Milletorp (MLTP) och Vrånge Södra (VS). I detta kapitel genomförs beräkningar av nollföljdsimpedansen och nollföljdskapacitansen för dessa kablar baserat på tillgängliga data och de beräkningsmodeller som presenterats i kapitel 2. I tabellen nedan redovisas de parametrar som används i beräkningsmodellerna⁴.

Tabell 2 Data för kabel AXLJ-O LT 36 kV 3x240/35 (tv) samt AXLJ 36 kV 3x240/25(th):

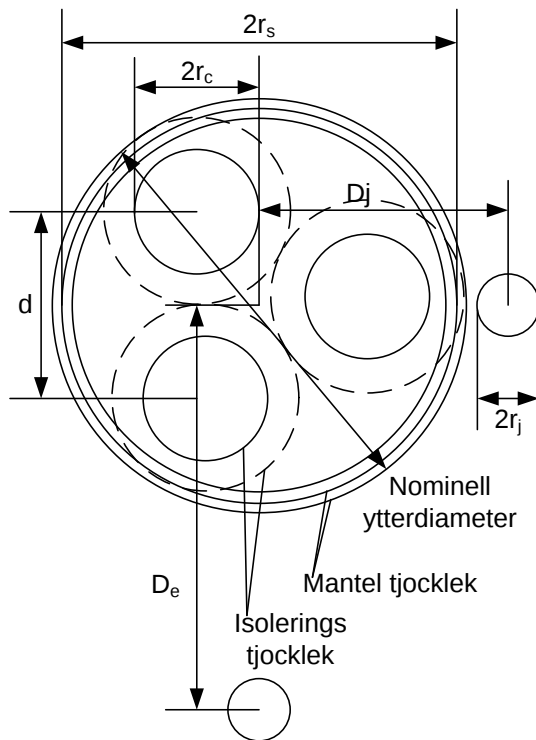
	KRDC-BRD	MLTP -VS
Kabeltyp	AXLJ – O LT 3x240/35	AXLJ 3x240/25
Max. DC resistans för ledaren vid 20 °C (R_c)	0.125 Ω/km	0.125 Ω/km
Skärmresistans(R_s)	0.6 Ω/km	0.8 Ω/km
Ledarradie (r_c)	$9.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	-
Nominell ytterdiameter	$88.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	-
Manteltjocklek (medelvärde)	$3.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	-
Isolering(manteltjocklek)	$6.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	-
Avstånd kabel till jordlina(D_j)	0.1 m	-

3.1 Modell 1 - retur i skärm

Mätningarna som genomförts i projektet har gjorts på treledarkablar och i kapitel 5.1.1 och 5.2.1 finns kabeldata presenterat för de två mätningar som redovisas i rapporten.

Kabelgeometrin med utmarkerade mått på nominell ytterdiameter, manteltjocklek samt isoleringstjocklek kan ses i Figur 13.

⁴ Resultaten i rapporten redovisas med samma noggrannhet som i databladen d.v.s. med 1 gällande värdesiffra.



Figur 13 Treledarkabel med utmarkerade mått för manteltjocklek, isoleringstjocklek samt nominell ytterdiameter som står angivna i Tabell 2.

För treledarkabeln mellan KRDC och BRD erhålls skärmradien r_s genom att subtrahera dubbla manteltjockleken från den nominella ytterdiameteren:

$$r_s = \frac{88.4 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 3.6 \cdot 10^{-3}}{2} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Avståndet mellan två ledares centrum d beräknas genom att lägga ihop de två ledarnas radie samt respektive isolerings tjocklek:

$$d = 2 \cdot 9.1 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 6.5 \cdot 10^{-3} = 30 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Med kabelvärden från ovanstående tabell insatta i ekvation (18) erhålls nollföljdsimpedansen:

$$Z_0 = 0.125 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 0.6 \cdot 10^{-3} + j3 \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \ln \frac{40.6 \cdot 10^{-3}}{\sqrt[3]{9.1 \cdot 10^{-3} \cdot 0.799 \cdot (31.2 \cdot 10^{-3})^2}} \leftrightarrow$$

$$Z_0 = 0.002 + j0.0001 [\Omega/\text{m} \cdot \text{fas}]$$

Kabeln mellan KRDC och BRD är 2927 m vilket ger:

$$Z_0 = 2927 \cdot (0.002 + j0.0001) = 6 + j0.3 = 6 \angle 3^\circ \Omega/\text{fas}$$

Nollföljdsimpedansen för 1 km blir:

$$Z_0 = 1000 \cdot (0.002 + j0.0001) = 2 + j0.1 = 2 \angle 3^\circ \Omega/\text{fas}$$

Det saknas dokumentation av geometrin för kabeln mellan MLTP och VS men eftersom kabeln är av i stort sett samma storlek kan ungefär liknande geometri antas som i föregående fall. Värdena insatta i samma formel ger nollföljdsimpedansen:

$$Z_0 = 0.125 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 0.8 \cdot 10^{-3} + j3 \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \ln \frac{40.6 \cdot 10^{-3}}{\sqrt[3]{9.1 \cdot 10^{-3} \cdot 0.799 \cdot (31.2 \cdot 10^{-3})^2}} \leftrightarrow$$

$$Z_0 = 0.003 + j0.0001 [\Omega/m \cdot fas]$$

Kabeln mellan MLTP och VS är ca 6300m vilket ger:

$$Z_0 = 6300 \cdot (0.003 + j0.0001) = 20 + j0.6 = 20 \angle 2^\circ \Omega/fas$$

Nollföljdsimpedansen för 1 km blir:

$$Z_0 = 1000 \cdot (0.003 + j0.0001) = 3 + j0.1 = 3 \angle 2^\circ \Omega/fas$$

3.2 Modell 2 - retur i skärm och jord

Värden på jordtagsresistanser och markresistivitet som använts i beräkningarna för respektive mätstation anges i nedanstående tabell. Värdet på jordtagsresistanserna i KRDC och BRD har valts enligt den motivering beskriven i kapitel 3.3.

Tabell 3 Markresistivitet och jordtagsresistans för KRDC, BRD, MLTP samt VS

	KRDC	BRD	MLTP	VS
$\rho [\Omega m]$	2500	2500	2500	2500
Jordtagsresistans $[\Omega]$	2	Saknar jordtag ≈ 2	1.53	2.00

Markdjupet för den fiktiva markåterledaren beräknas utifrån markresistiviteten och frekvensen till:

$$D_e = 659 \cdot \ln \sqrt{\frac{2500}{50}} = 1289 \text{ m}$$

Nollföljdsimpedansen på kabelledningen mellan KRDC och BRD kan sedan beräknas med hjälp av ekvation (21):

$$Z_0 = 2927 \cdot (0.125 \cdot 10^{-3} + j3 \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{40.6 \cdot 10^{-3}}{\sqrt[3]{9.1 \cdot 10^{-3} \cdot 0.799 \cdot (31.2 \cdot 10^{-3})^2}}) + \left(\frac{2927 \cdot 3 \cdot 0.6 \cdot 10^{-3} \left(2 + 2 + 2927 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{8} + j50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \ln \frac{1289}{40.6 \cdot 10^{-3}} \right) \right)}{2 + 2 + 2927 \cdot \left(40.6 \cdot 10^{-3} + \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{8} + j50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \ln \frac{1289}{40.6 \cdot 10^{-3}} \right)} \right) = 4 + j0.9 [\Omega/fas]$$

$$\leftrightarrow Z_0 = 4 + j0.9 = 4 \angle 13^\circ [\Omega/fas]$$

Nollföljdsimpedansen för 1 km blir:

$$Z_0 = 2 + j0.2 = 2 \angle 6^\circ [\Omega/fas]$$

På liknande sätt beräknas nollföljdsimpedansen på kabelledningen mellan MLTP-VS:

$$Z_0 = 6300 \cdot (0.125 \cdot 10^{-3} + j3 \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{40.6 \cdot 10^{-3}}{\sqrt[3]{9.1 \cdot 10^{-3} \cdot 0.799 \cdot (31.2 \cdot 10^{-3})^2}}) +$$

$$\left(\frac{6300 \cdot 3 \cdot 0.8 \cdot 10^{-3} \left(0.53 + 2.00 + 6000 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{8} + j50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \ln \frac{1289}{40.6 \cdot 10^{-3}} \right) \right)}{1.53 + 2.00 + 6300 \cdot \left(40.6 \cdot 10^{-3} + \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{8} + j50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \ln \frac{1289}{40.6 \cdot 10^{-3}} \right)} \right) = 9 + j4 \text{ } [\Omega/\text{fas}]$$

$$\Leftrightarrow Z_0 = 9 + j4 = 10 \angle 24^\circ \text{ } [\Omega/\text{fas}]$$

Nollföljdsimpedansen för 1 km blir:

$$Z_0 = 2 + j0.2 = 2 \angle 6^\circ \text{ } [\Omega/\text{fas}]$$

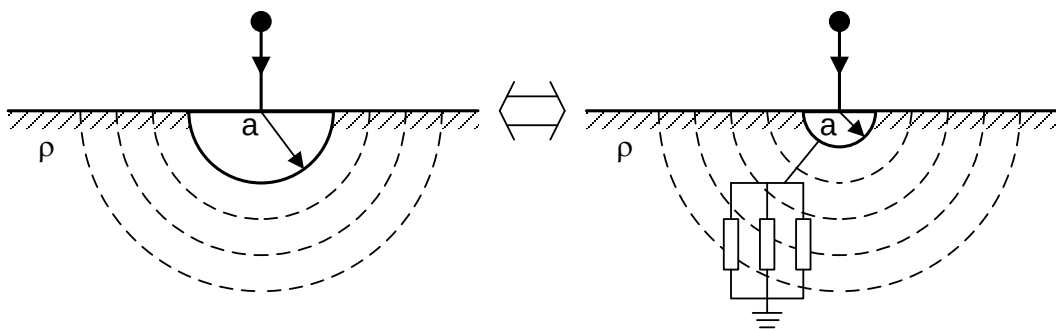
3.3 Modell 3 - retur i kabelskärm och jord samt medföljande jordlina

Beräkningar och jämförelser med mätresultat kommer endast göras på treledarkabeln mellan KRDC och BRD då den har medföljande jordlina hela vägen mellan mätstationerna till skillnad från mellan MLTP och VS (se kapitel 5).

De uppmätta jordtagsresistanserna (se Tabell 3) går inte såväl ihop med ansatsen om ett halvfäriskt jordtag. Ett av jordtagen har en uppmätt resistans på 0.23Ω , det motsvarar en radie på 1730 m vid en markresistivitet på

2500 Ωm . Nu ska man komma ihåg att detta värde på jordtagsresistansen är den så kallade resulterande jordtagsresistansen, d.v.s. jordtaget **parallellt** med övriga anslutningar till jord, exempelvis jordlinor och närliggande jordtag (se Figur 14). Genom att modellera närliggande jordtag och medföljande jordlinor som resistanser kan man beräkna ett nytt jordtag och radien för detta enligt ekvation (40).

$$\frac{1}{R_{\text{uppmätt jordtag}}} = \frac{1}{R_{\text{jordtag}}} + \frac{1}{R_{\text{närliggande jordtag och jordlinor}}} \quad (40)$$



Figur 14 Radie för ett jordtag med given resistans (vänster) och radie för samma jordtag när medföljande jordlinor och spett modelleras explicit.

I ekvation (40) är R_{jordtag} och $R_{\text{närliggande jordtag och jordlinor}}$ okända. Den totala resistansen för närliggande jordtag och jordlinor kan bara approximeras vilket betyder att jordtagets sanna resistans blir en approximation. I

beräkningsmodellen approximeras jordtagsresistanserna i KRDC och BRD till 2Ω vilket med en given markresistivitet på $2500 \Omega\text{m}$ ger en jordtagsradie på 199 m, vilket är ett mer rimligt resultat. Matlab används som modelleringsverktyg och de framtagna resultaten presenteras i kapitel 6.

3.4 Nollföljdskapacitans

Kablars kapacitans till jord anges ofta indirekt som kapacitiv jordfelström per km vid en angiven spänning och försumbar felresistans. I nedanstående tabell anges den kapacitiva felströmmen för treledarkablarna mellan KRDC och BRD samt mellan MLTP och VS.

Tabell 4 Kapacitiv felström för treledarkablar (Nexans (t.v.) och Draka (t.h.))

	Nexans(KRDC-BRD) (3 km)	Draka(MLTP-VS) (6 km)
$I_{\text{kapacitiv felström}}(\text{vid } 30\text{kV})$	4.2 A/km	3.3 A/km

Felströmmen för respektive kabel insatta i formel (39) ger nollföljdssusceptansen samt nollföljdskapacitansen:

$$B_{0,KRDC-BRD} = \frac{|4.2|}{\sqrt{3} \cdot |30 \cdot 10^3|} = 80 \mu\text{S}/(\text{km} \cdot \text{fas})$$

$$C_{0,KRDC-BRD} = \frac{|4.2|}{\sqrt{3} \cdot |30 \cdot 10^3| \cdot 2\pi \cdot 50} = 0.3 \mu\text{F}/(\text{km} \cdot \text{fas})$$

$$B_{0,MLTP-VS} = \frac{|3.3|}{\sqrt{3} \cdot |30 \cdot 10^3|} = 60 \mu\text{S}/(\text{km} \cdot \text{fas})$$

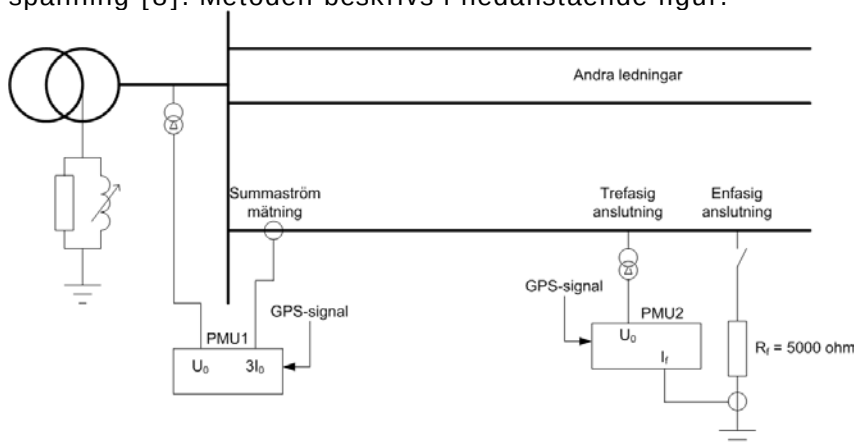
$$C_{0,MLTP-VS} = \frac{|3.3|}{\sqrt{3} \cdot |30 \cdot 10^3| \cdot 2\pi \cdot 50} = 0.2 \mu\text{F}/(\text{km} \cdot \text{fas})$$

4 Mätmetoder

Nedan presenteras två metoder som kan tillämpas vid uppmätning av en kabellednings nollföljdsimpedans och nollföljdsadmittans.

4.1 On-line metoden

Metoden går ut på att ett primärt jordfel ansluts under en tid som är så kort att ledningens jordfelsskydd startar, men inte kopplar bort ledningen (ca 1,5 s). Under jordfelet mäts nollföljdsströmmen och nollföljdsspänningen i matande station och vid felstället. Mätningarna i kabelns båda ändar synkroniseras och uppmätta värdena tidsstämplas så att samtidiga mätvärden från kabelns båda ändar kan jämföras. Därmed kan kabelledningens nollföljdsimpedans beräknas baserat på de uppmätta värdena på ström och spänning [8]. Metoden beskrivs i nedanstående figur.



Figur 15 Metod för uppmätning av nollföljdsimpedans hos distributionskablar under drift [8].

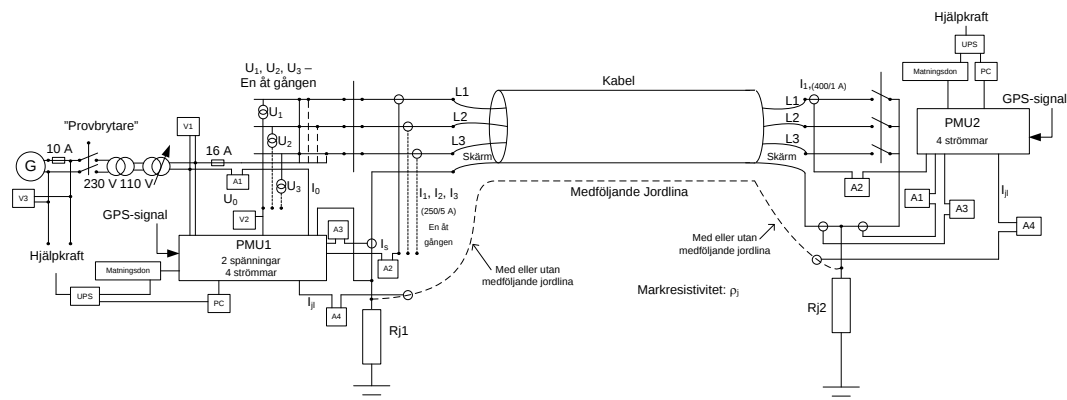
4.2 Off-line metoden

Off-line metoden innebär att mätobjektet (kabeln) tas ur drift och en ström eller spänning injiceras i ena kabeländan. I Figur 16 kan man se hur mät- och injiceringsutrustning kopplas in.

Injicerings- och mätutrustning består utav följande:

- Elverk
- Isolertransformator
- Vridbar transformator
- UPS (Uninterruptable Power Supply)
- PC
- PMU:er (Phasor Measurement Unit)

- Matningsdon (AC/DC Power Box)
- Multimetrar
- Delbara strömtransformatorer



Figur 16 Metod för uppmätning av nollföljdsegenskaper hos distributionskablar ur drift

PMU:er kopplas in i båda stationerna för att mäta ström i fasledare, skärm samt jordlina. För redundans kopplas multimetrar in för att mäta på samma signaler som PMU:erna. Fasströmmen mäts via befintliga kabeltransformatorer i stationerna. Om befintliga spänningstransformatorer finns tillgängliga mäts även fasspänningarna. Ström i skärm och jordlina mäts med hjälp av separata delbara strömtransformatorer.

Vid injiceringsstationen används ett elverk som hjälpkraft eftersom stationen är ur drift. Elverket matar via en probvrytare en isolertransformator som transformerar ner spänningen från 230 till 110 V. Vridtransformatorn ger på sekundärsidan en valfri spänning från 0 V till 240 V. På så vis kan injiceringsströmmen kontrollerat vridas upp till önskad nivå.

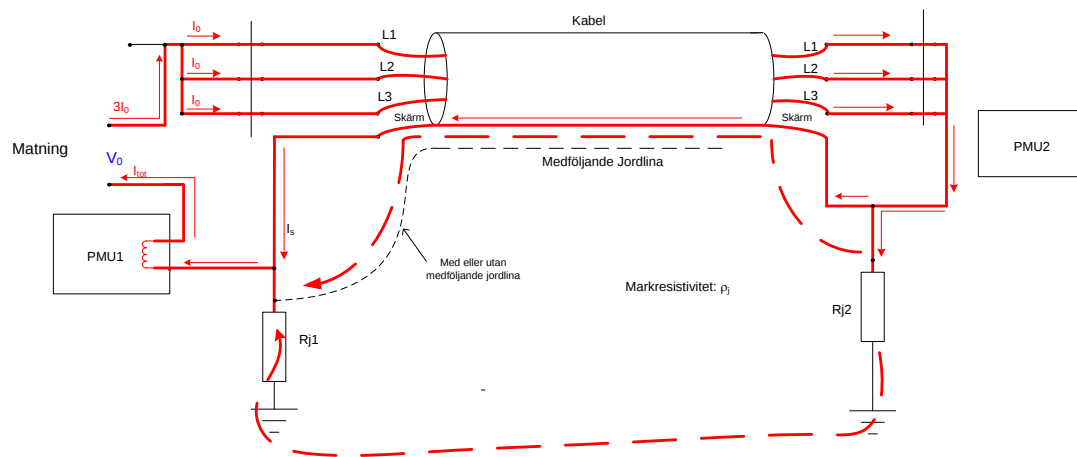
Strömmen injiceras direkt på skenan till aktuell fasledare. Olika kopplingsalternativ mellan fasledarna kan sedan väljas beroende på vilken mätning som ska göras. Återledaren för strömmen (antingen stationsjord, kabelskärm eller fasledare beroende på vilken typ av mätning som ska göras) kopplas sedan till PMU:n.

4.2.1 Mätmetod för kablers nollföljdsimpedans

Enligt definition mäts kabelsystemets nollföljdsimpedans då alla tre faser är sammankopplade och har samma spänning över sig samtidigt som kabeln är kortsluten och jordad i motsatt ände (se Figur 17) [3]. Därefter injiceras en ström i kretsen och kabelledningens nollföljdsimpedans erhålls genom att injiceringsspänningen divideras med den uppmätta strömmen i återledaren enligt nedanstående ekvation.

$$\bar{Z}_0 = \frac{\bar{V}_0}{\bar{I}_0} = \frac{3 \cdot \bar{V}_0}{\bar{I}_{tot}} = R_0 + jX_0 \text{ } [\Omega / fas] \quad (41)$$

Där R_0 och X_0 är kabelledningens nollföljdsresistans respektive nollföljdsreaktans per fas.



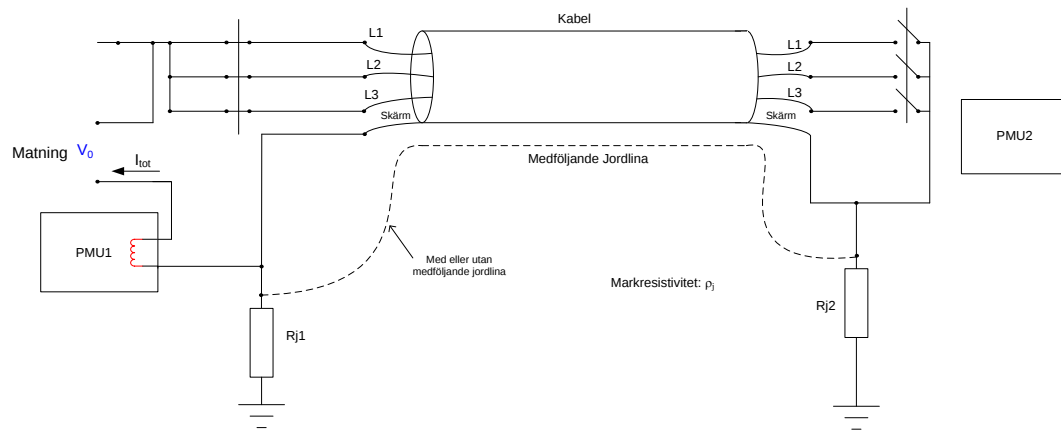
Figur 17 Mätning av kabelledningens nollföljdsimpedans görs genom att koppla fas till jord med alla faser sammankopplade och med kortsluten och jordad ledningsände i motsatt station. Injiceringsströmvägen är markerad röd i figuren.

4.2.2 Mätmetod för kablers nollföljdskapacitans

Kabelledningens nollföljdsadmittans mäts då alla tre faser är sammankopplade och bortre ledningsände är öppen (se Figur 18). Därefter appliceras en spänning över den öppna kretsen och kabelledningens nollföljdsadmittans erhålls genom att dividera den uppmätta strömmen med injiceringsspänningen enligt nedanstående ekvationer:

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{\bar{V}_0} = [\bar{I}_{tot} = 3\bar{I}_0] = \frac{\bar{I}_{tot}}{3 \cdot \bar{V}_0} = G_0 + jB_0 \quad [S/fas] \quad (42)$$

Där G_0 och B_0 är kabelledningens nollföljds-konduktans respektive nollföljds-susceptans. Konduktansen är kopplad till läckström och brukar vanligtvis vara försumbar.



Figur 18 Mätning av kabelledningens nollföljdsadmittans görs genom att koppla fas till jord med alla faser sammankopplade och med öppen ledningsände i motsatt station.

5 Fältmätningar – Genomförande och Resultat

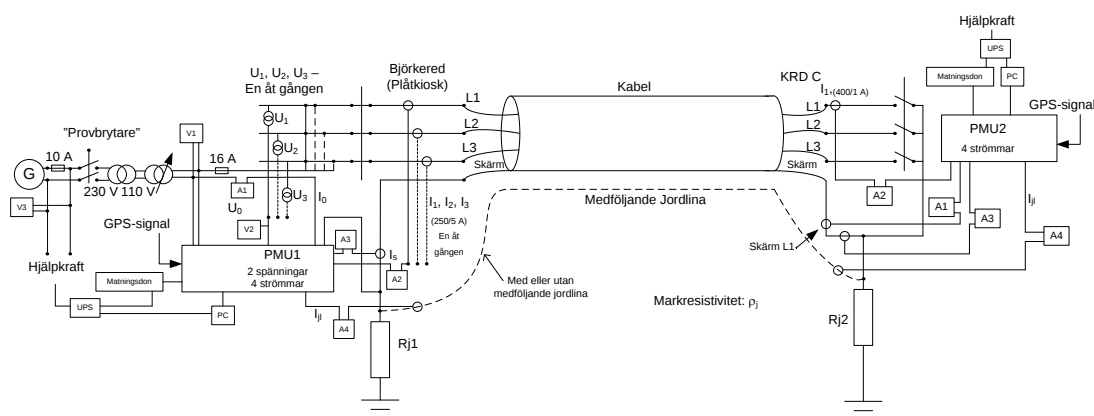
Tre mätningar med off-line metoden har genomförts under hösten 2014. Karakteristik för kablar och mätområde, genomförande samt resultat för två av mätningarna presenteras i detta kapitel. Följande mätningar har genomförts:

- Knäred C – Björkered 2014-10-09
- Milletorp – Hagasjön 2014-10-28⁵
- Milletorp – Vrånge Södra 2014-10-29

I kapitel 6 analyseras mätresultaten, dessutom görs en jämförelse med beräkningsresultaten från kapitel 3.

5.1 Knäred C (KRDC) – Björkered (BRD)

KRDC är beläget i Halland och innehåller bland annat en uppsamlingsstation för vindkraft. Mätningförfarandet i de två stationerna kan ses i Figur 19. Det gjordes ett flertal mätningar på kabeln enligt off-line metoden. Då endast de mest relevanta resultaten lyfts fram i rapporten hänvisas den intresserade till Appendix A och B för fler mätresultat.



Figur 19 Metod för uppmätning av nollföljdsimpedans hos distributionskabel (36 kV) ur drift (off-line metoden) mellan KRDC och BRD.

⁵ Mätresultatet redovisas inte i rapporten eftersom mätningen inte kunde genomföras enligt off-line metoden då spänning inducerats i kabeln (av närliggande kablar) trots att den var ur drift.

5.1.1 Karakteristik för kablar och övriga förhållanden

Det geografiska avståndet mellan KRDC och BRD är 3 km och kabeln mellan stationerna är en 1x3 ledare av typ AXLJ-O LT 36 kV. I KRDC är jordtagsresistansen 0.23Ω och en medföljande jordlina är ansluten mellan stationerna. Plåtkiosken i BRD saknar jordtag.

I nedanstående tabeller redovisas kabeldata samt data som beskriver kabelns omgivning.

Tabell 5 Data för kabel AXLJ-O LT 36 kV 3x240/35 [6]:

Max. DC resistans för ledaren vid 20 °C	0.125 Ω /km
Nominell faskapacitans	0.26 μ F/km
Nominell induktans	0.3 mH/km
Skärmresistans	0.6 Ω /km
Jordfelsström vid 30 kV	4.2 A/km
Märkspänning	36 kV
Ledarradie (r_c)	$9.1 \cdot 10^{-3} m$
Nominell ytterdiameter	$88.4 \cdot 10^{-3} m$
Manteltjocklek (medelvärde)	$3.6 \cdot 10^{-3} m$
Isolering (medeltjocklek)	$6.5 \cdot 10^{-3} m$

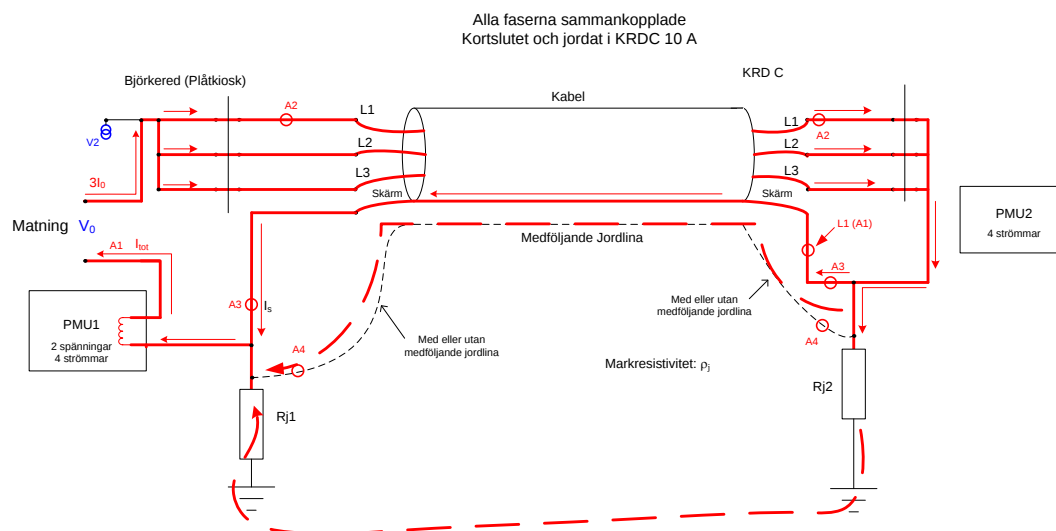
För ytterligare information angående kabel AXLJ-O LT hänvisas läsaren till Bilaga 1. En karta över markresistiviteten kan studeras i Bilaga 3.

Tabell 6 Jordtagsresistans och markresistivitet för mätområdet

Jordtagsresistans KRDC	0.23 Ω
Jordtagsresistans BRD	Saknar jordtag
Ledararea för jordlina (koppar)	25 mm ²
Markresistivitet [ρ_e]	$2500 < \rho_e \leq 10000 \Omega m$

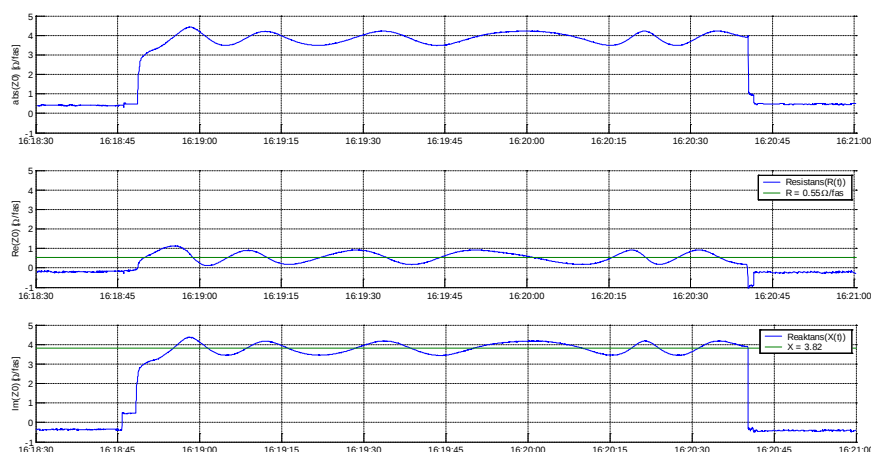
5.1.2 Mätning av nollföljdsimpedans för treledarkabel - med jordlina

En ström på 10 A injiceras då alla tre faserna är sammankopplade, denna nollföljdström återleds i kabelskärmen, jordlinan samt i marken enligt nedanstående figur. PMU:er försedda med GPS utrustning är utplacerade i båda stationerna för att kunna mäta ström och spänning i respektive ände av kabeln. Strömtransformatorer mäter strömmen i jordlina, skärm och fas.

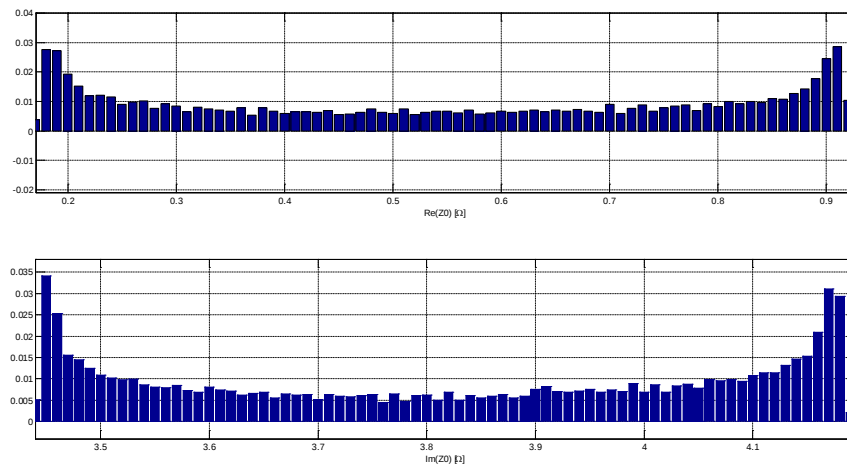


Figur 20 Kopplingsschema och riktning på injiceringsström. Ström- och spänningstransformatörer är markerade med röda respektive blå cirklar.

Eftersom den uppmätta nollföljdsimpedansen varierar gjordes ett histogram för real och imaginärdel där ett medelvärde kunde beräknas. I nedanstående figurer presenteras resultatet för uppmätt nollföljdsimpedans med jordlina.



Figur 21 Kabelledningens nollföljdsimpedans Z_0 med jordlina



Figur 22 Histogram över kabelledningens nollföljdsresistans (övre) och nollföljdsreaktans (nedre) med jordlina. Intervallet på x - axlarna är valt utefter det område inom vilket signalerna varierar.

Värdet på nollföljdsimpedansen för kabelledningen mellan KRDC och BRD med jordlina uppmättes till⁶:

$$\bar{Z}_0 = \frac{\bar{V}_0}{\bar{I}_0} = \frac{3 \cdot \bar{V}_0}{\bar{I}_{tot}} = R_0 + jX_0 = 0.6 + j4 \text{ } \Omega/\text{fas}$$

Där resistansen och reaktansen för nollföljd identifieras som:

$$R_0 = \text{Re}\{Z_0\} = 0.6 \text{ } \Omega/\text{fas} \text{ (nollföljdsresistans)}$$

$$X_0 = \text{Im}\{Z_0\} = 4 \text{ } \Omega/\text{fas} \text{ (nollföljdsreaktans)}$$

Absolutbeloppet för nollföljdsimpedansen ges av:

$$|Z_0| = \sqrt{0.6^2 + 4^2} = 4 \text{ } \Omega/\text{fas}$$

Fasvinkeln mellan ström och spänning är:

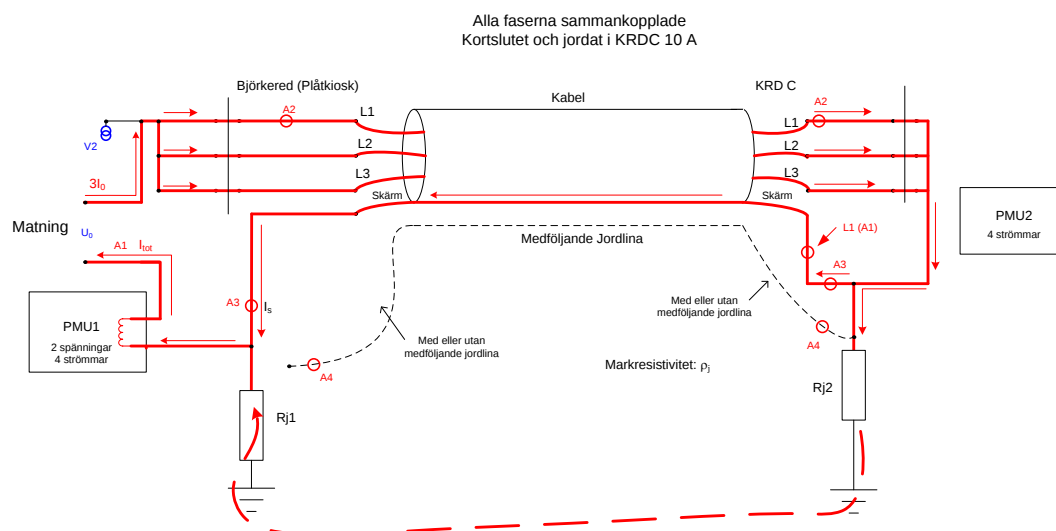
$$\theta = \arctan\left(\frac{4}{0.6}\right) = 80^\circ$$

I kapitel 6 analyseras resultatet och jämförs med beräkningar.

⁶ Mätresultaten avrundas till en gällande värdesiffror.

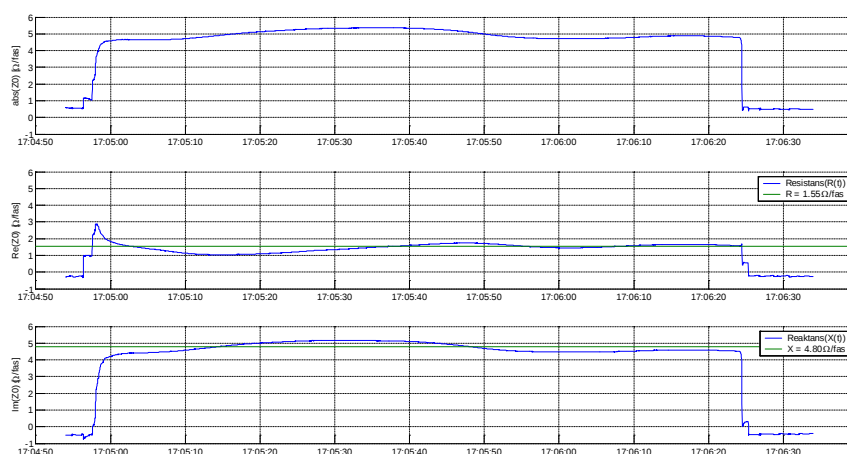
5.1.3 Mätning av nollföljdsimpedans för treledarkabel - bortkopplad jordlina

Identiskt mätningförfarande som i kapitel 5.1.2 men med bortkopplad jordlina i BRD enligt nedanstående figur.

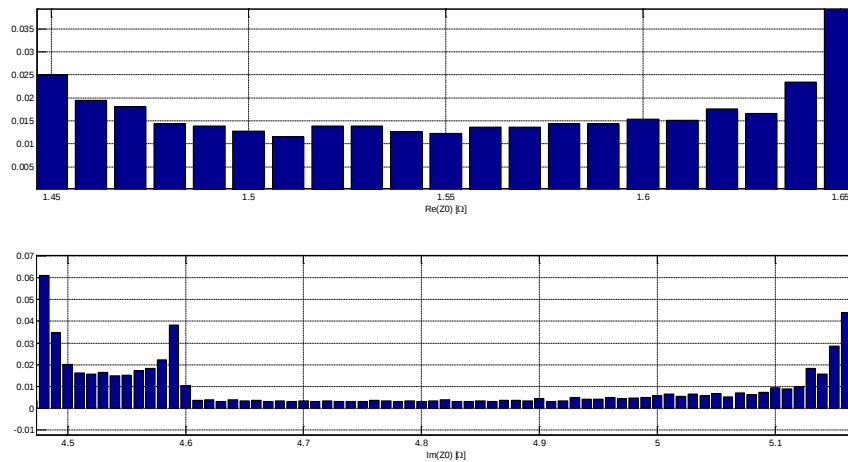


Figur 23 Kopplingsschema och riktning på injiceringsström. Ström- och spänningstransformatorer är markerade med röda respektive blåa cirklar.

I nedanstående figurer presenteras resultatet för uppmätt nollföljdsimpedans med bortkopplad jordlina.



Figur 24 Kabelledningens nollföljdsimpedans Z0 med bortkopplad jordlina



Figur 25 Histogram över kabelledningens nollföljdsresistans (övre) och nollföljdsreaktans (nedre) med bortkopplad jordlina. Intervallet på x - axlarna är valt utefter det område inom vilket signalerna varierar.

Värdet på nollföljdsimpedansen för kabelledningen mellan KRDC och BRD utan jordlina uppmättes till:

$$\bar{Z}_0 = \frac{\bar{V}_0}{\bar{I}_0} = \frac{3 \cdot \bar{V}_0}{\bar{I}_{tot}} = R_0 + jX_0 = 2 + j5 \text{ } \Omega/\text{fas}$$

Där resistansen och reaktansen för nollföljd identifieras som:

$$R_0 = \text{Re}\{Z_0\} = 2 \text{ } \Omega/\text{fas} \text{ (nollföljdsresistans)}$$

$$X_0 = \text{Im}\{Z_0\} = 5 \text{ } \Omega/\text{fas} \text{ (nollföljdsreaktans)}$$

Absolutbeloppet för nollföljdsimpedansen ges av:

$$|Z_0| = \sqrt{2^2 + 5^2} = 5 \text{ } \Omega/\text{fas}$$

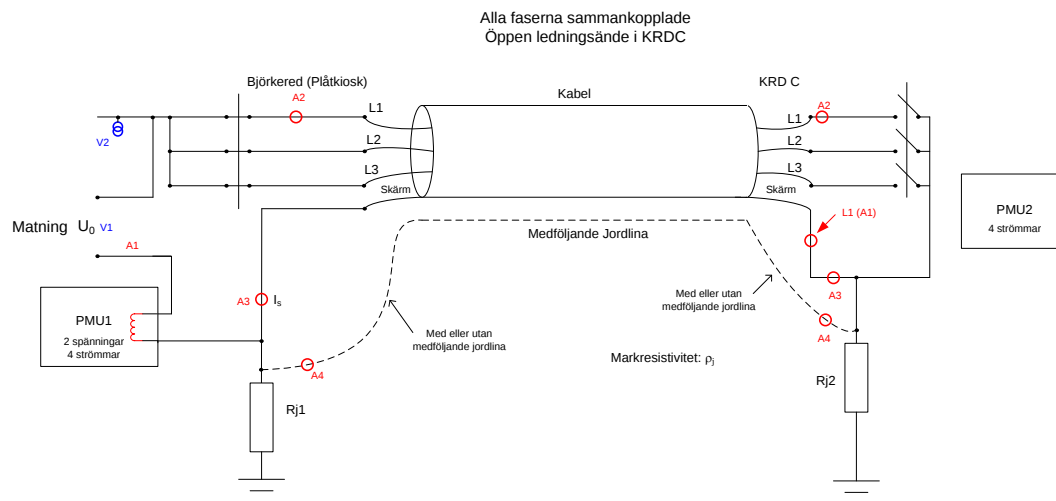
Fasvinkeln mellan ström och spänning är:

$$\theta = \arctan\left(\frac{5}{2}\right) = 70^\circ$$

I kapitel 6 analyseras resultatet och jämförs med beräkningar.

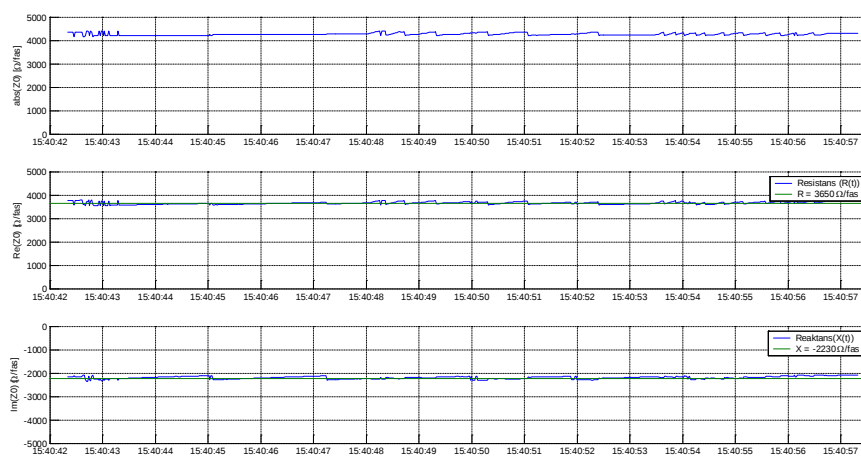
5.1.4 Mätning av kabelledningens nollföljdsadmittans

En injiceringspänning på ca 180 V läggs på kretsen då ledningsändan i KRDC är öppen och alla faserna är sammankopplade enligt nedanstående figur.

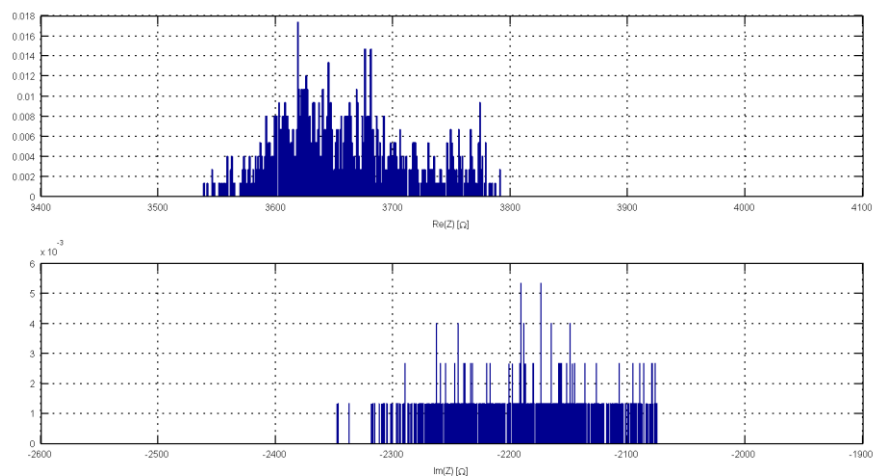


Figur 26 Kopplingsschema för mätning av kabelledningens nollföljdsadmittans. Strömtransformatorer och spänningstransformatorer är markerade med röda respektive blå cirklar.

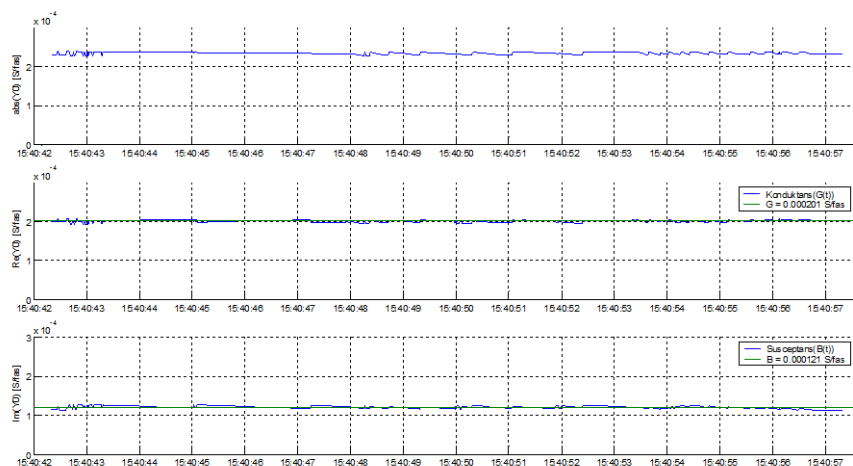
I nedanstående figurer presenteras mätresultatet.



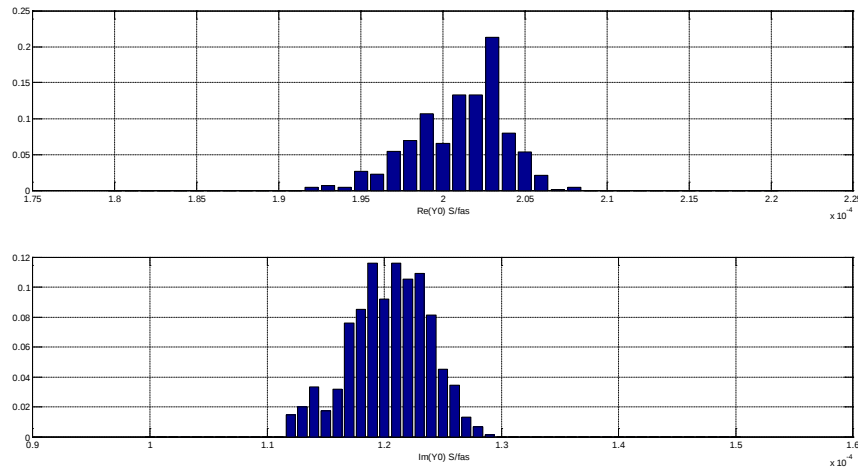
Figur 27 Kabelledningens impedans vid öppen ledningsände i KRDC



Figur 28 Histogram över kabelledningens resistans (övre) och reaktans (nedre). Intervallet på x - axlarna är valt utefter det område inom vilket signalerna varierar.



Figur 29 Kabelledningens nollföljdsadmittans vid öppen ledningsände i KRDC



Figur 30 Histogram över kabelledningens konduktans (övre) och susceptans(nedre). Intervallet på x - axlarna är valt utefter det område inom vilket signalerna varierar.

Värdet på impedansen för kabelledningen mellan KRD C och BRD med öppen ledningsände i KRDC uppmättes till:

$$\bar{Z}'_0 = \frac{\bar{V}_0}{\bar{I}_0} = \frac{3 \cdot \bar{V}_0}{\bar{I}_{tot}} = 4000 - j2000 \Omega / fas$$

Då mätvärdena är något märkliga antas parallellkoppling mellan shuntresistansen och shuntkapacitansen. Värdet för dessa kan beräknas genom att även mäta upp admittansen enligt nedanstående ekvation:

$$\bar{Y}_0 = \frac{1}{\bar{Z}'_0} = \frac{1}{R} + \frac{1}{-jX_{0,c}} = \frac{\bar{I}_0}{\bar{V}_0} = \frac{\bar{I}_{tot}}{3 \cdot \bar{V}_0} = G_0 + jB_0 = 2 \cdot 10^{-4} + j1 \cdot 10^{-4} S / fas$$

Konduktansen och susceptansen för nollföljd identifieras som:

$$G_0 = \text{Re}\{Y_0\} = 200 \mu S / fas \text{ (nollföljdskonduktans)}$$

$$B_0 = \text{Im}\{Y_0\} = 100 \mu S / fas \text{ (nollföljdssusceptans)}$$

Ur dessa erhålls shuntresistansen och shuntreaktansen:

$$R = \frac{1}{G_0} = 5000 [\Omega / fas]$$

$$X_{0,c} = \frac{1}{B_0} = 8000 [\Omega / fas]$$

Shuntresistansen för läckström R blir orimligt liten i förhållande till reaktansen vilket gör att den inte kan uteslutas ur modellen framtagna i kapitel 2.2.1. Modellen går därmed inte att använda. Anledningen till det låga uppmätta värdet på shuntresistansen (analogt med högt värde på konduktansen) diskuteras utförligt i 5.3 har att göra med att uppmätt ström är för låg för PMU:ns mätområde och mätresultaten blir därmed tveksamma för fortsatt analys.

5.2 Milletorp (MLTP) – Vrången Södra (VS)

MLTP är beläget i Småland och är en uppsamlingsstation för vindkraft. Mätförfarandet för kabeln mellan de två stationerna kan ses i nedanstående figur. Det gjordes flertalet mätningar på kabeln enligt off-line metoden. Då endast de mest relevanta resultaten lyfts fram i rapporten hänvisas den intresserade till Appendix A och B för fler mätresultat.

5.2.1 Karakteristik för kablar och övriga förhållanden

Kabellängden mellan MLTP och VS är 6.3 km och kabeln mellan stationerna är en 1x3 ledare av typ AXLJ 36 kV. I Milletorp är jordtagsresistansen 1.53 Ω och enligt data över området ska det inte finnas någon jordlina ansluten utan jordlinan ska starta i station N138436 som ligger 1.9 km från Milletorp.

I Vrången Södra är det två jordlinor kopplade till stationsjord men det är bara en av dessa som går till station N138436. Jordtagsresistansen i Vrången Södra är uppmätt till 2 Ω .

I nedanstående tabeller utläses kabeldata samt data som beskriver kabelns omgivning.

Tabell 7 Data för kabel AXLJ 36 kV 3x240/25 [7]:

Ledarresistans vid 20 °C	0.125 Ω /km
Nominell faskapacitans	0.21 μ F/km
Nominell induktans	0.37 mH/km
Skärmresistans	0.8 Ω /km
Jordfelsström vid 30 kV	3.3 A/km
Märkspänning	36 kV

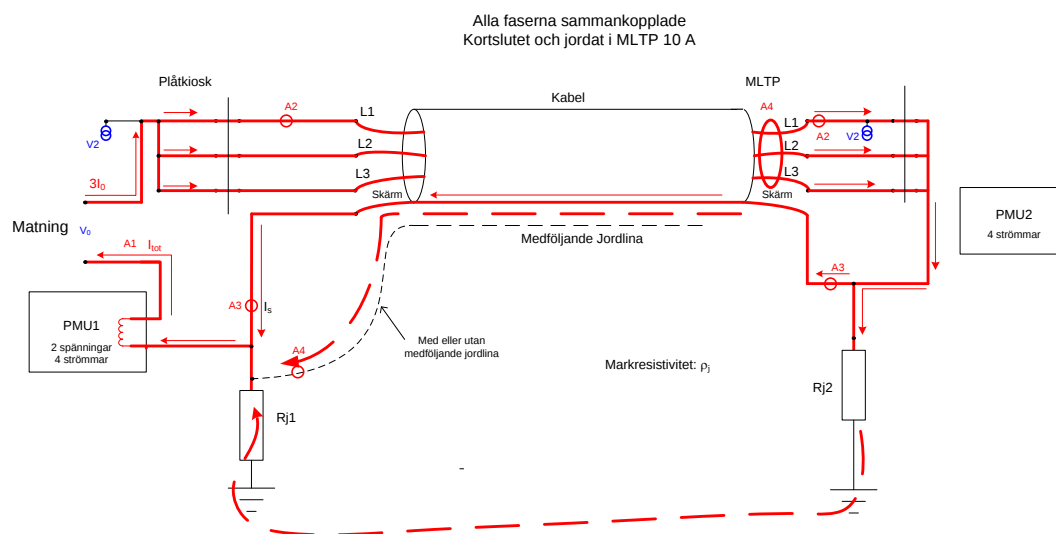
För ytterligare information om kabel AXLJ hänvisas läsaren till Bilaga 2.

Tabell 8 Jordtagsresistans, jordlina och markresistivitet för området

Jordtagsresistans MLTP	1.53 Ω
Jordtagsresistans Vrången Södra	2 Ω
Area för jordlina (koppar)	25 mm ²
Markresistivitet [ρ_e]	2500 < ρ_e ≤ 10000 Ω m

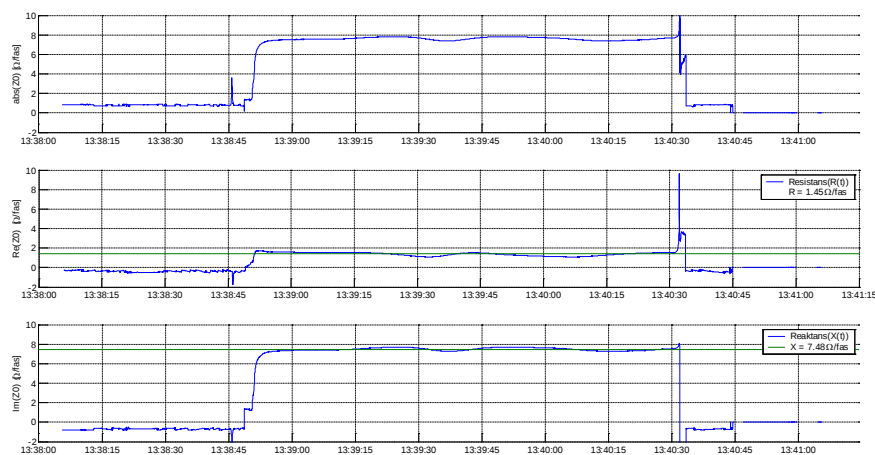
5.2.2 Mätning av nollföljdsimpedans för treledarkabel - med jordlina

En ström på 10 A injiceras då alla tre faserna är sammankopplade, denna nollföljdström återleds i kabelskärmen, jordlinan samt i marken enligt nedanstående figur. PMU:er försedda med GPS utrustning är utplacerade i båda stationerna för att mäta ström och spänning i respektive ände av kabeln. Strömtransformatorer mäter strömmen i jordlina, skärm och fas.

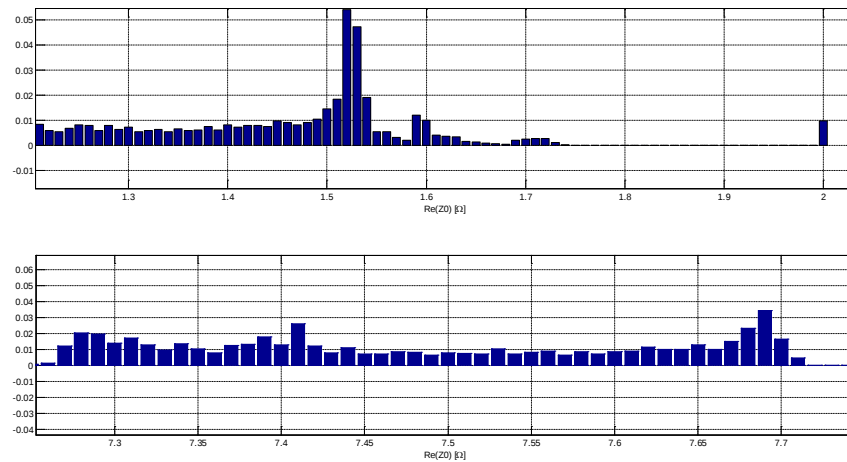


Figur 31 Kopplingsschema och riktning på injiceringsström. Ström- och spänningstransformatörer är markerade med röda respektive blå cirklar.

Eftersom den uppmätta nollföljdsimpedansen varierar gjordes ett histogram för real och imaginärdel där ett medelvärde kunde beräknas. I nedanstående figurer presenteras resultatet för uppmätt nollföljdsimpedans med jordlina.



Figur 32 Kabelledningens nollföljdsimpedans Z0 med jordlina



Figur 33 Histogram över kabelledningens nollföljdsresistans (övre) och nollföljdsreaktans (nedre) med jordlina. Intervallet på x - axlarna är valt utefter det område inom vilket signalerna varierar.

Värdet på nollföljdsimpedansen för kabelledningen mellan MLTP och VS med jordlina uppmättes till:

$$\bar{Z}_0 = \frac{\bar{V}_0}{\bar{I}_0} = \frac{3 \cdot \bar{V}_0}{\bar{I}_{tot}} = R_0 + jX_0 = 1 + j7 \Omega/\text{fas}$$

Där resistansen och reaktansen för nollföljd identifieras som:

$$R_0 = \text{Re}\{Z_0\} = 1 \Omega/\text{fas} \text{ (nollföljdsresistans)}$$

$$X_0 = \text{Im}\{Z_0\} = 7 \Omega/\text{fas} \text{ (nollföljdsreaktans)}$$

Absolutbeloppet för nollföljdsimpedansen ges av:

$$|Z_0| = \sqrt{1^2 + 7^2} = 7 \Omega/\text{fas}$$

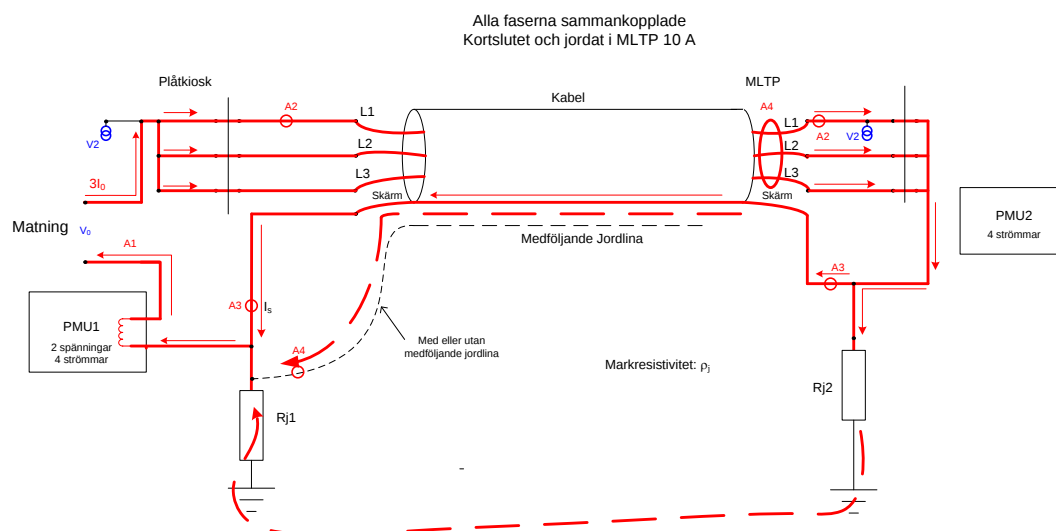
Fasvinkeln mellan ström och spänning är:

$$\theta = \arctan\left(\frac{7.48}{1.45}\right) = 80^\circ$$

I kapitel 6 analyseras resultatet och jämförs med beräkningar.

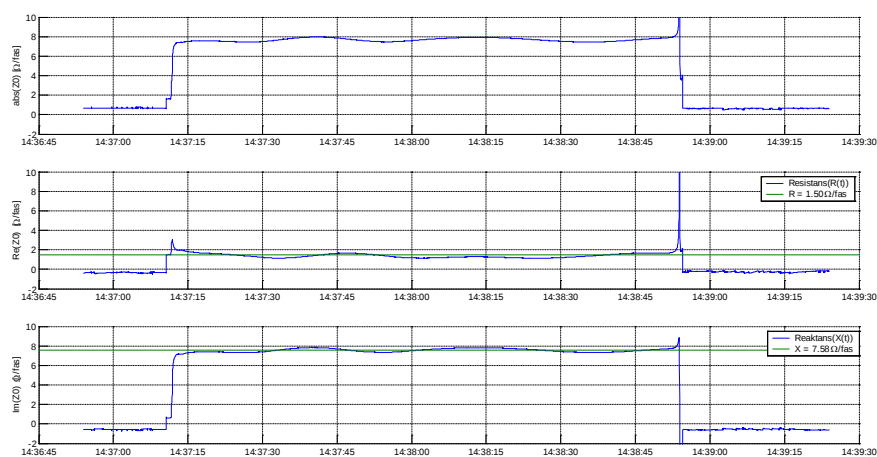
5.2.3 Mätning av nollföljdsimpedans för treledarkabel - bortkopplad jordlina

Identiskt mätningförfarande som i kapitel 5.2.2 men med bortkopplad jordlina i VS (se nedanstående figur).

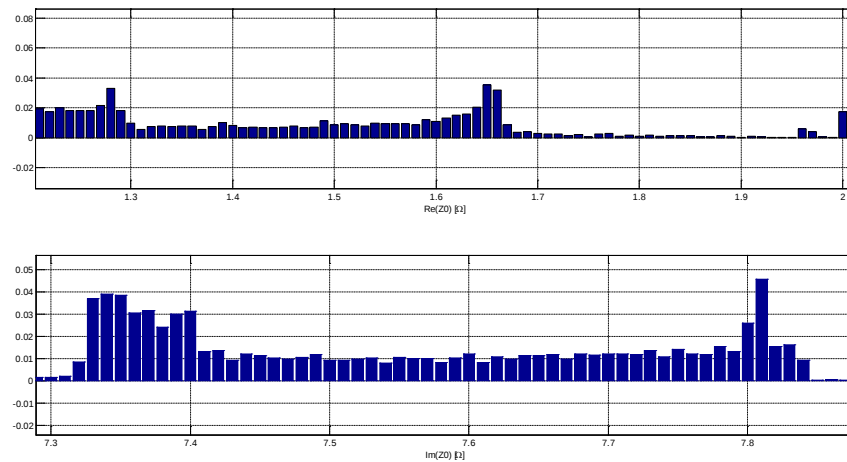


Figur 34 Kopplingsschema och riktning på injiceringsström. Ström- och spänningstransformatorer är markerade med röda respektive blåa cirklar.

I nedanstående figurer presenteras resultatet för uppmätt nollföljdsimpedans med bortkopplad jordlina.



Figur 35 Kabelledningens nollföljdsimpedans Z_0 med bortkopplad jordlina.



Figur 36 Histogram över kabelledningens nollföljdsresistans (övre) och nollföljdsreaktans (nedre) med bortkopplad jordlina. Intervallet på x - axlarna är valt utefter det område inom vilket signalerna varierar.

Värdet på nollföljdsimpedansen för kabelledningen mellan MLTP och VS utan jordlina uppmättes till:

$$\bar{Z}_0 = \frac{\bar{V}_0}{\bar{I}_0} = \frac{3 \cdot \bar{V}_0}{\bar{I}_{tot}} = R_0 + jX_0 = 1 + j8 \text{ } \Omega/\text{fas}$$

Där resistansen och reaktansen för nollföljd identifieras som:

$$R_0 = \text{Re}\{Z_0\} = 1 \text{ } \Omega/\text{fas} \text{ (nollföljdsresistans)}$$

$$X_0 = \text{Im}\{Z_0\} = 8 \text{ } \Omega/\text{fas} \text{ (nollföljdsreaktans)}$$

Absolutbeloppet för nollföljdsimpedansen ges av:

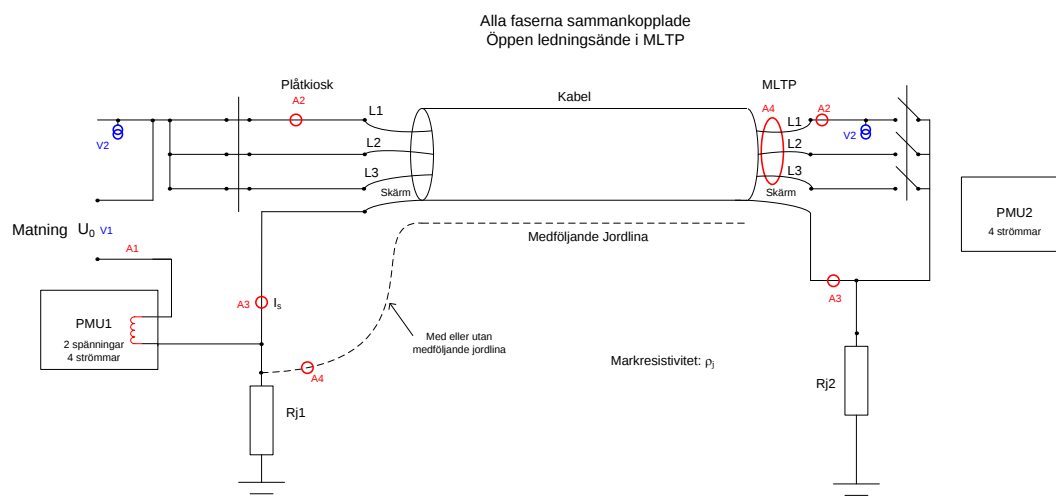
$$|Z_0| = \sqrt{1^2 + 8^2} = 8 \text{ } \Omega/\text{fas}$$

Fasvinkeln mellan ström och spänning är:

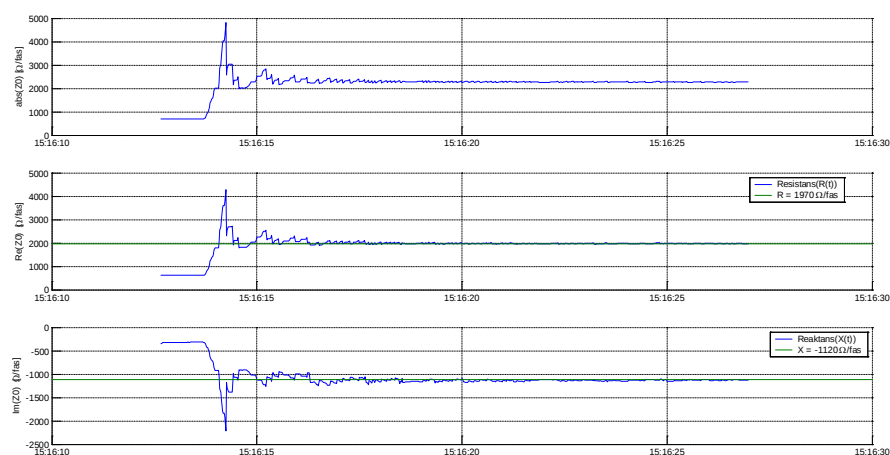
$$\theta = \arctan\left(\frac{8}{1}\right) = 80^\circ$$

5.2.4 Mätning av kabelledningens nollföljdsadmittans

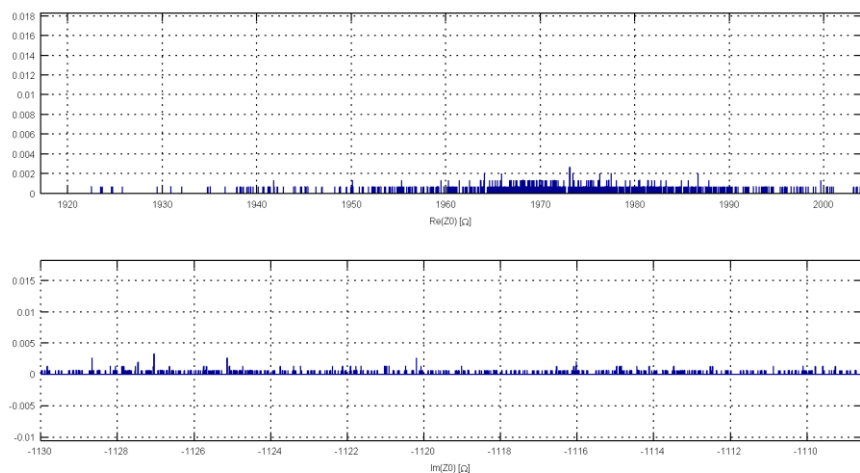
En injiceringspänning på ca 180 V läggs på kretsen då ledningsändan i MLTP är öppen och alla faserna är sammankopplade enligt nedanstående figur.



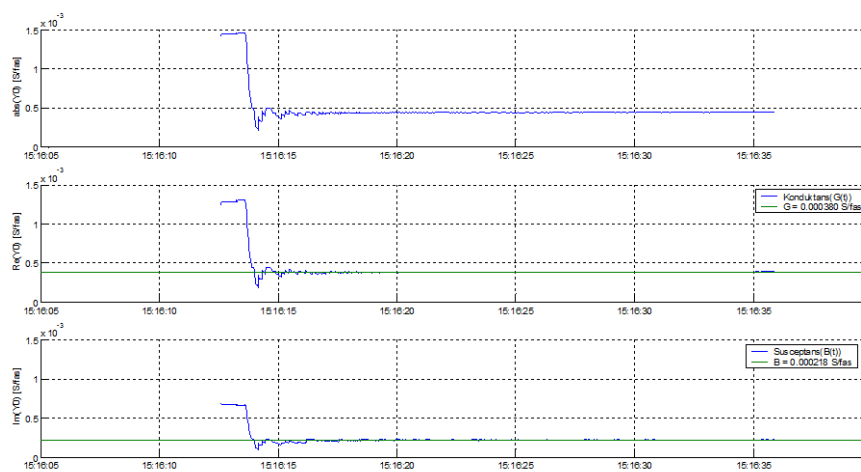
I nedanstående figurer presenteras mätresultatet.



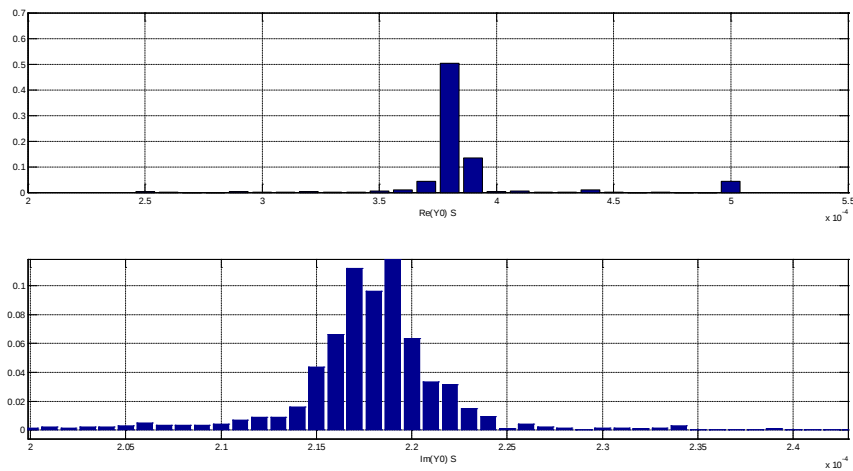
Figur 37 Kabelledningens impedans vid öppen ledningsände i MLTP



Figur 38 Histogram över kabelledningens resistans (övre) och reaktans(nedre). Intervallet på x - axlarna är valt utefter det område inom vilket signalerna varierar.



Figur 39 Kabelledningens nollföljdsadmittans vid öppen ledningsände i MLTP



Figur 40 Histogram över kabelledningens konduktans (övre) och susceptans (nedre). Intervallet på x axlarna är valt utefter det område inom vilket signalerna varierar.

Uppmätt värde på impedansen för kabelledningen mellan MLTP och VS med öppen ledningsände i MLTP:

$$\bar{Z}'_0 = \frac{\bar{V}_0}{\bar{I}_0} = \frac{3 \cdot \bar{V}_0}{\bar{I}_{tot}} = R_0 + jX_0 = 2000 - j1000 [\Omega/fas]$$

Mätvärdena verkar återigen avvikande. Shuntresistansen och shuntkapacitansen beräknas genom att anta parallelkoppling mellan dessa och mäta upp admittansen enligt nedanstående ekvation:

$$\bar{Y}_0 = \frac{1}{\bar{Z}'_0} = \frac{1}{R} + \frac{1}{-jX_{0,c}} = \frac{\bar{I}_0}{\bar{V}_0} = \frac{\bar{I}_{tot}}{3 \cdot \bar{V}_0} = G_0 + jB_0 = 4 \cdot 10^{-4} + j2 \cdot 10^{-4} S/fas$$

Konduktansen och susceptansen för nollföljd identifieras som:

$$G_0 = \text{Re}\{Y_0\} = 400 \mu S/fas \text{ (nollföljdskonduktans)}$$

$$B_0 = \text{Im}\{Y_0\} = 200 \mu S/fas \text{ (nollföljdssusceptans)}$$

Ur dessa erhålls shuntresistansen och shuntreaktansen:

$$R = \frac{1}{G_0} = 3000 [\Omega/fas]$$

$$X_{0,c} = \frac{1}{B_0} = 5000 [\Omega/fas]$$

Även för denna mätning är shuntresistansen för läckström R orimligt liten i förhållande till reaktansen vilket gör att den inte kan uteslutas ur modellen framtagna i kapitel 2.2.1. Modellen går därmed inte att använda.

5.3 Övriga erfarenheter och lärdomar

Noggranna förberedelser är ett måste inför denna typ av fältmätningar. Trots att mätstationerna rekognoserats på förhand, välskrivna provprogram utformats och mätutrustningen testats, inträffade ändå problem som fick lösas på plats. Varje mättillfälle är unikt och varje mätstation är unik. Improviserade lösningar där man skarvat kabelskärmar eller använt fel färgkod på jordlinor försvårade mätningarna. Förutsättningarna var inte idealiska för att genomföra väldefinierade mätningar; med respektive utan jordlina. Vid Vrången Södra var mer än en jordlina kopplad till stationsjord och i Milletorp gick inte jordlinan hela vägen till stationen utan den avvek 1.9 km innan. Ändå var dessa stationer de som på förhand såg bäst ut att genomföra mätningar på.

Impedansvärdet från mätningen i KRDC oscillerade något (se Figur 21). Detta beror troligen på varierande markpotential till följd av andra kablar och markåterledare som ligger i marken. Vid mätningen i KRDC hade utrustningen ingen definierad jord vilket kan ha gjort att potentialen svävade med markpotentialens variationer. Utrustningen jordades inför mätningen i MLTP vilket gjorde att oscillationerna minskade något (se Figur 32).

Mätobjektet (kabeln) ligger ofta nergrävd ihop med andra kablar som är i drift vilket försvårar tolkning av mätresultat. Vid mätningen mellan MLTP och Hagasjön var mätobjektet spänningssatt på grund av inducerad spänning från närliggande kablar trots att det kopplats från vilket omöjliggjorde ströminjicering. Då kabeln är längre än för övriga mätningar (9 km) blev den inducerade spänningen så stor att stora gnistor uppstod då provaren förde ett jordningsdon mot mätskenan!

Konduktansen är orimligt hög för båda mätningarna. Då PMU:ns mätningångar inte hanterar spänningar över 180 V blev den uppmätta strömmen vid mätning med öppen ledningsände i storleksordning 0 – 0.15 A. För den strömingång som användes är märkström och mätområde definierat enligt:

$$I_{rated} = 5 A$$
$$(0.03 - 100) \cdot I_{rated}$$

Mätområdet för PMU:n blir:

$$\pm (0.15 A - 500) A$$

Eftersom uppmätt ström under mätning med öppen ledningsände var utanför PMU:ns mätområde är det en förklaring till att mätresultaten dessvärre inte är tillräkneliga.

6 Analys

Resultaten från mätningarna presenterade i kapitel 5 samt beräkningarna gjorda i kapitel 3 sammanställs, jämförs och analyseras i detta kapitel.

6.1 Beräkningsresultat

I föreliggande delkapitel sammanställs och diskuteras resultaten från beräkningarna i kapitel 3.

6.1.1 Modell 1 - Nollföljdsimpedans för retur i skärm [3]

Nedanstående tabell redovisar beräknade värden av nollföljdsimpedansen för treledarkablarna mellan KRDC och BRD samt mellan MLTP och VS då hela strömmen återleds i skärmen (18).

Tabell 9 Återledning i enbart skärm (ekvation (18)). Nollföljdsimpedansen är beräknad för 1000 m (överst) samt för verkliga avståndet mellan KRDC och BRD (2927 m) respektive MLTP och VS (6300 m) (underst).

	KRDC-BRD	MLTP-VS
$Z_0[\Omega/1000\text{m} \cdot \text{fas}]$	$2 + j0.1 = 2 \angle 3^\circ$	$3 + j0.1 = 3 \angle 2^\circ$
$Z_0[\Omega/\text{fas}]$	$6 + j0.4 = 6 \angle 4^\circ$	$20 + j0.9 = 20 \angle 3^\circ$

6.1.2 Modell 2 - Nollföljdsimpedans för retur i skärm och mark [3]

Nedanstående tabell redovisar beräknade värden av nollföljdsimpedansen för treledarkablarna mellan KRDC och BRD samt mellan MLTP och VS då strömmen återleds i både skärm och mark (ekvation (21)).

Tabell 10 Återledning i skärm och jord (ekvation (21)) Nollföljdsimpedansen är beräknad för 1000m (överst) samt för avståndet mellan KRDC och BRD (2927 m) samt MLTP och VS (6300 m) (underst).

	KRDC-BRD	MLTP-VS
$Z_0[\Omega/\text{km} \cdot \text{fas}]$	$2 + j0.2 = 2 \angle 6^\circ$	$2 + j0.2 = 2 \angle 6^\circ$
$Z_0[\Omega/\text{fas}]$	$4 + j0.9 = 4 \angle 10^\circ$	$9 + j4 = 10 \angle 20^\circ$

Kommentarer

I Tabell 9 och Tabell 10 kan man se att nollföljdsresistansen minskar medan nollföljdsreaktansen ökar för båda mätstationerna då återledning även sker i jord jämfört med enbart återledning i skärm. Vad nollföljdsresistansen beträffar är resultatet rimligt då denna bör minska till följd av parallellkopplingen mellan marken och skärmen. En ökning av nollföljdsreaktansen är också rimligt eftersom det nu uppstår induktion mellan ledaren och den fiktiva markåterledaren.

Om man studerar skillnaden på resultaten (se nedanstående resultat hämtade från Tabell 9 och Tabell 10) då kabeln är 1 km kan man se att nollföljdsimpedanserna är i samma storleksordning.

$$Z_{0, \text{Retur i skärm}, MLTP-VS} = 3 + j0.1 = 3 \angle 2^\circ \left[\frac{\Omega}{1000\text{m} \cdot \text{fas}} \right]$$
$$Z_{0 \text{ Retur i skärm och jord}, MLTP-VS} = 2 + j0.2 = 2 \angle 6^\circ \left[\frac{\Omega}{1000\text{m} \cdot \text{fas}} \right]$$

Men då kablarna blir längre som mellan MLTP och Vrången Södra (6.3 km) har nollföljdsresistansen nästan halverats och nollföljdsreaktansen femdubblats (se nedanstående resultat hämtade från Tabell 9 och Tabell 10) jämfört med modellen med endast retur i skärmen. Vilket tyder på att för kablar av längre karaktär är modellen för enbart retur i skärm inte tillräcklig.

$$Z_{0 \text{ Retur i skärm}, MLTP-VS} = 20 + j0.9 = 20 \angle 3^\circ \left[\frac{\Omega}{\text{fas}} \right]$$
$$Z_{0 \text{ Retur i skärm och jord}, MLTP-VS} = 9 + j4 = 10 \angle 20^\circ \left[\frac{\Omega}{\text{fas}} \right]$$

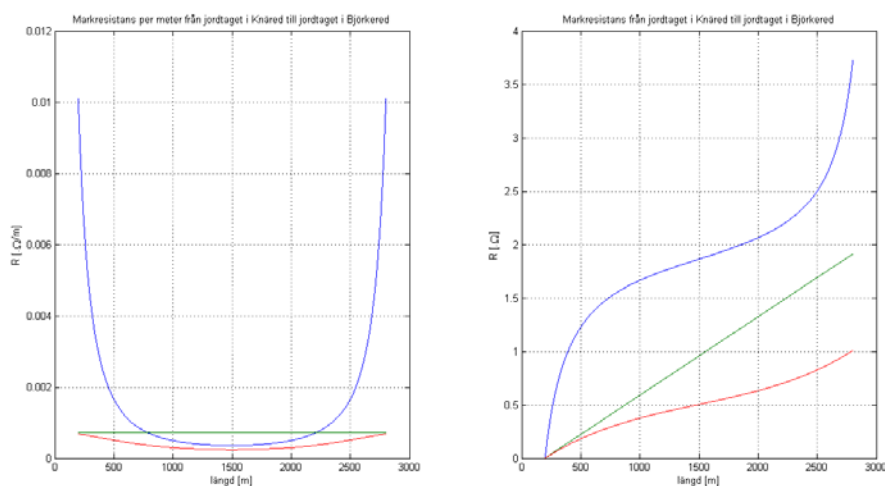
6.1.3 Modell 3 - Nollföljdsimpedans för retur i skärm, mark och medföljande jordlina

De två översta värdena i Tabell 11 är impedansen för mark och jordlina samt impedansen för skärm, mark och jordlina beräknade från jordtaget i BRD till jordtaget i KRDC. Därefter redovisas total impedans följt av nollföljdsimpedansen för treledarkabeln mellan KRDC och BRD för nollföljdsström genom fasledarna med retur i skärm, mark och medföljande jordlina. De fyra sista värdena är motsvarande impedanser beräknade med Modell 3 utan jordlina.

Tabell 11 Resultat från den framtagna beräkningsmodellen presenterad i kapitel 2.1.6.

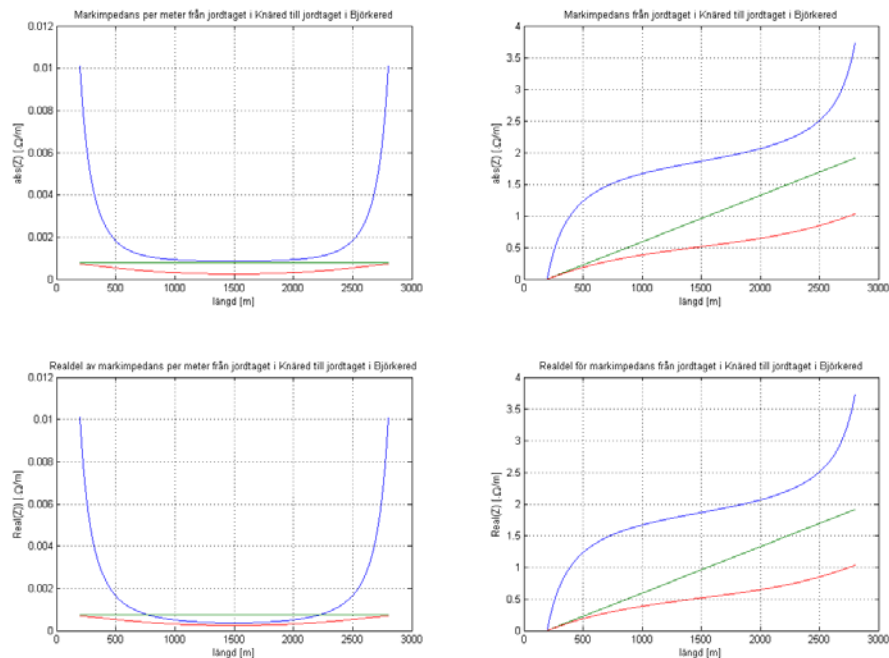
	KRDC-BRD
$Z_{\text{mark och jordlina}}$	$1 + j0.2 = 1 \angle 10^\circ$
$Z_{\text{skärm, mark och jordlina}}$	$0.6 + j0.08 = 0.6 \angle 8^\circ$
$Z_{\text{tot}} [\Omega]$	$0.7 + j2 = 2 \angle 70^\circ$
$Z_0 [\Omega/\text{fas}]$	$2 + j7 = 7 \angle 70^\circ$
$Z_{\text{mark utan jordlina}}$	$4 + j0 = 4 \angle 0^\circ$
$Z_{\text{skärm, mark utan jordlina}}$	$1 + j0.02 = 1 \angle 1^\circ$
$Z_{\text{tot, utan jordlina}} [\Omega]$	$1 + j2 = 2 \angle 60^\circ$
$Z_{0, utan jordlina} [\Omega/\text{fas}]$	$4 + j6 = 7 \angle 56^\circ$

I Figur 41 nedan visas resistans per längdenhet samt resistans; för mark, jordlina och total resistans (mark och jordlina) som en funktion av avståndet mellan jordtagen i KRDC och BRD.



Figur 41 Resistans markåterledare (per meter t.v. samt total t.h.) mellan KRDC och BRD. Total resistans (röd), jordlineresistans (grön) och markresistans (blå). Markresistivitet, 2500 Ωm , jordtagsresistanserna är 2 Ω . Jordlinan är 25 mm² kopparlina och kabellängden 3000 m.

I Figur 42 kan man se impedansen (två översta) och realdelen av impedansen (2 nedersta) för mark, jordlina samt mark och jordlina som en funktion av avståndet mellan jordtagen.



Figur 42 Impedans för markåterledare (t.v. per meter samt total t.h.) mellan KRDC och BRD. Total markimpedans (röd), jordlineimpedans (grön) och markimpedans (blå). Markresistivitet, $2500 \Omega m$, jordtagsresistanserna är 2Ω . Jordlinan är 25 mm^2 kopparlina och kabellängden 3000 m.

Kommentarer

De två första beräkningsmodellerna tar inte hänsyn till medföljande jordlina. I modell 3 (beskriven i slutet av kapitel 2.1.6) inkluderas medföljande jordlina, dessutom har jordtagen modellerats som halvsfäriska klot där resistansen minskar med avståndet från jordtaget.

I Figur 41 ser man att den totala resistansen (mark och jordlina) blir mycket mindre än för en parallellkoppling mellan mark och jordlina. Det syns också klart att resistansen per längdenhet aldrig är större än den lägsta av de ingående resistanserna (t.v. i Figur 41). I det redovisade fallet betyder det att den medföljande jordlinan gör störst nytta nära jordtagen. En bit från jordtagen går största delen av strömmen i marken eftersom dess area är så mycket större än den medföljande jordlinans area. Detta fenomen är också det som gör att jordtag har lägre resistans än vad som ges av enkla formler eftersom det för det mesta finns gott om medföljande jordlinor anslutna i ett jordtag. För beräkning av en jordlinas resistans mot "sann" jord se exempelvis [2]. Som framgår i Figur 41 och Figur 42 är resistansen klart dominerande, skillnaden på resistans beräknad för mark och jordlina och realdelen av impedansen för mark och jordlina är väldigt liten.

I Tabell 11 kan man se att då jordlinan är med i kretsen minskar nollföljdsresistansen med 50 % (från 4 till 2 Ω/fas) medan nollföljdsreaktansen ökar med 20 % (från 6 till 7 Ω/fas).

6.2 Sammanställning av mätresultat

I nedanstående tabeller sammanfattas resultaten från mätningarna presenterade i kapitel 5.1 och kapitel 5.2. Mätresultaten för nollföljdsimpedansen för treledarkabeln mellan KRDC och BRD samt mellan MLTP och VS redovisas i Tabell 12 och Tabell 13. Mätresultaten för retur i skärm är hämtade från Appendix A och B.

Tabell 12 Resultatsammanfattning över mätningarna av nollföljdsimpedansen för kabelledningen mellan KRDC och BRD.

KRDC-BRD	Med jordlina	Bortkopplad jordlina	Retur i enbart skärm
$Z_0[\Omega/\text{fas}]$	$0.6 + j4 = 4 \angle 80^\circ$	$2 + j5 = 5 \angle 70^\circ$	$4 + j7 = 8 \angle 60^\circ$

Tabell 13 Resultatsammanfattning över mätningarna av nollföljdsimpedansen för kabelledningen mellan MLTP och VS.

MLTP-VS	Med jordlina	Bortkopplad jordlina	Retur i enbart skärm
$Z_0[\Omega/\text{fas}]$	$1 + j7 = 7 \angle 80^\circ$	$1 + j8 = 8 \angle 80^\circ$	$7 + j10 = 10 \angle 60^\circ$

6.2.1 Kommentarer

Som tidigare nämnts har det varit svårt att genomföra mätningar helt utan jordlina. Även då jordlinan kopplats bort ligger den kvar i marken och har fortfarande viss inverkan. Detta till trots verkar bortkopplingen av jordlinan för mätningen mellan KRDC och BRD ha inverkan på resultatet. I Tabell 12 kan man se att nollföljdsresistansen och nollföljdsreaktansen minskar med 70 % (från 2 till 0.6 Ω/fas) respektive 20 % (från 5 till 4 Ω/fas) då jordlinan kopplas in. Detta är i linje med tidigare Elforskrapporter 06:64 och 06:66 båda från 2006 vad gäller nollföljdsresistansen men inte vad gäller nollföljdsreaktansen där det går att läsa att denna ökat då kabelledningen har längsgående jordlina. Induktansen mellan två ledare ökar med avståndet mellan ledarna (se ekvation (11)-(13)). Då nollföljdsreaktansen är induktiv beror en ökning eller minskning av denna på hur djupt ner i marken strömbanan går. Om strömmen återleds närmare treledarkabeln då jordlinan kopplas bort kommer induktansen att minska medan den kommer att öka om strömmen återleds längre bort från treledarkabeln.

I Tabell 14 (mätningen mellan MLTP och VS) visar resultaten att nollföljdsresistansen förblir oförändrad och att nollföljdsreaktansen minskar med 10 % (från 8 till 7 Ω/fas) då jordlinan kopplas in. En bortkoppling av jordlinan hade bevisligen inte så stor betydelse vilket var väntat då jordlinan

inte gick hela vägen till MLTP och det var dessutom andra jordlinor kopplade till stationsjord i Vrången Södra.

6.3 Jämförelser mellan mätresultat och beräkningar

Resultaten från mätningarna jämförs med resultaten för de tre beräkningsmodellerna.

6.3.1 Modell 1 - Retur i skärm

Beräkningsresultaten för retur i skärm (Tabell 9) visade högre värde på nollföljdsresistansen än för mätningarna (se Tabell 12 och Tabell 15 för retur i enbart skärm). Nollföljdsreaktansen är däremot betydligt större i verkligheten jämfört med beräkningarna. Hur treledarkabeln är skarvad, hur skärmen är skarvad eller om det har kommit in fukt i skärmen är några parametrar som kan påverka mätresultaten. Skarvade kablar borde dock lett till ett högre värde vad nollföljdsresistansen beträffar. Den troligaste anledningen till att mätresultaten uppvisade en lägre nollföljdsresistans är att bortkopplad jord och jordlina inte är detsamma som att dessa är helt borttagna ur kretsen varav de fortfarande kan ha viss inverkan på mätresultatet.

6.3.2 Modell 2 - Retur i skärm och jord

Om man jämför resultaten för mätningen med bortkopplad jordlina mellan KRDC och BRD (Tabell 12) med beräkningsmodell för retur i skärm och jord (Tabell 10) är skillnaden inte lika stor som för endast retur i skärm. Men beräknad nollföljdsresistans är fortfarande större än uppmätt. Då beräkningsmodellen inte innefattar jordlina är en jämförelse med mätresultaten inte rättvis då en bortkopplad jordlina inte är (som tidigare nämnts) detsamma som total avsaknad av jordlina eftersom den fortfarande ligger kvar i marken och påverkar resultatet. Beräknad nollföljdsreaktans är även för denna beräkningsmodell betydligt mindre än uppmätt. En anledning till detta kan vara att det ligger fler kablar i marken parallellt med mätobjektet som dessutom är i drift vilket kan öka värdet på den induktiva uppmätta nollföljdsreaktansen.

6.3.3 Modell 3 - Retur i skärm, jord och jordlina

Nedanstående resultat visar på skillnader vad gäller nollföljdsresistans och nollföljdsreaktans för framtagna modell jämfört med mätningarna både för med och utan jordlina.

Nollföljdsimpedansen för treledarkabel mellan KRDC och BRD uppmättes till:

$$Z_{0,uppmätt} = 0.6 + j4 = 4 \angle 80^\circ [\Omega/\text{fas}] \text{ (med jordlina)}$$

$$Z_{0,uppmätt} = 2 + j5 = 5 \angle 70^\circ [\Omega/\text{fas}] \text{ (bortkopplad jordlina)}$$

Vidare beräknades nollföljdsimpedansen för samma treledarkabel till:

$$Z_{0,model 3} = 2 + j7 = 7 \angle 70^\circ [\Omega/\text{fas}] \text{ (med jordlina)}$$

$$Z_{0,model 3} = 4 + j6 = 7 \angle 56^\circ [\Omega/\text{fas}] \text{ (utan jordlina)}$$

Mätresultaten uppvisar en betydligt lägre nollföljdsresistans jämfört med beräknade resultat. Enligt datablad (se Bilaga 1) är ledarresistansen $0.125 \Omega/(\text{km} \cdot \text{fas})$ vilket för 3 km kabel ger en ledarresistans på $3.00 \text{ km} \cdot 0.125 \Omega/(\text{km} \cdot \text{fas}) = 0.4 \Omega/\text{fas}$. Detta betyder att den totala resistansen för återledningarna är $0.2 \Omega/\text{fas}$ vilket är lågt. Studera följande resonemang:

Om man betraktar nollföljdsresistansen per fas där skärmresistansen ($3R_s$) ges av $3 \cdot 3 \text{ km} \cdot 0.6 \Omega/\text{km} = 5.4 \Omega$ för 3 km kabel (se Bilaga 1). En jordlina (25 mm^2) av koppar som är 3 km lång har en resistans på $6.6 \Omega/\text{fas}$. Om man parallellkopplar dessa två får man ($3R_s // 3R_{\text{jordlina}}$):

$$\frac{5.4 \cdot 6.6}{5.4 + 6.6} = 3 \left[\frac{\Omega}{\text{fas}} \right]$$

Om markåterledaren ses som två jordtag (2Ω vardera) i serie är resistansen $(2+2) \cdot 3 = 12 \Omega/\text{fas}$. Om markåterledaren parallellkopplas med jordlinan och skärmen får man ($3R_s // 3R_{\text{jordlina}} // 3R_{\text{mark}}$):

$$\frac{2.97 \cdot 12}{2.97 + 12} = 2 \left[\frac{\Omega}{\text{fas}} \right]$$

För enbart återledningarna skulle alltså nollföljdsresistansen bli $2 \Omega/\text{fas}$ istället för $0.2 \Omega/\text{fas}$ som mätningarna visar. Ledarresistans och skärmresistans är relativt väldokumenterade parametrar men hur förhållandena ser ut i marken vet vi relativt lite om. Värdet på jordtagsresistanserna är osäkra parametrar och även för markresistiviteten som är hämtad från en karta över markresistiviteten i Sverige (se Bilaga 3) kunde noggrannheten varit större. I kapitel 6.3.1 för retur i enbart kabelskärmen kan man se att det finns en skillnad mellan beräkningar och resultat redan där. Vilket kan betyda att den ledarresistans och skärmresistans som finns angiven i datablad inte gäller längre för mätobjektet. Anledningar till detta diskuteras i ovan nämnda kapitel.

Även beräknad nollföljdsreaktans skiljer sig från den uppmätta där den beräknade är betydligt större. Placeringen av de ömsesidiga reaktanserna har stor betydelse för den totala reaktansen. Om man väljer att placera dem enbart utefter ledaren kommer de att hamna i serie med återledningarna och reaktansen blir stor. Om man istället placerar dem utefter återledningarna kommer de att parallellkopplas med varandra och på så vis blir den totala induktansen lägre. För att kunna studera strömbanan för nollföljdsströmmen har vi i Modell 3 valt att placera ut alla ömsesidiga reaktanser längs både ledare och återledare enligt Figur 8. Värdet på reaktansen är visserligen närmre än Modell 1 och Modell 2 men det är ändå stort.

Det grundläggande problemet är att beräkningsmodellen antar kända förhållande, men i verkligheten finns det en rad andra faktorer som är svåra att kartlägga. Problemet ligger alltså inte i modelleringen utan det svåra är att kartlägga hur det ser i och runt omkring marken som kabelförbandet ligger i men även hur treledarkabeln är skarvad, hur skärmen är skarvad eller om det har kommit in fukt i skärmen är parametrar som påverkar resultatet.

7 Slutsatser och rekommendationer

Nedan följer slutsatser och rekommendationer från de mätningar och beräkningar som genomförts.

7.1 Fältmätningar med off-line metoden

Det är viktigt att understryka skillnaden mellan att genomföra mätningar på kabelledning helt utan jordlina och mätningar då jordlinan är bortkopplad, eftersom den bortkopplade jordlinan har bättre eller sämre kontakt med marken och andra jordlinor, beroende på förläggningssätt, markens beskaffenhet, fukthalt, etc. Det skulle därför vara av värde att kunna genomföra jämförande mätningar med respektive utan jordlina under likartade förhållanden i övrigt.

Resultaten från fältmätningen på treledarkabeln mellan KRDC och BRD visar på en tydlig skillnad (se Tabell 12) för mätningar med jordlina och mätningar då jordlinan bortkopplades i BRD. Mätningen får därmed anses vara lyckad med reservation för att uppmätt nollföljdsimpedans med bortkopplad jordlina inte motsvarar kabelledningens nollföljdsimpedans då kabelledningen är helt utan medföljande jordlina.

För mätningen mellan MLTP och VS visste vi på förhand att jordlinan inte gick hela vägen mellan stationerna utan den avvek 1.9 km från MLTP. Dessutom var flera andra jordlinor kopplade till stationsjord i VS. Det är av denna anledning föga förvånande att det inte blev någon märkbar skillnad då jordlinan kopplades bort i VS.

Resultatet från uppmätt nollföljdsadmittans visade på ett för högt värde på konduktansen och för lågt på susceptansen. Då konduktansen motsvarar läckström ska denna vara försumbar. Att så inte blev fallet vid mätningen indikerar på att något inte stämmer. Anledningen till avvikelser har diskuterats i kapitel 5.3 där slutsatsen blivit att mätresultaten får anses oanvändbara och kan inte tas med i analysen på grund av alltför låg ström.

Det finns en risk att mätsignalerna generade med off-line metoden blir för små (framförallt för mätning med öppen ledningsände) vilket innebär att störningarna från omgivningen påverkar mätresultatet. Metoden hade förmodligen fungerat bättre om mätobjektet grävts ner i ett område utan påverkan från andra kablar. Detta skulle ge ett teoretiskt korrekt värde för treledarkabelns nollföljdegenskaper men inte för det verkliga kabelförbandet.

För att få ett tillförlitligt resultat rekommenderas istället mätningar med on-line metoden. Mätobjektet är då i drift och omgivningens inverkan på mätssignalerna blir en del av verkligheten. På så vis erhålls realistiska nollföljdsegenskaper för mätobjektet i sin normala miljö under normala driftbetingelser. Det rekommenderas att utföra mätningar på flera kablar för att få tillförlitliga mätresultat och på så vis lättare kunna identifiera och urskilja kablar som är i dåligt skick och som har avvikande mätresultat. Det ska nämnas att on-line metoden inte är aktuell för mätning av

nollföljdsadmittansen. Men eftersom osäkra parametrar såsom jordtag och markpotential inte ingår i en sådan modell är detta inget problem utan tillverkarnas data i form av kapacitiv jordfelsström per kilometer är fullt tillräckligt.

7.1.1 Jämförelser mellan on-line och off-line metoden

I inledningen av projektet var intentionen att mätningen skulle genomföras med on-line metoden eftersom metoden tillämpats i [8]. Men då mätutrustning inte funnits tillgänglig tillämpades istället off-line metoden. Nedanstående punkter belyser skillnader på de två mätmetoderna:

- On-line metoden innebär mätningar på driftsatt kabel medan off-line metoden utförs på kabel som är ur drift
- Off-line metoden har visat vara mindre lämplig för längre kablar då det finns risk för stora inducerade spänningar i mätobjektet. Mätutrustningen för on-line metoden är anpassad för driftsatt kabel vilket innebär att den blir oberoende av den inducerade spänningen.
- Till skillnad från off-line metoden behöver inte kabeln tas ur drift då on-line metoden tillämpas vilket betyder att anslutna kunder inte påverkas
- Mätutrustning saknas för att tillämpa on-line metoden på 36 kV kablar. Tillgänglig mätutrustning lämpar sig endast för mätningar på 12-24 kV kablar. Det är rimligt att anta att kablars nollföljdsegenskaper och inverkan av medföljande jordlina borde vara likartade för 12-24 kV kablar som för 36 kV kablar. Vilket innebär att de slutsatser som skulle kunna baseras på on-line mätningar på jämförbara 12-24 kV kablar även borde gälla för 36 kV kablar
- On-line metoden, så som den redovisas i [8] ger en precis mätning av nollföljdsimpedansen, under de vid mättillfället rådande förhållandena.
- I samband med off-line metoden finns möjlighet till ytterligare impedansmätningar vilket kan vara av godo om man vill dra generella slutsatser från sina nollföljdsimpedansmätningar.

7.2 Beräkningsmodell

I kapitel 1.2 kan man läsa följande: "målet för projektet är att skapa en större kunskap kring kablarnas nollföljdsimpedans och betydelse av medföljande jordlina". Syftet med mätningarna och framtagna beräkningsmodeller är alltså i huvudsak att få en ökad förståelse för en kabellednings nollföljdsegenskaper. Nedan följer en liten resume av beräkningsmodellerna där skillnaderna dem emellan lyfts fram.

De två första beräkningsmodellerna (Modell 1 och Modell 2) presenterade i kapitel 2.1.6 är tämligen enkla där ekvation (18) representerar retur i skärm och ekvation (21) retur i skärm och mark. För retur i skärmen utgörs nollföljdsresistansen av ledarresistansen och skärmresistansen medan nollföljdsreaktansen utgörs av induktansen mellan ledare och skärm. Denna modell är tillräcklig i många fall, men då kabelledningarna är längre är den inte tillräcklig vilket illustrerades i kapitel 6.1.2.

För retur i skärm och mark (Modell 2 ekvation (21)) utgörs marken av markresistansen (jordtagsresistanserna inräknade) i serie med induktansen mellan skärm och mark. Därefter blir det en parallellkoppling mellan skärmen och marken. En begränsning med denna modell är att den saknar medföljande jordlina.

I Modell 3 beskriven i slutet av kapitel 2.1.6 har jordtagsresistanserna modellerats som halvsfärer där resistansen minskar med avståndet från jordtaget. Jordtagsresistanserna justeras något eftersom det uppmätta värdet är ett resultat från parallellkopplingar med spett och andra jordlinor i marken. Det enskilda jordtagets värde är alltså högre än det uppmätta. Då jordlinan är oisolerad blir det en kontinuerlig parallellkoppling mellan markåterledaren och jordlinan. Den totala markimpedansen löses genom att integrera från det ena jordtaget till det andra. Därefter parallellkopplas markimpedansen med skärmimpedansen och slutligen adderas ledarens impedans med återledarens impedans.

Grundtanken var att verifiera beräkningsmodellerna mot mätningarna. Då för få mätningar har genomförts och ingående parametrar inte kunnat varieras tillräckligt kan inte mätresultaten användas som en absolut sanning utan snarare ska ses som en fingervisning. Resultaten från den framtagna beräkningsmodellen (Modell 3) var inte överensstämmande med mätresultaten även om den var närmast av de tre modeller som presenterats i rapporten. Problemet ligger antagligen inte i modelleringen utan problemet är snarare de icke kontrollerbara markförhållanden i vilka treledarkabeln är förlagd. För att kunna genomföra framtida beräkningar av nollföljdsimpedansen enligt exempelvis Modell 3 är det av yttersta vikt att man vid en kabelförläggning dokumenterar och kartlägger förhållandena kring mätstationerna samt i den mark i vilken kabelförbandet ska ligga i. Att ha koll på var jordlinorna går, hur nära de ligger varandra och hur och var de är kopplade till mätstationerna har stor inverkan på de resulterande jordtagsresistanserna som i sin tur har stor inverkan på nollföljdsresistansen. Även hur man hanterat kabeln under förläggningsarbetet om det t.ex. förekommer kabelskarvar eller om skärmen är skarvad bör dokumenteras. I dagsläget får man helt enkelt räkna med att det finns en osäkerhet i beräkningsmodellerna.

Utifrån beräkningsmodellen kan följande konstateras:

- Det går att sätta upp uttryck för en kables nollföljdsimpedans men de är inte direkt lätta att använda.
- Några tumregler går inte att ge utan modellen skulle behöva användas vid varje enskilt fall och därefter får en analys göras.

7.3 Jordlinans inverkan på nollföljdsimpedansen

Det har gjorts för få mätningar för att utifrån enbart dessa kunna dra en generell slutsats vad beträffar jordlinans inverkan på nollföljdsimpedansen. Den mätning som var av störst värde (mätningen mellan KRDC och BRD) visade att nollföljdsresistansen och nollföljdsreaktansen minskade med 70 % (från 2 till 0.6 Ω /fas) respektive 20 % (från 5 till 4 Ω /fas) då jordlinan kopplades in. Den framtagna beräkningsmodellen visade upp resultat där beräknad nollföljdsimpedans mellan KRDC och BRD inte stämde överens med uppmätta resultat. Modellen kommer ändå användas som referens för slutsatser kring jordlinans inverkan på nollföljdsimpedansen.

Följande iakttagelser har gjorts:

- Vad beträffar markimpedansen (mark + jordlina) är resistansen klart dominerande över den induktiva reaktansen. Mätresultaten och beräkningsresultaten visar också att jordlinan inte har lika stor inverkan på nollföljdsreaktansen som på nollföljdsresistansen.
- Medföljande jordlina gör störst nytta nära jordtagen. En bit från jordtagen överstiger dess resistans jordtagets och strömmen går i jorden istället.
- Att nollföljdsresistansen minskar då kabelledningen har medföljande jordlina är klart och tydligt. För mätningarna på treledarkabel med längsgående jordlina inkopplad mellan KRDC och BRD minskade nollföljdsresistansen med 70 % (från 2 till 0.6 Ω /fas) medan beräkningsmodellen visade en minskning på 50 % (från 4 till 2 Ω /fas).
- Om tvärsnittsarean på jordlinan ökar så minskar nollföljdsresistansen enligt $R = \rho \cdot l / A$ där ρ är resistiviteten, l är längden och A tvärsnittsarean. Även nollföljdsreaktansen skulle minska eftersom jordlinans radie ökar enligt ekvation (14).
- Avståndet mellan kabel och jordlina har ingen inverkan på nollföljdsresistansen däremot skulle nollföljdsreaktansen öka om avståndet ökar enligt ekvation (14)
- En kabellednings nollföljdsimpedans är inte additiv.
- Nollföljdsresistansen beror i stor utsträckning på jordtagens resistans.
- Kablars nollföljdsegenskaper samt inverkan av medföljande jordlina borde vara likartade på 12-24 kV nivå som på 36 kV.

Utifrån ovanstående punkter rekommenderas följande:

Eftersom jordlinan har störst betydelse nära jordtagen hade man ur ett nollföljdsimpedansperspektiv inte behövt ha jordlina hela vägen längs kabelledningen. Istället hade man kunnat investera i att gräva ner korta men

grova kopparlinor nära jordtagen och därefter låta marken leda strömmen. Om man av andra anledningar väljer att förlägga jordlinan hela vägen längs med kabeln får jordlinan gärna ha en stor tvärsnittsarea och förläggas så nära kabeln som möjligt.

Eftersom jordlinan inte har någon negativ inverkan och eftersom den minskar nollföljdsresistansen så kan det aldrig bli värre av att ha en medföljande jordlina. Om den kapacitiva felströmmen är stor vilket den kan vara för långa kablar så är rimligt att anta att jordlinans minskning av nollföljdsresistansen skulle vara betydande.

8 Fortsatt arbete

Mätningar enligt on-line metoden beskriven i kapitel 4.1 rekommenderas för att få tillförlitliga mätresultat och på så vis kunna göra fler jämförelser med den framtagna beräkningsmodellen (Modell 3) beskriven i slutet av kapitel 2.1.6.

För framtida mätningar med on-line metoden föreslås följande upplägg:

Mätningar och beräkningar bör göras på varierande kabelstorlek, förläggningssätt, markförhållanden samt med och utan jordlina. De vanligast förekommande 36 kV kablarna är 95, 150, 240, 400 och 630 mm². Det föreslås att mätningar med on-line metoden genomförs på i alla fall hälften av dessa kablar med åtminstone två olika typer av markförhållanden. I Bilaga 3 som visar markresistiviteten i Sverige kan man se att det skulle innebära en mätning i Skåne samt en mätning i Halland/Småland.

Tre olika kabelareor samt två olika markresistiviteter innebär att $3 \cdot 2 = 6$ mätningar skulle behöva göras. Sedan ska denna mätning göras för kablar med och utan jordlina vilket resulterar i max 12 mätningar under förutsättning att kablar utan medföljande jordlina kan identifieras. Om det visar sig finnas mycket enledarkabel vid vissa storlekar så kan det bli två mätningar per kabelarea men då kan man kanske nöja sig med att mäta på två areor eller bara mäta på enledare vid den grövre arean.

Det hade varit intressant att göra separata mätningar på två kabelledningar som ligger efter varandra och jämföra resultatet med en mätning på den sammanlagda kabelledningen. På så vis hade man kunnat få en bild av hur stort felet blir då nollföljdsimpedansen för respektive kabelledning adderas.

Beräkningsmodellen som tagits fram utgår från en konstant markresistivitet. Detta kan förfinas ytterligare då markresistiviteten tenderar att variera mellan jordtagen. Som tillägg till modellen skulle därför markresistiviteten tillåts variera som funktion av avståndet. Då kan man till exempel låta ρ vara litet i närheten av jordtaget för att sedan vara större när man kommit en bit ifrån jordtaget.

Beräkningsmodellerna har utgått från en klassik kabelskärmskonstruktion (se Figur 7). I dag finns det kabelskärmar med tre stycken inbäddade aluminium trådar som ligger i kontakt med ett omslutande aluminiumhölje. Denna konstruktion skulle möjligtvis ge en annan nollföljdsimpedans och i framtiden skulle även denna skärmtyp kunna modelleras.

Mätningar och beräkningar har enbart gjorts på treledarkablar och skulle även behöva genomföras på enledarkablar så att jämförelser kan göras. Även beräkningsmodellen skulle kunna utökas till att även gälla enledarkablar.

9 Referenser

- [1] Messing, Lars "Jordfelsdetektering i reaktansjordade mellanspänningsnät", Elforsk, Malmö, 2014
- [2] IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems IEEE Std 142-2007, Standard (4396963)
- [3] Henning, Gunnar "Nollföljdsimpedans för kablar", ABB High Voltage Cables
- [4] Glover, J. Duncan, Sarma, Mulukutla .(1994) "Power system analysis and design ", Boston : PWS, cop. 1994, ISBN: 0534939600
- [5] Hemmingsson, Morten (2008) "Nollföljdsdata för kabel Nätnyttomodellen Billeberga verkligt nät", Malmö, 2008-04-09, MHe-07-005
- [6] Nexans, Power Cables, http://www.nexans.se/eservice/Sweden-en/navigateproduct_540232315/21066998.html#characteristics [2014 12 05]
- [7] Draka, Power Cables, http://se.prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/pd/products/kraftkablar-36kv/AXLJ-RMF-18-3036-kV/ [2014 12 04]
- [8] Messing, Lars, et al, "Testsystem för höghögmigt jordade mellanspänningsnät", Elforsk, Malmö, februari 2010
- [9] Pettersson, G. Adolf, 1975 " Den svenska markens och berggrundens elektriska resistivitet - speciellt med hänsyn till kraftfrekvent inverkan och åska", ISBN: 9170820864, 9789170820861

Appendix A

Mätningar mellan Knäred C och Björkered

Den 9 oktober 2014 utfördes mätningar av nollföljdsimpedans och nollföljdsadmittans för treledarkabeln mellan Knäred C och Björkered. För mätning av nollföljdsimpedansen och nollföljdsadmittansen genomfördes mätningar enligt metoderna beskrivna i kapitel 4.2.1 och kapitel 4.2.2. Under dagen genomfördes även andra typer av mätningar för att få en ökad förståelse för och kunskap om strömvägar i kabel, skärm, mark och jordlina. Samtliga mätningar och resultat presenteras nedan.

Kortslutet och jordat i KRDC – 10 A

En ström på 10 A injicerades i Björkered då treledarkabeln var kortsluten och jordad i Knäred C. Följande mätningar gjordes:

Fas till jord

- Referensmätning utan injicerad ström
 $Z_{ref} = R_0 + jX_0 = -0.07 - j0.1 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Alla tre faserna sammankopplade
 $Z_0 = R_0 + jX_0 = 0.6 + j4 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L1
 $Z_{L1-jord} = 0.1 + j2 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L2
 $Z_{L2-jord} = 0.1 + j2 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L3
 $Z_{L3-jord} = 0.1 + j2 \text{ } \Omega/\text{fas}$

Fas till fas

- Referensmätning utan injicerad ström
 $Z_{ref} = 0.0 + j0.0 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L1-L2
 $Z_{L1-L2} = -0.01 + j1 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L2-L3
 $Z_{L2-L3} = -0.01 + j1 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L3-L1
 $Z_{L3-L1} = -0.02 + j1 \text{ } \Omega/\text{fas}$

Fas till skärm

- Referensmätning utan injicerad ström
 $Z_{ref} = 0.0 + j0.0 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Alla tre faserna sammankopplade
 $Z_0 = 4 + j7 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L1-skärm
 $Z_{L1-skärm} = 1 + j3 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L2-skärm
 $Z_{L2-skärm} = 1 + j3 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L3-skärm
 $Z_{L3-skärm} = 1 + j3 \text{ } \Omega/\text{fas}$

Bortkopplad jordlina i Björkered - kortslutet och jordat i KRDC – 10 A

Fas till jord

- Referensmätning utan injicerad ström
 $Z_{ref} = -0.09 - j0.2 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Alla tre faserna sammankopplade
 $Z_0 = 2 + j5 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L1
 $Z_{L1-jord} = 0.4 + j2 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L2
 $Z_{L2-jord} = 0.4 + j2 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L3
 $Z_{L3-jord} = 0.5 + j23 \text{ } \Omega/\text{fas}$

Öppen ledningsände i KRDC

En injiceringspänning på 250 V injicerades i Björkered då ledningsändan var öppen i Knäred C, det visade sig efteråt att 250 V var för högt för A/D omvandlingen i PMU:n därför beräknades nollföljdsadmittansen under den tid som spänning vreds upp. Följande mätningar gjordes:

Fas till jord

- Referensmätning utan pålagd spänning
Ingen mätbar signal
- Alla tre faserna sammankopplade
 $Y_0 = G_0 + jB_0 = 4 \cdot 10^{-4} + j2 \cdot 10^{-4} \text{ S/fas}$
- Fas L1
 $Y_{L1-jord} = 2 \cdot 10^{-4} + j1 \cdot 10^{-4} \text{ S/fas}$
- Fas L2
 $Y_{L2-jord} = 2 \cdot 10^{-4} + j1 \cdot 10^{-4} \text{ S/fas}$
- Fas L3
 $Y_{L3-jord} = 2 \cdot 10^{-4} + j1 \cdot 10^{-4} \text{ S/fas}$

Fas till fas

- Referensmätning utan pålagd spänning
Ingen mätbar signal
- Fas L1-L2
 $Y_{L1-L2} = 1 \cdot 10^{-4} + j0.6 \cdot 10^{-4} \text{ S/fas}$
- Fas L2-L3
 $Y_{L2-L3} = 1 \cdot 10^{-4} + j0.6 \cdot 10^{-4} \text{ S/fas}$
- Fas L3-L1
 $Y_{L3-L1} = 1 \cdot 10^{-4} + j0.6 \cdot 10^{-4} \text{ S/fas}$

Fas till skärm

- Referensmätning utan pålagd spänning
Ingen mätbar signal
- Alla tre faserna sammankopplade
 $Y_0 = G_0 + jB_0 = 6 \cdot 10^{-4} + j4 \cdot 10^{-4} \text{ S/fas}$
- Fas L1-skärm
 $Y_{L1-skärm} = 2 \cdot 10^{-4} + j1 \cdot 10^{-4} \text{ S/fas}$
- Fas L2-skärm
 $Y_{L2-skärm} = 2 \cdot 10^{-4} + j1 \cdot 10^{-4} \text{ S/fas}$
- Fas L3-skärm
 $Y_{L3-skärm} = 2 \cdot 10^{-4} + j1 \cdot 10^{-4} \text{ S/fas}$

Appendix B

Mätningar mellan MLTP och Vrången Södra

Den 29 oktober 2014 utfördes mätningar av nollföljdsimpedans och nollföljdsadmittans för treledarkabeln mellan MLTP och Vrången Södra. För mätning av nollföljdsimpedansen och nollföljdsadmittansen genomfördes mätningar enligt metoderna beskrivna i kapitel 4.2.1 och kapitel 4.2.2. Under dagen genomfördes även andra typer av mätningar för att få en ökad förståelse för och kunskap om strömvägar i kabel, skärm, mark och jordlina. Samtliga mätningar och resultat presenteras nedan.

Kortslutet och jordat i MLTP – 10 A

En ström på 10 A injicerades i Vrången Södra då treledarkabeln var kortsluten och jordad i MLTP. Följande mätningar gjordes:

Fas till jord

- Referensmätning utan injicerad ström
 $Z_{ref} = R_0 + jX_0 = -0.2 - j0.3 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Alla tre faserna sammankopplade
 $Z_0 = R_0 + jX_0 = 1 + j7 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L1
 $Z_{L1-jord} = 0.3 + j3 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L2
 $Z_{L2-jord} = 0.3 + j3 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L3
 $Z_{L3-jord} = 0.3 + j3 \text{ } \Omega/\text{fas}$

Fas till fas

- Referensmätning utan injicerad ström
 $Z_{ref} = 0.0 + j0.0 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L1-L2
 $Z_{L1-L2} = -0.2 + j2 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L2-L3
 $Z_{L2-L3} = -0.2 + j2 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L3-L1
 $Z_{L3-L1} = -0.2 + j2 \text{ } \Omega/\text{fas}$

Fas till skärm

- Referensmätning utan injicerad ström
 $Z_{ref} = 0.0 + j0.0 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Alla tre faserna sammankopplade
 $Z_0 = 7 + j10 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L1-skärm
 $Z_{L1-skärm} = 2 + j5 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L2-skärm
 $Z_{L2-skärm} = 2 + j5 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L3-skärm
 $Z_{L3-skärm} = 2 + j5 \text{ } \Omega/\text{fas}$

Bortkopplad jordlina i Vrången Södra - kortslutet och jordat i MLTP – 10 A

Fas till jord

- Referensmätning utan injicerad ström
 $Z_{ref} = -0.1 - j0.2 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Alla tre faserna sammankopplade
 $Z_0 = 2 + j8 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L1
 $Z_{L1-jord} = 0.4 + j3 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L2
 $Z_{L2-jord} = 0.4 + j3 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L3
 $Z_{L3-jord} = 0.4 + j3 \text{ } \Omega/\text{fas}$

Öppen ledningsände i MLTP

En spänning på 250 V injicerades i Vrången Södra då ledningsändan var öppen i MLTP, det visade sig efteråt att 250 V var för högt för A/D omvandlingen i PMU:n därför beräknades nollföljdsadmittansen under den tid som spänning vreds upp. Följande mätningar gjordes:

Fas till jord

- Referensmätning utan pålagd spänning
Ingen mätbar signal
- Alla tre faserna sammankopplade
 $Y_0 = G_0 + jB_0 = 4 \cdot 10^{-4} + j2 \cdot 10^{-4} S/fas$
- Fas L1
 $Y_{L1-jord} = 3 \cdot 10^{-4} + j2 \cdot 10^{-4} S/fas$
- Fas L2
 $Y_{L2-jord} = 3 \cdot 10^{-4} + j2 \cdot 10^{-4} S/fas$
- Fas L3
 $Y_{L3-jord} = 3 \cdot 10^{-4} + j2 \cdot 10^{-4} S/fas$

Fas till fas

- Referensmätning utan pålagd spänning
Ingen mätbar signal
- Fas L1-L2
 $Y_{L1-L2} = 2 \cdot 10^{-4} + j1 \cdot 10^{-4} S/fas$
- Fas L2-L3
 $Y_{L2-L3} = 2 \cdot 10^{-4} + j1 \cdot 10^{-4} S/fas$
- Fas L3-L1
 $Y_{L3-L1} = 2 \cdot 10^{-4} + j1 \cdot 10^{-4} S/fas$

Bortkopplad skärm i Vrången Södra – kortslutet och jordat i MLTP – 10 A

Fas till jord

- Referensmätning utan injicerad ström
 $Z_{ref} = -0.05 - j0.1 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Alla tre faserna sammankopplade
 $Z_0 = -0.3 + j10 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L1
 $Z_{L1-jord} = -0.3 + j4 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L2
 $Z_{L2-jord} = -0.3 + j4 \text{ } \Omega/\text{fas}$
- Fas L3
 $Z_{L3-jord} = -0.3 + j4 \text{ } \Omega/\text{fas}$

Bilaga 1

Treledarkabeln mellan KRDC och BRD [6].

AXLJ-O LT 36 kV

AXLJ-O LT 36 kV 3x240/35

Nexans ref.: 21066998

Characteristics

Construction characteristics	
Conductor material	Aluminium
Conductor shape	Round, stranded
Insulation	XLPE (Cross-linked Polyethylene)
Outer sheath	PE LLD
Colour	Black
Halogen free	Yes
Screen	Copper wires
Dimensional characteristics	
Number of cores	3
Conductor cross-section	240 mm ²
Conductor diameter	18.2 mm
Average insulation thickness	6.5 mm
Screen section	35 mm ²
Average sheath thickness	3.6 mm
Nominal outer diameter	88.4 mm
Approximate weight	510.0 kg/100m
Tube diameter	12 mm
Electrical characteristics	
Max. DC resistance of the conductor at 20°C	0.125 Ohm/km
Nominal phase capacitance	0.26 µF / km
Nominal inductance	0.3 mH/km
Resistance of the screen	0.6 Ohm/km
Earth leakage current at 30 kV	4.2 A/km
Operating voltage	36 kV
Mechanical characteristics	
Permissible pulling forces	0.03 kN/mm ²
Usage characteristics	
Minimum installation temperature	-20 °C
Maximum operating temperature	90 °C
Short-circuit max. conductor temperature	250 °C
Bending factor when installed	8 (xD)
Bending factor when laying	12 (xD)
Minimum static operating bending radius	661 mm
Laying operation bending radius	991 mm
Water proof	Longitudinal
Packaging	500 m

Bilaga 2

Treledarkabeln mellan MLTP och Vrånge Södra [7].

AXLJ-RMF 18/30(36) kV

AXQJ-RMF 18/30(36) kV

Användning
AXLJ-RMF är en treledarkabel framtagen för ersättning av isolerad luftledning utomhus. Kabeln är i första hand utvecklad för nedplöjning i mark, men klarar tack vare sin robusta konstruktion de påfrestningar som uppstår vid spjontagning i insjolar utan strömmande vatten och vid begränsat djup.

Alternativ beteckning
SE-N30K7E-AR

Temperaturområde
I kontinuerlig drift max. ledartemp: 90 °C. Låga kabeltemperatur vid förläggning -20 °C, under 0 °C skall försiktighet iakttagas.

Stötspänning
170 kV

Böjningsradie
Vid fast montering: 8 x D
Under utdragnings: 12 x D
Vid plöjning: 8 x D

Standard
SS 424 14 16
CENELEC HD 620 Part 10 Section M

Brandspridningsklass
F1 enligt SS 424 14 75

Miljödeklaration
AXLJ-F, -RMF LT

Konstruktion

Ledare: Fåtrådig, rund och komprimerad aluminium enl. IEC 60228 klass 2, långsvantentät
Inre ledande skikt: Sprutat
Isolering: PE, min. tjocklek = 7,1 mm
Yttre ledande skikt: Fasttilltande
Bandning: Ledande band
Skärm: Glödglädd koppartrådar
Mantel: PE, svart
Märkesempel: AXLJ-RMF 18/30 kV 3x150/25 LT DRAKA "Datum", metermärke

Artikel data

Ledarantal x area mm²	Diameter över isolering mm	Ytterdiam. (approx.) mm	Vikt (approx.) kg/100 m	Stand.-längd m	Leve-rans-form	Artikel-nummer
3x50/16	24,3	62,6	238,1	500	K24	1046031702
3x95/25	27,6	70,3	320,0	500	K24	1046031902
3x150/25	30,5	76,8	393,8	500	K26	1046032102
3x240/35	34,4	86,0	523,3	500	K26	1046032302
3x300/35	36,9	91,8	610,6	500	K28	1046032402

Elektriska data vid +20 °C

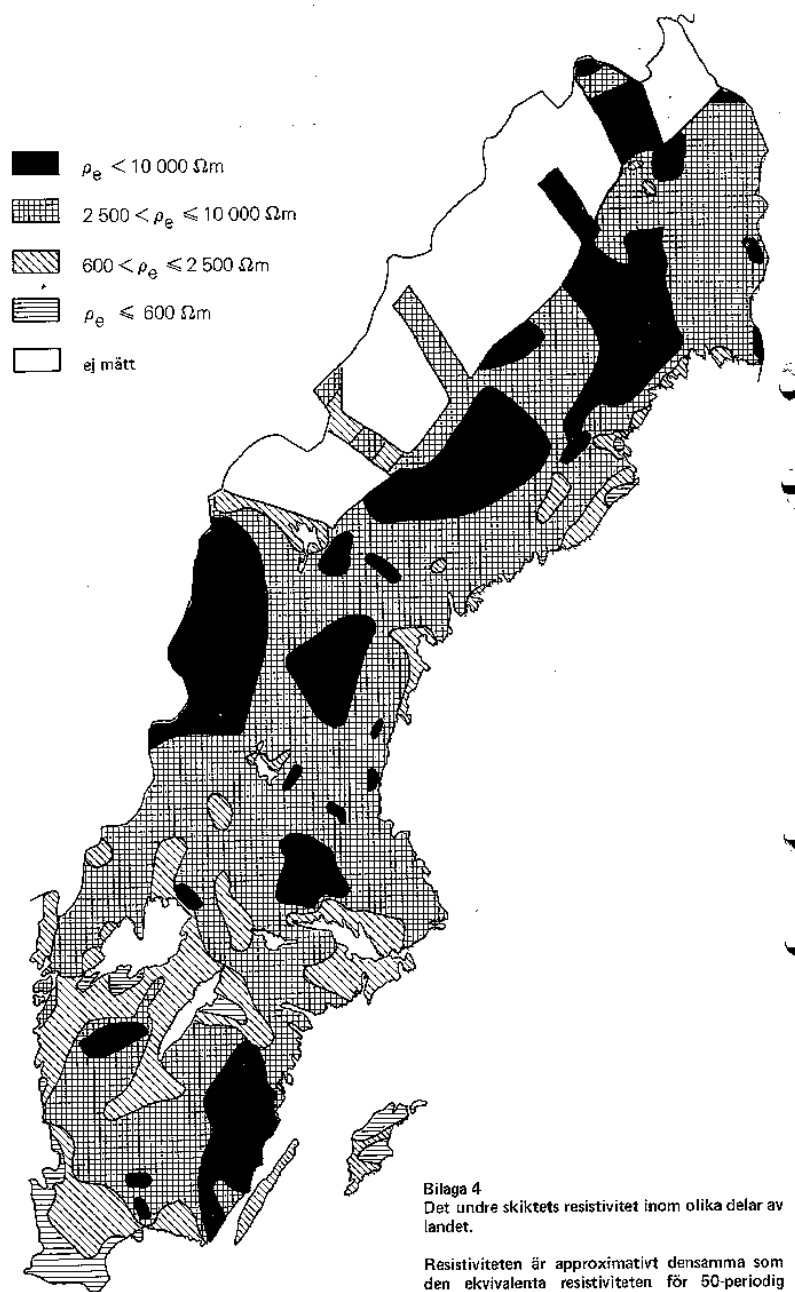
Ledarantal x area mm²	Ledar-resistans Ω/km	Skärm-resistans Ω/km	Induktans mH/km	Reaktans Ω/km	Kapacitans µF/km	Kapacitiv laddningsström/fas A/km	Kapacitiv jordsl. ström A/km
3x50/16	0,641	1,2	0,42	0,13	0,13	0,7	2,2
3x95/25	0,320	0,8	0,37	0,12	0,16	0,9	2,7
3x150/25	0,206	0,8	0,35	0,11	0,19	1,1	3,2
3x240/35	0,125	0,6	0,32	0,10	0,22	1,2	3,7
3x300/35	0,100	0,6	0,31	0,10	0,24	1,4	4,1

Elektriska data

Ledarantal x area mm²	Bel. formåga vid ledar-temp. 65 °C i mark A	Bel. formåga vid ledar-temp. 65 °C i luft A	Bel. formåga vid ledar-temp. 90 °C i luft A	Max korttids-ström i led. under 1 sek. vid begynnelse-temp 65 °C, kA	Max korttids-ström i led. under 1 sek. vid begynnelse-temp 90 °C, kA	Max stöt-ström kA
3x50/16	145	130	160	5,2	4,7	55
3x95/25	205	190	230	9,9	8,9	65
3x150/25	260	250	305	15,6	14,2	70
3x240/35	340	330	400	25,0	22,7	70
3x300/35	380	375	460	31,2	28,3	70

Nominella värden om inget annat anges.

Bilaga 3 Markresistivitet[9]



KABLARS NOLLFÖLJDSIMPEDANS

Det finns behov av att öka förståelsen för kablers nollföljdsegenskaper eftersom de påverkar möjligheten att upptäcka och koppla bort jordfel. Här har mätningar gjorts på treledarkablar och en ny beräkningsmodell tagits fram för att beräkna en kabellednings nollföljdsimpedans.

Resultaten från modellen och mätningarna visar att jordlinan har större inverkan på nollföljdens resistans än på reaktansen. Mätningarna gjordes enligt off-line metoden, vilket betyder att kabeln är ur drift då mätningen görs. Den här metoden är känslig för störningar från omgivningen och här föreslås därför ytterligare mätningar görs enligt on-line metoden, då kabeln är i drift.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk