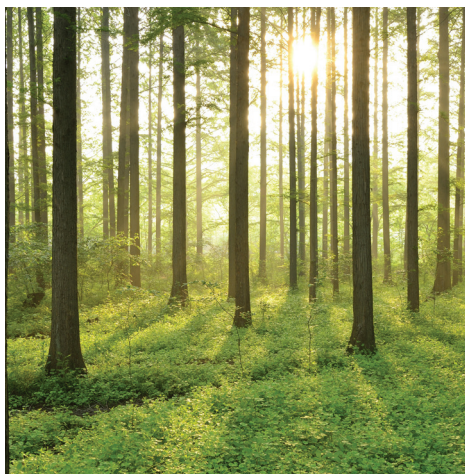


JORDFELSDETEKTERING I MELLANSPÄNNINGSNÄT

RAPPORT 2015:128



Jordfelsdetektering i mellanspänningsnät

LARS MESSING, JENS SLOTH

ISBN 978-91-7673-128-4 | © 2015 ENERGIFORSK

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

Förord

Rapporten 2015:128 är ett projektresultat av det samlade ramprogrammet för Underhåll, Diagnostik och Reinvesteringsstrategi som startades under 2010.

Målsättning med ramprogrammet är att:

- *identifiera utvecklingsinsatser för det strategiska reinvesterings- och underhållsarbetet som kan leda till förbättrad nätekonomi, samt att medverka till att dessa genomförs*
- *öka kunskapen om nya möjligheter med diagnostiska metoder för underhåll av elnät*
- *skapa möjligheter till att förbättra underhållets styrning och planering*
- *sprida kunskap med syfte att höja kompetensnivån inom området*
- *vara en brygga mellan högskoleforskningens resultat och branschens möjliga applikationer*

Prioriteringar inom programmet har gjort att måluppfyllelsen är mycket god vad beträffar kortsiktiga och handgripliga projekt, men svagare vad beträffar långsiktiga frågor och managementfrågor. Reinvesteringsstrategier liksom reservdelshållning saknas i projektportföljen.

De finansierande företagen i ramprogrammet är följande:

Svenska Kraftnät	Jönköping Energi Nät AB
Vattenfall Eldistribution AB	Gävle Energi AB
E.ON Elnät Sverige AB	Eskilstuna Energi & Miljö AB
Fortum Distribution	Sundsvall Elnät AB
ABB AB	Borås Elnät AB
Göteborg Energi AB	Växjö Energi Elnät AB
Skellefteå Kraft Elnät AB	Borlänge Energi AB
Jämtkraft Elnät AB	Pite Energi AB
Umeå Energi Elnät AB	Mälarenergi Elnät AB

Ramprogrammets styrgrupp består för närvarande av följande personer:

- Hans-Erik Carlsson E.ON Elnät Sverige AB, ordförande
- Rikard Persson Svenska Kraftnät
- David Håkansson Borås Elnät AB
- Mats-Erik Jansson, Jämtkraft Elnät AB
- Torbjörn Jernström Vattenfall Eldistribution AB
- Catarina Naucler, Fortum Distribution
- Ferruccio Vuinovich, Göteborg Energi Nät AB
- Örjan Kvist, Växjö Energi Elnät AB
- Robert Saers ABB Power Transformers
- Reyna Lind, Sundsvall Elnät AB
- Johan Fält, Mälarenergi Elnät AB
- Sven Jansson Elforsk AB, programansvarig

Sammanfattning

Tillgänglighetskraven på elförsörjningen och därmed även på mellanspänningsnäten i Sverige ökar. Som en följd av många och långvariga leveransavbrott orsakade av snö och blåst, samt skärpta ersättningsregler för avbrott i elanslutningen, har många elnätsföretag under senare år genomfört en omfattande kablifiering av sina mellanspänningsnät. Kablifieringen av näten medför ändrade förutsättningar för detektering och bortkoppling av jordfel. Kraven på hög känslighet hos jordfelsskydden står till viss del i motsatsförhållande till kraven på hög tillgänglighet på elanslutningen.

I detta dokument ges vägledning för nätbolagen vid utformning av mellanspänningsnät beträffande systemjordning och jordfelsskyddssystem.

Krav på begränsning av jordfelsström och bortkoppling av jordfel beskrivs.

Tekniska förutsättningar diskuteras:

- Nätstruktur
- Anslutning och utformning av nollpunktsutrustning
- Inverkan av ledningars serieimpedanser
- Feltyper
- Skyddsprinciper
- Analysmetoder

Med dessa förutsättningar som grund ges rekommendationer som redovisas i avsnitt 12. I korthet rekommenderas:

Nätstruktur

Kapacitiv jordfelsström i ett distributionsnät bör begränsas. Övre gräns är lämpligen 600 A i 24 kV nät och 500 A i 12 kV.

Systemjordning

Mellanspänningsnät skall ha nollpunktsreaktor i nätets anslutningspunkt till överliggande nät. Systemjordningen skall uppfylla följande:

- Central nollpunktsreaktor (i nätets anslutningspunkt till överliggande nät) skall vara kontinuerligt avstämbar alternativt avstämbar i steg om maximalt 2 A.
- Avstämning skall ske automatiskt med maximal snedavstämning om 2 A. Vid omkopplingar i nätet som medför ändrad kapacitiv jordfelsström skall justering av avstämning ske inom 30 s.
- Avstämningsautomatiken skall kunna medge manuell avstämning via fjärr.
- För kabelledning med stor generering av kapacitiv jordfelsström (>50 A) rekommenderas att installera utlokaliserade nollpunktsreaktorer anslutna till 24/12 kV nollpunkt på distributions-transformatorer (till 0,4 kV) med lämplig kopplingsart: ZN/zn, YN/d/yn.

- Aktiva effektförluster (aktiv jordfelsström) hos nollpunktsreaktorer skall vara max 2 % av märkeffekt/märkström
- Central nollpunktsreaktor skall anslutas enligt endera av följande alternativ:
 - Till nollpunkt på transformator med lämplig kopplingsart så att nollföljdsström/nollföljdsspänning inte kan transformeras mellan spänningsnivåerna: Ydyn, Dyn, YNdyn (där det skall visas at transformering av nollföljdsstorheter är försumbara). Transformatorns nollföljdsimpedans i serie med nollpunktsutrustningen skall vara begränsad: $Z_{OT} \leq 0,1 Z_{NP}$
 - Till separat jordningstransformator lämpligen med kopplingsart ZN. Alternativt kan stationstransformator med kopplingsart ZNzn eller YNdyn användas. Jordningstransformatorns nollföljdsimpedans i serie med nollpunktsutrustningen skall vara begränsad: $Z_{OT} \leq 0,1 Z_{NP}$
- Nollpunktsmotstånd kopplas normalt parallellt med nollpunktsreaktor. Om nollpunktsreaktorns ekvivalenta aktiva jordfelsström överstiger ca 5 A slopas nollpunktsmotståndet.
- Om nollpunktsutrustningen är tagen ur drift för underhåll eller fel skall åtgärder vidtas så snabbt som möjligt för att kompensera jordfelsströmmen till acceptabla nivåer. Alternativ:
 - Lagerhållning av nollpunktsutrustning så utbyte kan ske snabbt (inom ett dygn). Detta skall omfatta jordningstransformator om inkoppling av nollpunktsutrustning sker via jordningstransformator.
 - Möjlighet att koppla nollpunktsutrustning till mer än en transformatornollpunkt.
 - Omkoppling i nätet så att delar av den kapacitiva genereringen av jordfelsström ansluts till ett annat nät.
- Restströmskompensering genom injicering av ström i nollpunkten i motfas med nätets aktiva jordfelsström kan ske. I dagsläget är marknaden för denna typ av utrustning begränsad.

Jordfelsskyddssystem

Jordfel skall kopplas bort enligt de krav som ställs i "Elsäkerhetsverkets föreskrifter och allmänna råd om hur elektriska starkströmsanläggningar ska vara utförda; ELSÄK-FS 2008:1" [1].

- Jordfelsskyddssystemet skall ha redundans, dvs. jordfel skall kopplas bort även om en komponent i felbortkopplingskedjan är felbehäftad. Detta kan innebära:
 - Ordinarie skydd och reservskydd skall matas från separata likströmssystem, alternativt från ett likströmssystem med uppdelning på huvudsäkringsnivå.
 - Ordinarie skydd och reservskydd skall matas från separata mättransformatorer, alternativt från skilda strömtransformator-kärnor (strömmätande jordfelsskydd).

- Det bör finnas ett nollpunktsspänningsskydd i matande station som utgör reservskydd för hela nätet och ordinarie skydd för jordfel på samlingsskena och i transformator i matande station.
 - Det är olämpligt att mata riktade jordströmsskydd från samma spänningstransformatorgrupp som matar nollpunktsspänningsskydd.
- För utgående ledningsfack rekommenderas att ha ett grundtonsmätande jordfelsskydd:
 - Riktat strömmätande jordfelsskydd som mäter den aktiva komponenten hos strömmen till skyddet (i fas med nollföljdsspänningen). Detta skydd skall vara inställt så att krav på känslighet är uppfyllt för alla de driftläggningar som kan förekomma i nätet. Vid nät med stor andel kabel rekommenderas att inställningarna baseras på nätberäkningar där hänsyn tas till serieimpedanserna i nollföljdsnätet.
 - Admittansmätande jordfelsskydd. Detta skydd skall vara inställt så att admittansområdet för fel på skyddad ledning (bakomliggande admittans) täcks för alla de driftläggningar som kan förekomma i nätet. Vid nät med stor andel kabel rekommenderas att inställningarna baseras på nätberäkningar där hänsyn tas till serieimpedanserna i nollföljdsnätet. Vidare kontrolleras att nollpunktsspänningen för frigivning av skyddsfunktionen ställs så att kravet på känslighet uppfylls.
- Parallellt med det grundtonsmätande jordfelsskyddet för utgående ledning rekommenderas att ha ett transientmätande (intermittent) jordfelsskydd. Detta gäller främst fack som ansluter ledning med kabelsträckor eftersom intermittenta jordfel ofta förekommer i kablar och kabelavslut. Dock kan intermittenta fel förekomma även för andra komponenter.
- Parallellt med riktat jordfelsskydd och transientmätande jordfelsskydd rekommenderas att använda ett oriktat strömmätande jordfelsskydd med ströminställning över förekommande jordfelsströmmar vid enfasigt jordfel och funktionstid om maximalt 0,5 s. Detta skydd skall detektera dubbla jordfel.
- För alla typer av jordfelsskydd gäller att de skall uppfylla krav i standarder beträffande:
 - Elektromagnetisk störmiljö: överspänning, högfrekventa störningar, mm
 - Hög/låg temperatur
- Mättransformatorerna skall uppfylla de krav som relätillverkarna ställer.
- Vid analys av aktuellt nät som görs för att beräkna resulterande jordfelsströmmar och inställningar av jordfelsskydd rekommenderas att använda nätberäkningsprogram med noggrann nollföljdsrepresentation. I de fall jordfelsströmmarna är små kan förenklad analys göras. Som vägledning om fullständiga nätberäkningar krävs bör följande vara uppfyllt:

- Totala kapacitiva jordfelsströmmen i nätet överstiger 200 A
- Antalet fack i matande station understiger 8
- Kapacitiv jordfelsström från ett enskilt fack överstiger 50 A
- Nätet har nätstationer med jordtagsresistans överstigande 10 Ω

Driftskedet

Även om nollpunktsutrustning avstäms automatiskt och jordfelsskydden skall fungera utan mänsklig inblandning bör följande beaktas under driftskedet:

- Kontroll av nollpunktsreaktorernas kapacitet (maximal kompenseringström) skall ske vid om- och utbyggnad av nätet.
- Översyn av jordfelsskyddens inställning skall ske vid om- och utbyggnad av nätet. Det är även lämpligt att detta sker med regelbundna intervall (t.ex. vart 5:e år) för att fånga upp förändringar som inte observerats.
- Funktionsprov av jordfelsskydd och automatik för avstämning av nollpunktsreaktorer skall ske med regelbundna intervall (t.ex. vart 5:e år).

Summary

The requirements of availability on the delivery of electricity tend to be increasingly stringent.

A large number of interruptions with long duration, caused by snow and strong wind, have resulted in exchange of overhead lines to earth cables in many medium voltage networks. The increased number of cables has changed the basis for detection and clearance of earth faults. The requirements of high sensitivity of the earth fault protection are to some degree in contradiction to the requirements on availability of supply.

In this report guidance is given to network owners regarding design of medium voltage network system earthing and earth fault protection system.

The requirements on limitation of earth fault current limits and on clearance of earth faults are described.

Technical preconditions are discussed.

- Network structure
- Connection and design of neutral point equipment
- Impact from the series impedances of the distribution lines
- Earth fault types
- Earth fault protection principles
- Analysis methods

Having these conditions as a base recommendations are given in chapter 12. In short the following recommendations are given:

Network structure

The capacitive earth fault current in a distribution network should be limited. A suitable upper limit is 600 A in 24 kV networks and 500 A in 12 kV networks.

System earthing

Medium voltage networks shall normally have a neutral point reactor (Petersen coil) connected in the connection point to the feeding system. The system earthing shall fulfill:

- A central neutral point reactor (in the connection point to the feeding system) shall be continuously tunable alternatively tunable in steps of maximum 2 A.
- The tuning shall be made automatically with a maximum tuning deviation from the ideal value 2 A. In case of switching in the network causing change of capacitive earth fault current retuning of the neutral point reactor shall be made within 30 s.
- The tuning equipment shall allow manual retuning from remote control.
- In case of cable feeders having large generation of capacitive earth fault current (>50 A) it is recommended to install distributed compensation

by means of neutral point reactors connected to the 24 or 12 kV neutral point of distributions transformers (to 0,4 kV) with suitable vector group: ZN/zn, YN/d/yn.

- Active power losses (resistive earth fault current) of neutral point reactors shall be maximum 2 % of rated power/rated current.
- The central neutral point reactor shall be connected as any of the alternatives:
 - To the neutral point of a transformer with a suitable vector group preventing zero sequence current/voltage to be transformed between the voltage levels: Ydyn, Dyn, YNdyn (It shall be shown that transformation of zero sequence quantities is negligible). The transformer zero sequence impedance in series with the neutral point equipment shall be limited: $Z_{OT} \leq 0,1 Z_{NP}$
 - To a separate earthing transformer with suitable vector group ZN. Alternatively a station auxiliary power transformer having vector group ZNzn or YNdyn can be used. The earthing transformer zero sequence impedance in series with the neutral point equipment shall be limited: $Z_{OT} \leq 0,1 Z_{NP}$.
- A neutral point resistor shall normally be connected in parallel with the neutral point reactor. If the equivalent resistive earth fault current (active losses) of the neutral point reactor is larger than about 5 A the neutral point resistor should be skipped.
- If the neutral point equipment is taken out of service due to maintenance or fault measures shall be done as quickly as possible to reduce the earth fault current to acceptable level. Alternatives:
 - Warehousing of neutral point equipment shall allow replacement quickly (within 24 hours). This shall include earthing transformer if the connection of the neutral point equipment is made via earthing transformer.
 - Possibility of alternative connection of the neutral point equipment to another transformer neutral point.
 - Network switching to move capacitive earth fault current generation to other networks (alternative feeding).
- Compensation of resistive earth fault current (residual earth fault current compensation) can be made by means of neutral point injection of current in counter phase with the resistive earth fault current in the network. Today the market of equipment for this purpose is limited.

Earth fault protection system

Earth faults shall be cleared according to the requirements given in "Elsäkerhetsverkets föreskrifter och allmänna råd om hur elektriska starkströmsanläggningar ska vara utförda; ELSÄK-FS 2008:1" [1].

- The earth fault protection system shall have redundancy, i.e. earth faults shall be cleared even if one component in the fault clearance system is out of order. In praxis:

- Main and back-up protection relays shall be fed from separated auxiliary DC systems, alternatively from one DC system where the main one and the back-up protections are separated at the main fuse level.
 - Main and back-up protection relays shall be fed from separated instrument transformers, alternatively from separate cores of one current transformer (current based earth fault protection).
 - There should be a residual voltage protection in the feeding substation providing back-up earth fault protection for the entire network as well as main earth fault protection for the busbar and transformer winding in the feeding substation.
 - It should be avoided to feed directional earth fault protection from the same voltage transformer group as the residual voltage earth fault protection.
- In the feeder bays it is recommended to have an earth fault protection using fundamental frequency quantities (zero sequence current and voltage):
 - Directional residual current protection measuring the active current component of the current fed to the protection (With the same phase angle as the zero sequence voltage). The protection shall be set to fulfill the sensitivity requirements for all possible operational states in the network. In networks with a large proportion of cable it is recommended that the setting shall be based on network calculations where zero sequence series impedance is considered.
 - Admittance based earth fault protection. The protection shall be set so the apparent admittance in case of fault on the protected feeder (feeder source admittance) shall be covered for all possible operational states in the network. In networks with a large proportion of cable it is recommended that the setting shall be based on network calculations where zero sequence series impedance is considered. Further it should be checked that the setting of residual voltage release will give sufficient sensitivity according to the requirements.
- It is recommended to include an earth protection measuring the transients (due to intermittent earth faults) in zero sequence current and voltage in parallel with the fundamental frequency earth fault protection. This should be done mainly for bays connecting cable feeders or feeder with both cables and overhead lines, as intermittent earth faults mainly occur in cables and cable terminations. Intermittent earth faults can occur also in other components.
- It is recommended to use a nondirectional fundamental frequency earth fault current protection in parallel with the other feeder protections. This protection shall detect simultaneous earth fault in different phases and feeders. This protection shall be set with a current level higher than the occurring earth fault currents in the bay at single phase earth faults. The operation time shall be maximum 0, 5 s.

- All types of earth fault protection shall fulfill requirements in standards (IEC) regarding:
 - Electromagnetic compatibility: overvoltage, high frequency disturbances etc.
 - High/low temperature
- The instrument transformers shall fulfill relay manufacturers requirements.
- In the analysis made for calculation of total earth fault currents and for settings of earth fault protections it is recommended to use network calculation software using relevant zero sequence modelling of the network components. In case of small capacitive earth fault currents in the network simplified analysis is acceptable. As a guidance if complete network fault calculations are necessary the following should be fulfilled:
 - The total capacitive earth fault current in the network is larger than 200 A
 - The number of bays in the feeding substation is less than 8
 - The capacitive earth fault current generation in a single bay is larger than 50 A
 - There are secondary sub-stations having earthing resistance of more than 10 Ω

Operation

Even if neutral point reactors are tuned automatically and the earth fault protection shall operate without human interference the following should be regarded during operation of the network:

- Control of the neutral point reactance capacity (maximum compensation current) shall be made at changes in the network, such as installation of new cables.
- Revision of the parameter settings of earth fault protections shall be made when changes in the primary system is made. Revision should also be made on regular basis (for example every 5 years) to identify changes that have not been observed.
- Functional tests of earth fault protection and of neutral point reactance tuning equipment shall be made on regular basis (for example every 5 years).

Innehåll

1	Bakgrund	1
2	Krav och regelverk	2
2.1	Ellagen	2
2.2	Förordningar	3
2.3	Föreskrifter och myndigheter	3
2.3.1	Elsäkerhetsverkets föreskrifter och allmänna råd om hur elektriska starkströmsanläggningar ska vara utförda; ELSÄK-FS 2008:1, 2010:1	4
2.3.2	Svensk Standard SS-EN 50522	6
2.3.3	Energimarknadsinspektionens föreskrifter och allmänna råd om krav som ska vara uppfyllda för att överföringen av el ska vara av god kvalitet; EIFS 2013:1	7
2.4	Förslag till kravformulering	8
3	Olika typer av mellanspänningsnät	10
3.1	Landsbygdsnät med enbart friledning	10
3.2	Landsbygdsnät med blandat friledning och kabelledning	10
3.3	Landsbygdsnät med enbart kabelledning	11
3.4	Tätortsnät med blandat friledning och kabelledning	11
3.5	Tätortsnät med enbart kabelledning	11
3.6	Uppsamlingsnät för vindkraftparker	12
3.7	Icke effektivt jordade regionnät	12
3.8	Industrinät	12
3.9	Alternativa principer för mellanspänningsnät	13
3.9.1	Maskade mellanspänningsnät	13
3.9.2	Införande av "spärrar" för nollföljdsström och nollföljdsspänning	13
3.9.3	Effektiv systemjordning av mellanspänningsnät	14
4	Tekniska förutsättningar	15
4.1	Matande transformator från effektivt jordat nät	15
4.1.1	YNyn kopplad transformator	16
4.1.2	Yyn kopplad transformator	18
4.1.3	YNd kopplad transformator	20
4.1.4	YNynd kopplad transformator	21
4.2	Matande transformator från icke effektivt jordat nät	22
4.2.1	YNyn kopplad transformator	22
4.2.2	YNynd kopplad transformator	23
4.2.3	Yyn kopplad transformator	24
4.2.4	YNd kopplad transformator	26
4.3	Jordningstransformator	27
4.4	Kablars egenskaper	28
4.4.1	Nollföljds kapacitans till jord	28
4.4.2	Serieimpedans för nollföljd	29
4.4.3	Alternativ beräkning av kablars nollföljdsdata	33
4.5	Friledningars egenskaper	40
4.6	Mellanspänningsnätets struktur och utbredning	40
4.7	Mellanspänningsnätets omkopplingsmöjligheter	41
4.8	Nollpunktsbehandling och systemjordning	42
4.8.1	System med isolerad nollpunkt	42
4.8.2	Jordning via Nollpunktsreaktor (Petersenspole)	42
4.8.3	Distribuerad kompensering	46
4.8.4	Aktiv injicering i nollpunkten: Restströmskompensering	46

4.9	Serieimpedansernas inverkan	48
5	Olika typer av fel och andra händelser som påverkar jordfelsskyddssystemen	49
5.1	Ljusbågsfel	49
5.2	Påfallande träd	49
5.3	Linbrott på friledning	50
5.4	Bakmatat jordfel	50
5.5	Grävskador	51
5.6	Dubbla jordfel	51
5.7	Intermittent jordfel på grund av "Water Treeing"	53
5.8	Transienter som initierar pendlingar i nollföljdssystemet i mellanspänningsnät	54
5.9	Kabelfel på grund av överbelastning	55
5.10	Sprickbildning i isolatorer eller avledare på friledningar	56
5.11	Händelser som kan orsaka oönskad jordfelsskyddsfunktion	56
5.11.1	Transienter i nätet	56
5.11.2	Osymmetri i nätet	56
5.11.3	Felaktig sekundär nollföljdsström på grund av mätfel hos strömtransformatorer	56
5.11.4	Induktion från ledning i effektivt jordat system	59
5.11.5	Cirkulerande nollföljdsström i parallella friledningar	61
6	Principer för jordfelstdetektering i mellanspänningsnät	63
6.1	Grundtonsmätande jordfelsskydd	63
6.1.1	Enkel analys	63
6.1.2	Analys av nät med stor kapacitiv jordfelsström	65
6.1.3	Oriktade jordströmskydd	67
6.1.4	Riktade jordströmskydd	67
6.1.5	Spänningsskydd	70
6.1.6	Selektivitet	70
6.2	Transientmätande jordfelsskydd	70
6.3	Admittansmätande jordfelsskydd	77
6.4	Admittansmätning med ströminjicering	80
6.5	Jordfelsskydd med pulstågsinjicering	80
6.6	Nollpunktsanalys	81
6.7	Shuntning av jordfel	83
6.8	Telesamverkande jordfelsskydd	84
7	Lokalisering av jordfel	87
7.1	Lokalisering med slingkoppling	87
7.2	Utlokaliserad mätning av jordfelsström	87
7.3	Lokalisering av jordfel/begynnande jordfel med hjälp av PD-mätning	88
8	Erfarenhetssammanställning	89
8.1	Vattenfall Eldistribution	89
8.2	E.ON Elnät	90
8.3	Fortum Distribution	91
8.4	Mälarenergi	91
8.5	Sundsvall Elnät	92
9	Analysmetoder	93
9.1	Grundtonsanalys med försummande av serieimpedanser	93
9.2	Grundtonsanalys med hänsynstagande till serieimpedanser	94
9.2.1	Modellering	94
9.2.2	Landsbyggsnät med både friledningar och kabelledningar	97

9.3	Transientanalys	109
10	Kontroll och provning	110
10.1	Olämplig/felaktig konstruktion och/eller montage.....	110
10.2	Olämpliga/felaktiga parameterinställningar.....	111
10.3	Otillräcklig kompensering av kapacitiv jordfelsström.....	111
11	Störningsanalys och störningsregistreringar	112
12	Rekommendationer	113
12.1	Principiell utformning av nätstruktur, systemjordning och felbortkopplingssystem för jordfel	113
12.2	Planeringsskedet.....	113
12.2.1	Nätstruktur	113
12.2.2	Systemjordning.....	114
12.2.3	Jordfelsskyddssystem.....	115
12.3	Driftskedet	116
	Referenser	117

1 Bakgrund

Merparten av alla avbrott i elleveransen till elkunder kan hänföras till fel och andra händelser i mellanspänningsnäten. Mellanspänning¹ är ett lite oklart begrepp, men i den här rapporten fokuserar vi på nät med nominell spänning inom intervallet 6 – 70 kV. Mellanspänningsnät förekommer oftast inom distributionssystemen och som uppsamlingsnät mellan produktionsanläggningar, främst vindkraftverk. Inom distributionssystemen förekommer mellanspänningsnät både inom regionnätssdelen² och inom lokalnätssdelen³. Uppsamlingsnät för vindkraftparker har ofta spänningsnivåer kring 20 - 36 kV.

Mellanspänningsnät i Sverige är, med något enstaka undantag, icke effektivt jordade. Detta innebär att felströmmen vid enfasigt jordfel är avsevärt mindre än felströmmarna vid kortslutning mellan faserna, medan spänningen på de friska faserna i samband med jordfel kan stiga till nivåer i närheten av huvudspänning.

Nollföljds kapacitansens storlek och nätets utbredning har stor betydelse för utformningen av jordfelsskyddssystem i icke effektivt (höghögt) jordade mellanspänningsnät.

Tillgänglighetskraven på elförsörjningen och därmed även på mellanspänningsnäten i Sverige ökar. Som en följd av många och långvariga elavbrott orsakade av snö och blåst, samt skärpta ersättningsregler för avbrott i elanslutningen, har många elnätsföretag under senare år genomfört en omfattande kablifiering av sina mellanspänningsnät. Kablifieringen av näten medför ändrade förutsättningar för detektering och bortkoppling av jordfel. Kraven på hög känslighet hos jordfelsskydden står till viss del i motsatsförhållande till kraven på hög tillgänglighet på elanslutningen.

Det finns ett behov av vägledning för nätföretagen vid utformning av mellanspänningsnät beträffande systemjordning och jordfelsskyddssystem.

¹ IEC anger övre gräns inom intervallet 30 – 100 kV (any set of voltage between low and high voltage)

² Regionnäten sammanbinds av regionledningar, som drivs med linjekoncession

³ Lokalnäten drivs med områdeskoncession

2 Krav och regelverk

Anslutningen och överföringen av el till elnätsföretagets kunder måste uppfylla fastställda krav på säkerhet och tillförlitlighet, ofta beskrivna som:

- Säkerhet mot person- eller sakskada på grund av el
- Leveranskvalitet
- Tillgänglighet

Kraven finns hierarkiskt formulerade i ellagen, där riksdagen i ganska allmänna ordalag kräver att överföringen av el skall vara av god kvalitet och att anslutningen ska ha hög tillgänglighet och hög säkerhet, i förordningar, där regeringen i huvudsak pekar ut vissa myndigheter och ger dem preciserade ansvarsområden och anpassade befogenheter, samt i föreskrifter, där myndigheterna ganska detaljerat sätter upp specifika krav. Vidare tjänar standarder och branschpraxis ofta som rättesnören när det gäller teknisk utformning, installation och drift av elnät och deras kontroll- och skyddssystem.

2.1 Ellagen

Ellagen är den mest grundläggande och minst detaljerade delen av det regelverk som styr anslutning och drift av elektriska anläggningar. Lagarna ändras sällan och de ska ligga till grund för mer detaljerade regler, därav har ellagen en central betydelse för förståelsen av efterföljande förordningar och föreskrifter.

Nätverksamhet mm, Inledande bestämmelse

Ellagen 3 kap, 1 § (2005:404)

”Ett företag som bedriver nätverksamhet ansvarar för drift och underhåll och, vid behov, utbyggnad av sitt ledningsnät och, i tillämpliga fall, dess anslutningar till andra ledningsnät. Företaget svarar också för att dess ledningsnät är säkert, tillförlitligt och effektivt och för att det på lång sikt kan uppfylla rimliga krav på överföring av el.”

Skyldighet att ansluta anläggning

Ellagen 3 kap, 6 §, 7 §, 8 § (2005:404)

”Den som har nätkoncession för linje är, om det inte finns särskilda skäl, skyldig att på skäliga villkor ansluta en elektrisk anläggning till ledningen.”

”Den som har nätkoncession för område är, om det inte finns särskilda skäl, skyldig att på skäliga villkor ansluta en elektrisk anläggning inom området till ledningsnätet.”

Skyldighet att överföra el

Ellagen 3 kap, 9 § (2005:1110)

”Den som har nätkoncession är skyldig att på skäliga villkor överföra el för annans räkning. Överföringen av el skall vara av god kvalitet.”

En nätkoncessionshavare är skyldig att avhjälpa brister hos överföringen i den utsträckning kostnaderna för att avhjälpa bristerna är rimliga i förhållande till de olägenheter för elanvändarna som är förknippade med bristerna."

Skyddsåtgärder

Ellagen 9 kap, 1 § (1997:857) och 2 § (2007:217)

"Elektriska anläggningar, elektriska anordningar avsedda att anslutas till sådana anläggningar, elektrisk materiel och elektriska installationer skall vara så beskaffade och placerade samt brukas på sådant sätt att betryggande säkerhet ges mot person- eller sakskada eller störning i driften vid den egna anläggningen eller vid andra elektriska anläggningar.

Regeringen eller den myndighet som regeringen bestämmer får, i den mån det behövs från elsäkerhetssynpunkt, meddela föreskrifter om kontroll, provning eller besiktning samt andra föreskrifter som rör elektriska anläggningar, anordningar avsedda att anslutas till sådana anläggningar, elektrisk materiel eller elektriska installationer."

Produktansvar

Ellagen 10 kap, 2-3 § (1997:857)

"2 § Om en skada orsakas av säkerhetsbrist i el som har satts i omlopp från en elektrisk anläggning med egen generator eller transformator är innehavaren, om inte annat följer av 3 §, skyldig att betala skadestånd för personskada samt för sakskada på egendom som till sin typ vanligen är avsedd för enskilt ändamål, om den skadelidande vid tiden för skadan använde egendomen huvudsakligen för sådant ändamål. Med säkerhetsbrist avses att elen inte är så säker som skäligen kan förväntas. Avtalsvillkor som inskränker skadeståndsskyldigheten är utan verkan."

2.2 Förordningar

Baserat på kraven i ellagen utser och instruerar regeringen, genom förordningar, lämpliga myndigheter för olika ansvarsområden. Följande förordningar är intressanta för säkerställandet av elnätverksamhetens säkerhet och effektivitet:

Elsäkerhet:

- Starkströmsförordningen (2009:22) -> Elsäkerhetsverket

Nätmyndighet:

- Elförordningen (2013:208) -> Energimarknadsinspektionen

2.3 Föreskrifter och myndigheter

Elsäkerhetsverket svarar för frågor som berör personsäkerhet och anläggningssäkerhet medan Energimarknadsinspektionen svarar för frågor som berör tillgänglighet och kvalitet för el.

Myndigheternas uppgifter är att:

- Ta fram och ge ut föreskrifter inom ansvarsområdet
- Utöva tillsyn inom ansvarsområdet

I starkströmsförordningen (SFS 2009:22) föreskrivs att Elsäkerhetsverket är tillsynsmyndighet (enligt ellagen (1997:857) 12 kap. 1§ första stycket) när det gäller frågor om elsäkerhet. Elsäkerhetsverket får därför, i den utsträckning som behövs för att förebygga person- eller sakskada på grund av el, meddela föreskrifter om utförande av elektriska anläggningar och anordningar, samt kontroll och provning av sådana anläggningar och anordningar. För utformning och kontroll av jordfelsdetektering i mellanspänningsnät är det främst följande delar av starkströmsföreskrifterna som är av intresse:

- Elsäkerhetsverkets föreskrifter och allmänna råd om hur elektriska starkströmsanläggningar ska vara utförda (ELSÄK-FS 2008:1, 2010:1).
- Elsäkerhetsverkets föreskrifter och allmänna råd om innehavarens kontroll av elektriska starkströmsanläggningar och elektriska anordningar (ELSÄK-FS 2008:3, 2010:3).

2.3.1 Elsäkerhetsverkets föreskrifter och allmänna råd om hur elektriska starkströmsanläggningar ska vara utförda; ELSÄK-FS 2008:1, 2010:1

Som grund för utformning av systemjordningen och jordfelskyddssystemet ställs krav i ELSÄK-FS 2008:1 "Elsäkerhetsverkets föreskrifter och allmänna råd om hur elektriska starkströmsanläggningar ska vara utförda" [1]. I dessa föreskrifter ställs krav relaterande till jordfel i icke effektivt jordade nät med avseende på:

- Maximal spänningssättning av skyddsjordad anläggningsdel
- Känslighet för bortkoppling av jordfel

Känsligheten, dvs. möjligheten att detektera jordfelet, beror av felströmmens storlek. Maximal spänningssättning av skyddsjordad anläggningsdel är direkt relaterad till jordfelsströmmens storlek vid stumt jordfel (ingen resistans i felstället) och aktuell jordtagsresistans. Föreskriften säger bland annat följande:

"En högspänningsanläggning i ett icke direktjordat system ska vara utförd så, att en- eller flerpoliga jordslutningar kopplas ifrån snabbt och automatiskt. Undantag gäller för en anläggning för högst 25 kV nominell spänning som inte innehåller någon luftledning. En sådan anläggning får vara utförd så, att en enpolig jordslutning enbart signaleras automatiskt.

För en högspänningsanläggning i ett icke direktjordat system i vilken det ingår:

- *en friledning i förstärkt utförande,*
- *en friledning med plastbelagda ledare eller,*
- *en luftledning utförd med kabel utan metallmantel eller skärm*

ska jordfelskydden ha högsta möjliga känslighet vid detektering av jordfel. Reläfunktionen för fränkoppling ska vara säkerställd för resistansvärden upp till 5 000 ohm.

För en högspänningsanläggning i ett icke direktjordat system för högst 25 kV nominell spänning, i vilken det ingår luftledningar av något annat slag än vad som anges ovan, ska jordfelskydden vara anordnade så, att reläfunktionen för fränkoppling är säkerställd för resistansvärden upp till 3 000 ohm. Inom

områden som inte omfattas av detaljplan får en sådan anläggning innehålla ett fåtal spann friledning med plastbelagda ledare.

För spänningssättning av sådana jordade delar i anläggningar inom ett icke direktjordat system för högst 25 kV nominell spänning till vilka jordslutning kan ske gäller de värden som anges i Tabell 1."

Tabell 1 Högsta tillåtna värden vid spänningssättning av jordade delar

Anläggningsdel	Högsta tillåtna värden vid enpolig jordslutning		
	Frånkopplas automatiskt inom		Signaleras automatiskt
	2 sekunder	5 sekunder	
Skyddsledare och PEN-ledare som tillhör något annat ledningssystem anslutet över transformator i vilket en punkt är direkt jordad (TN-system)			
- vid gemensam jordning	100 V	100 V	50 V
- vid skilda jordningar	200 V	200 V	100 V
Utsatta delar i driftrum eller på sådana platser där människor ofta vistas	400 V	300 V	100 V
Övriga delar	800 V	600 V	200 V

I anläggningar med nominell spänning över 25 kV inom ett icke direktjordat system ska förhöjda markpotentialer som uppträder vid en jordslutning jämnas ut. Alternativt ska den spänningssättning av jordade delar som jordslutningsströmmen orsakar begränsas till värdena i Tabell 1.

Tabell 1 anger högsta spänningssättning vid enpolig jordslutning. Det bör observeras att dubbla jordfel där felställena är geografiskt skilda troligen ger större lokal spänningssättning.

Vad som menas med utjämnad spänning anges i Allmänna råd enligt:

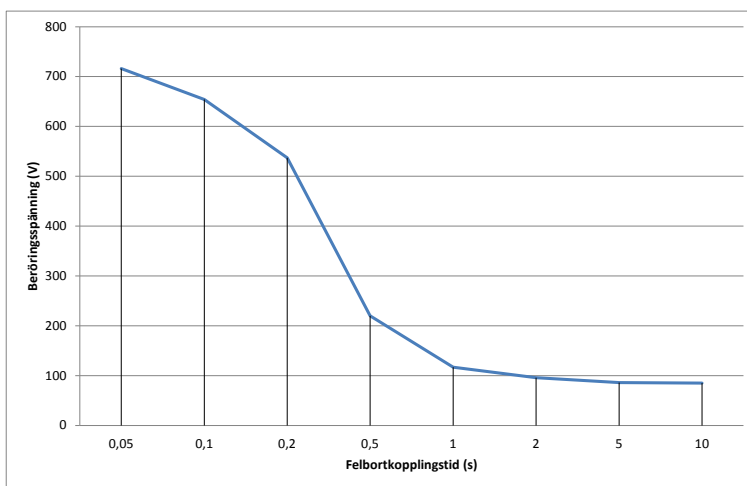
Spänning och markpotentialer bör mätas och kontrolleras. Därvid bör hänsyn tas till att markpotentialen i ett icke direktjordat system anses vara utjämnad om de förekommande spänningarna inte överstiger 150 V vid en jordslutning som kopplas bort inom 5 sekunder respektive 240 V vid en jordslutning som kopplas bort inom 2 sekunder.

Spänningarna kan fastställas som produkten av en resistans om 3 000 ohm och den ström som vid jordslutning flyter genom resistansen.

För nät med nominell spänning över 25 kV kan större jordfelsströmmar accepteras än vad som oftast är fallet för 10 – 20 kV distributionsnät, om jordtagen uppfyller kravet på spänningsutjämning.

2.3.2 Svensk Standard SS-EN 50522

I rubricerad standard [7] behandlas krav på jordningssystem baserat på begränsning av beröringsspänning. Standarden går relativt djupt in på bakgrunden till krav på spänningssättning av anläggningsdel med avseende på risk för hjärtkammerflimmer hos person som utsätts för aktuell beröringsspänning. Tillåten beröringsspänning anges med värden som är beroende av felbortkopplingstid enligt Figur 1.



Figur 1 Tillåten beröringsspänning enligt SS-EN 50522

Med tanke på att tillåten felbortkopplingstid kan vara upp till 5 s i nät med friledning, bör man dimensionera näten så att beröringsspänningen begränsas till ca 80 V. Kravet på beröringsspänning är enligt [7] uppfyllt om:

- *Anläggningen ifråga blir en del av ett utbrett jordningssystem, eller*
- *Jordpotentialstegringen, bestämd genom mätning eller beräkning, inte överstiger dubbla värdet av den tillåtna beröringsspänningen enligt Figur 1.*

För att kunna uppskatta jordpotentialstegringen krävs uppgift om storlek hos spänningssättande ström och aktuell jordtagsresistans.

Den spänningssättande strömmen är den ström som flyter till jord i det lokala jordtaget.

Vid jordfel kommer en viss del av felströmmen att återledas via luftledningars jordledare och jordkablar metallmantlar. Standarden definierar en reduktionsfaktor r enligt:

$$r = \frac{I_E}{3I_0} = \frac{3I_0 - I_{EW}}{3I_0}$$

där

I_{EW} är strömmen i markledaren/kabelmanteln

I_E är jordreturströmmen (spänningssättande ström)

$3I_0$ är summan av nollföljdsströmmarna till felstället

Reduktionsfaktorn påverkar direkt spänningssättningen vid jordfel.

Om det lokala jordtaget har jordtagsresistansen R_E fås jordpotentialstegringen enligt:

$$U_E = r \cdot 3I_0 \cdot R_E$$

För luftledning utan markledare blir $r = 1$, dvs. ingen reduktion.

Benämningen reduktionsfaktor kan vara lite missvisande då det rör sig om hur stor andel av jordfelsströmmen som ger potentialstegring.

För kabel kommer viss återledning att ske via kabelmantel där faktorn r kommer att vara beroende av mantelarea, kabellängd och markresistivitet. I många fall förläggs kabeln tillsammans med en seriegående markledare vilket reducerar reduktionsfaktorn ytterligare.

En överslagsberäkning för en trefaskabel $3 \times 95/25 \text{ mm}^2$ ger följande reduktionsfaktor:

$r \approx 0,85$ utan medföljande markledare

$r \approx 0,5$ med medföljande markledare ($25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$)

Det skall observeras att dessa värden är beroende av ett antal faktorer, främst markresistiviteten.

Med de felbortkopplingstider som är aktuella i de spoljordade mellanspänningsnäten (upp till 5 s) skall maximal beröringsspänning begränsas till maximalt 80 V. Detta ger den maximala jordpotentialstegringen 160 V.

2.3.3 Energimarknadsinspektionens föreskrifter och allmänna råd om krav som ska vara uppfyllda för att överföringen av el ska vara av god kvalitet; EIFS 2013:1

Den del av kraven på god leverans kvalitet av el som har bäring på felbortkoppling är främst antal och varaktighet av leveransavbrott.

Nedanstående krav för avbrott i elöverföring anges i [2]:

"Överföringen av el till lågspänningskunder är av god kvalitet, med avseende på antalet oaviserade långa avbrott, när antalet oaviserade långa avbrott per kalenderår inte överstiger tre i uttags- eller inmatningspunkten.

Om antalet oaviserade långa avbrott per kalenderår överstiger elva i uttags- eller inmatningspunkten är överföringen av el inte av god kvalitet. Avbrott som uppkommer under felsökning och felavhjälpning ska inte ingå vid beräkningen av antalet avbrott enligt första stycket."

Vidare ges riktlinjer för varaktigheten vid avbrott i elleverans:

"I de uttags-, eller gränspunkter i elnät där det under normala matnings- och driftförhållanden är möjligt att överföra mer än två megawatt effekt får avbrottstiderna vid avbrott inte vara längre än vad som anges i nedanstående tabell för respektive återställningsförhållande.

Lastintervall (Megawatt)	Avbrottstid vid normala återställningsförhållanden (timmar)	Avbrottstid vid onormala återställningsförhållanden (timmar)
$2 < \text{Last} \leq 5$	12	24
$5 < \text{Last} \leq 20$	8	24
$20 < \text{Last} \leq 50$	2	24
$50 < \text{Last}$	2	12

Normala återställningsförhållanden är sådana drift- och väderleksförhållanden eller andra liknande förhållanden som inte hindrar att felavhjälpning påbörjas omgående efter att ett fel i elnätet inträffat. Onormala återställningsförhållanden är sådana förhållanden som medför att felavhjälpning inte skäligen kan påbörjas omgående."

Det är naturligtvis omöjligt att undvika leveransavbrott orsakade av vädrets makter och andra naturfenomen. Ovanstående kan dock tolkas som att avbrott på grund av felaktig skyddsfunktion måste minimeras. Vidare bör feldetektering, felbortkoppling, fellägesbestämning och reparationsrutiner vara utformade för att kunna återuppta elleveranser så snabbt som möjligt efter driftstörningar. Eftersom en stor andel av avbrotten orsakas av jordfel i mellanspänningsnät är utformning, parameterinställning och underhåll av jordfelskyddssystemen av stor betydelse.

2.4 Förslag till kravformulering

Ovan är redovisat vad nätägare har att hålla sig till beträffande jordfel i mellanspänningsnät. Med detta som grund och vad som betraktas som god praxis kan kraven specificeras i punktform:

- Jordfelsströmmen skall begränsas så att föreskriftskraven uppfylls. Detta gäller vid normala driftsituationer. Kortvarigt måste vissa avvikelser accepteras:
 - Direkt efter bortkoppling av felbehäftad anläggningsdel (ledning eller kabel) då avstämning av nollpunktsreaktor inte hunnit justeras
 - Kortvarigt vid underhåll/utbyte av nollpunktsreaktor.
- Felbortkopplingssystemet för jordfel skall ha redundans:
 - Ordinarie felbortkopplingssystem skall detektera och koppla bort jordfel med föreskriven känslighet och inom föreskriven tid.
 - Ordinarie felbortkoppling skall vara selektiv, dvs. felbortkoppling skall ske så att bortkoppling av icke felbehäftade anläggningsdelar minimeras.

- Reservbortkoppling skall uppfylla kraven på känslighet och alltid men oselectiv felbortkoppling kan accepteras.
- Redundanta jordfelsskyddssystem skall vara separerade från varandra i rimlig omfattning: DC-matning från skilda batterisystem eller skilda huvudsäkringar i samma batterisystem. Separerat montage av kablar. Skild spänningsmatning (U_0) till redundanta skydd
- Vid inträffade jordfel skall jordfelsskyddens funktion kontrolleras:
 - Var felbortkoppling korrekt?
 - Har skydd för de icke felbehäftade anläggningsdelarna fungerat korrekt (start av skydd, rätt riktning, mm)
- Vid inställning av jordfelsskydd skall kontrolleras om ledningarnas/kablarnas serieimpedans i nollföljd påverkar jordfelsströmmens storlek och skyddens känslighet.

3 Olika typer av mellanspänningsnät

Nedan beskrivs olika typer av mellanspänningsnät och dess egenskaper, speciellt beträffande jordfelsproblematiken.

3.1 Landsbygdsnät med enbart friledningar

Traditionellt har distributionsnät på landsbygden av ekonomiska skäl byggts med enbart friledningar (blanktråd och med belagt lina). Dessa nät har följande egenskaper och förutsättningar.

- Näten har relativ begränsad kapacitiv koppling mellan faser och jord vilket innebär att den kapacitiva jordfelsströmmen är begränsad
- Näten har ofta stor geografisk utbredning
- Friledningarna är normalt inte "trädsäkra" vilket innebär att näten utsätts för relativt många väderrelaterade jordfel
- De jordfel som inträffar kan ha stor resistans till jord i felstället vilket ger krav på mycket känsliga jordfelsskydd [1]
- De enskilda jordtagen i landsbygdsnäten är normalt inte sammankopplade med andra jordtag eftersom friledningarna oftast inte har markledare som förbinder jordtagen med varandra

3.2 Landsbygdsnät med blandat friledningar och kabledningar

Distributionsnät på landsbygden har under de senaste åren genomgått en omfattande kablifiering. Dock bibehålls vissa friledningar där risk för väderrelaterade driftstörningar, främst trädpåfall, är liten. Dessa nät har följande egenskaper och förutsättningar.

- Näten har ökad kapacitiv koppling mellan faser och jord vilket innebär att den kapacitiva jordfelsströmmen kan vara betydande
- Näten har ofta stor geografisk utbredning
- Total kabellängd som ansluts till ett enskilt fack kan vara betydande vilket innebär stor generering av kapacitiv jordfelsström
- De jordfel som inträffar på friledningssträckor kan ha stor resistans till jord i felstället vilket ger krav på mycket känsliga jordfelsskydd [1]
- De enskilda jordtagen i landsbygdsnäten är normalt inte sammankopplade med andra jordtag på friledningssträckorna, eftersom friledningarna oftast inte har markledare som förbinder jordtagen med varandra

3.3 Landsbygdsnät med enbart kabelledningar

Distributionsnät på landsbygden har under de senaste åren genomgått en omfattande kablifiering. Vissa av dessa nät har enbart kabel. Dessa nät har följande egenskaper och förutsättningar.

- Näten har stor kapacitiv koppling mellan faser och jord vilket innebär att den kapacitiva jordfelsströmmen kan vara betydande
- Näten har ofta stor geografisk utbredning
- Total kabellängd som ansluts till ett enskilt fack kan vara betydande vilket innebär stor generering av kapacitiv jordfelsström
- Myndighetskrav på mycket känsliga jordfelsskydd [1] gäller inte för nät med enbart kabel
- De enskilda jordtagen är sammankopplade med andra jordtag via kabelskärm och eventuell längsgående markledare

3.4 Tätortsnät med blandat friledningar och kabelledningar

Tätortsnät har sedan länge varit kablifierade till stora delar. I vissa fall har dock dessa nät ledningssträckor med friledning. Dessa nät har följande egenskaper och förutsättningar.

- Näten har stor kapacitiv koppling mellan faser och jord vilket innebär att den kapacitiva jordfelsströmmen kan vara betydande
- Näten har ofta begränsad geografisk utbredning
- Total kabellängd som ansluts till ett enskilt fack är begränsad vilket innebär liten generering av kapacitiv jordfelsström i varje fack
- De jordfel som inträffar på friledningssträckor kan ha stor resistans till jord i felstället vilket ger krav på mycket känsliga jordfelsskydd [1]
- De enskilda jordtagen är sammankopplade med andra jordtag via kabelskärm och eventuell längsgående markledare samt annat ledande material i mark (metalliska rörledningar med stor utsträckning). Därmed fås i praktiken bra jordtag

3.5 Tätortsnät med enbart kabelledningar

Tätortsnät har sedan länge varit helt kablifierade. Dessa nät har följande egenskaper och förutsättningar.

- Näten har stor kapacitiv koppling mellan faser och jord vilket innebär att den kapacitiva jordfelsströmmen kan vara betydande
- Näten har ofta begränsad geografisk utbredning
- Total kabellängd som ansluts till ett enskilt fack är begränsad vilket innebär liten generering av kapacitiv jordfelsström i varje fack
- Myndighetskrav på mycket känsliga jordfelsskydd [1] gäller inte för nät med enbart kabel

- De enskilda jordtagen är sammankopplade med andra jordtag via kabelskärm och eventuell längsgående markledare samt annat ledande material i mark (vattenledningsrör mm.)

3.6 Uppsamlingsnät för vindkraftparker

Uppsamlingsnät för vindkraftparker utgörs normalt av rena kabelnät med en konstruktionsspänning om 36 kV eller lägre. Dessa nät har följande egenskaper och förutsättningar.

- Näten har stor kapacitiv koppling mellan faser och jord vilket innebär att den kapacitiva jordfelsströmmen kan vara betydande
- Näten kan ha relativt stor geografisk utbredning
- Total kabellängd som ansluts till ett enskilt fack kan vara betydande vilket innebär stor generering av kapacitiv jordfelsström
- Myndighetskrav på mycket känsliga jordfelskydd [1] gäller inte för nät med enbart kabel
- De enskilda jordtagen är sammankopplade med andra jordtag via kabelskärm och eventuell längsgående markledare
- Vid jordfel i uppsamlingsnätet kommer felet att spänningssättas, under en kort tid, från vindkraftverken även sedan anslutningskabeln bortkopplats från överliggande nät

3.7 Icke effektivt jordade regionnät

Regionnät med en konstruktionsspänning över 36 kV men inte över 84 kV i Sverige är, med något enstaka undantag, icke effektivt jordade. I dessa nät finns ofta både friledning och kabelledning. Dessa nät har följande egenskaper och förutsättningar.

- Traditionellt utgörs dessa nät huvudsakligen av friledningar men en ökad grad av kablifiering kan förutses
- Näten har relativt stor kapacitiv koppling mellan faser och jord vilket innebär att den kapacitiva jordfelsströmmen kan vara betydande
- Näten har relativt stor geografisk utbredning
- Myndighetskrav spänningssättning av jordad anläggningsdel är inte lika strikt eftersom jordfel i dessa nät sällan påverkar lågspänningsnät

3.8 Industrinät

Industrinät har normalt spänningsnivå 6 eller 12 kV och är normalt helt kablat. Dessa nät har följande egenskaper och förutsättningar.

- Uppbyggnaden av industrinät är mycket varierande beroende på den aktuella industriprocessen
- Näten har liten geografisk utbredning

- Myndighetskrav på mycket känsliga jordfelskydd [1] gäller inte för nät med enbart kabel
- Vissa industrinät, t.ex. pappersmassfabriker, har ofta egna produktionsanläggningar. Detta innebär att jordfel i anläggningen även spänningssätts från dessa generatorer

3.9 Alternativa principer för mellanspänningsnät

I dagsläget kännetecknas mellanspänningsnäten inom spänningsområdet med konstruktionsspänning om 36 kV och lägre av följande:

- Näten drivs med radiell struktur vilket innebär att ett ledningsfel ger bortkoppling av alla elkunder anslutna till feldrabbad ledning
- Näten är icke effektivt jordade och jordfelsströmmen begränsas kraftigt jämfört med nätens kortslutningsström
- De flesta nät har felströmsmatning endast från överliggande nät
- Ett ökat antal distributionsnät har decentraliserad generering ansluten (främst vindkraft och solbaserad generering)
- Ökad grad av kablifiering ger ökad generering av reaktiv effekt och därmed tendens till överspänningar vid normal drift
- Ökad grad av generering ger ökade kapacitiva jordfelsströmmar

Nedan diskuteras alternativa principer för uppbyggnad och drift av mellanspänningsnät.

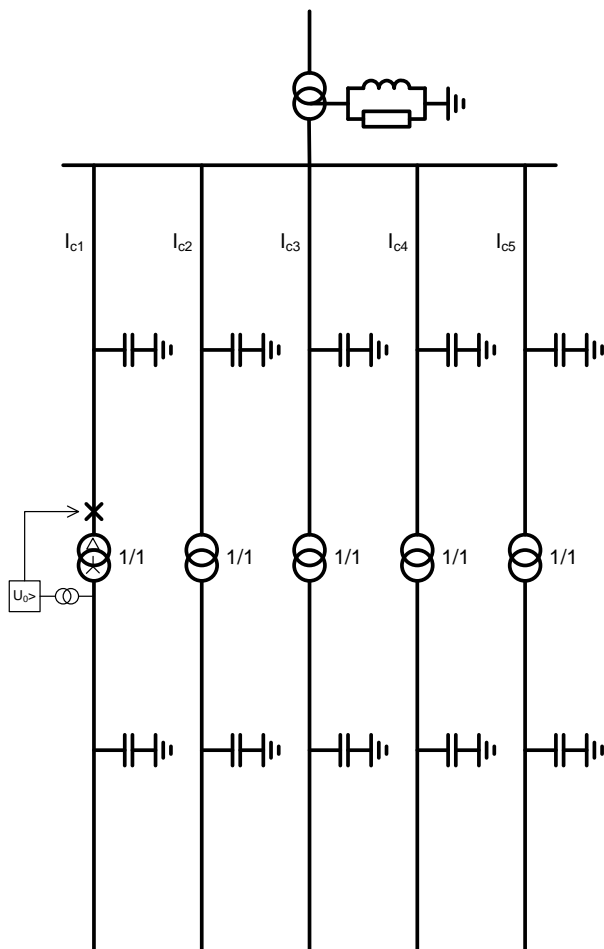
3.9.1 Maskade mellanspänningsnät

Mellanspänningsnäten drivs i dag normalt med radiell matning. Detta innebär naturligtvis att vid ledningsfel bortkopplas ett antal elkunder. Om man driver näten med maskad struktur kan antal och varaktighet av leveransavbrott troligen minskas.

Felbortkopplingssystemen i mellanspänningsnäten är oftast anpassade för radiell drift. Därför måste skydden anpassas för att möjliggöra maskad drift. För att möjliggöra detta är det lämpligt att använda skyddssystem med kommunikation mellan nätstationer. Detta diskuteras i 6.8.

3.9.2 Införande av "spärrar" för nollföljdsström och nollföljdsspänning

Ledningar med stor kapacitiv generering av jordfelsström medför svårigheter att uppfylla myndighetskraven på spänningssättning av skyddsjordade anläggningsdelar och känslighetskraven för detektering och bortkoppling av högresistiva jordfel. Dessa svårigheter kan reduceras om näten delas upp nollföljdsmissigt. Detta kan göras med serietransformatorer i näten enligt Figur 2. Denna transformator har omsättningen 1/1 i figuren men i Finland är denna lösning använd med transformatorer med omsättning 10/1 kV.



Figur 2 Exempel på nät med "spärr" för nollföljdsström med transformatorer

I figuren indikeras även hur en enkel jordfelskyddsfunktion kan appliceras för den avskilda delen.

Ett alternativ till detta är att applicera en speciell seriereaktor i stället för en transformator. Denna seriereaktor är konstruerad så att den utgör en stor serieimpedans för nollföljdsström medan den har liten impedans för plus- och minusföljdsström (lastström).

3.9.3 Effektiv systemjordning av mellanspänningsnät

I andra länder kan mellanspänningsnät vara direktjordade eller lågohmig jordade. Detta innebär att jordfelsströmmen är i samma storleksordning som nätets kortslutningsströmmar. Med nuvarande regler är detta inte realistiskt för svensk del.

4 Tekniska förutsättningar

Mellanspänningsnät är uppbyggda på olika sätt, som leder till olika tekniska lösningar för utformningen av system för betryggande drift- och personsäkerhet.

Inmatning av felsström i samband med jordfel i reaktansjordade mellanspänningsnät kan i princip komma från:

- Transformatorer anslutna till Överliggande direktjordade nät
- Transformatorer anslutna till Överliggande högimpedansjordade nät
- Transformatorer anslutna till underliggande högimpedansjordade nät med ansluten produktion eller maskning till Överliggande nät
- Transformatorer anslutna till underliggande direktjordade nät med ansluten produktion
- Elproduktionsanläggningar direkt ansluten eller ansluten via aggregattransformator till det betraktade mellanspänningsnätet

Transformeringen av nollföljdsström mellan olika nät (spänningsnivåer) beror till stor del på transformatorns kopplingsart och jordning, och i vissa fall på även transformator kärnans utformning.

Mellanspänningsnät matas normalt från överliggande nät med systemspänning inom intervallet 40 – 130 kV. Det finns även exempel på reaktansjordade mellanspänningsnät som matas direkt från 220 kV.

Matningen från överliggande nät bidrar med den spänning som matar ett jordfel i mellanspänningsnätet även om strömmen från det överliggande nätet har låg nivå. Det kan uttryckas som att överliggande nät bidrar med plusföljdsspänning och plusföljdsström men normalt inte med motsvarande nollföljdsspänning och nollföljdsström. Transformatorerna för matning från överliggande nät kan normalt inte transformera nollföljdsstorheter. Dock finns vissa undantag där transformatorer med kopplingsart YNyn används.

Distribuerad generering, exempelvis enstaka vindkraftaggregat, är oftast anslutna till mellanspänningsnät. Detta innebär att de bidrar till spänningsmatning av jordfel i det aktuella nätet. Skyddsutformningen för jordfel måste därför inbegripa detektering och bortkoppling av felströmsinmatning från produktionsanläggningar anslutna till nätet.

Nedan beskrivs och diskuteras ett antal viktiga tekniska förutsättningar som påverkar detektering och bortkoppling av jordfel.

4.1 Matande transformator från effektivt jordat nät

För transformator som matar mellanspänningsnät är kopplingsarten av betydelse. Den avgör hur nollpunktsutrustning kan anslutas samt nollföljdskoppling mellan upp- och nedspänningssida av transformatorn. Vidare är nollföljdsimpedansen för transformatorn beroende av kopplingsarten.

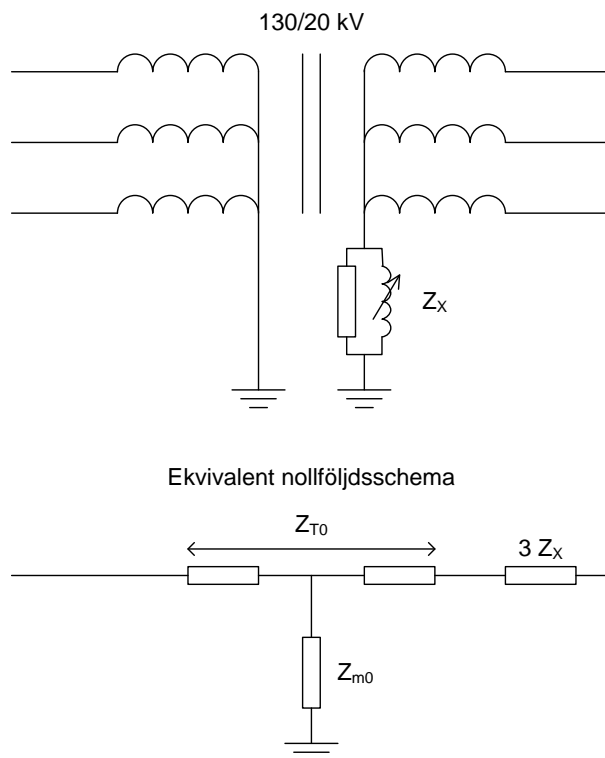
Transformatorernas impedans för nollföljdsström kan åskådliggöras med ekvivalenta scheman för varje kopplingsart.

Vid val av kopplingsart för transformatorer är man oftast styrd av hur man valt kopplingsart historiskt. Ett nätbolag kan t.ex. ha kopplingsart YNy0 vid transformering 130/20 kV medan ett annat nätbolag kan ha kopplingsarten YNd11.

Vid matning från direktjordat nät (130 kV) har vi ett antal alternativ:

4.1.1 YNyn kopplad transformator

I Figur 3 visas ett exempel på ekvivalent schema för en 130/20 kV transformator med nollpunktsreaktor (Petersenspöle) och nollpunktsmotstånd anslutna till 20 kV nollpunkten.

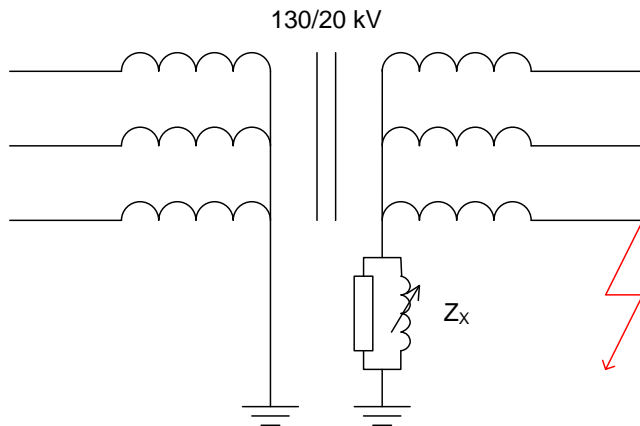


Figur 3 Exempel på YNyn kopplad transformator med nollpunktsutrustning

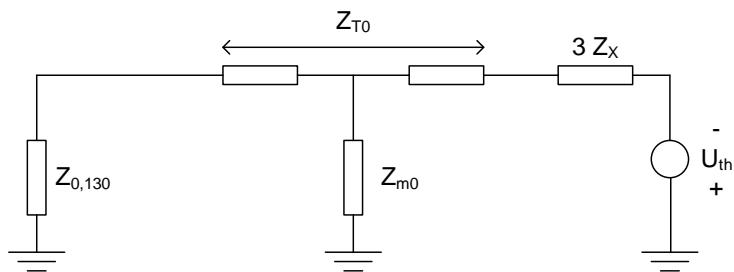
Z_{T0} är transformatorns serieimpedans för nollföljdsström vilken är av samma storleksordning som kortslutningsimpedansen eftersom man får mmk-balans för nollföljd, dvs. Z_{T0} är omkring 10 %.

Z_{m0} är transformatorns magnetiseringsimpedans för nollföljdsström.

Med denna kopplingsart fås transformering av nollföljdsström och nollföljdsspänning mellan spänningsnivåerna. Hur stor denna transformering blir är beroende av bakomliggande nollföljdsimpedans på matande sida av transformatorn. Det ekvivalenta nollföljdsschemat vid jordfel på nedsidan visas i Figur 4. Eftersom Z_{m0} är stor kommer bakomliggande nollföljdimpedans i felstället att bli ca $Z_0 = 3Z_x + Z_{T0} + Z_{0,130}$.

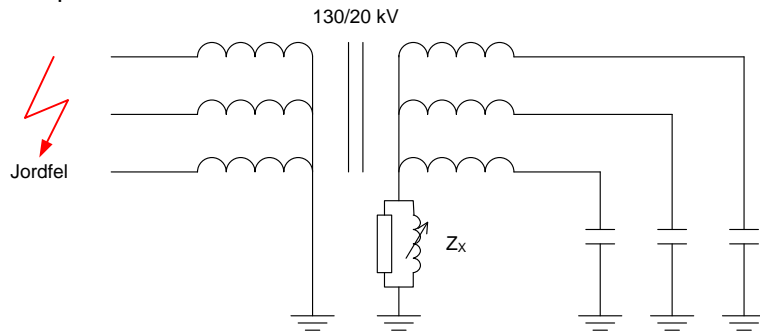


Ekvivalent nollföjdsschema

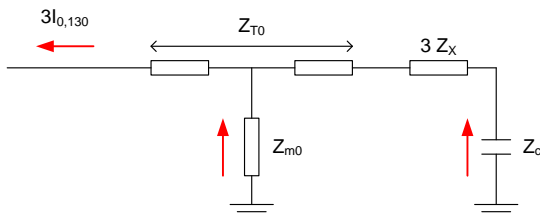


Figur 4 Jordfel på nedsidan av transformatorn

Vid jordfel i det direktjordade 130 kV nätet fås en viss nollföjdsström på 20 kV nivån (Figur 5). Denna ström är beroende av impedansen i 20 kV nätet. Med väl avstämd nollpunktsreaktor bestäms denna impedans främst av nollpunktsmotståndets storlek.



Ekvivalent nollföjdsschema



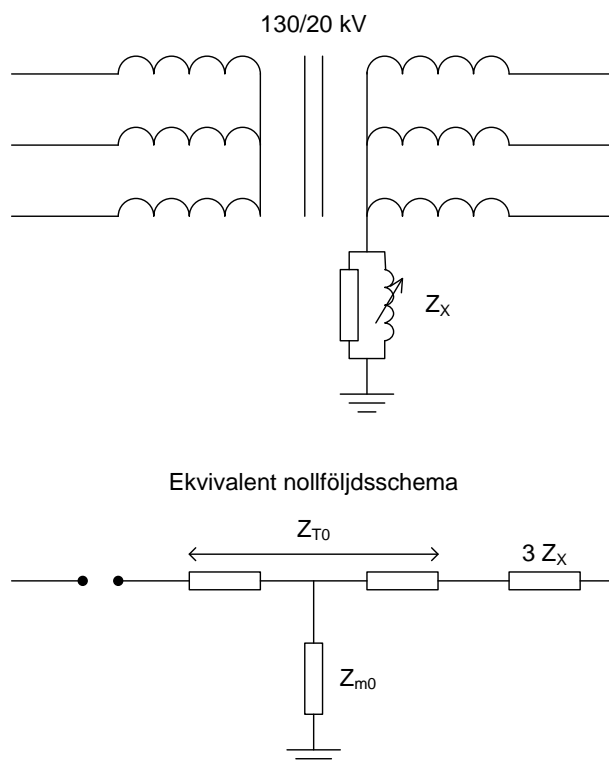
Figur 5 130 kV jordfel med inverkan på nollföljdssystemet i 20 kV nätet

Det finns risk för oönskad skyddsfunktion hos jordfelsskydden i 20 kV nätet. Oftast är dock felbortkopplingen på 130 kV nivån så snabb att 20 kV skyddet hinner återgå innan utlösning. Vidare kan man teoretiskt få hög spänning på 20 kV nivån, men en sådan överspänning kommer troligen att begränsas av mättning hos krafttransformatorn.

Vid jordfel i det icke effektivt jordade 20 kV nätet kommer nollföljdsimpedansen i 130 kV nätet att påverka nollföljdsströmmen på 20 kV nivån. Normalt är den bakomliggande nollföljdsimpedansen i 130 kV nätet liten i förhållande till transformatorns magnetiseringsimpedans Z_{m0} för nollföljdsström.

4.1.2 Yyn kopplad transformator

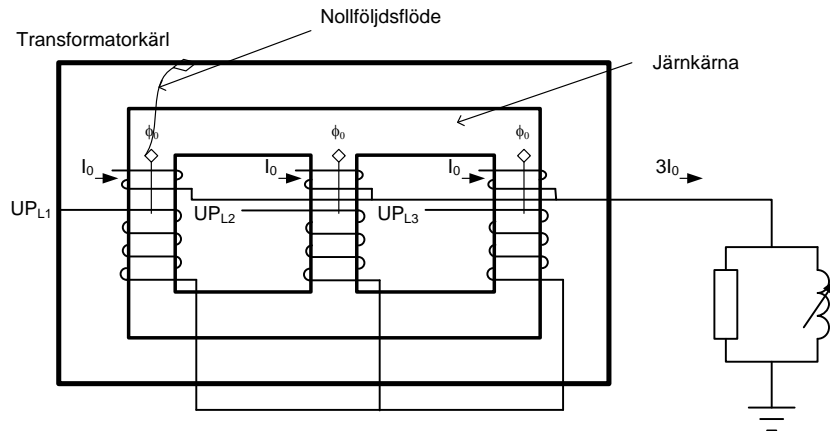
I Figur 6 visas ett exempel på ekvivalent schema för en 130/20 kV Yyn-kopplad transformator med nollpunktsreaktor och nollpunktsmotstånd anslutna till 20 kV nollpunkten.



Figur 6 Exempel på Yyn kopplad transformator med nollpunktsutrustning

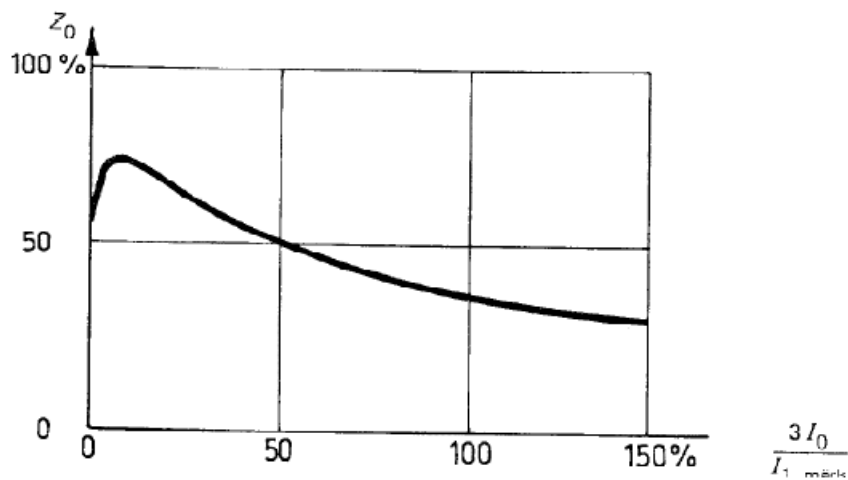
Eftersom 130 kV lindningens nollpunkt inte är jordad kan inte nollföljdsström flyta i denna lindning. Vid jordfel i 20 kV nätet kommer strömmen i 20 kV nollpunktsutrustningen att starkt påverkas av transformatorns magnetiseringsimpedans för nollföljdsström. Denna nollföljdsimpedans är beroende av transformatorns uppbyggnad: trebent eller fembent transformator kärna.

Om transformatorn har trebent kärna kan situationen beskrivas enligt Figur 7.



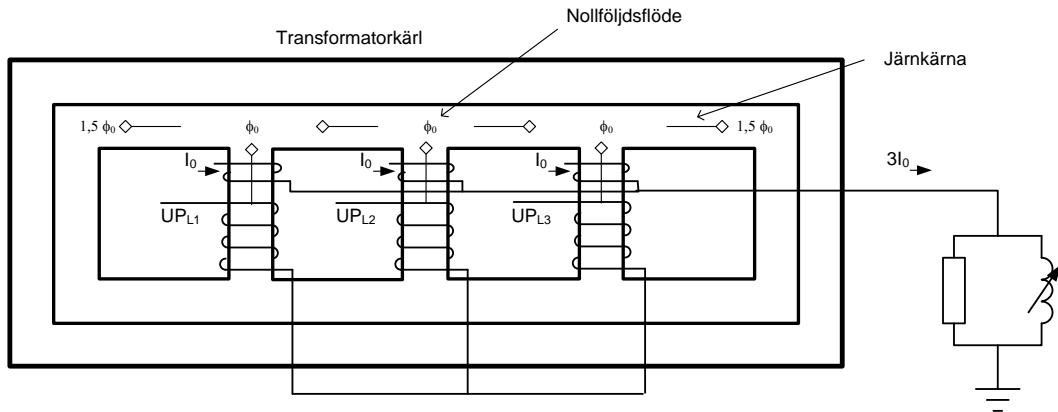
Figur 7 Nollföljdsström i en trebent Yyn transformator med nollpunktsutrustning på nedspänningssidan

Magnetflödet i kärnan som induceras av nollföljdsströmmen kan inte sluta sig i järnkärnan. Eftersom flödet till viss del sluter sig i omagnetiskt material (oljan i transformatorn) bestäms transformatorns nollföljdsimpedans till stor del av hur transformatorn är byggd. Typiska värden på nollföljdsimpedansen visas i Figur 8. Det kan vidare konstateras att nollföljdsimpedansen dessutom är strömerberoende.



Figur 8 Typiska värden på nollföljdsimpedans för en Yyn-kopplad transformator med trebent kärna och utan deltalindning [4]

Med fembent kärna fås nollföljdsflöde enligt Figur 9.

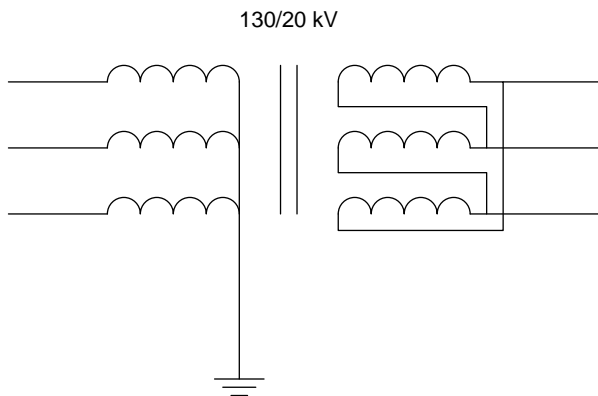


Figur 9 Nollföljdsström i en fembent Yyn transformator med nollpunktsutrustning på nedspänningssidan

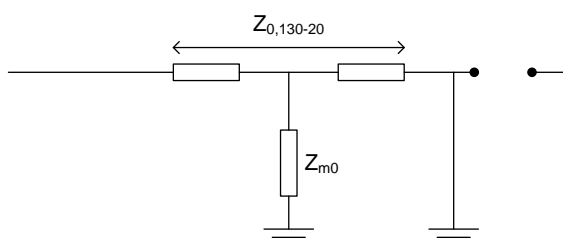
Magnetflödet inducerat från nollföljdsström kommer att sluta sig genom transformatorns järnkärna. Magnetiseringsimpedansen för nollföljdsström blir därför i samma storleksordning som magnetiseringsimpedansen för plusföljdsström, dvs. mycket stor. Detta innebär att anslutning av nollpunktsutrustning till en Yyn kopplad transformator med fembent kärna och utan utjämningslindning är meningslös eftersom transformatorns nollföljdsimpedans i serie med nollpunktsutrustningen är mycket stor och reducerar därför nollpunktsreaktors funktion betydligt.

4.1.3 YNd kopplad transformator

I Figur 10 visas ett exempel på ekvivalent schema för en 130/20 kV YNd-kopplad transformator.



Ekvivalent nollföljdsschema



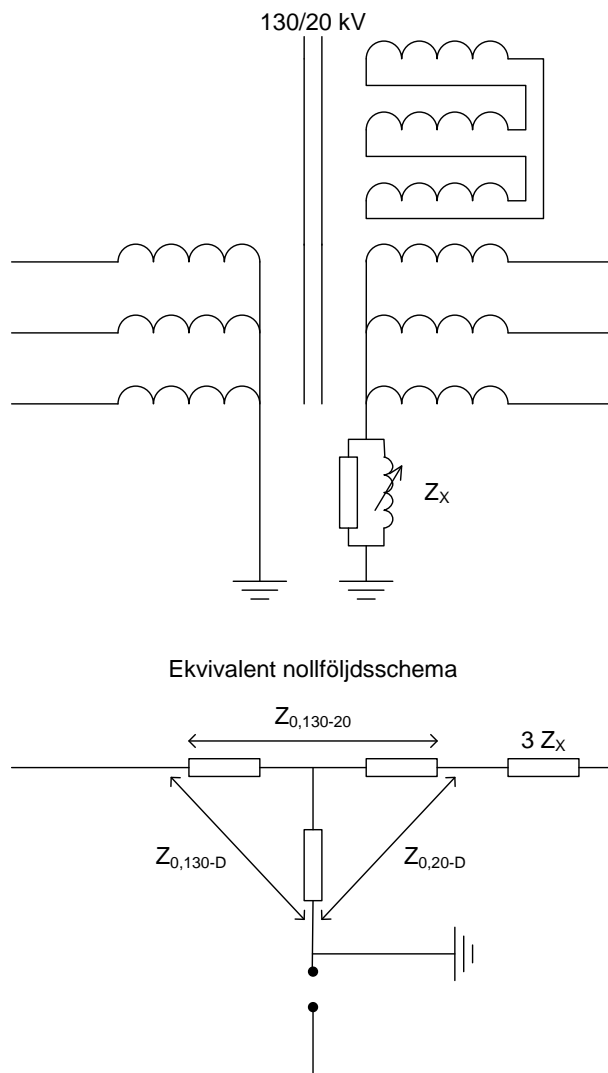
Figur 10 Exempel på YNd kopplad transformator

I denna typ av transformator kan inte nollföljdsström transformeras mellan spänningsnivåerna. Däremot kan nollföljdsström i 130 kV lindningen ge en cirkulerande ström i den deltakopplade 20 kV lindningen. Därigenom blir transformatorns nollföljdsimpedans, sedd från 130 kV sidan, i samma storleksordning som transformatorns kortslutningsimpedans.

Det är inte möjligt att ansluta nollpunktsutrustning till den delta-kopplade lindningen. Normalt krävs en separat jordningstransformator (nollpunktsbildare) på nedspänningssidan (i detta fall 20 kV).

4.1.4 YNynd kopplad transformator

I Figur 11 visas ett exempel på ekvivalent schema för en 130/20 kV YNynd-kopplad transformator, dvs. transformatorn har en deltakopplad utjämningslindning.



Figur 11 exempel på YNynd kopplad transformator

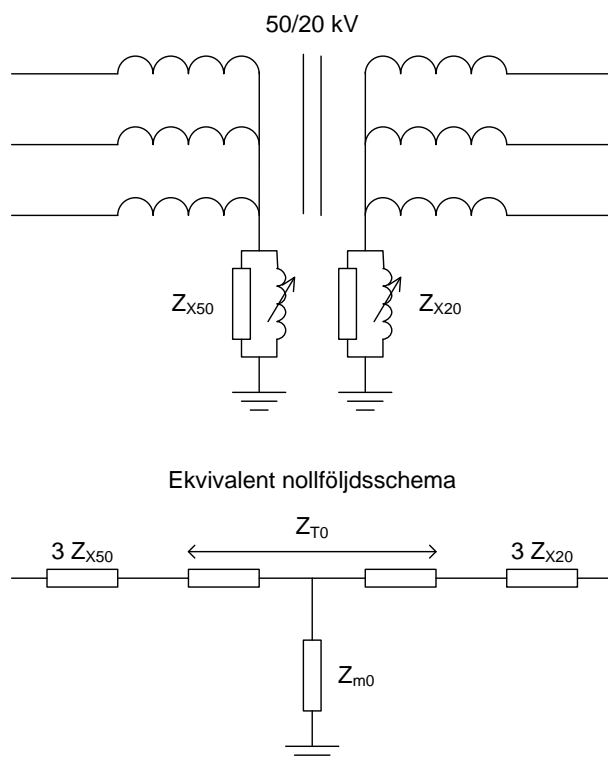
Eftersom den deltakopplade utjämningslindningen ger låg impedans till jord både sett från 130 kV-sida och 20 kV sidan fås begränsning av transformering av nollföljdsström och nollföljdsspänning mellan spänningsnivåerna.

4.2 Matande transformator från icke effektivt jordat nät

Vid matning från ett icke effektivt jordat nät med nominell spänning 40 – 70 kV har vi ett antal alternativ för transformatorernas kopplingsart. Jämfört med transformering från direktjordade nät är 40 – 70 kV näten icke effektivt jordade, dvs. bakomliggande nollföljdsimpedans är stor.

4.2.1 YNyn kopplad transformator

I Figur 12 visas ett exempel på ekvivalent schema för en 50/20 kV transformator med nollpunktsreaktor och nollpunktsmotstånd anslutna till både 50 kV och 20 kV nollpunkterna.



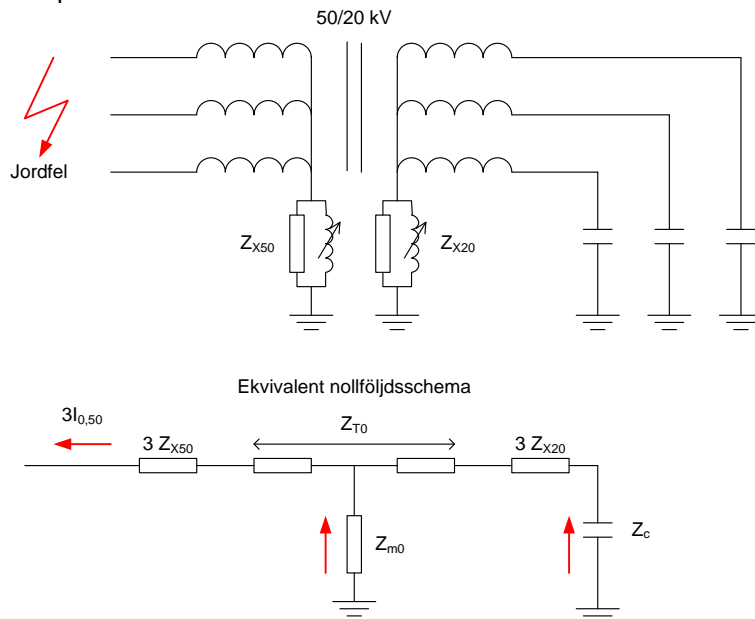
Figur 12 Exempel på YNyn kopplad transformator med nollpunktsutrustning

Z_{T0} är transformatorns serieimpedans för nollföljdsström vilken är av samma storleksordning som kortslutningsimpedansen eftersom man får mmk-balans för nollföljd, dvs. Z_{T0} är omkring 10 %.

Z_{m0} är transformatorns magnetiseringsimpedans för nollföljdsström.

Med denna kopplingsart fås transformering av nollföljdsström och nollföljdsspänning mellan spänningsnivåerna. Hur stor denna transformering blir är beroende av bakomliggande nollföljdsimpedans på matande sida av transformatorn.

Vid jordfel i det icke effektivt jordade 50 kV nätet fås en viss nollföljdsström på 20 kV nivån (Figur 13). Denna ström är beroende av impedansen i 20 kV nätet. Med väl avstämd nollpunktsreaktor bestäms denna impedans främst av nollpunktsmotståndets storlek.



Figur 13 50 kV jordfel med inverkan på nollföljdssystemet i 20 kV nätet

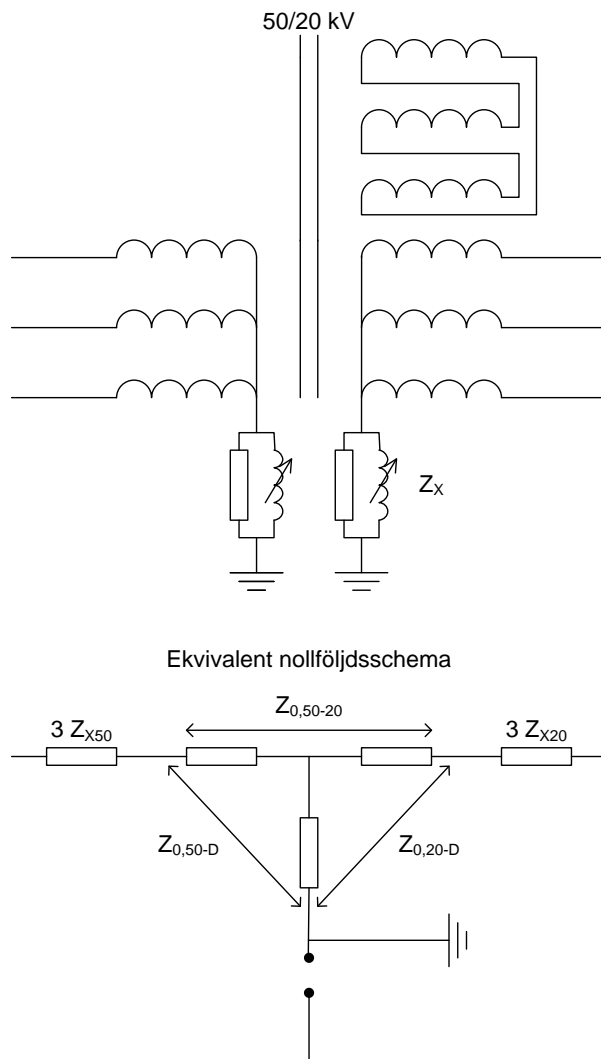
Det finns risk för oönskad skyddsfunktion hos jordfelsskydden i 20 kV nätet. Vidare kan man teoretiskt få hög spänning på 20 kV nivån, men en sådan överspänning kommer troligen att begränsas av mätning hos krafttransformatorn.

Vid jordfel i det icke effektivt jordade 20 kV nätet kommer nollföljdsimpedansen i 50 kV nätet att påverka nollföljdsströmmen på 20 kV nivån.

Det bedöms vara olämpligt att koppla nollpunktsutrustning till båda nollpunkterna av en YNyn-kopplad transformator som förbinder två icke effektivt jordade nät eftersom jordfel på en spänningsnivå kan ge funktion hos jordfelsskydd på den andra spänningsnivån.

4.2.2 YNynd kopplad transformator

I Figur 14 visas ett exempel på ekvivalent schema för en 50/20 kV transformator med nollpunktsreaktor och nollpunktsmotstånd anslutna till både 50 kV och 20 kV nollpunkterna.

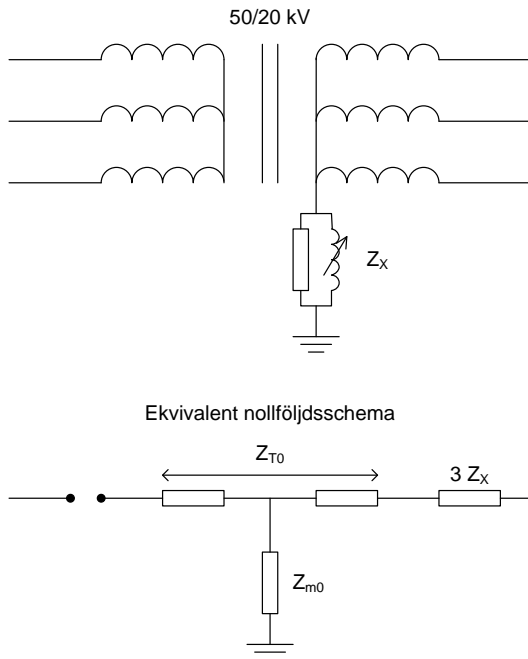


Figur 14 Exempel på YNd kopplad transformator med nollpunktsutrustning

En viss grad av transformering av nollföjdsström/nollföjds-spänning kan förekomma. Dock kommer den deltakopplade utjämningslindningen att shunta denna transformering och därmed i viss mån minska risken att jordfel i ett av näten kan ge oönskad påverkan på det andra nätet (främst vid jordfel i överliggande nät). Analys bör dock göras för varje enskilt fall.

4.2.3 Yyn kopplad transformator

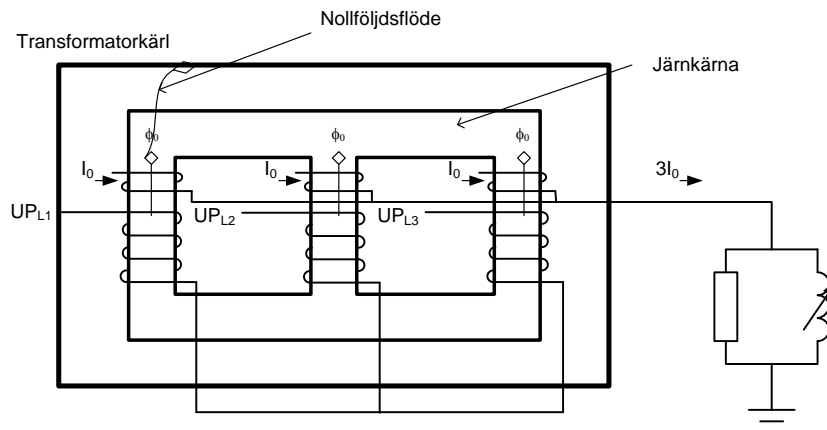
I Figur 15 visas ett exempel på ekvivalent schema för en 50/20 kV Yyn-kopplad transformator med nollpunktsreaktor och nollpunktsmotstånd anslutna till 20 kV nollpunkten.



Figur 15 Exempel på Yyn kopplad transformator med nollpunktsreaktor och nollpunktsmotstånd på 20 kV sidan

Eftersom 50 kV lindningens nollpunkt inte är jordad kan inte nollföljdsström flyta i denna lindning. Vid jordfel i 20 kV nätet kommer strömmen i 20 kV nollpunktsutrustningen att starkt påverkas av transformatorns magnetiseringsimpedans för nollföljdsström. Denna nollföljdsimpedans är beroende av transformatorns uppbyggnad: trebent eller fembent transformatorkärna.

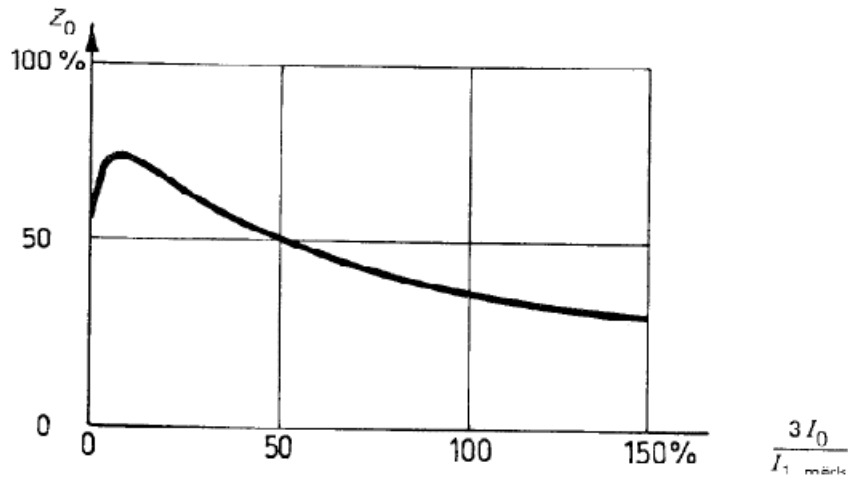
Om transformatorn har trebent kärna kan situationen beskrivas enligt Figur 16.



Figur 16 Nollföljdsström i en trebent Yyn transformator med nollpunktsutrustning på nedspänningssidan

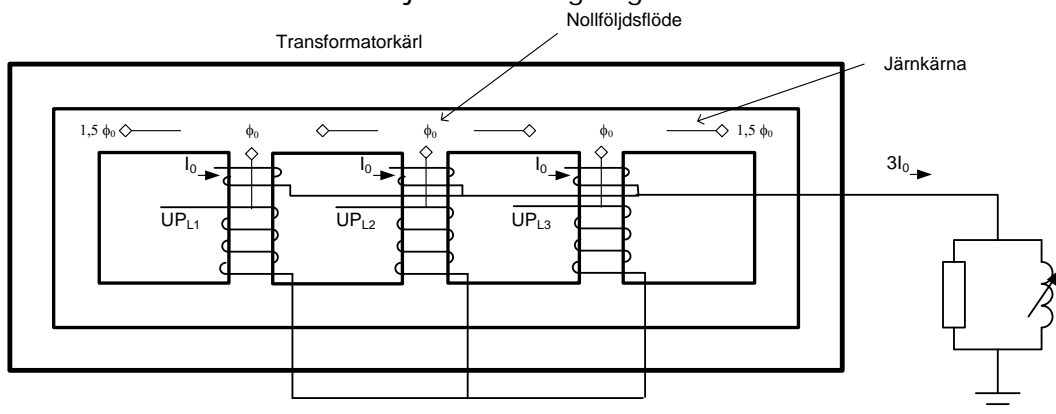
Magnetflödet i kärnan som induceras av nollföljdsströmmen kan inte sluta sig i järnkärnan. Eftersom flödet till viss del sluter sig i omagnetiskt material (oljan i transformatorn) bestäms transformatorns nollföljdsimpedans till stor del av hur transformatorn är byggd. Typiska värden på nollföljdsimpedansen visas i

Figur 17. Det kan vidare konstateras att nollföljdsimpedansen dessutom är strömberoende.



Figur 17 Typiska värden på nollföljdsimpedans för en Yyn-kopplad transformator med trebent kärna och utan deltalindning [4]

Med fembent kärna fås nollföljdsflöde enligt Figur 18.

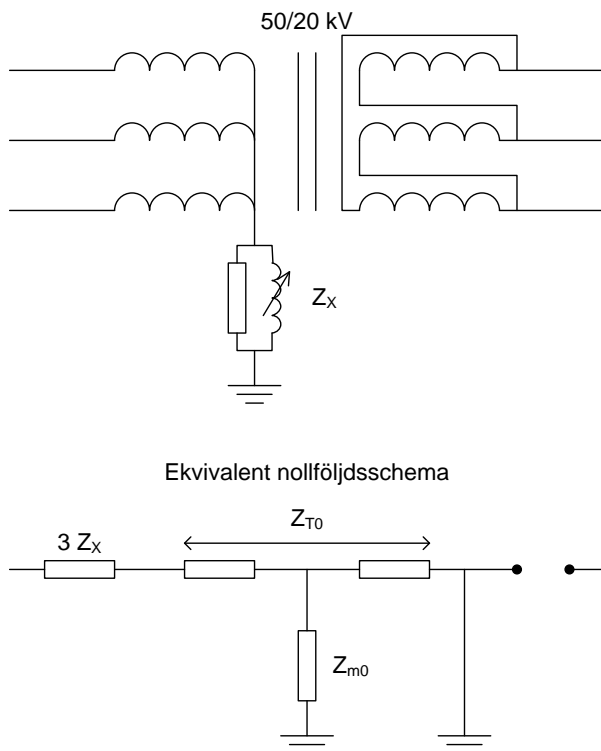


Figur 18 Nollföljdsström i en fembent Yyn transformator med nollpunktsutrustning på nedspänningssidan

Magnetflödet inducerat från nollföljdsström kommer att sluta sig genom transformatorns järnkärna. Magnetiseringsimpedansen för nollföljdsström blir därför i samma storleksordning som magnetiseringsimpedansen för plusföljdsström, dvs. mycket stor. Detta innebär att anslutning av nollpunktsutrustning till en Yyn kopplad transformator med fembent kärna och utan utjämningslindning är meningslös eftersom transformatorns nollföljdsimpedans i serie med nollpunktsutrustningen är mycket stor och reducerar därför nollpunktsreaktors funktion betydligt.

4.2.4 YNd kopplad transformator

I Figur 19 visas ett exempel på ekvivalent schema för en 50/20 kV Yyn-kopplad transformator med nollpunktsreaktor och nollpunktsmotstånd anslutna till 50 kV nollpunkten.



Figur 19 Exempel på Ynd kopplad transformator med nollpunktsreaktor och nollpunktsmotstånd på 50 kV sidan

I denna typ av transformator kan inte nollföljdsström transformeras mellan spänningsnivåerna. Däremot kan nollföljdsström i 50 kV lindningen ge en cirkulerande ström i den deltakopplade 20 kV lindningen. Därigenom blir transformatorns nollföljdsimpedans, sedd från 50 kV sidan, i samma storleksordning som transformatorns kortslutningsimpedans. Denna typ av transformator ger möjlighet att enkelt ansluta distribuerad kompensering med nollpunktsreaktor i regionnät med 30 – 70 kV nominell spänning.

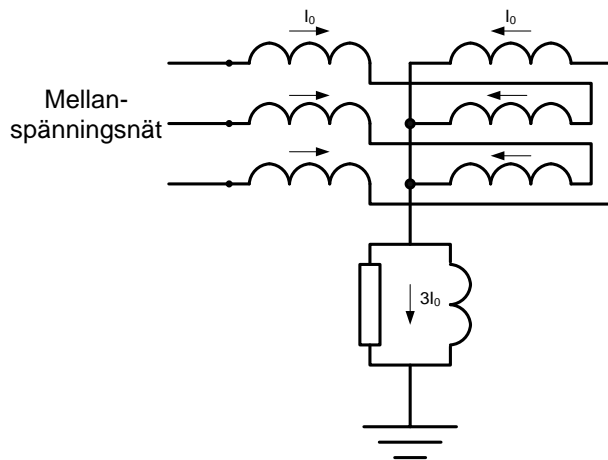
Det är inte möjligt att ansluta nollpunktsutrustning till den delta-kopplade lindningen. Normalt krävs en separat jordningstransformator på nedspänningssidan (i detta fall 20 kV).

4.3 Jordningstransformator

I de fall det icke effektivt jordade mellanspänningsnätet ansluts till överliggande nät med transformator med deltakopplad lindning på den betraktade mellanspänningssidan finns i denna transformator ingen nollpunkt för anslutning av nollpunktsutrustning. I dessa fall fordras en särskild jordningstransformator, ibland benämnd jordningstransformator.

Nollpunktbildare kan även användas då matande transformator har kopplingsart YNyn där högspänningslindningen är direktjordad eller ansluter nollpunktsutrustning.

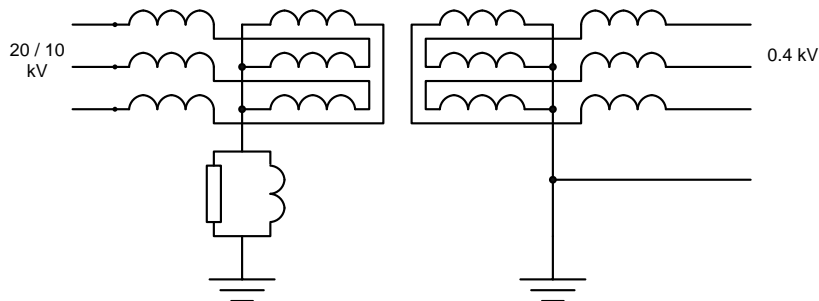
Normalt utförs jordningstransformatorn som en z-kopplad reaktor där nollpunktsutrustningen ansluts till nollpunkten enligt Figur 20.



Figur 20 Jordningstransformator med nollpunktsutrustning

Vid nollföljdsström I_0 fås mmk-balans mellan lindningspar på samma ben vilket ger nollföljdsimpedans i samma storleksordning som transformatorers kortslutningsimpedans. Denna impedans kan vara försumbar jämfört med nollpunktsutrustningens impedans. Detta måste dock specificeras för varje anläggning.

I vissa fall utgörs jordningstransformatorn av en stationstransformator där mellanspanningslindningen är z-kopplad (Figur 21).



Figur 21 Kombinerad jordningstransformator och stationstransformator

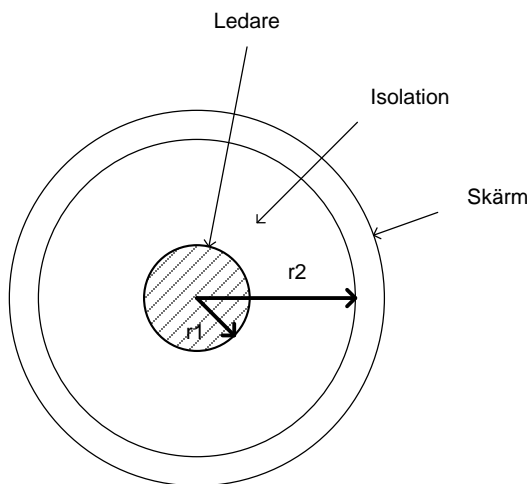
4.4 Kablars egenskaper

För jordfelskyddens funktion är kablarnas nollföljds kapacitans till jord och serieimpedans för nollföljdsström främst av intresse.

4.4.1 Nollföljds kapacitans till jord

Kablarnas kapacitans till jord (nollföljds kapacitans) är väl definierad och redovisas i kabeldata för specifika kablar såsom kapacitiv jordfelsström per kilometer (vid felresistans = 0Ω).

En enledarkabel kan ses som en inre ledare med en omgivande cylinder (skärmen), Figur 22. I princip kan nedanstående resonemang även gälla treledarkabel.



Figur 22 Tvärsnitt av kabel

Isolationen har kapacititeten $\epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0$ där ϵ_0 är kapacititeten för fria rummet och ϵ_r är den relativa kapacititeten för isolationen. För en kabel med längden l kan kapacitansen tecknas:

$$C = \frac{2\pi \times \epsilon \times l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

För en kabel med isolation av tvärbunden polyeten (PEX) med $\epsilon_r = 2,3$ kan uttrycket skrivas:

$$C = \frac{2,3}{18 \times \ln \frac{r_2}{r_1}} \mu F / km$$

Nollföljdskapacitansen för kablar brukar anges som bidrag till kapacitiv jordfelsström per kilometer, I_{jc} . Värdet är beroende av kabeldesign. För kabel inom spänningsintervallet 12 – 24 kV är I_{jc} inom intervallet 1 – 5 A/km.

4.4.2 Serieimpedans för nollföljd

Serieimpedansen för en kabel kan beräknas utgående från data för själva kabeln och dess förläggningssätt. Underlag: [5] Följande data krävs:

- Typ av kabelförband: trefaskabel eller tre enfaskablar
- Ledarmaterial: Cu eller Al
- Ledararea och ledarradie för fasledare
- Ledararea och medelradie för skärmledare
- Geometrisk uppbyggnad för trefaskabel
- Förläggningssätt för kabelförband med enledarkablar: triangel- eller platt förläggning samt avstånd mellan fasledarna
- Markresistivitet

- Ledarmaterial, ledarearea och förläggning av eventuell längsgående markledare

Vid beräkning av kabelimpedans egenimpedans för varje ledare studeras den slutna kretsen med den aktuella ledaren och återledning i mark genom en fiktiv ledare med konstant resistans och ett avstånd som är beroende av markresistiviteten:

$$\bar{Z}_{nn} = R_{ledare} + R_e + j1000 \times \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \times \ln \frac{D_e}{r_{ledare}} \Omega/km$$

Där:

R_{ledare} : ledarens resistans per km

R_e : den fiktiva återledarens resistans ($R_e = \frac{\omega\mu_0}{8} \times 1000 \Omega/km$)

ω : vinkelfrekvens ($2\pi f$)

μ_0 : permeabilitet i vakuum

D_e : avstånd till den fiktiva återledaren i jord ($D_e = 660 \times \sqrt{\frac{\rho_e}{f}}$)

ρ_e : markresistivitet

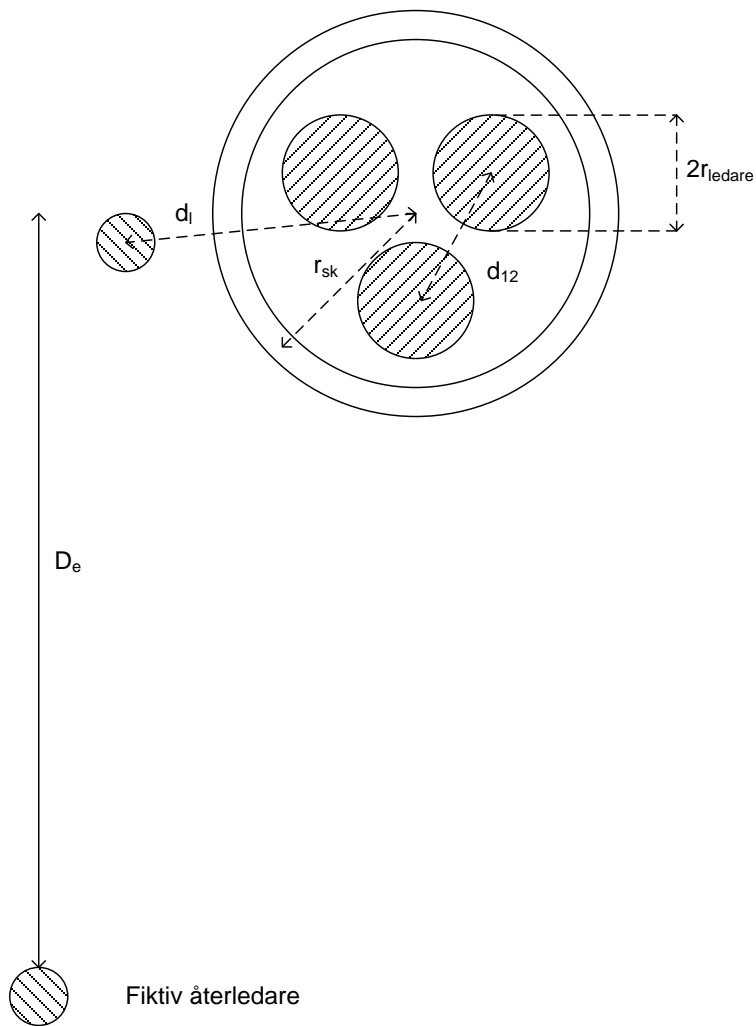
r_{ledare} : ledarens radie

Vid beräkning av den ömsesidiga impedansen mellan två ledare studeras induktansen som bildas av det gemensamma magnetflödet för de två ledarna med återledning i mark genom en fiktiv ledare med konstant resistans och ett avstånd som är beroende av markresistiviteten:

$$\bar{Z}_{nm} = j1000 \times \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \times \ln \frac{D_e}{d_{nm}} \Omega/km, n \neq m$$

d_{nm} : avstånd mellan de två ledarna

För en trefaskabel med längsgående markledare har varje ledare egenimpedans: fas L1, fas L2, fas L3, den gemensamma skärmen och den längsgående markledaren. Vidare finns ömsesidig impedans mellan varje par av ledare.



Figur 23 Trefaskabel med långsgående markledare och fiktiv återledare representerande jordåterledning

Totalt fås en impedansmatris:

$$Z = \begin{pmatrix} \bar{Z}_{L1} & \bar{Z}_{L1L2} & \bar{Z}_{L1L3} & \bar{Z}_{L1sk} & \bar{Z}_{L1l} \\ \bar{Z}_{L2L1} & \bar{Z}_{L2} & \bar{Z}_{L2L3} & \bar{Z}_{L2sk} & \bar{Z}_{L2l} \\ \bar{Z}_{L3L1} & \bar{Z}_{L3L2} & \bar{Z}_{L3} & \bar{Z}_{L3sk} & \bar{Z}_{L3l} \\ \bar{Z}_{skL1} & \bar{Z}_{skL2} & \bar{Z}_{skL3} & \bar{Z}_{sk} & \bar{Z}_{skl} \\ \bar{Z}_{lL1} & \bar{Z}_{lL2} & \bar{Z}_{lL3} & \bar{Z}_{lsk} & \bar{Z}_{ll} \end{pmatrix}$$

$\bar{Z}_{L1}, \bar{Z}_{L2}, \bar{Z}_{L3}, \bar{Z}_{sk}$ och \bar{Z}_{ll} är egenimpedans för respektive fasledare, skärm och långsgående markledare.

$\bar{Z}_{L1L2}, \bar{Z}_{L1L3}, \bar{Z}_{L1sk}, \bar{Z}_{L1sk}$ o.s.v. är ömsesidiga impedanser mellan varje par av ledare i kabelförbandet.

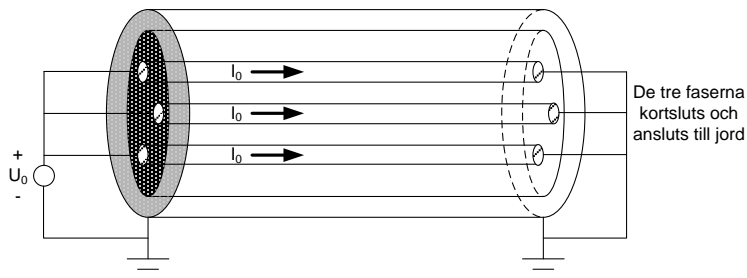
Vi bildar en matrisekvation enligt:

$$U = Z \times I$$

Där

$$U = \begin{pmatrix} \bar{U}_{L1} \\ \bar{U}_{L2} \\ \bar{U}_{L3} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ och } I = \begin{pmatrix} \bar{I}_{L1} \\ \bar{I}_{L2} \\ \bar{I}_{L3} \\ \bar{I}_{sk} \\ \bar{I}_l \end{pmatrix}$$

Kabeln matas med en nollföljdsspänning ansluten till varje fas i ena kabeländan medan faserna i den andra ledningsändan är kortslutna och anslutna till jord enligt Figur 24.



Figur 24 Schematisk bild för åskådliggörande av härledningen av nollföljdsimpedansen

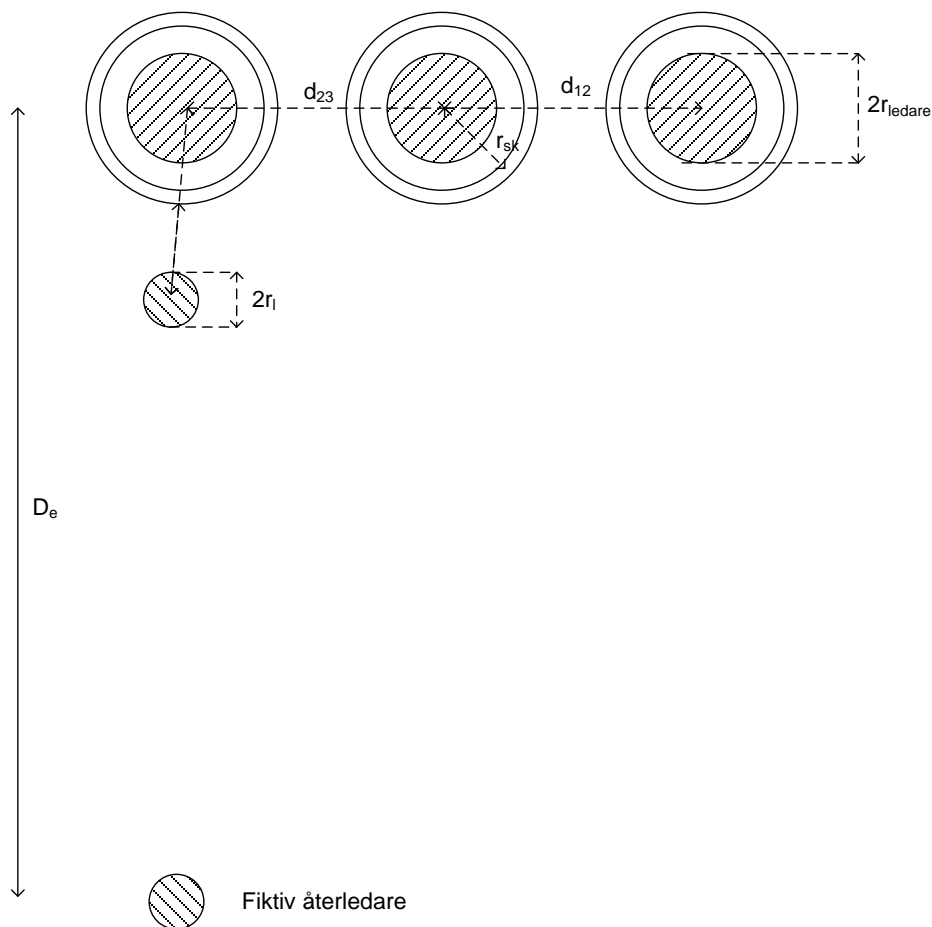
Nollföljdsspänning: $\bar{U}_0 = \bar{U}_{L1} = \bar{U}_{L2} = \bar{U}_{L3}$ kommer att ge upphov till nollföljdsström: $3\bar{I}_0 = \bar{I}_{L1} + \bar{I}_{L2} + \bar{I}_{L3}$ där $\bar{I}_0 = \bar{I}_{L1} = \bar{I}_{L2} = \bar{I}_{L3}$

Genom att applicera nollföljdsspänning kan nu nollföljdsströmmen fås genom att lösa matrisekvationen ovan.

Nollföljdsimpedansen kan nu fås genom:

$$\bar{Z}_0 = \bar{U}_0 \cdot \bar{I}_0^{-1}$$

För kabelförband med tre enfaskablar fås en mer komplex beräkning av nollföljdsimpedansen med flera ledare och därmed fler ömsesidiga impedanser ingående i beräkningen.



Figur 25 Trefas kabelförband med enfaskablar i flat förläggning

Serieimpedansen skiljer sig åt mellan olika kabeltyper mm. Det kan dock konstateras att nollföljdsimpedansen i relation med plusföljdsimpedansen kan uppskattas enligt:

$$\frac{R_0}{R_1} = 2 - 9$$

$$\frac{X_0}{X_1} = 10 - 15$$

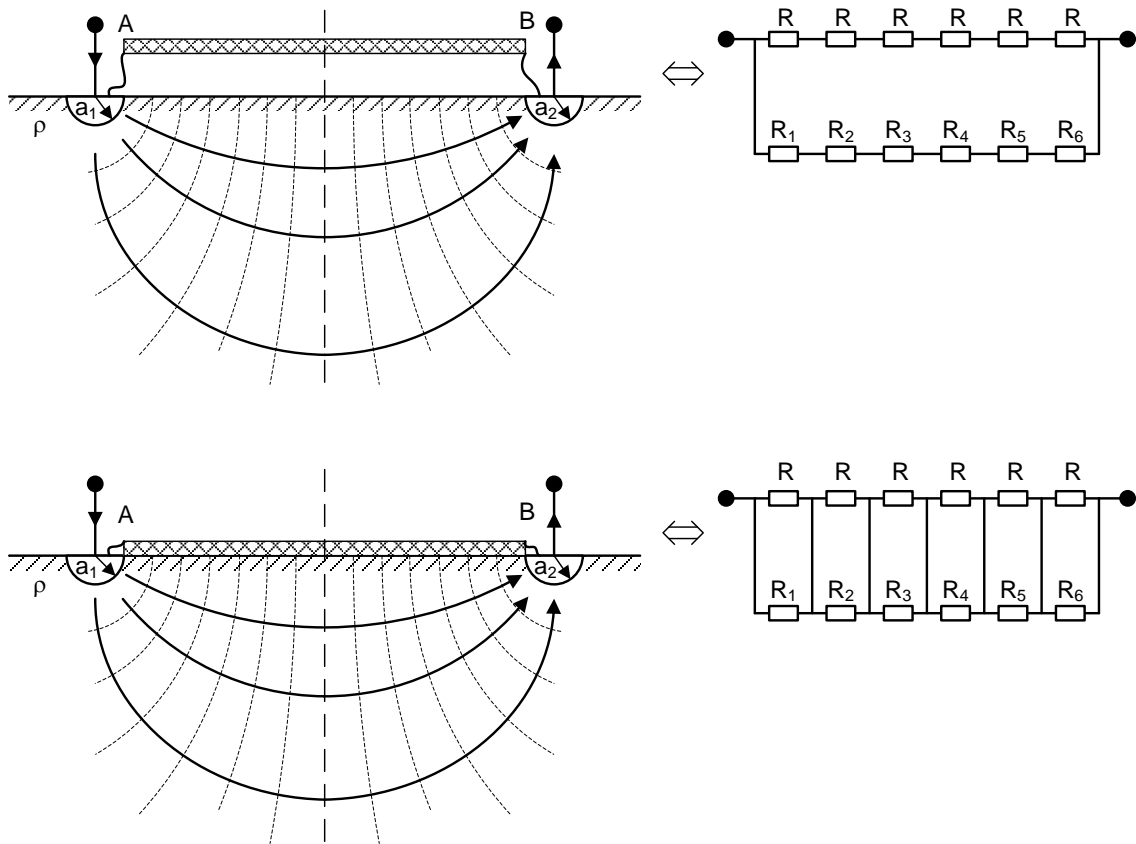
4.4.3 Alternativ beräkning av kablers nollföljdsdata

Resistans i mark och återledare

Ett (halvsfäriskt) jordtagets resistans ges av:

$$R = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (1)$$

Där a är jordtagets radie (i meter) och ρ är markens resistivitet (i Ωm).



Figur 26 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 $R_1 > R_2 > R_3$.

Resistansen mellan två jordtag ges av:

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \int \left(\frac{1}{r_1^2} \vec{r}_1 - \frac{1}{r_2^2} \vec{r}_2 \right) d\vec{r} \quad [\Omega] \quad (2)$$

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

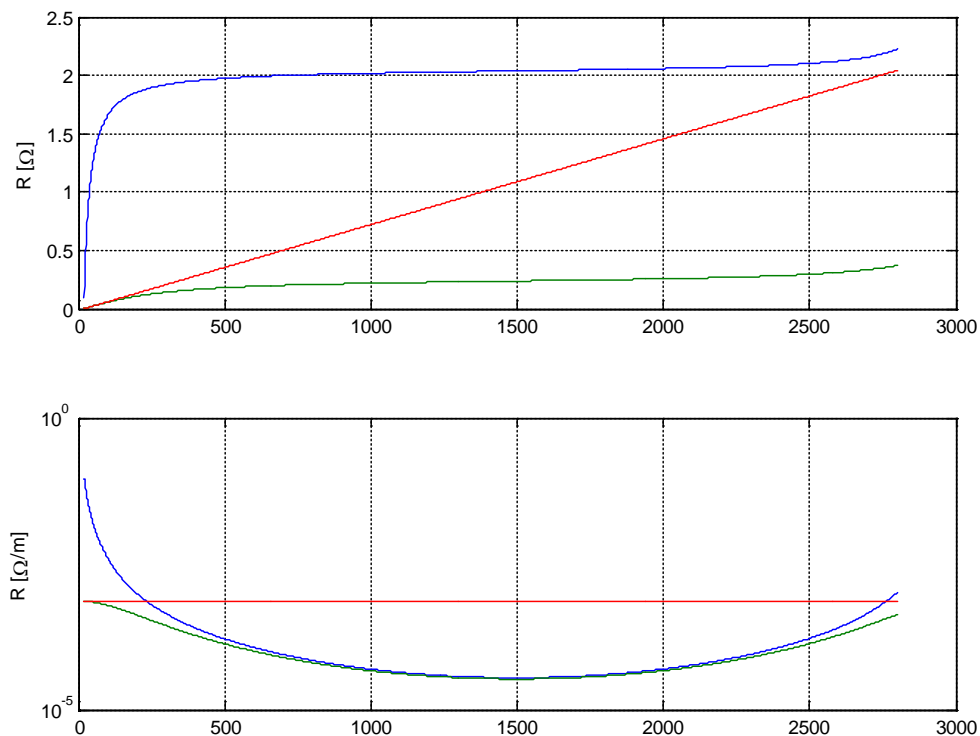
$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{D - a_2} + \frac{1}{a_2} - \frac{1}{D - a_1} \right) \quad [\Omega] \quad (3)$$

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.

När man lägger till en extra (oisolerad) ledare (medföljande markledare) i marken mellan jordtagen kan man se det som en kontinuerlig parallellkoppling av den extra ledaren och marken. Den totalaresistansen mellan de två jordtagen ges då av:

$$R = \int_A^B \frac{1}{\frac{1}{\rho_j} + \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(D-x)^2} \right)} dx \quad [\Omega] \quad (4)$$

Där A, B är start och slutpunkt för ström mellan jordtagen (Figur 26), ρ_j och A_j är resistivitet och area för medföljande markledare. Resultatet är oberoende av väg och numeriskt enklast blir integrationen om man håller sig längs marken ($y = 0$).



Figur 27 Total resistans (grön), jordlineresistans (röd) och markresistans (blå). Markresistivitet, 250 Ωm , jordtagsresistans, 2 och 0,2 Ω , 25mm² följelina av koppar och 3000m kabellängd.

Induktans

När man talar om induktans utgår man ofta från två ledare eller grupper som bildar två ledare. Nedan ges är en mycket kort sammanfattning av [8]

Två ledare

$$\lambda_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_x \ln \frac{1}{D_{xx}} + I_y \ln \frac{1}{D_{xy}} \right) [H/m] \quad (5)$$

$$\lambda_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_x \ln \frac{1}{D_{yx}} + I_y \ln \frac{1}{D_{yy}} \right) [H/m] \quad (6)$$

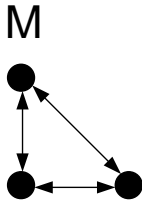
$$L = L_x + L_y = \frac{\lambda_x}{I_x} + \frac{\lambda_y}{I_y} [H/m] \quad (7)$$

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

Fram och återledning med godtyckligt antal ledare

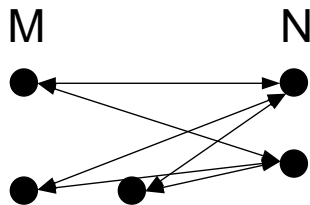
För att kunna utföra beräkningar behöver vi definiera ett par begrepp:

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



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

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



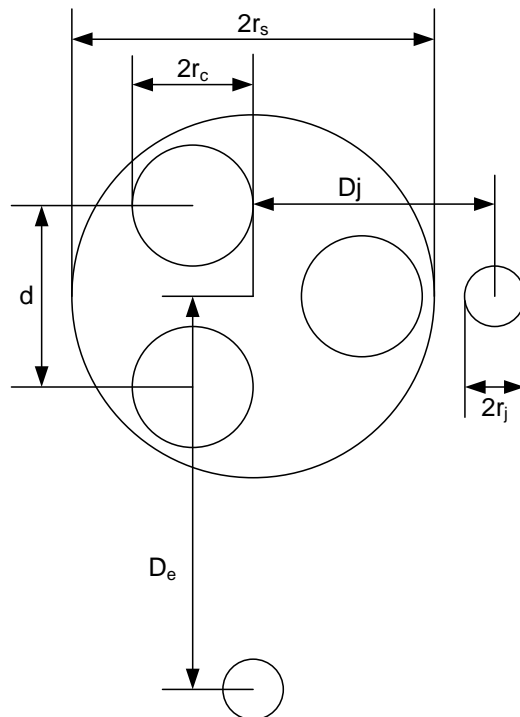
$$GMD = \sqrt[MN]{\prod_{k=1}^M \prod_{l=1}^N d_{kl}}$$

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

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

Treledarkabel

Vi tänker oss att geometrin för en treledarkabel ges av Figur 28.



Figur 28 De olika mått som kommer att användas för att beräkna impedanserna för en treledarkabel.

Dessa mått, eller mått som kan användas för härledning av måtten i Figur 28, finns oftast i datablad för kablarna. Om det inte finns lämpliga mått kan man använda approximationen:

$$r_s = d \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{1}{2} \right) = d \frac{2 + \sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \quad (8)$$

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

För en treledarkabel kan man nu beräkna ([9], [10] för Enbart skärm och Retur i skärm och mark).

GMR för en treledare fås som:

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

Där r_m är:

$$r_m = r_c e^{-1/4} \quad (10)$$

Enbart skärm

För retur enbart i skärmen får man:

$$Z_0 = R_c + 3R_s + j3f\mu_0 \ln \frac{r_s}{\sqrt[3]{r_m \cdot d^2}} \quad [\Omega/m] \quad (11)$$

Och där R_c, R_s, R_g är resistansen i ledare, skärm och mark.

Retur i skärm och mark

För retur i både skärm och jord blir det:

$$Z_0 = R_c + j3f\mu_0 \ln \frac{r_s}{\sqrt[3]{r_m \cdot d^2}} + \left(\frac{3R_s \left(R_g + jf\mu_0 \ln \frac{D_e}{r_s} \right)}{R_s + R_g + jf\mu_0 \ln \frac{D_e}{r_s}} \right) \quad (12)$$

D_e är djupet för en tänkt återledare och ges av Carsons formel [1]:

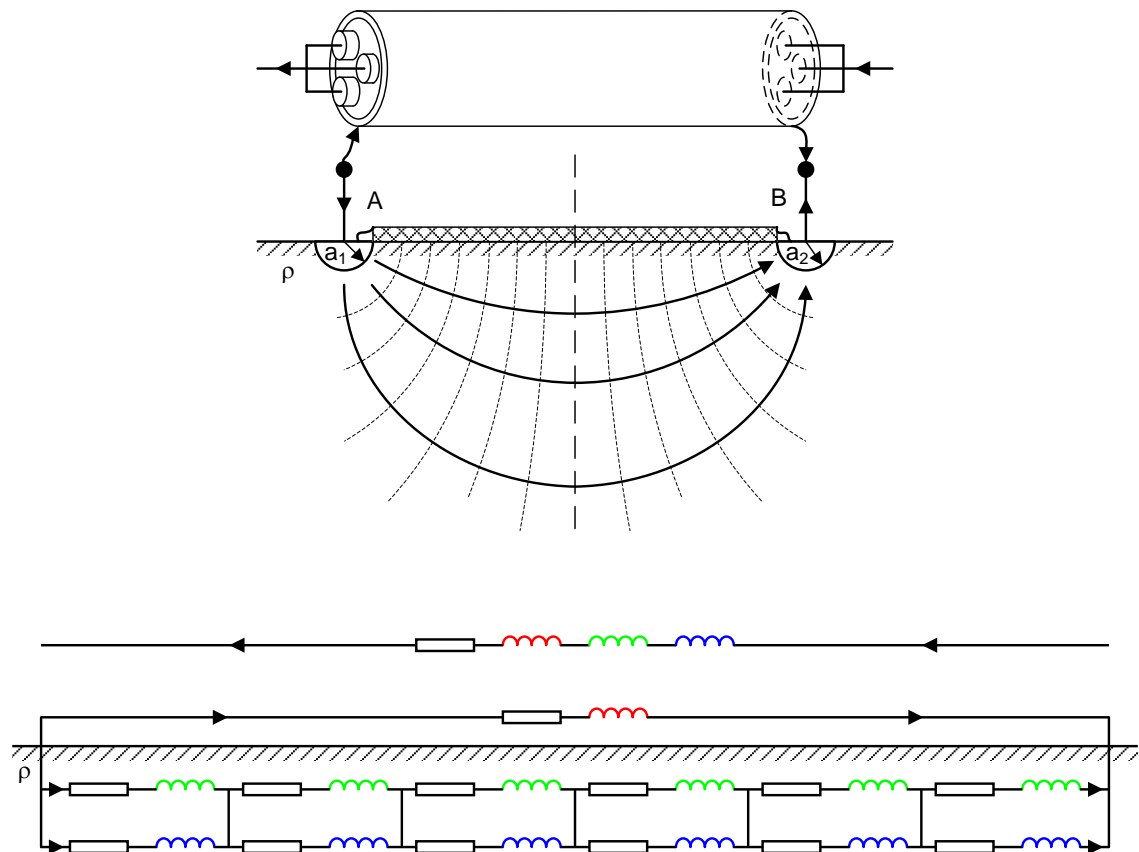
$$D_e \approx 659\sqrt{\rho/f} \text{ [m]} \quad (13)$$

För ett stort djup, D_e , får man samma resultat som i ekvation (11).

Med jordtagsresistanser, R_{j1} och R_{j2} , ändras markåterledaren från R_g till $R_g + R_{j1} + R_{j2}$

Retur med medföljande markledare

Vi tänker nu nollföljden som en tvåledare, ledare och returledare, se Figur 28.



Figur 29 Modell av systemet ledare och återledare. Återledaren är sammansatt av skärm, medföljande markledare och mark.

När vi pratar om tvåledare ser man att induktansen delas upp på de två ledarna, ekvation (5)-(7). Reaktansen per längdenhet för återledarna i ledare-markledare och ledare-jord kan beräknas som:

$$X_j = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_j}{r_j} \quad [\Omega/m] \quad (14)$$

$$X_{jord} = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{\sqrt[3]{r_m d^2}} \quad [\Omega/m] \quad (15)$$

Den totala markimpedansen för kabeln blir då:

$$Z_{mark} = \int_A^B \frac{1}{\frac{\rho_j}{A_j} + jX_j + \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(D-x)^2} \right) + jX_{jord}} dx \quad [\Omega] \quad (16)$$

Vilket är samma uttryck som (4) men med reaktanserna tillagda. Total impedans för återledaren blir då skärmimpedans parallellt med markimpedans:

$$Z_{\text{återledare}} = Z_{mark} \parallel Z_{skärm} \quad (17)$$

Impedansen för skärmen blir:

$$Z_{skärm} = R_s + \omega \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \frac{r_s}{\sqrt[3]{r_m d^2}} \quad [\Omega/m] \quad (18)$$

Notera att induktanserna endast stämmer för den specifika kombinationen av kabel, förläggning, mark och jordåterledare man har vid just detta ställe. Uttryck går att få fram men värden kan enbart tabelleras med vald noggrannhet. Någon form av interpolering får sedan ske i de tabellerade värdena.

Den total (sling)impedansen fås nu som:

$$Z = Z_{ledare} + Z_{\text{återledare}} \quad (19)$$

Där ledarimpedansen ges av:

$$Z_{ledare} = R_c + j(X_{skärm} + X_{jledare} + X_{jord}) \quad (20)$$

Där X_{jord} fås av (15), $X_{skärm}$ av (18) och där $X_{jledare}$ skiljer sig något från (14), $X_{jledare}$ blir nu:

$$X_{jledare} = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_j}{\sqrt[3]{r_m d^2}} \quad [\Omega/m] \quad (21)$$

Slutsatser

- Det går att sätta upp uttryck för en kabels-impedans men de är inte direkt lätta att använda. De uttryck som finns idag är å andra sidan inte heller så lätta att använda.
- En stor källa till osäkerhet är markens resistivitet. Den har antagits vara ett värde. I verkligheten lär den variera längs med kabelns förläggning.
- En kabels (lednings) nollföljdsimpedans är inte additiv. Nollföljdsimpedansen beror i stor utsträckning på jordtagens impedans.

Frågor

- Hur gör man med induktans när det finns flera återledare och strömmen i dem är olika beroende på avstånd till jordtag?
 - Titta enbart på egeninduktans för returledarna och strunta i öms-kopplingar?
 - Använd nytt ρ från resistansberäkningarna (med markledare) istället för det ρ som antas för marken och räkna sedan med en återledare?
 - Använd en återledare med olika avstånd från ledaren beroende på avstånd från jordpunkt
- Hur hantera befintlig jordtagsmätning istället för "original" jordtag?
- Anta något annat än halvsfärisk elektrod i markplanet (den tenderar till att bli stor)?

4.5 Friledningars egenskaper

Jämfört med kablar kännetecknas friledningarnas elektriska egenskaper av följande:

- Ledningarnas nollföljds kapacitans är betydligt mindre än vad som gäller för kablar. Den kapacitiva jordfelsström som friledningen ger upphov till vid jordfel ligger den inom området 0,02 – 0,04 A/km för 10 – 20 kV ledningar.
- Serieimpedansen för en friledning har normalt större reaktans jämfört med kabel. Serieresistansen är däremot mindre. Detta gäller både plusföljd och nollföljd.
- Friledningar för distribution byggs ofta utan markledare. Detta innebär att vid jordfel i nätstation som matas från friledning utan jordlina kommer hela jordfelsströmmen att spänningssätta det lokala jordtaget. Med jordlina kommer den spänningssättande strömmen att reduceras med den ström som återleds i jordlinan.

Sett ur störningssynpunkt är friledningen mer utsatt för väderfenomen, såsom åska, vind och snö, jämfört med kabel. Därmed har friledningar högre felfrekvens.

4.6 Mellanspänningsnätets struktur och utbredning

En viktig parameter vid analys av icke effektivt jordade mellanspänningsnät är nätets kapacitiva koppling till jord, normalt uttryckt som kapacitiv jordfelsström vid stumt jordfel (felresistans = 0). Det är dock även viktigt hur denna kapacitiva koppling är fördelad i nätet, speciellt för nät med stor andel kabel. Förenklat kan man dela in näten i två kategorier:

- Nät med många utgående kabelledningar (tätortsnet), där den totala kapacitiva jordfelsströmmen är stor men fördelad på många fack i matande station.

- Nät med få utgående ledningar, ofta blandade kabel- och friledningssträckor (landsbygdsnät), där den totala jordfelsströmmen är stor och fördelad på få fack i matande station.

Det finns naturligtvis en del nät som är ett mellanting mellan dessa ytterligheter.

Vid analys av näten med avseende på jordfel har man traditionellt bortsett från ledningarnas serieimpedanser (serieimpedanser i nollföljdsnätet). Med stora kapacitiva jordfelsströmmar kan serieimpedanserna dock ha viss betydelse beroende på nätets struktur. Serieimpedanserna har följande inverkan:

- Serieimpedansernas resistiva del i nollföljdsnätet kan inte kompenseras med Petersenspolar.
- Ökad resistiv jordfelsström ger ökad spänningssättning av skyddsjordad anläggningsdel vid jordfel.
- Ökad total jordfelsström ger sämre känslighet för de grundtöns-mätande jordfelsskydden.

I nät med många korta kabelförbindelser är den enkla analysen, där man bortser från serieimpedanserna i nollföljdsnätet, fullt acceptabel.

I nät där en eller flera ledningar ut från matande station har stor kapacitiv jordfelsström och stor ledningslängd kommer påverkan från serieimpedanserna i nollföljdsnätet att ha signifikant betydelse vid jordfel. Denna påverkan kan till viss del begränsas med installation av utlokaliserade nollpunktsreaktorer (se avsnitt 4.8.3).

Frågan är när man måste ta hänsyn till dessa impedanser och hur man genomför analysen i dessa nät.

4.7 Mellanspänningsnätets omkopplingsmöjligheter

Mellanspänningsnät drivs i de flesta fall radiellt, dvs. ett ledningsfel kommer att ge bortkoppling av alla elkunder som är anslutna till nätet via den felbehäftade ledningen. För att kunna upprätthålla acceptabel leverans kvalitet måste leveransavbrottens varaktighet begränsas. Detta görs normalt genom omkoppling i nätet där reservmatningsvägar används. I mellanspänningsnäten finns ofta sektioneringspunkter mellan olika matningspunkter eller olika ledningar från samma inmatningspunkt. Kopplingsorgan (frånskiljare eller effektbrytare) i dessa sektioneringspunkter möjliggör nätomkopplingar. Omkopplingar i nätet innebär att förutsättningarna för jordfelsskydden förändras. Detta kan ha följande konsekvenser:

- Nätets totala kapacitiva jordfelsström ändras vilket medför att avstämning av nollpunktsreaktor i spoljordade nät måste justeras. I många nät görs detta automatiskt i dag.
- Fördelningen mellan kapacitiv jordfelsström mellan ledningarna förändras vilket kan påverka jordfelsskyddens funktion.

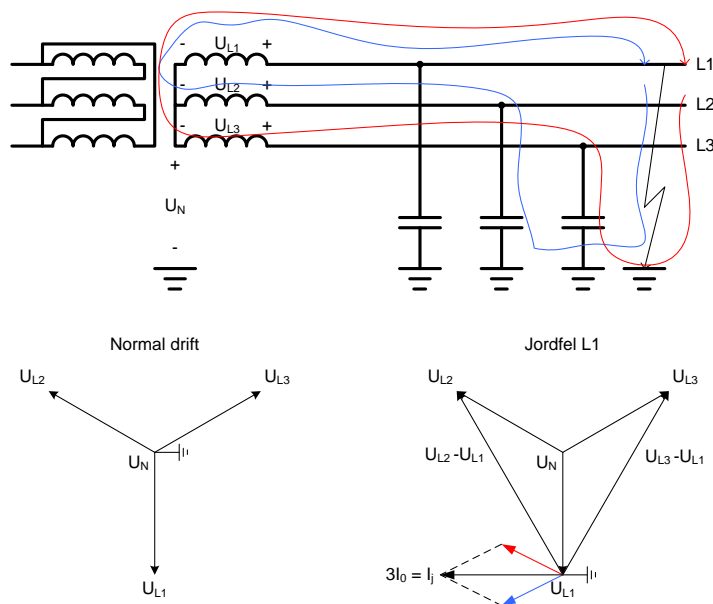
Vid utformning och inställning av felbortkopplingssystemet för jordfel måste hänsyn tas till alla alternativ för reservmatning.

4.8 Nollpunktsbehandling och systemjordning

För att begränsa jordfelsströmmar och för att skapa förutsättningar för god funktion hos jordfelskyddssystem ansluts apparater till en eller flera nollpunkter i nätet. Olika system och principer diskuteras nedan.

4.8.1 System med isolerad nollpunkt

I sin enklaste form drivs nätet utan apparater anslutna till nollpunkten. Systemets koppling till jord sker endast via de distribuerade kapacitanserna mellan faserna och jord. Vid jordfel bildas felslingor (blå via fas L2 och röd via fas L3) med i stort sett kapacitiv impedans vilket framgår i Figur 30.

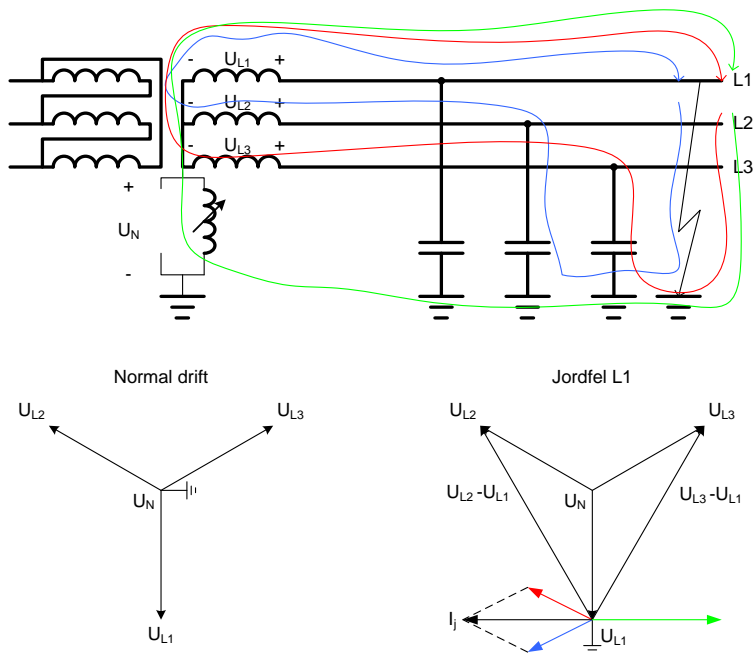


Figur 30 Stumt jordfel i nät med isolerad nollpunkt

Den kapacitiva jordfelsströmmen måste vara liten för att kravet på spänningssättning av skyddsjordad anläggningsdel skall kunna innehållas [1]. Detta är ofta inte möjligt och därför finns få nät utan apparater anslutna till nollpunkter i nätet.

4.8.2 Jordning via Nollpunktsreaktor (Petersenspole)

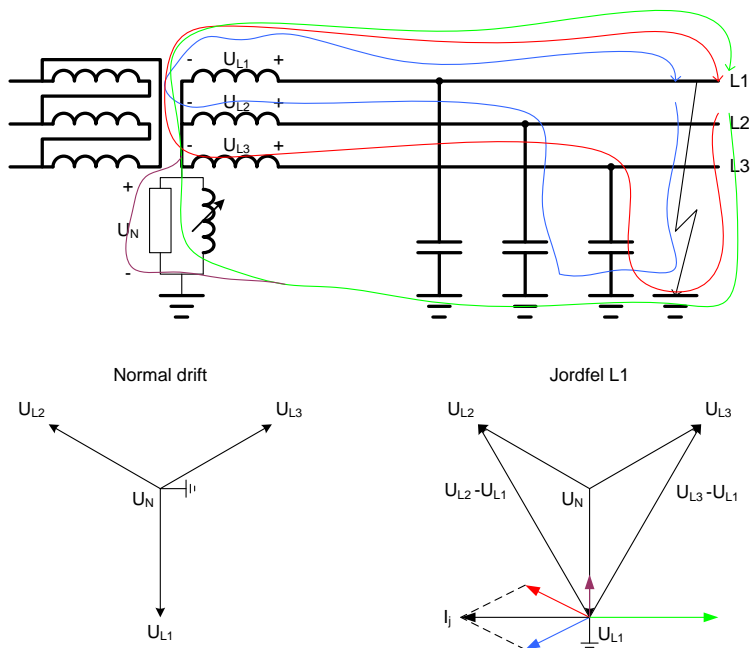
Det traditionella sättet att minska jordfelsströmmen för att kunna uppfylla kravet på spänningssättning av skyddsjordad anläggning vid jordfel, är att ansluta en reaktor (nollpunktsreaktor) till en eller flera nollpunkter i nätet. Vid jordfel bildas förutom felslingor, med i stort sett kapacitiv impedans till jord, även en felslinga via reaktansen i nollpunkten vilket framgår i Figur 31.



Figur 31 Stumt jordfel i reaktansjordat nät

En strömkomponent i motfas med nätets kapacitiva jordfelsström bildas och minskar därmed den resulterande jordfelsströmmen i felstället.

För att kunna möjliggöra selektiv detektering av felbehäftad ledning vid jordfel krävs ofta en väldefinierad strömkomponent som endast flyter ut på denna ledning. För att åstadkomma detta parallellkopplas oftast nollpunktsreaktorn med ett nollpunktsmotstånd (Figur 32).



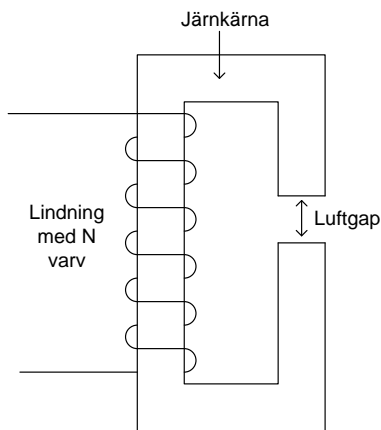
Figur 32 Stumt jordfel i högimpedansjordat nät med nollpunktsmotstånd

Den violetta strömbanan via nollpunktsmotståndet som ligger i fas med nollpunktsspänningen sluter sig endast via den felbehäftade ledningen. Den resistiva strömmen kan därför med fördel användas som riktningskriterium.

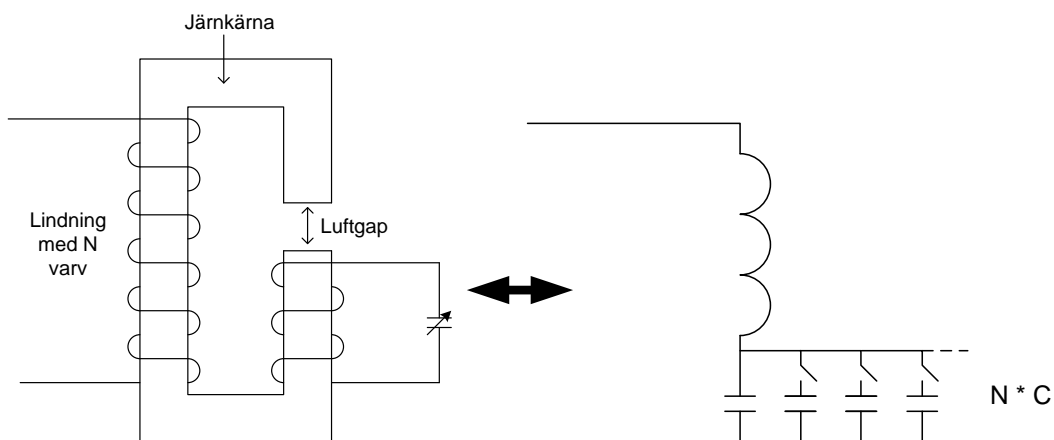
Nollpunktsreaktorn måste ha en stegvis eller steglöst varierbar reaktans för att kunna justeras vid ändringar i nätet som förändrar den kapacitiva jordfelsströmmen. I sin äldre utformning gjordes avstämning (stegvis justering av reaktansen) manuellt vid regelbundna tillfällen och vid kända förändringar i näten. Det finns nya typer av nollpunktsreaktorer där reaktansen kan justeras steglöst och automatiskt under drift.

Förändring av reaktansen kan göras enligt följande principer:

- Variation av antal varv för spolen, se Figur 33
- Variation av luftgap i järnkärnan, se Figur 33
- Tillkoppling av olika antal kondensatorer seriekopplade med spolen, se Figur 34



Figur 33 Schematisk bild av nollpunktsreaktor med varierbart varvtal N eller varierbart luftgap

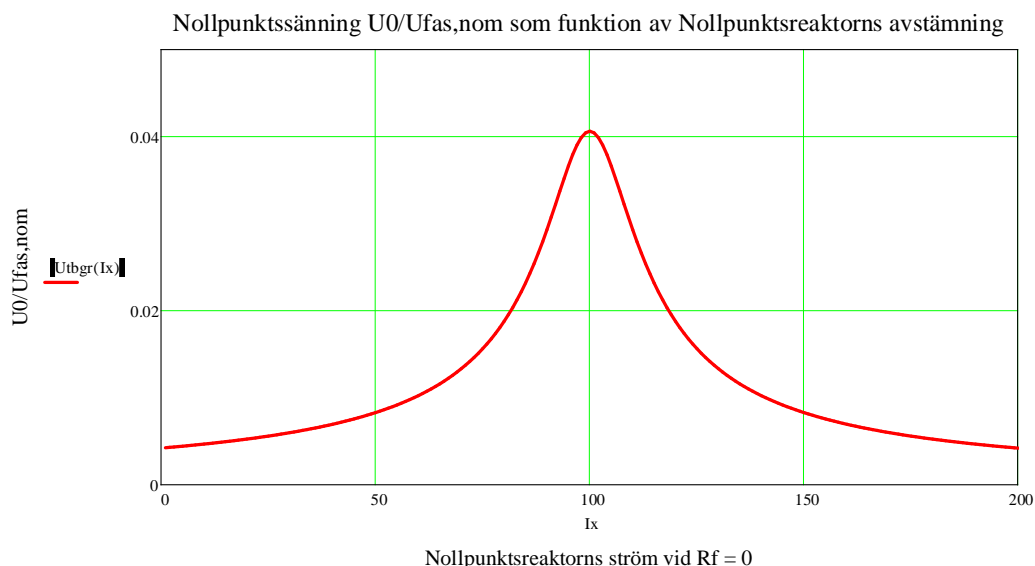


Figur 34 Schematisk bild av nollpunktsreaktor med kondensatorbaserad avstämning

Vid manuell eller automatisk avstämning av nollpunktsreaktorn mäts normalt nollpunktsspänningen (nollföljdsspänningen). Teoretiskt är denna spänning noll men oftast har nätet en viss "naturlig" osymmetri, främst på grund av olika avstånd mellan faserna och jord för friledningar.

Med ökad andel kabel (främst trefaskabel) fås en ökad grad av symmetri i näten och den "naturliga" osymmetrin blir inte tillräcklig för manuell eller automatisk avstämning. För att kunna genomföra tillförlitlig avstämning av nollpunktsreaktor även i nät med stor grad av symmetri används injicering av en ström i nollpunkten eller ansluta en enfasig kapacitiv last.

I Figur 35 visas ett exempel hur den uppmätta nollpunktsspänningen varierar med variation av nollpunktsreaktors avstämning (induktiva ström vid fullt utbildat jordfel). Den automatiska avstämningen gör kontinuerligt små förändringar av spolens reaktans och utnyttjar tecknet på förändringen av nollpunktsspänningen för att hitta resonanspunkten med ideal avstämning.



Figur 35 Avstämningskurva för ett nät med 100 A kapacitiv jordfelsström vid stumt jordfel

En så bra avstämning som möjligt är viktigt både med avseende på begränsning av jordfelsströmmens storlek (spänningssättning av utsatt anläggningsdel) och jordfelskyddens känslighet. För att kunna säkerställa att kraven alltid uppfylls vid ändrad koppling i näten bör avstämningen ske via automatik.

En problemställning med avstämning av nollpunktsreaktor är efter bortkoppling av ledning på grund av fel. Om provtillkoppling av bortkopplad ledning sker efter automatiskt ändrad avstämning finns risk att tillkoppling sker mot ett kvarstående högresistivt jordfel vid felaktig avstämning. På grund av detta kan det vara lämpligt att ha viss fördröjning av förändring av avstämning.

En nollpunktsreaktor har alltid en viss resistans. Denna resistans ger ett tillskott till jordfelsströmmen, ekvivalent med ett extra nollpunktsmotstånd. Vid specifikation av nollpunktsmotstånd bör maximala förluster (resistans) anges.

Typiska värden på aktiva förluster för en nollpunktsreaktor är i storleksordningen 2 – 3 % av nollpunktsreaktorns reaktiva märkeffekt (Q_N). Om man har ett nollpunktsmotstånd med reaktiv märkström: 200 A och 2 % förluster fås 4 A extra aktiv jordfelsströmskomponent.

4.8.3 Distribuerad kompensering

Med omfattande kablifiering av mellanspänningsnät fås i vissa fall mycket höga värden på generering av den kapacitiva jordfelsströmmen. Det finns i dag exempel på 24 kV nät med upp till 600 A kapacitiv jordfelsström. Central kompensering med stora nollpunktsreaktorer i matande transformatorstation medför omfattande "transport" av den kapacitiva jordfelsströmmen vid inträffat jordfel. Detta i sin tur medför ökad aktiv komponent hos jordfelsströmmen med ökad spänningssättning av utsatt del och minskad känslighet hos jordfelskydden som följd.

För att hantera ovan beskrivna problem finns möjligheten att använda distribuerad kompensering av jordfelsströmmen, där nollpunktsreaktorer ansluts till högspänningsnollpunkten på ett antal transformatorer, lämpligt placerade i nätet.

En betydande vinst med denna princip är att den kapacitiva jordfelsströmmen inte behöver transporteras över långa avstånd. I stora nät blir därför förlusterna på grund av denna transport ringa.

Transformatorer i nätstationer har normalt kopplingsart Dyn vilket omöjliggör anslutning av nollpunktsreaktor på mellanspänningssidan. I dessa fall måste transformatorer med annan kopplingsart användas. Nollpunkt krävs för både upp och nedspänningssida. Kopplingsarter som är aktuella: ZNzn eller YNynd.

Normalt antar vi att de decentraliserade reaktorerna är relativt små, dvs. med en kompenseringsström om 10 – 15 A. Därmed kompenseras ofta den kapacitiva strömmen från närliggande kabelsträcka. Det finns dock inget som hindrar att man ansluter en större nollpunktsreaktor till en distributionstransformator. Denna kan utgöras av en "överbliven" central nollpunktsreaktor som ersatts. Dock måste man i sådana fall anpassa transformatorn, till vilken reaktorn ansluts, till den större kompenseringsströmmen. Vidare ska reaktorn ha små förluster, dvs. samma nivå (2 – 3 %) som gäller för centralt placerad nollpunktsreaktor.

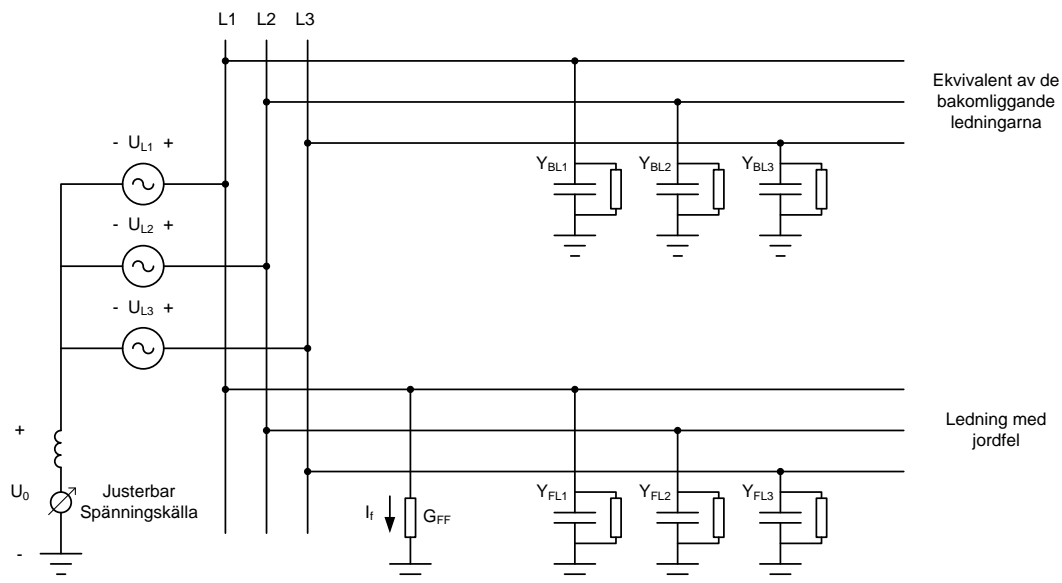
4.8.4 Aktiv injicering i nollpunkten: Restströmskompensering

Även om den kapacitiva jordfelsströmmen kompenseras perfekt kommer det, förutom strömmen från nollpunktsmotstånd, att finnas en resistiv restström i felstället. Denna resistiva restström, som ligger i fas med nollpunktsspänningen, beror på:

- Resistiva förluster i nollpunktsreaktor. Dessa förluster motsvarar en ström i storleksordning 2 – 5 % av den induktiva kompenseringsströmmen. Detta gäller såväl centralt placerad nollpunktsreaktor som utlokaliserade nollpunktsreaktorer.
- Resistiva förluster i transformator/jordningstransformator som ansluter nollpunktsreaktorn.

- Resistiva förluster i nätet orsakade av nollföljdsström genom friledningarna och kablar.

För att möjliggöra låg spänningssättning av skyddsjordade anläggningsdelar är det värdefullt att kunna kompensera även de resistiva restströmmarna i nätet som uppkommer vid jordfel. Schematiskt kan teorin beskrivas enligt Figur 36.



Figur 36 Exempel på nät med nollpunktsreaktor och aktiv spänningsinjicering i nollpunkten

Spänningen i felstället till jord är lika med $U_0 + U_{L1}$. Genom att justera spänningen i nollpunkten kan man minimera felströmmen till nära noll. Detta kan ske med hjälp av en växelriktare där spänningen fritt kan varieras i amplitud och fasvinkel så att fasspänningen i felstället blir noll. Spänningsinjiceringen kan ses som en negativ resistans i nollpunkten.

Resonemanget med spänningsinjicering för att kompensera det resistiva felströmsbidraget bygger på antagandet att serieimpedanserna i nätet kan försummas. I kabelnät med stor utbredning är det inte helt säkert att denna förenkling är giltig. Följande svårigheter kan identifieras:

- Serieimpedanserna medför att bakomliggande nollföljdsimpedans i felstället är beroende på var i nätet jordfel inträffar.
- Den symmetriska lastströmmen kommer att ge ett spänningsfall mellan källan och felstället vilket ger viss spänning över felstället även vid perfekt avstämning och spänningsinjicering i nollföljdssystemet.
- Traditionella riktade jordfelsskydd som använder nollföljdsströmmen aktiva komponent (i fas med nollföljdsspänningen) kan troligen inte användas i nät med aktiv spänningsinjicering i nollpunkten.
- Admittansmätande jordfelsskydd kan troligen användas i kombination med restströmskompensering. Detta kräver troligen central intelligens för att kunna identifiera vilken utgående ledning som är felbehäftad. Detta grundas på förändring av uppmätt admittans ut på varje ledning.

För icke felbehäftad ledning är admittansen i stort sett oförändrad vid jordfel (6.3 och 6.4).

Restströmkompensering innebär installation av relativt avancerad teknik. Nollpunktsbehandlingen beskriven i 6.4 och 6.6 kan utgöra grunden för styrning av restströmskompenseringen.

Restströmkompensering har använts i vissa fall (främst utomlands) för att kunna driva nätet vidare med kvarstående jordfel genom att felströmmen reduceras till nära noll. De svenska föreskrifterna tillåter inte detta i dagsläget. Applikationen är dock mycket intressant med avseende på möjligheten att minska den spänningssättande strömmen vid jordfel till skyddsjordad anläggningsdel. Vid inträffat jordfel måste dock kompenseringen vara mycket snabb med hänsyn till personsäkerhet. Utrustning för restströmskompensering finns tillgänglig på marknaden, dock med begränsat antal leverantörer.

4.9 Serieimpedansernas inverkan

Normalt försummas serieimpedanserna i distributionsnäten eftersom de är betydligt mindre än shuntimpedanserna. I distributionsnät med stor andel kabel som ger stora kapacitiva jordfelströmmar i nätet kan även serieimpedanserna, främst för nollföljdsström, ha signifikant inverkan främst på jordfelsströmmens aktiva komponent. Vid analys av jordfel kan det vara viktigt att beakta serieimpedanserna i nollföljdsnätet för vissa nät. Det är dock svårt att avgöra för vilka nät detta är viktigt. Faktorer som har påverkan är:

- Total kapacitiv jordfelsström i nätet: I_{ctot}
- Fördelning av denna kapacitiva jordfelsström:
 - Många korta kabelledningar (tätortsnät): serieimpedanserna har troligen försumbar inverkan
 - Få ledningar i systemet med stor kapacitiv jordfelsström per ledning (landsbygdsnät): serieimpedanserna kan ha signifikant inverkan

Analys av serieimpedansernas inverkan behandlas grundligare i 6.1.

Det svåra är att identifiera när serieimpedanserna i nollföljdsnätet måste beaktas vid analys. Vägledning ges i avsnitt 6.1 och 9.

5 Olika typer av fel och andra händelser som påverkar jordfelskyddssystemen

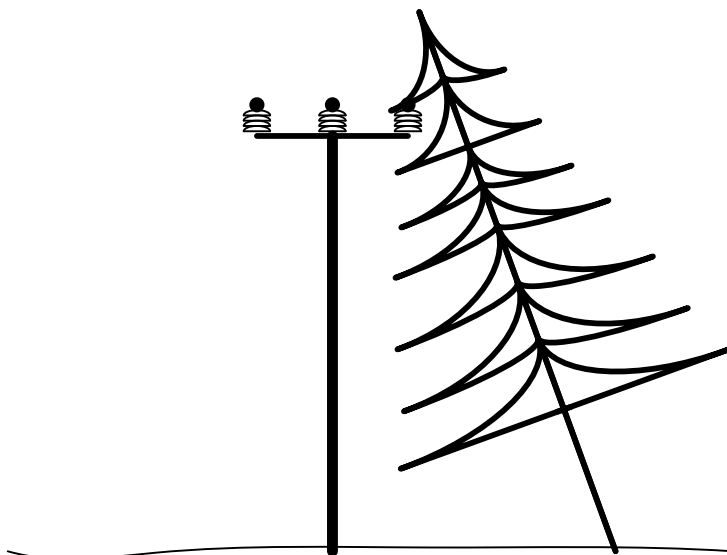
5.1 Ljusbågsfel

Överspänningar i nätet kan orsaka överslag mellan fas och jord (t ex skyddsjordad anläggningsdel). Den vanligaste orsaken till överspänning är åska med direkt nedslag eller indirekt påverkan på grund av näraliggande blixtnedslag. Ljusbågsfelet i sig är att betrakta som relativt lågresistivt åtminstone om ljusbågen är kort och strömmen hög. Om ljusbågen är mycket längre än fasavståndet och strömmen låg är ljusbågsresistansen hög.

Om ljusbågsströmmen är mindre än några tiotal ampere finns det en möjlighet att jordfelet självslocknar. Det enklaste är att koppla från felbehäftad ledning och återkoppla ledningsbrytaren efter ett kort intervall. För ljusbågar i icke effektivt jordade system kan felströmmen i ljusbågen vid jordfel reduceras genom att använda en väl avstämd nollpunktsreaktor (Petersenspole) vilken kompenserar nätets kapacitiva jordfelsström.

5.2 Påfallande träd

Av ekonomiska skäl är friledningar i distributionsnät normalt inte trädsäkra, dvs. ledningsgatan är så smal så att fallande träd kan beröra friledningen och därmed orsaka jordfel.



Figur 37 Trädpåfall på friledning

Denna feltyp orsakas främst av väderförhållanden med mycket hårda vindar. Detta exemplifierades främst vid stormarna Gudrun och Per då stora områden med landsbygdsnät blev strömlösa under mycket långa tider. Trädpåfall på friledning ger jordfel, ofta med hög felresistans och därmed små jordfelsströmmar. Felresistansen kan i inledningskedet vara mycket stor (upp mot 100 k Ω). Små felströmmar genom trädet ger kolbanor med succesivt minskad resistans.

På grund av den höga felresistansen kan denna feltyp ofta vara svåra att detektera och därmed svåra att koppla bort. Därför är det viktigt att jordfelskydden har hög känslighet.

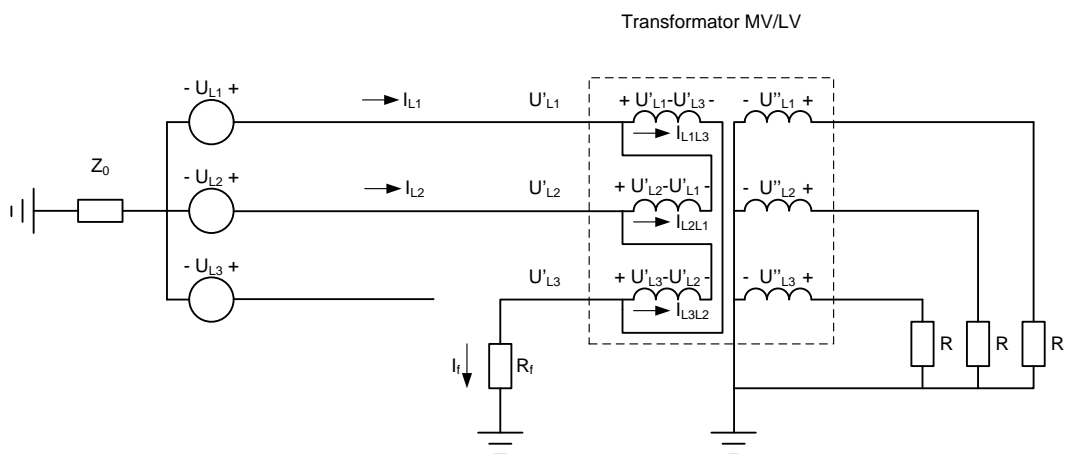
5.3 Linbrott på friledning

Det finns alltid en risk att en fasledare brister och faller till marken. Därmed fås ett jordfel, ofta med stor resistans i felstället. Om detta felfall inte bortkopplas är den spänningssatta linan lätt åtkomlig för människor och djur och utgör därför stor fara.

På grund av den höga felresistansen kan denna feltyp ofta vara svår att detektera och därmed koppla bort. Därför är det viktigt att jordfelskydden har hög känslighet.

5.4 Bakmatat jordfel

Ett specialfall vid linbrott är bakmatat jordfel som schematiskt beskrivs i Figur 38.



Figur 38 Schematisk bild av bakmatat jordfel

Linan faller till marken på så sätt att jordfelet matas från "lastsidan" av felet, dvs. via en eller flera nättransformatorer. Förutom resistansen i felstället (R_f) kommer belastningsresistanserna i lågspänningsanläggningen (R) att påverka jordfelsströmmen (I_f) och nollpunktsspänningen (U_0).

$$\bar{I}_f = \frac{\bar{U}_{fas}}{9R+6R_f+2\bar{Z}_0}$$

och

$$\frac{\bar{U}_0}{\bar{U}_{fas}} = \frac{\bar{Z}_0}{9R+6R_f+2\bar{Z}_0}$$

På grund av att felet ofta ger låga värden på nollföljdsström och nollföljdsspänning i matande station finns risk att konventionella jordfelskydd inte detekterar detta felfall.

5.5 Grävskador

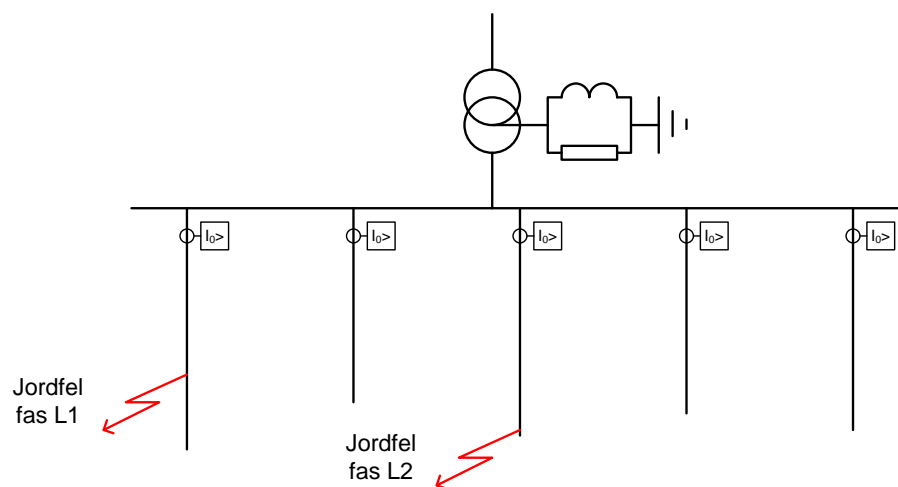
Grävskador på kabel orsakar oftast två- eller trefasig kortslutning med stor felström. Kortslutningar detekteras snabbt av överströmsskydd, differentialskydd eller underimpedansskydd. Det finns dock viss risk att grävskada kan leda till enfasigt jordfel (fasledare till kabelskärm). Ett sådant fel har mestadels låg resistans till jord i felstället och kan därmed detekteras relativt enkelt.

5.6 Dubbla jordfel

Vid ett enfasigt jordfel fås ökad spänning mellan de icke felbehäftade faserna och jord. Detta kan i sin tur orsaka ett andra jordfel i en annan fas med nedsatt isolation. Vanliga komponenter där ett "andra" jordfel kan uppstå är:

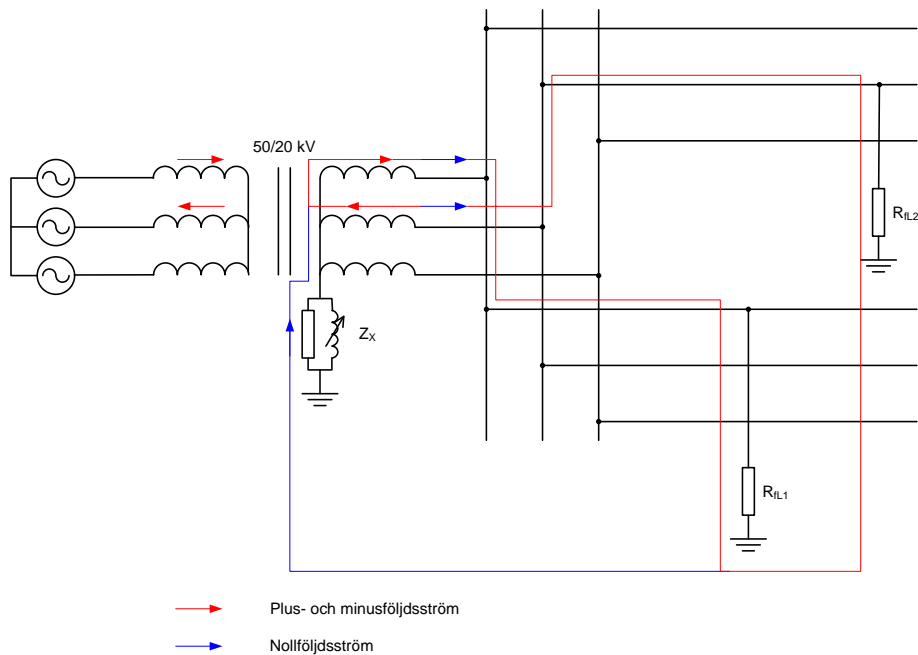
- Kablar
- Kabelavslut
- Kabelskarvar
- Gnistgap

Ett exempel på dubbelt jordfel (cross-country fault) visas i Figur 34.



Figur 39 Exempel på ett nät med dubbelt jordfel

I ett ekvivalent schema kan felet beskrivas enligt Figur 35.



Figur 40 Ekvivalent schema beskrivande dubbelt jordfel

Feltypen kan betraktas som en kortslutning mellan två faser via jord som berör två ledningar. Felet ger normalt mycket större felström än enfasigt jordfel och sammansätts till största delen av plus- och minusföljdsström, sett från matande transformator. Sett från varje utgående fack har dock strömmen stor nollföljdskomponent.

Eftersom felströmmen till jord i vardera felstället är stor fås lokalt stor spänningssättning vid felstället. Denna spänningssättning är med stor sannolikhet större än vad som tillåts för enfasigt jordfel.

Det är troligt att nollpunktsspänningen i matande station är relativt liten vilket kan innebära att riktade jordfelsskydd kan ha svårt att detektera riktning hos felströmmen. Vidare är det troligt att det riktade jordfelsskyddet för den ena ledningen ser felet i framriktningen medan motsvarande skydd för den andra ledningen ser felet i backriktningen.

För att minimera konsekvenserna av denna feltyp måste felbortkopplingen ske så snabbt som möjligt.

Ett alternativ för att åstadkomma snabb felbortkoppling är att använda oriktade strömmätande jordfelsskydd på utgående mellanspanningsledningar. Enkelt uttryckt skall dessa skydd ställas in enligt:

- Ströminställningen skall vara större än den maximalt förekommande enfasiga jordfelsströmmen genom ledningsfacket. Vägledning för detta

är den anslutande ledningens maximala kapacitiva generering av jordfelsström.

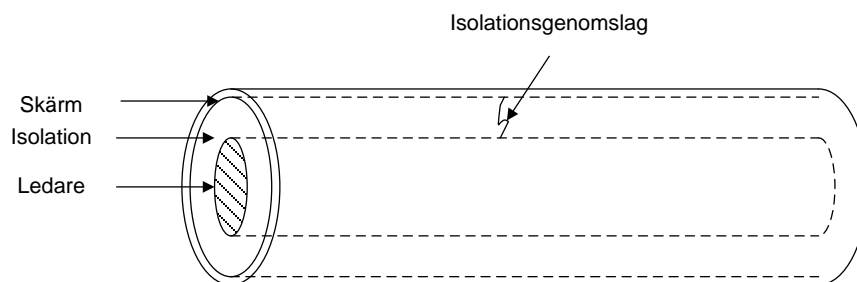
- Funktionstiden för detta oriktade jordfelsskydd bör vara maximalt 0,5 s vilket är i linje med kraven för direktjordade system

5.7 Intermittent jordfel på grund av "Water Treeing"

Första generationens kablar med isolering av tvärbunden polyeten (på svenska förkortat PEX och på engelska XLPE) hade vissa svagheter med mikroskopiska sprickor i isolationen. Dessa samlade fukt och bildade vattenträd (water treeing) och därigenom förändrades den elektriska fältfördelningen i isolationen med ökad risk för isolationsgenomslag.

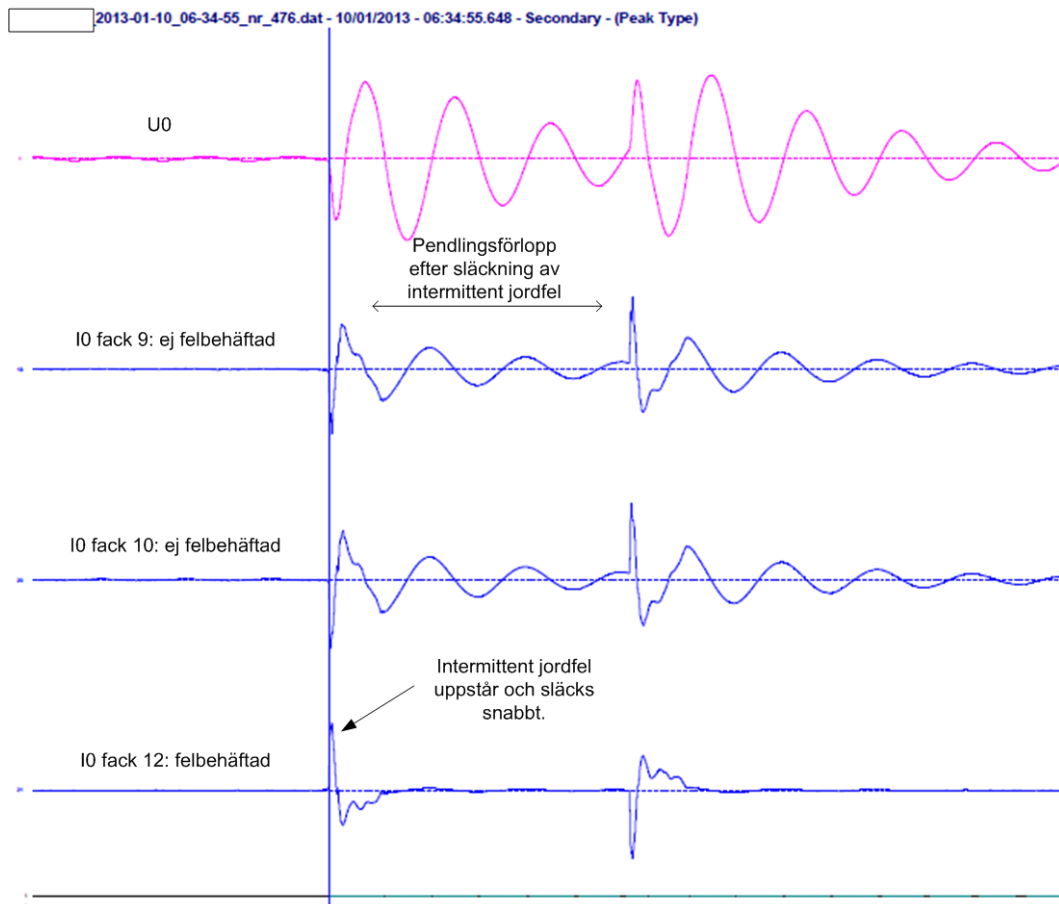
Tillverkningsmetoderna har sedan dess förbättrats och fel på grund av bildning av vattenträd är mer ovanliga i dag. De kan trots allt förekomma.

När fasspänningens momentanvärde antar ett högt värde sker ett överslag mellan fasledaren och jord i en punkt där isolationsförmågan är nedsatt. Detta kan vara orsakat av vatteninträngning i isolationen. Detta överslag ger en omladdning som innebär att spänningen över felstället snabbt antar ett värde nära noll, vilket gör att ljusbågen slocknar, d v s felet ger endast en kort strömpuls. En annan faktor som medverkar till att felet slocknar är att uppvärmningen från ljusbågen smälter material. Energiutvecklingen i felstället "blåser bort" det smälta materialet så att man får en vidgad "krater" i felstället.



Figur 41 Kabelfel på grund av bildning av vattenträd

Omladdningen ger upphov till en nollpunktsspänning som kommer att oscillera med en frekvens som är beroende av nätets kapacitans till jord och dess induktans till jord (nollpunktsreaktor). Initialt är nollföljdspeänningen lika med fasspänningen i felstället innan felet men med ombytt tecken. Ett exempel på hur nollpunktsspänning och nollföljdsström på ledningarna vid ett intermittent jordfel kan se ut visas i Figur 42.



Figur 42 Exempel på intermittent jordfel med efterföljande pendling i nollföljdssystemet (Källa: DLaboratory/E.ON)

Det intermittenta jordfelet initierar oscillation mellan nätets nollföljdskapacitans och nollpunktsreaktor (Petersenspolen). Eftersom nollpunktsreaktor är avstämd till en reaktans som motsvarar nätets kapacitiva reaktans fås resonansfrekvens lika med eller nära grundtonsfrekvens (50 Hz). Traditionella jordfelsskydd är normalt gjorda för att mäta grundtonsstorheter (nollpunktsspänning och jordfelsström). I nät med kabelledningar kan amplituden för strömpendlingen bli så stor att man riskerar oönskad utlösning från jordfelsskydd på icke felbehäftade ledningar. Detta gäller även för riktade jordfelsskydd eftersom resonanskretsen har viss resistans.

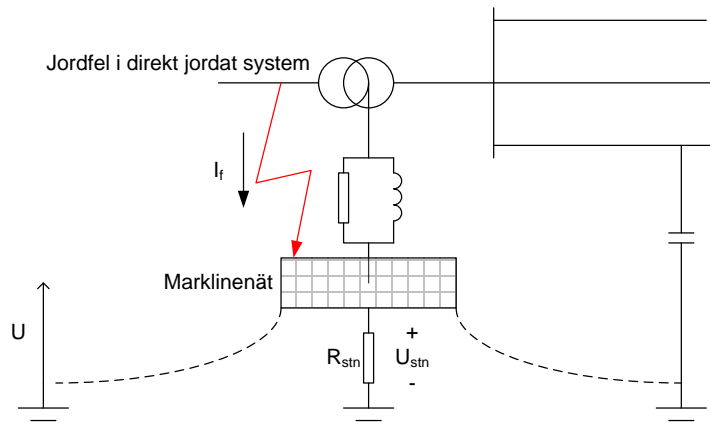
5.8 Transienter som initierar pendlingar i nollföljdssystemet i mellanspänningsnät

I 5.7 är diskuterat hur intermittenta jordfel kan initiera oscillationer i nollföljdssystemet mellan nätets kapacitans till jord och nollpunktsreaktor. Frågan är om andra transienta händelser kan initiera motsvarande pendlingar, och därmed risk för oönskade jordfelsskyddsfunktioner.

Möjliga händelser kan vara:

- Jordfel i överliggande effektivt jordade nät
- Kopplingar i nätet som kortvarigt ger kapacitiva osymmetrier
- Kopplingar i nätet med återvändande brytare
- Kopplingar i nätet med fränskiljarmanöver

Nedan diskuteras hur jordfel i överliggande nät kan initiera pendling i mellanspänningsnätet.



Figur 43 Jordfel som spänningssätter stationsjord i matande transformatorstation

Jordfelet i överliggande nät (t.ex. med en nominell spänning om 130 kV) spänningssätter stationsjorden i matande station:

$$U_{stn} = I_f \times R_{stn}$$

Jordfelet spänningssätter mellanspänningsnätets nollpunkt via nollpunktsreaktor och nollpunktsmotstånd. Detta i sin tur medför en omladdning av nätets nollföljdsystem med följande initiering av resonanspendling mellan nollpunktsreaktor och mellanspänningsnätets nollföljdskapacitans. Jordfelet i det effektivt jordade systemet skall kopplas bort inom 0,5 s. Vid bortkoppling av jordfelet sker en ny omladdning och åter fås resonansoscillation i nollföljdsnätet.

5.9 Kabelfel på grund av överbelastning

Förlusteffekten i en kabel är kvadratisk beroende av strömmen ($P_f = R \times I^2$). Förlusteffekten ger uppvärmning av kabelisolationen. Samtidigt sker överföring av värmeenergi från kabeln. För varje stadigvarande värde på strömmen genom kabeln fås en balans mellan tillförd och avgiven värme vilken motsvarar en viss temperatur. Om strömmen är större än vad kabeln är dimensionerad för fås så hög temperatur att kabelisolationen degenereras. Detta ger på sikt risk för isolationsgenomslag och därmed jordfel eller kortslutning. Det långvariga elavbrottet på Nya Zeeland orsakades av överbelastning av en jordkabel.

5.10 Sprickbildning i isolatorer eller avledare på friledningar

Porlinsisolatorer kan i vissa fall få viss sprickbildning där man får ansamling av smuts, sot, salt och annat. I torrt tillstånd är oftast dessa föroreningar icke ledande, dvs. resistansen är stor. Vid fuktig väderlek kan dock föroreningens resistans till jord minskas så att jordfel uppstår. En risk med ett sådant jordfel är att det i viss mån är "självläkande" vilket innebär att effektutvecklingen i felstället bränner bort fukt och föroreningar som orsakat jordfelet. Eftersom sprickbildningen kvarstår kommer felet att återkomma förr eller senare. Själva felstället är mycket svårt att lokalisera.

5.11 Händelser som kan orsaka oönskad jordfelsskyddsfunktion

Föreskrifterna kräver i många fall att jordfel med stor resistans till jord i felstället skall detekteras och kopplas bort. Detta innebär att jordfelsskydden skall kunna detektera små jordfelsströmmar i förhållande till nätets driftströmmar. Eftersom skydden måste vara så känsliga kan händelser, som inte är primära jordfel, påverka skydden och eventuellt ge oönskad bortkoppling. Nedan diskuteras ett antal fenomen som kan påverka jordfelsskydden.

5.11.1 Transienter i nätet

Vid alla snabba förändringar i nätet uppstår transienter i ström och spänning vilka uppträder som svängningar mellan kapacitanser och induktanser i nätet. Normalt har dessa transienter liten amplitud och kort varaktighet (god dämpning).

Det finns dock risk att en händelse kan initiera en rad pendlningar i nätet där dessa pendlningar tillsammans aktiverar transientmätande skydd.

5.11.2 Osymmetri i nätet

Osymmetri mellan faserna kan ha olika karaktär. Osymmetrisk belastning uppträder i mellanspänningsnät som minsföljdsströmmar och minsföljdsspänningen påverkar inte jordfelsskyddens funktion. Dock kan osymmetri uppstå på grund av olika koppling mellan faserna och jord, främst för friledningar. Sådan osymmetri kan uppträda som nollföljdsspänningar och nollföljdsströmmar i näten. Normalt sett är dessa nollföljdskomponenter så små att de inte påverkar jordfelsskydden. Dock kan de ge höga nollföljdsspänningar i nät med svag koppling till jord.

5.11.3 Felaktig sekundär nollföljdsström på grund av mätfel hos strömtransformatorer

Jordfelsskydd som mäter nollföljdsström ut på skyddad ledning kan matas på två olika sätt:

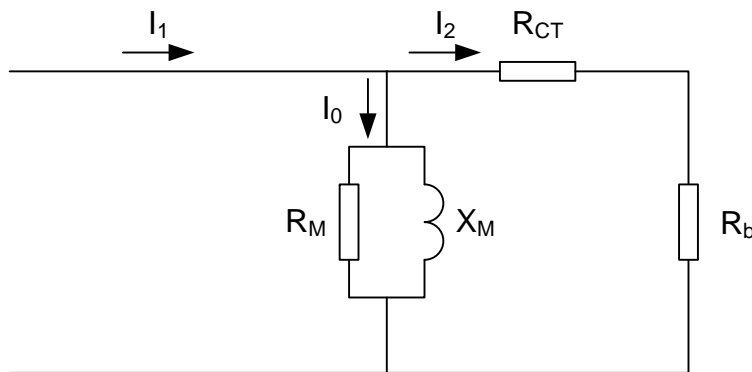
- Matning från summakopplade fasströmtransformatorer i "Holmgrenkoppling". Detta alternativ är vanligt vid de högre spänningsnivåerna (40 – 70 kV).

- Matning från kabelströmtransformator där transformatorkärnan omsluter de tre faserna. Detta alternativ är vanligt vid de lägre spänningsnivåerna (10 – 30 kV).

I båda fallen matas skydden med strömmen $3I_0$ (tre gånger nollföljdsströmmen).

En strömtransformator har alltid ett visst fel som delas upp i amplitudfel och vinkelfel. Hur dessa fel uppstår kan förklaras om vi studerar strömtransformatorns ekvivalenta schema.

Strömtransformatorns ekvivalenta schema



Figur 44 Strömtransformatorns ekvivalenta schema

I_1 är den primära strömmen, överreducerad till sekundärsidan. R_M och X_M är strömtransformatorns magnetiseringsimpedans (resistiv och induktiv del). R_{CT} är resistansen hos strömtransformatorns sekundärlindning. R_b är bördans resistans. Strömtransformatorns fel kan tecknas:

$$\Delta \bar{I} = \bar{I}_1 - \bar{I}_2 = \bar{I}_0$$

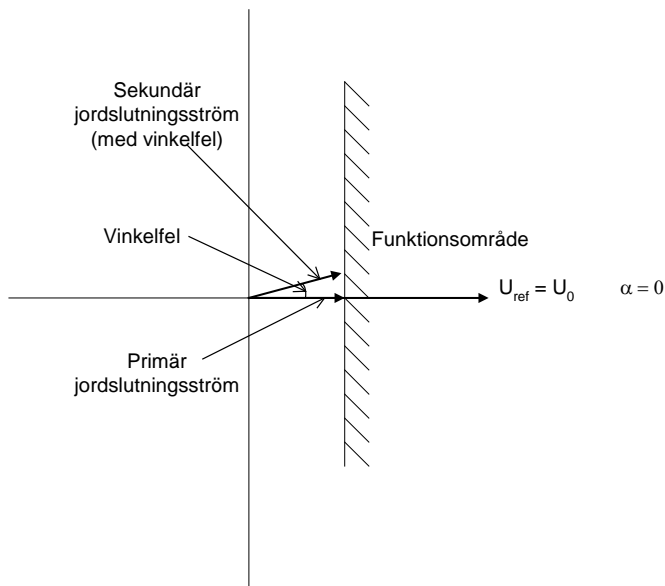
Vidare kan magnetiseringsströmmens storlek tecknas:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 \times \frac{R_{CT} + R_b}{R_{CT} + R_b + \frac{R_M \times jX_M}{R_M + jX_M}}$$

Z_M d v s $R_M // jX_M$ skall vara stor för att minimera amplitudfelet och vinkelfelet. Z_M är kvadratisk beroende av sekundärlindningens varvtal, vilket innebär att mätfelet är 4 gånger större för en strömtransformator 100/1 jämfört med 200/1.

Det är främst vinkelfelet som påverkar funktionen hos ett riktat jordströmsskydd. Vinkelfelet är alltid positivt, vilket innebär att den sekundära jordfelsströmmen vinkelmässigt ligger före den primära jordfelsströmmen.

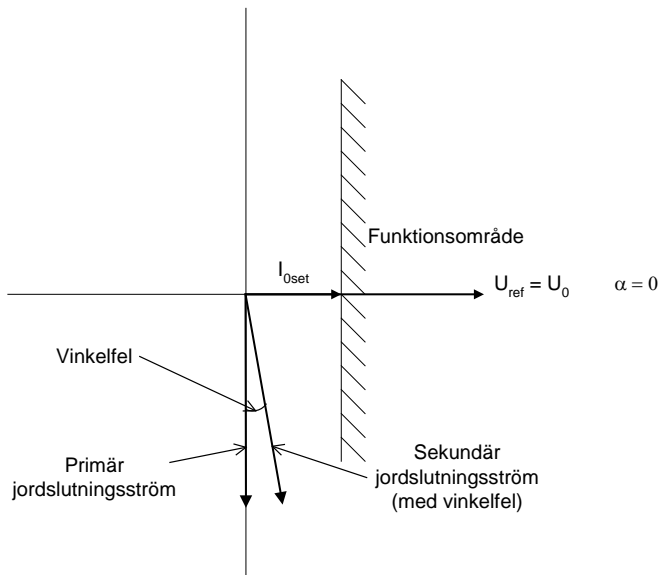
För ett fel ut på skyddad ledning fås följande visardiagram (Figur 45) (OBS referensriktning är ström ut på ledningen):



Figur 45 Vinkelfel vid jordfel på skyddad ledning

Vi kan se att för denna ström ger vinkelfelet liten påverkan på den aktiva jordfelsströmmen. Amplitudfelet har viss betydelse, det som ofta kallas verkningsgrad hos strömtransformatorn.

I visardiagram i Figur 46 visas primär jordfelsström på annan ledning (fel i backriktningen: kapacitiv ström i backriktningen) och sekundär jordfelsström med strömtransformatorns vinkelfel:



Figur 46 Vinkelfel vid jordfel på annan ledning

Med en liten funktionsström och en stor kapacitiv jordfelsström från ledningen finns risk för oönskad skyddsfunktion.

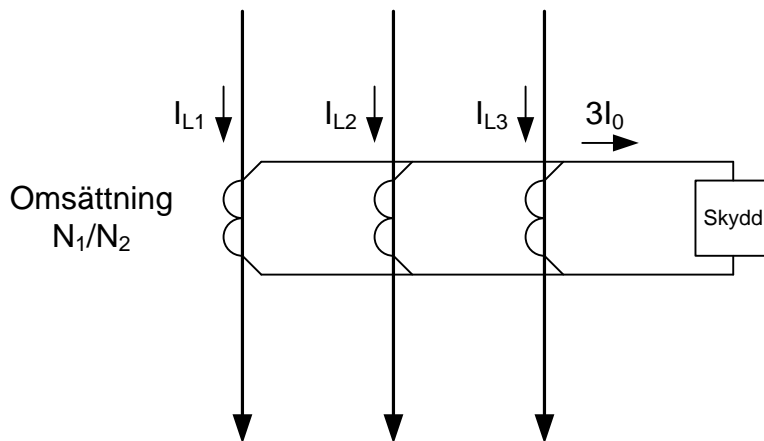
Den aktiva strömkomponenten, orsakad av strömtransformatorns vinkelfel, kan beräknas enligt:

$$I_{aktiv} = I_{c,ledning} \times \sin \varphi$$

där φ är vinkelfelet.

Hur stort vinkelfel som kan accepteras är beroende av skyddets inställda funktionsström och ledningens kapacitiva jordfelsström vid stumt enfasigt jordfel. För att få önskad känslighet hos strömmätande riktade jordfelskydd krävs inställd funktionsström ned mot 1 A (primärström) i ett 12 kV nät. För 20 kV kan ströminställningen ofta vara något högre.

För summakopplade fasströmtransformatorer (Holmgrenkoppling) fås en falsk summaström beroende på skillnad mellan fastransformatorerna.



Figur 47 Strömtransformatorer i Holmgrenkoppling

Om primärströmmen är helt symmetrisk ($\bar{I}_{L1} = I, \bar{I}_{L2} = a^2 I, \bar{I}_{L3} = a I$) fås en falsk summaström enligt:

$$3\bar{I}_0 = I \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot [(1 + \varepsilon_{L1}) \cdot (\cos \delta_{L1} + j \sin \delta_{L1}) + a^2 \cdot (1 + \varepsilon_{L2}) \cdot (\cos \delta_{L2} + j \sin \delta_{L2}) + a \cdot (1 + \varepsilon_{L3}) \cdot (\cos \delta_{L3} + j \sin \delta_{L3})]$$

ε_{Lx} är amplitudfelet för strömtransformatorn i fas Lx

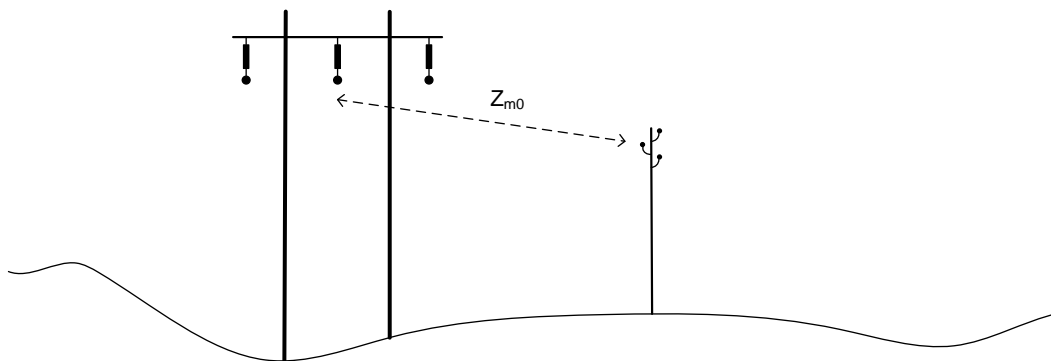
δ_{Lx} är vinkelfelet för strömtransformatorn i fas Lx

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

5.11.4 Induktion från ledning i effektivt jordat system

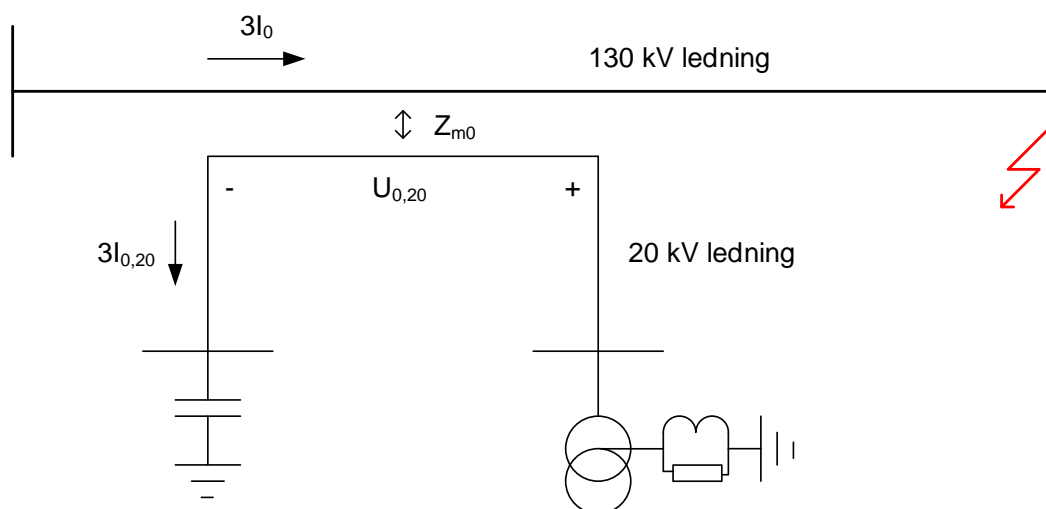
Friledningarna i mellanspänningsnät dras i vissa fall i ledningsgata gemensamt med ledning i effektivt jordat nät. Beroende på avstånd mellan ledningarna finns induktiv koppling. Denna koppling är främst av nollföljdskaraktär, dvs. vid jordfel i det effektivt jordade nätet inducerar den stora jordfelsströmmen i det effektivt jordade nätet en nollföljdsspänning över mellanspännings-ledningen.

I Figur 48 visas ett typiskt fall med ömsesidig koppling mellan en 130 kV ledning och en näraliggande 20 kV ledning.



Figur 48 Parallellism mellan 130 kV ledning (effektivt jordat nät) och 20 kV ledning (icke effektivt jordat nät)

I ett ekvivalent schema, Figur 49 visas nätbilden med parallellism mellan ledningarna.



Figur 49 Nätbild med ömsesidig nollföljdskoppling mellan näraliggande ledningar

Ett jordfel orsakar en jordfelsström på 130 kV ledningen: $3I_{0,130}$. Denna ström inducerar en längsspänning på den parallella 20 kV ledningen:

$$U_{0,20} = 3I_{0,130} \times Z_{m0}$$

Denna spänning ger i sin tur upphov till en nollföljdsström på 20 kV ledningen: $3I_{0,20}$.

Den ömsesidiga impedansen Z_{m0} bestäms av olika faktorer:

- Avstånd mellan 130 kV ledningen och 20 kV ledningen
- Markresistiviteten
- Parallellsträckan längd

Om avståndet mellan 130 kV ledningen och 20 kV ledningen som visas i Figur 48 är ca 20 meter kan den ömsesidiga nollföljdsimpedansen mellan ledningarna beräknas till ca 1 Ω /km (induktiv impedans). Med en jordfelsström om 1 kA på

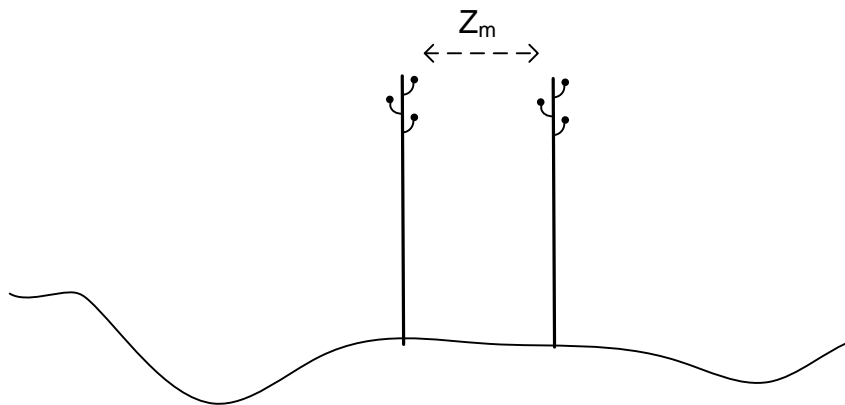
130 kV ledningen induceras därmed en nollföljdsspänning om 1000 V/km (nollföljd) på 20 kV ledningen. Storleken på nollföljdsströmmen som uppkommer på 20 kV ledningen är beroende av nollföljdsimpedanserna i 20 kV nätet, främst nollpunktsreaktor, nollpunktsmotstånd och nätets kapacitans till jord. Nollföljdsström och nollföljdsspänning på 20 kV nivå kan ha följande konsekvenser:

- Spänningssättning av 20 kV nätet utöver dimensionering
- Önskad funktion hos 20 kV jordfelskydd

Slutsatsen blir att i de nät man utnyttjar en ledningsgata för både en ledning i ett effektivt jordat nät och en ledning med icke effektiv systemjordning bör man analysera om den ömsesidiga nollföljdskopplingen kan orsaka problem. En extrem form av ömsesidig nollföljdskoppling uppkommer om en ledning ingående i ett icke effektivt jordat system placeras på samma stolpar som en ledning ingående i ett effektivt jordat system. Sådana dubbelledningar förekommer i Nederländerna och i Tyskland (RWE).

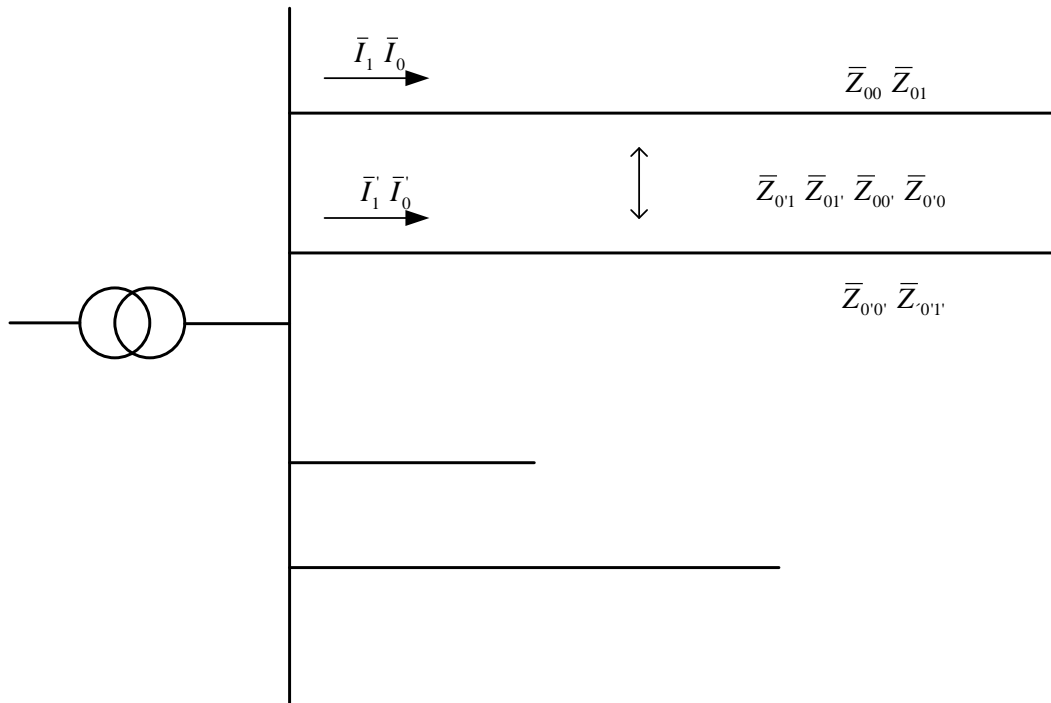
5.11.5 Cirkulerande nollföljdsström i parallella friledningar

I vissa fall krävs hög överföringskapacitet mellan ställverk i mellanspänningsnät. I dessa fall har man ofta parallellgående friledningar. Detta ger även viss reserv att bibehålla matningen även med en av de parallellgående ledningarna ur drift. Dock innebär parallellismen viss ömsesidig impedans Z_m mellan ledningarna.



Figur 50 Parallella distributionsledningar

I ett enlinjeschema kan olika storheter beskrivas (Figur 51).



Figur 51 Impedanser för de parallella ledningarna

Den symmetriska lastströmmen (plusföljd) på ledningarna inducerar spänningsfall över ledningarna både i plusföljd och nollföljd. I den slutna slingan fås en cirkulerande nollföljdsström:

$$\bar{I}_0 = -\bar{I}'_0 = \frac{\bar{I}_1 \times \bar{Z}_{01} + \bar{I}'_1 \times \bar{Z}_{0'1} + \bar{I}'_0 \times \bar{Z}_{0'0} - \bar{I}_1 \times \bar{Z}_{0'1} - \bar{I}'_1 \times \bar{Z}_{0'0} - \bar{I}_0 \times \bar{Z}_{0'0}}{\bar{Z}_{00} + \bar{Z}_{0'0'}}$$

Den cirkulerande nollföljdsströmmen, vid normaldrift, kan orsaka oönskad utlösningsfunktion hos jordfelskyddet för de aktuella parallella ledningarna. Speciellt gäller detta om ett verkligt jordfel inträffar på annan ledning i nätet och den ena av de parallella ledningarna är en friledning och den andra en jordkabel.

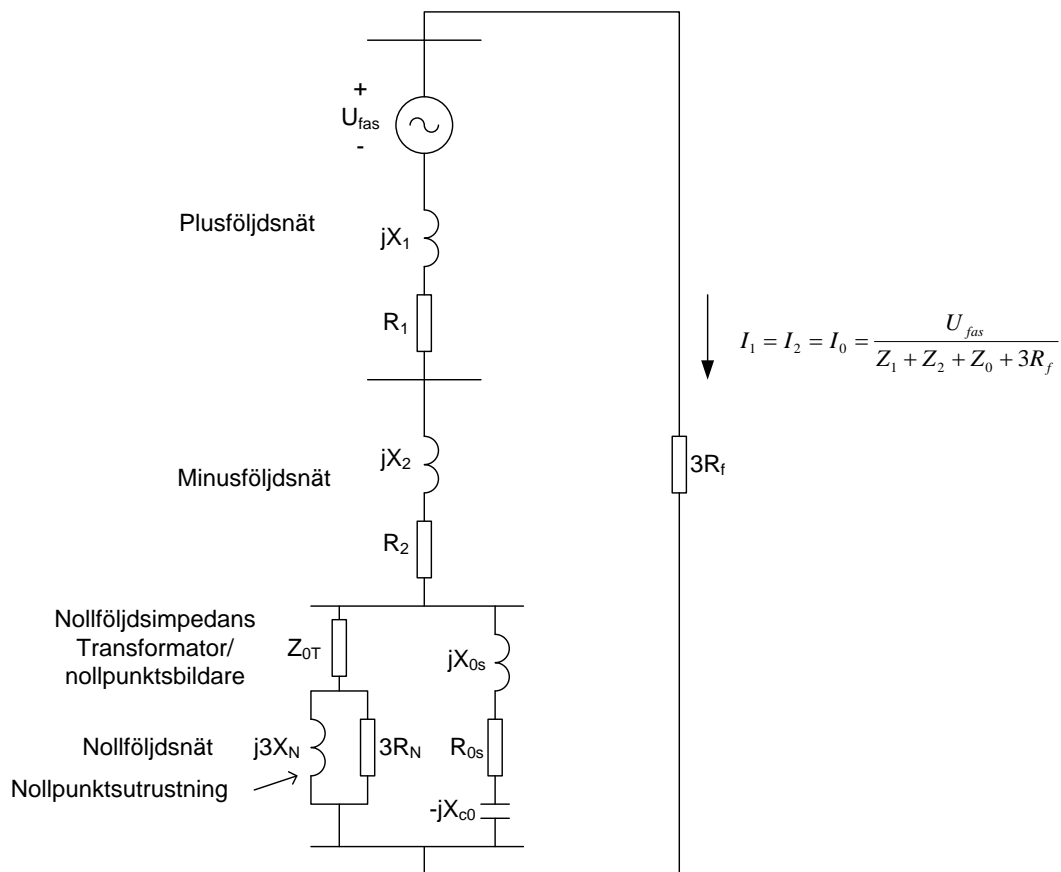
För att minimera den cirkulerande nollföljdsströmmen kan ledningarna ges "spegelsymmetrisk" fasplacering.

6 Principer för jordfelsdetektering i mellanspänningsnät

Det finns ett antal olika principer för detektering och bortkoppling av jordfel i icke effektivt jordade nät. Nedan ges kortfattade beskrivningar av de olika principerna och deras egenskaper.

6.1 Grundtonsmätande jordfelsskydd

Med hjälp av symmetriska komponenter kan ett enfasigt jordfel beskrivas enligt Figur 52.



Figur 52 Enfasigt jordfel beskrivet som seriekoppling av plus-, minus- och nollföljdsnät

6.1.1 Enkel analys

Traditionellt har analysen förenklats genom att källimpedanserna och serieimpedanserna i plus- och minusföljdsnäten försumrats ($Z_1 = Z_2 = 0$). Vidare har serieimpedanserna i nollföljdsnätet försumrats ($jX_{0s} = R_{0s} = 0$).

Med dessa förenklingar kan nollpunktsspänning och jordfelsström enkelt beräknas:

$$\bar{U}_0 = \frac{\bar{U}_{fas}}{1 + \frac{3R_f}{\bar{Z}_0}}$$

$$I_0 = \frac{\bar{U}_{fas}}{\bar{Z}_0 + 3R_f}$$

\bar{U}_{fas} : Fasspänning före fel

R_f : Resistansen till jord i felstället

\bar{Z}_0 : Nätets totala bakomliggande nollföljdsimpedans. Z_0 sammansätts av ledningarnas och kablarnas kapacitans mellan faserna och jord samt av impedansen hos apparater anslutna mellan transformatornollpunkter och jord.

I ett **isolerat** system, d v s ett system utan apparater anslutna mellan transformatornollpunkter och jord, kan den bakomliggande nollföljdsimpedansen skrivas:

$$\bar{Z}_0 = -jX_c$$

där X_c är nätets kapacitiva reaktans (Ω /fas) mellan varje fas och jord.

I ett **motståndsjordat** system, d v s ett system med ett nollpunktsmotstånd anslutet mellan en transformatornollpunkt och jord, kan den bakomliggande nollföljdsimpedansen skrivas:

$$\bar{Z}_0 = -jX_c // 3R_N = \frac{-jX_c \cdot 3R_N}{-jX_c + 3R_N}$$

där R_N är nollpunktsmotståndets resistans. Observera att i denna resistans ingår även nollföljdsresistansen i den transformator eller jordningstransformator till vilken nollpunktsmotståndet är anslutet.

I ett **impedansjordat** system, d v s ett system med en eller flera nollpunktsreaktorer (Petersenspolar) anslutna mellan transformatornollpunkter och jord, kan den bakomliggande nollföljdsimpedansen skrivas:

$$\bar{Z}_0 = -jX_c // 3R_N // j3X_N = \frac{3R_N \cdot X_N \cdot X_c}{X_N \cdot X_c + jR_N \cdot (3X_N - X_c)}$$

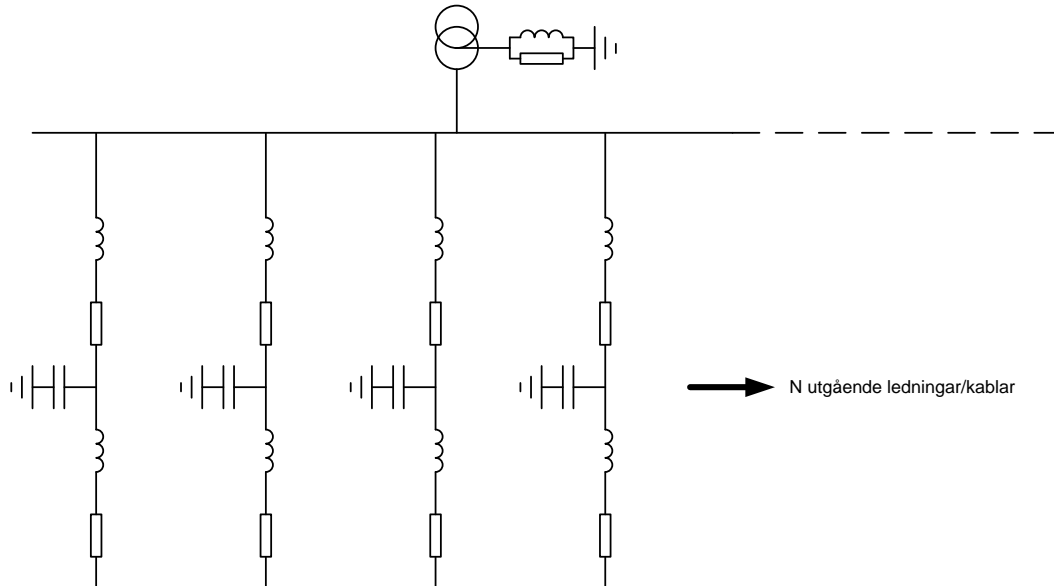
där X_N är nollpunktsreaktors reaktans. Här har antagits att ett nollpunktsmotstånd finns inkopplat parallellt med en nollpunktsreaktor i nätet. Detta motstånd används för att erhålla en väldefinierad aktiv jordfelsströmkomponent (i fas med nollpunktsspänningen) för ledningarnas riktade jordströmsskydd.

Om nätet är perfekt avstämt ($3X_N = X_c$), kan den resulterande bakomliggande nollföljdsimpedansen tecknas:

$$\bar{Z}_0 = -jX_c // 3R_N // j3X_N = 3R_N$$

6.1.2 Analys av nät med stor kapacitiv jordfelsström

I nät med stora kapacitiva jordfelsströmmar (långa kabelsträckor) kommer nollföljdsnätets serieimpedanser jX_{0s} och R_{0s} att påverka den bakomliggande nollföljdsimpedansen. En förenklad uppskattning av inverkan av dessa impedanser kan göras med ett ekvivalent nät enligt Figur 53.



Figur 53 Ekvivalenta nollföljdsimpedanser i ett nät med N st. utgående ledningar

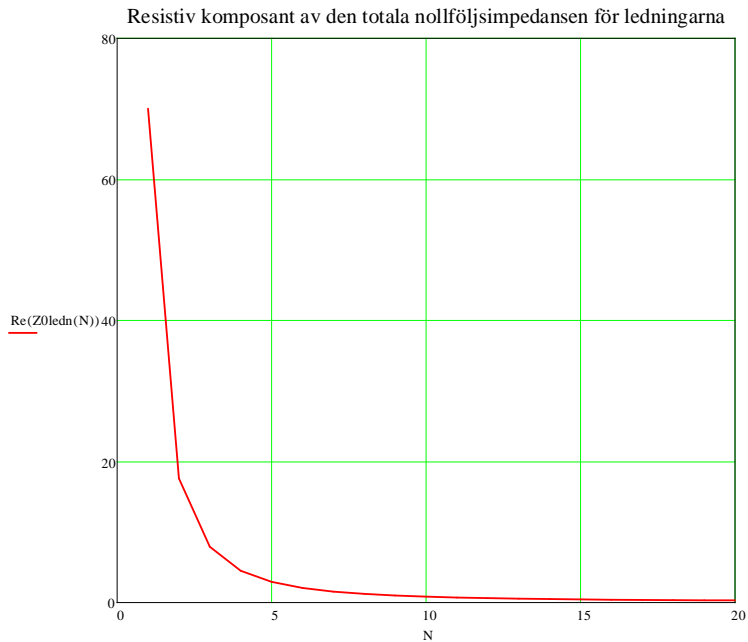
Följande gäller för det studerade nätet:

- Nätet har enbart kabelledning
- Varje ledning har identiska data: nollföljdsreaktans till jord ($-jX_{c0}$) och serieimpedans ($R_{s0} + jX_{s0}$)
- Ledningskapacitansen till jord är placerad mitt på ledningen
- Nätets driftspänning: $U_N = 22$ kV
- Kapacitiv jordfelsström: $I_c = 2$ A/km
- Ledningarnas nollföljds-serieimpedans: $Z_{L0} = 1,4 + j 0,75 \Omega/\text{km}$
- Total kabellängd: $L = 100$ km
- Nätets totala kapacitiva jordfelsström är 200 A oberoende av antalet utgående ledningar, dvs. kabellängden för vardera ledningen är $100/N$ km
- $X_{c0} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{\frac{L}{N} I_c}$
- $R_{s0} + jX_{s0} = \frac{L}{N} \cdot Z_{L0}$

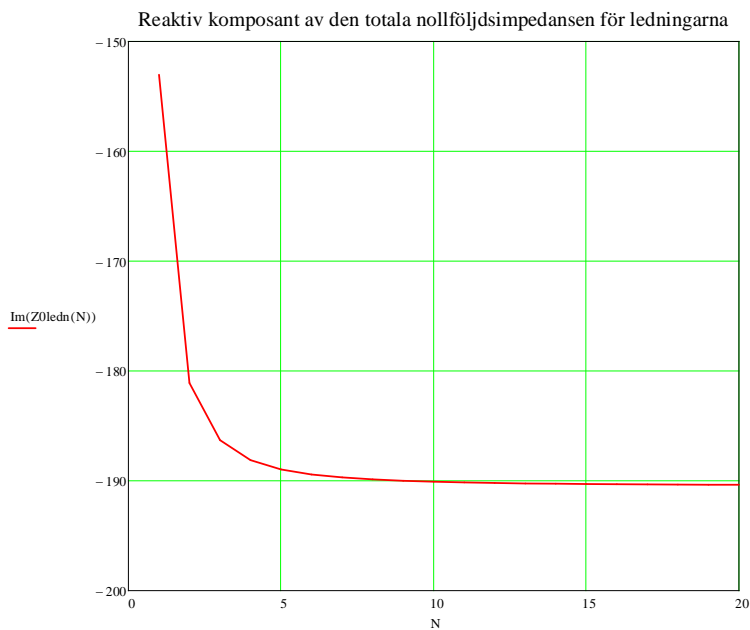
Den totala ledningsimpedansen för de parallella ledningarna kan nu tecknas:

$$Z_{0,ledntot} = \frac{-jX_{c0} + \frac{1}{2}(R_{s0} + jX_{s0})}{N}$$

Den resulterande ekvivalenta ledningsimpedansen för detta exempel visas i Figur 54 och Figur 55.



Figur 54 Resistiv del av den resulterande ledningsimpedansen (nollföljd)



Figur 55 Reaktiv del av den resulterande ledningsimpedansen (nollföljd)

I detta exempel kan vi konstatera att serieimpedanserna har betydande inverkan om antalet utgående ledningar understiger ca 5.

Det visade exemplet ger en vägledning men det måste observeras att **varje nät är unikt och måste studeras för sig**. Man kan dock dra slutsatsen att för stora tätortsnät med många korta kablar har serieimpedanserna försumbar inverkan på den totala nollföljdsimpedansen. För landsortsnät med få utgående ledningar kan dock påverkan bli betydande.

6.1.3 Oriktade jordströmsskydd

Det oriktade jordströmsskyddet är enkelt till sin uppbyggnad och består av ett känsligt strömrelä matat från summaströmmen ($3I_0$) på den skyddade ledningen. Mätningen sker endera från en kabelströmtransformator där järnkärnan omsluter de tre faserna, eller från fasströmtransformatorerna parallellkopplade på sekundärsidan (Holmgrenkoppling). För datorbaserade skydd sker en sampling av jordfelsströmmen där en samplingsfrekvens om ca 1000 Hz ofta används. För sampling lågpasfilteras uppmätt ström i ett analogt aktivningsfilter för att undvika felaktig mätning på grund av vinkningsfenomen. Detta innebär att högsta frekvensen som kan registreras är ca 500 Hz, dvs. 10^{de} överton. Det finns dock exempel på skydd med högre samplings/analysfrekvens.

Följande egenskaper kan identifieras för de oriktade grundtonsmätande jordströmsskydden:

- Vid transienta och intermittenta jordfel med höga och korta strömpikar, har felströmmen stort övertonsinnehåll (> 500 Hz). Uppmätning av strömpikar blir därför otillförlitlig. Oriktade strömsskydd kan därför normalt inte detektera och koppla bort transienta eller intermittenta jordfel korrekt.
- I nät med övervägande friledningar är förekomsten av transienta och intermittenta jordfel ringa.
- Har ledningarna liten kapacitiv generering av jordfelsström kan oriktade traditionella jordströmsskydd med fördel användas, speciellt i nät med nollpunktsmotstånd.
- Skyddsinställning är förhållandevis enkel med strömparameter och tidsfördröjning.
- Oriktade jordströmsskydd är lämpade för att detektera och ge snabb bortkoppling av dubbla simultana jordfel (cross-country fault). Skyddet ställs lämpligen in på en strömnivå över felströmsnivån för ett enkelt enfasigt jordfel ut på skyddad ledning eller ledningens kapacitiva jordfelsström vid enfasigt jordfel på annan ledning.

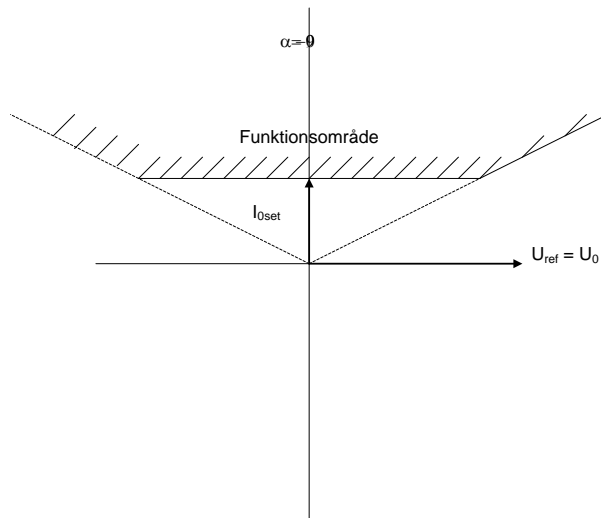
6.1.4 Riktade jordströmsskydd

För riktade jordströmsskydd sker strömmätning på samma sätt som för oriktade jordströmsskydd. Samtidigt jämförs strömmen fasvinkel med fasvinkeln för en uppmätt referensspänning. Denna referensspänning utgörs normalt av nollföljdsspänning ($3U_0$) matad från öppet-deltakoppad spänningstransformatorgrupp. Därmed kan riktning till jordfel bestämmas. Här finns olika principer för riktningsbestämning:

- $I_0 \cdot \cos(\varphi - \alpha)$

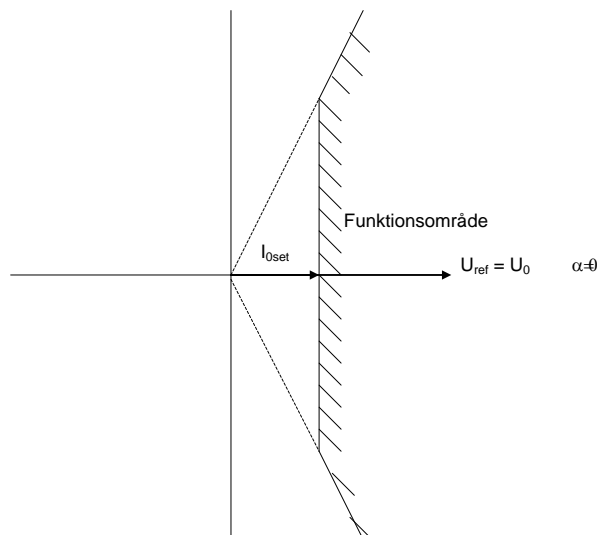
φ är den aktuella vinkeln mellan jordfelsströmmen och nollpunktsspänningen och α är skyddets karakteristiska vinkel. För kapacitiva nät (utan nollpunktsutrustning) är $\alpha = -90^\circ$. I nät med nollpunktsmotstånd är $\alpha = 0^\circ$. Ofta är karakteristiken modifierad enligt Figur 56 och Figur 57 för att ta hänsyn till vinkelfel vid stora jordfelsströmmar.

Karakteristiken i ett nät med isolerad nollpunkt kan beskrivas enligt Figur 51.



Figur 56 Riktat jordströmsskydd för nät med isolerad nollpunkt

Karakteristiken i ett nät med nollpunktsmotstånd kan beskrivas enligt Figur 57.

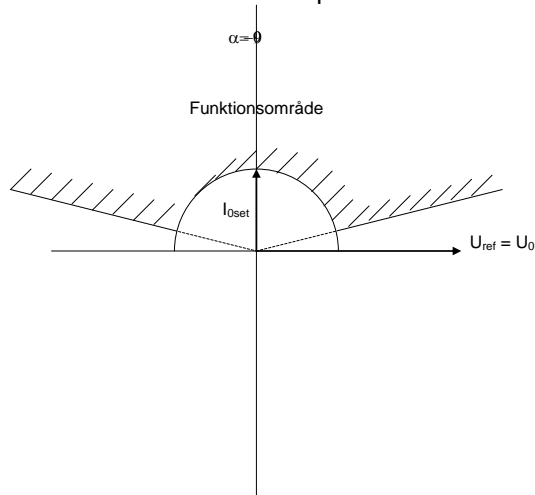


Figur 57 Riktat jordströmsskydd för nät med nollpunktsmotstånd

- I_0 och vinkel φ

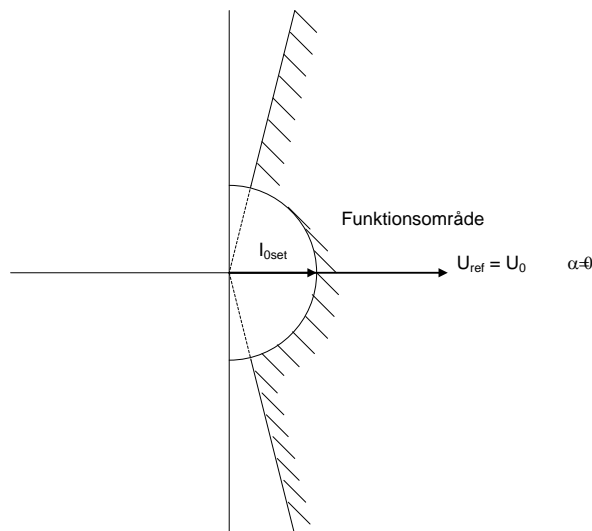
I detta fall skall strömmens amplitud överskrida inställt värde och vinkeln mellan jordfelsström och nollpunktsspänning skall ligga inom ett intervall t ex $\pm 88^\circ$ från den karakteristiska vinkeln för skyddet.

Karakteristiken i ett kapacitivt nät kan beskrivas enligt Figur 58.



Figur 58 Riktat jordströmsskydd för nät med isolerad nollpunkt

Karakteristiken i ett nät med nollpunktsmotstånd kan beskrivas enligt Figur 59.



Figur 59 Riktat jordströmsskydd i nät med nollpunktsmotstånd

Följande egenskaper kan identifieras för de riktade grundtonsmätande jordströmsskydden:

- Vid transienta och intermittenta jordfel med höga och korta strömpikar, har felströmmen stort övertonsinnehåll (> 500 Hz). Uppmätning av strömpikar blir därför otillförlitlig. Riktade strömskydd kan därför normalt inte detektera och koppla bort transienta eller intermittenta jordfel korrekt.

- I nät med övervägande friledningar är förekomsten av transienta och intermittenta jordfel ringa. Har ledningarna icke försumbar kapacitiv generering av jordfelsström kan riktade traditionella jordströmsskydd med fördel användas.
- Skyddsinställning är förhållandevis enkel med funktionsström, funktionsvinklar och tidsfördröjning.

6.1.5 Spänningsskydd

Spänningsskydd som mäter nollföljdsspänning är ett enkelt och effektivt jordfelsskydd för mellanspänningsnäten. Nollföljdsspänningen kan tas från en enfasig spänningstransformator ansluten till en krafttransformators nollpunkt eller från tre fasspänningstransformatorer vilkas sekundärlindningar seriekopplats. Skyddstypen möjliggör dock inte selektiv bortkoppling av jordfel eftersom nollpunktsspänningen i stort sett är densamma i hela nätet oberoende av felläget. Skyddstypen används därför som reservskydd med relativt lång tidsfördröjning.

Följande egenskaper kan identifieras för spänningsskydd:

- Skyddsbyggnaden är enkel
- Eftersom jordfel ger nollpunktsspänning i hela nätet kan enbart spänningsmätning inte ge selektiv detektering av jordfel. Denna skyddfunktion är därför mestadels använd som reservskyddfunktion.
- Vid intermittenta jordfel i nätet uppträder oscillationer med hög nollpunktsspänning även under tidsintervall då det intermittenta jordfelet "slocknat". Detta medför risk för oselektiv bortkoppling av hela nätet vid intermittenta jordfel.

6.1.6 Selektivitet

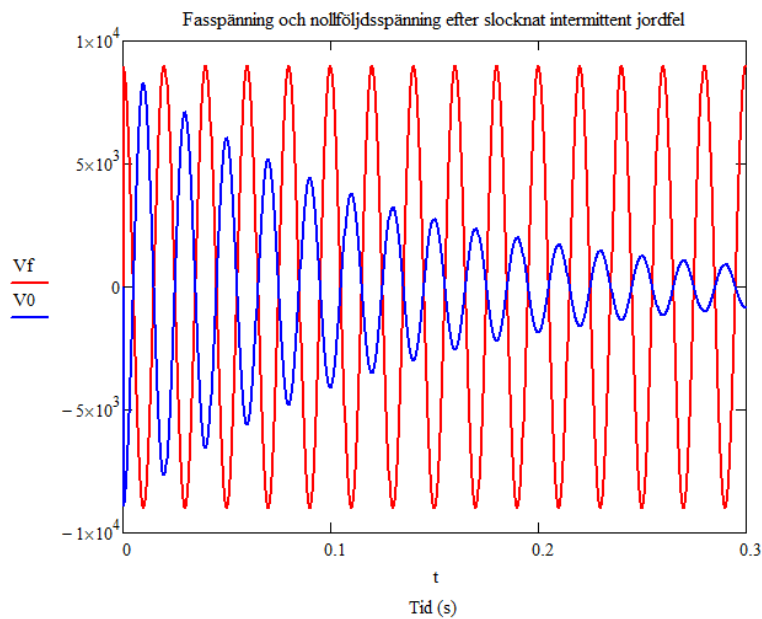
Traditionella grundtonsmätande jordfelsskydd mäter jordfelsström och nollföljdsspänning. Storleken på dessa storheter är i stort sett oberoende av var i nätet ett jordfel inträffar. Därför kan inte ström- och spänningsinställningar användas för att identifiera felläget. För att säkerställa selektivitet används därför enbart olika tidsfördröjning för jordfelsskydden. De skydd som ligger mest perifert i ett radiellt matat nät ges kortast funktionstid. Stegvis ökas funktionstiden för skydden närmare matande transformator. Detta system är fullt acceptabelt i de flesta mellanspänningsnät. Vid många seriekopplade ledningar/jordfelsskydd kan däremot feltiden bli så lång att myndighetskravet på maximal feltid inte kan uppfyllas.

6.2 Transientmätande jordfelsskydd

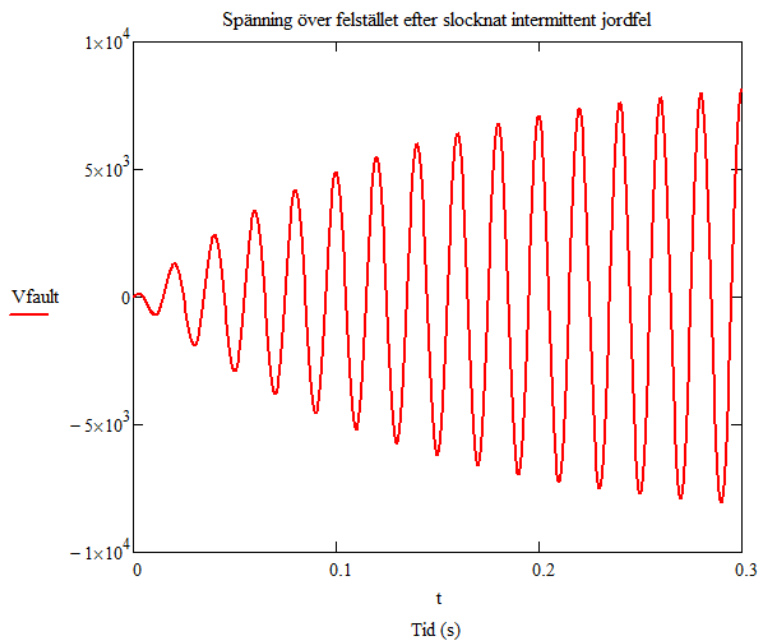
Såsom beskrivits i 5.7 har vissa typer av jordfel transient karaktär, dvs. när jordfelet inträffar fås en mycket snabb strömstöt (ca 1 ms) som ger en omladdning av nätets faskapacitanser till jord. Efter detta korta skede är spänningen över felstället noll och jordfelet slocknar. Omladdningen har även inneburit att nätets nollpunkt har spänningssatts upp till fasspänningen i felbehäftad fas men med ombytt tecken. I nästa skede fås nu en svängning

mellan nätets nollföljdskapacitans till jord och nollpunktsreaktorn. Om nätet är väl avstämt har denna svängning en frekvens nära grundfrekvensen 50 Hz. Spänningen över felstället som slocknat är lika med summan av nollföljdsspänningen och matande fasspänning. Detta innebär att spänningen över felstället växer upp med en tidskonstant R/L för nollföljdssystemet.

Exempel på nollföljdsspänning och matande fasspänning visas i Figur 60. Spänningen över felstället visas i Figur 61.



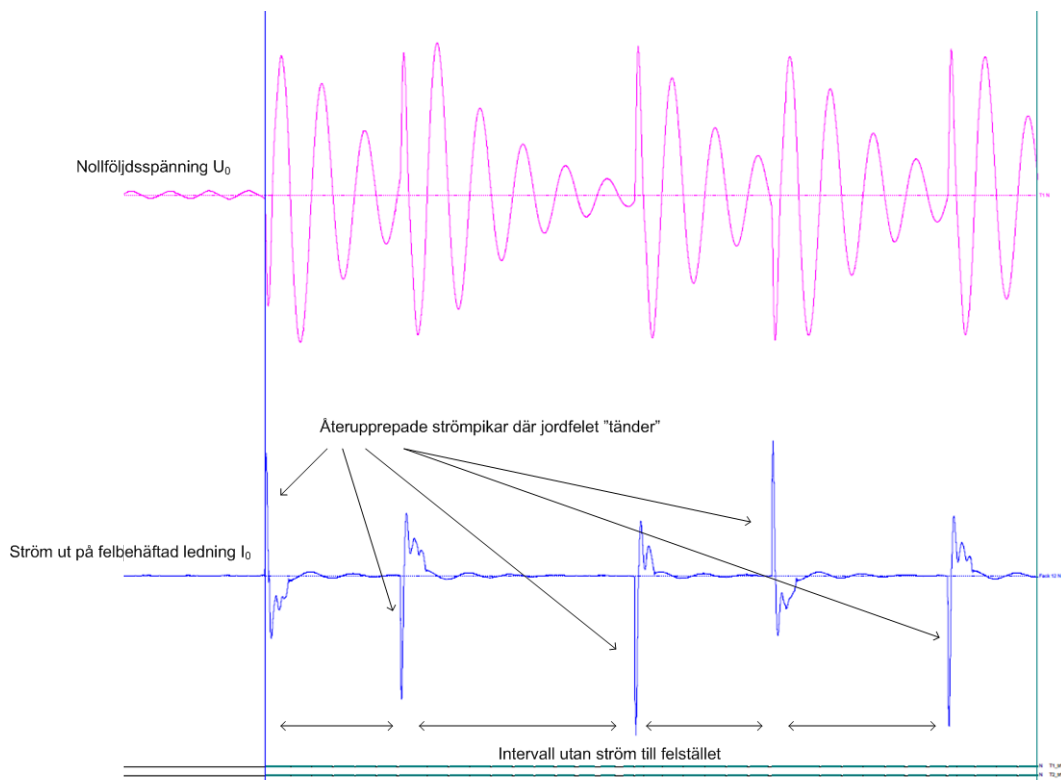
Figur 60 Nollföljdsspänning (blå) och matande fasspänning (röd) efter en transient



Figur 61 Spänning vid felstället efter en transient

Det är troligt att felet kommer att tända igen när spänningen blivit tillräckligt stor.

Från ett verkligt felfall kan man observera strömspiken som uppträder vid felet och som upprepas om felet återtändas när spänningen blivit tillräckligt stor.



Figur 62 Nollpunktström U_0 och felström I_0 vid intermitterent jordfel (Källa: DLaboratory/E.ON)

Transientmätande jordfelsskydd identifierar den strömpik som fås när felet "tänder". Polariteten på strömpiken jämförs med polariteten hos nollpunktsspänningen för att bestämma om felet ligger ut på ledningen (framåt) eller på annan ledning (bakåt).

För att tillåta utlösningssfunktion från skyddet räknas ofta strömpulser inom ett visst tidsintervall. Om antalet strömpulser överstiger ett inställt antal ges utlösningssignal. I detta fall är felbortkopplingstiden beroende av hur ofta strömpikarna kommer.

För andra skydd startas en tidskrets vid första strömpuls. Utlösningssfunktion fås om nollföljdsspänningen överstiger inställd nivå efter inställd tid. Upprepade strömpulser kan även hålla kvar aktiveringen av timern även om nollföljdsspänningen skulle bli låg.

Det finns även andra principer för analys av strömpikarna vid intermitterenta jordfel. Ett alternativ är integrering av uppmätt ström som ger information om omladdningen av nätet vid strömpikarna.

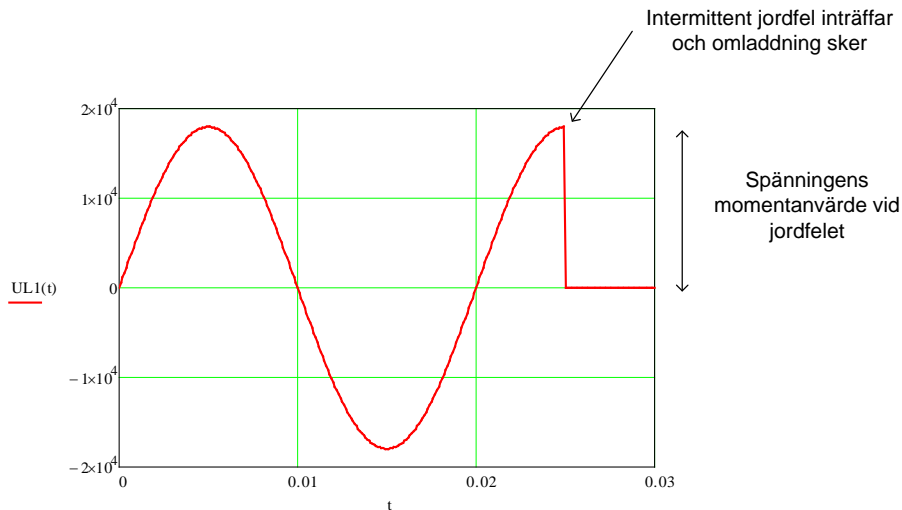
Följande osäkerheter kan identifieras för de transientmätande skydden:

- De uppträdande strömpulserna kan ha mycket kort varaktighet (< 1 ms). Eftersom samplingsintervallet för de flesta skydd ligger i samma

intervall (ca 1000 Hz) finns risk att enstaka strömpulser inte detekteras eller detekteras med felaktig amplitud och/eller fasläge. I många fall används analog filtrering av strömmen före samling för att öka varaktigheten för strömpulsen. Vissa relätillverkare har ökat samplingsfrekvensen för att förbättra skyddsfunktionen.

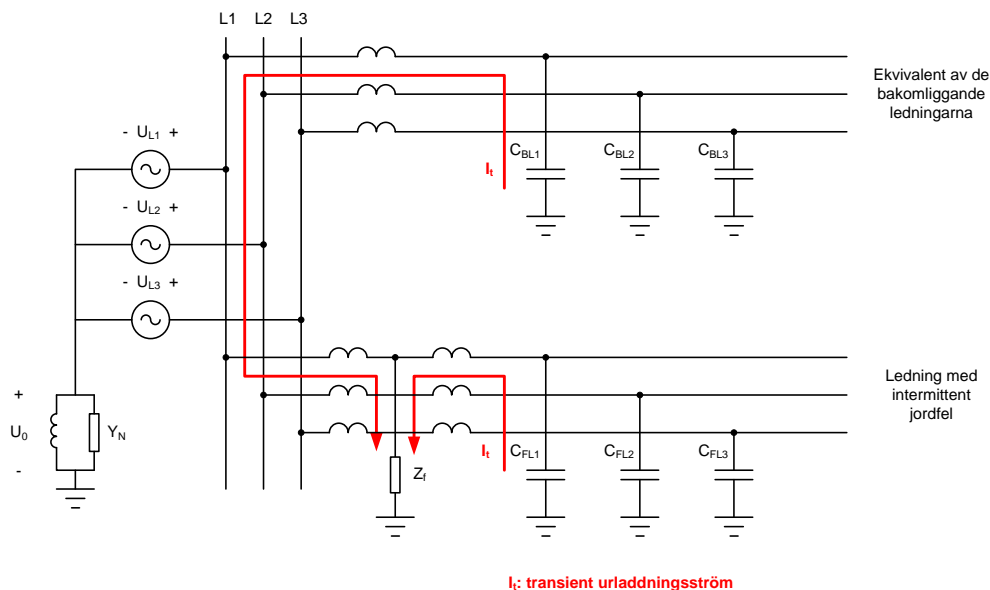
- För transientmätande skydd skall, för vissa fabrikat, amplituden på strömspiken för detektering anges som inställningsparameter. För andra fabrikat är nivån för strömdetekteringen fast. Det är oklart hur denna parameter skall beräknas. En grov uppskattning av strömspiken kan göras enligt nedan:

Vid ett intermitterent jordfel kommer nätets laddning i felbehäftad fas att urladdas till jord under ett mycket snabbt förlopp, ca 1 ms. Med mycket stor sannolikhet inträffar felet vid spänningens toppvärde enligt nedan.



Figur 63 Fasspänning vid felstället

Urladdningen för felbehäftad fas (omladdning till de felfria faserna) kan åskådliggöras enligt Figur 64.



Figur 64 Schematisk bild av urladdningsströmmen vid intermittent jordfel

Förenklat kan felförloppet beskrivas enligt:

Vid $t = 0,025$ s startar urladdningen och impedansen $Z_f = 0$. Man kan se urladdningen som första delen av en resonansspending mellan shuntkapacitansen till jord för felbehäftad fas och nätets serieinduktans. Hur snabbt urladdningen sker är beroende av nätets serieinduktanser i förhållande till dess shuntkapacitanser. Erfarenhetsmässigt är urladdningen avslutad efter ca 1 ms.

Efter 1 ms antas omladdningen vara klar och spänningen över felstället är 0. Felimpedansen Z_f blir åter stor.

För att uppskatta strömspikens medelvärde kan följande grova analys göras. Vid spänningens toppvärde är laddningen i den fas där felet inträffar:
 $Q_{L1} = \hat{U}_{L1} \cdot (C_{FL1} + C_{BL1})$.

Efter 1 ms är denna laddning 0.

Den totala urladdningsströmmen (medelvärde under 1 ms) i fas L1 kan då grovt beräknas:

$$I = \frac{\Delta Q_{L1}}{\Delta t} = \frac{\hat{U}_{L1} \cdot (C_{FL1} + C_{BL1})}{0,001} \text{ A}$$

Skyddet för den felbehäftade ledningen kommer att mäta urladdningsströmmen från bakomliggande ledningar:

$$I_{skydd} = \frac{\hat{U}_{L1} \cdot C_{BL1}}{0,001} \text{ A}$$

Som exempel kan följande data användas:

Driftspänning: 22 kV

Total kapacitiv jordfelsström: 200 A varav 50 A från den felbehäftade ledningen.

Kapacitiv reaktans för felbehäftad ledning:

$$X_{c,F} = \frac{\sqrt{3} \cdot 22000}{50} = 762 \Omega / fas \text{ och}$$

$$C_{FL1} = \frac{1}{\omega \cdot X_{c,L1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 762} = 4 \mu F$$

Kapacitiv reaktans för bakomliggande nät:

$$X_{c,B} = \frac{\sqrt{3} \cdot 22000}{150} = 254 \Omega / fas \text{ och}$$

$$C_{BL1} = \frac{1}{\omega \cdot X_{c,L1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 254} = 13 \mu F$$

Medelvärde av den totala urladdningsströmmen:

$$I = \frac{\Delta Q_{L1}}{\Delta t} = \frac{\hat{U}_{L1} \cdot (C_{FL1} + C_{BL1})}{0,001} = \frac{22000 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot (4 \cdot 10^{-6} + 13 \cdot 10^{-6})}{0,001} = 305 A$$

Medelvärde av urladdningsströmmen till ledningsskyddet:

$$I = \frac{\Delta Q_{L1}}{\Delta t} = \frac{\hat{U}_{L1} \cdot C_{BL1}}{0,001} = \frac{22000 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot (13 \cdot 10^{-6})}{0,001} = 234 A$$

- Spontana strömtransienter i nätet kan uppträda även om man inte har något jordfel, vilket kan ge risk för oönskad utlösningssfunktion.
- Tidsintervallet mellan strömpulsarna vid intermitterent jordfel varierar med nollföljdssystemets tidskonstant, dvs. hur snabbt spänningen över felstället återkommer. Detta kan resultera i relativt långa funktionstider. Därmed finns risk att andra (grundtonsmätande) jordfelsskydd i nätet kan ge oönskad utlösningssfunktion.
- Det är osäkert hur strömspikar detekteras. Om ett transient jordfel eller annan transient med en strömspik orsakar en pendlning med stor strömamplitud i nollföljdsnätet kan eventuellt topparna i pendlingsströmmen klassas som återtändning av fel och därmed riskeras oönskad skyddsfunktion.
- Vid intermitterent jordfel långt ut på skyddad ledning reduceras strömspikens amplitud på grund av dämpning.

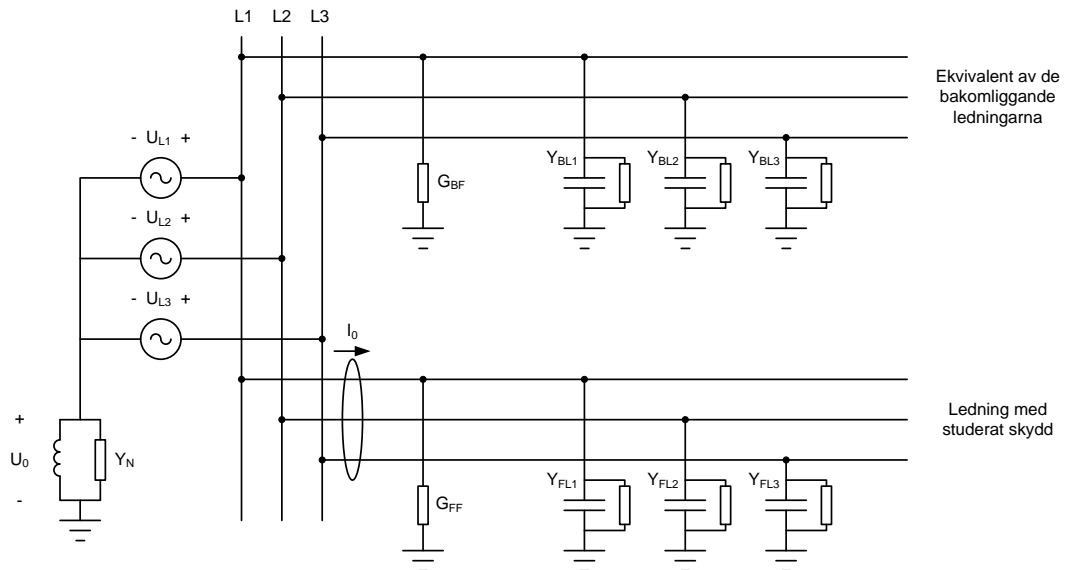
Under senare tid har skyddstillverkarna förfinat tekniken för transientmätande/intermittenta jordfelsskydd och erfarenheterna från användarhåll är relativt goda. Dock kan det vara svårt för användaren att testa denna typ av jordfelsskydd. En rad prov med primära intermittenta kabelfel har genomförts för att säkerställa pålitlighet, dvs. hög sannolikhet att intermittenta jordfel

verkligen bortkopplas. Prov av säkerhet, dvs. hög sannolikhet att önskad funktion hos skyddet inte förekommer har inte redovisats i samma omfattning.

6.3 Admittansmätande jordfelsskydd

Jordfelsskydd som använder admittansmätning beskrivs i [3].

Ett icke effektivt jordat mellanspänningsnät beskrivs schematiskt enligt Figur 65.



Figur 65 Ekvivalent nät för beskrivning av admittansmätande jordfelsskydd

I det ekvivalenta schemat försummas inverkan av serieimpedanser eftersom de normalt sett är små i förhållande till shuntimpedanserna.

Skyddet beräknar den komplexa admittansen för den skyddade ledningen:

$$\bar{Y} = G_0 + jB_0 = \frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0}$$

Vid ett externt jordfel ($G_{BF} = \infty$ och G_{FF} litet) kommer skyddet att mäta nollföljdsströmmen från den skyddade ledningen:

$$\bar{I}_0 = -\bar{U}_0 \times (\bar{Y}_{FL1} + \bar{Y}_{FL2} + \bar{Y}_{FL3}) \text{ och därmed blir uppmätt nollföljdsadmittans:}$$

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} = -(\bar{Y}_{FL1} + \bar{Y}_{FL2} + \bar{Y}_{FL3}) \text{ dvs. nollföljdsadmittansen för den skyddade ledningen.}$$

Vid ett internt jordfel (G_{BF} litet och $G_{FF} = \infty$) kommer skyddet att mäta nollföljdsströmmen från det bakomliggande nätet:

$$\bar{I}_0 = \bar{U}_0 \times (\bar{Y}_{BL1} + \bar{Y}_{BL2} + \bar{Y}_{BL3} + \bar{Y}_N)$$

och därmed blir uppmätt nollföljdsadmittans:

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} = \bar{Y}_{BL1} + \bar{Y}_{BL2} + \bar{Y}_{BL3} + \bar{Y}_N$$

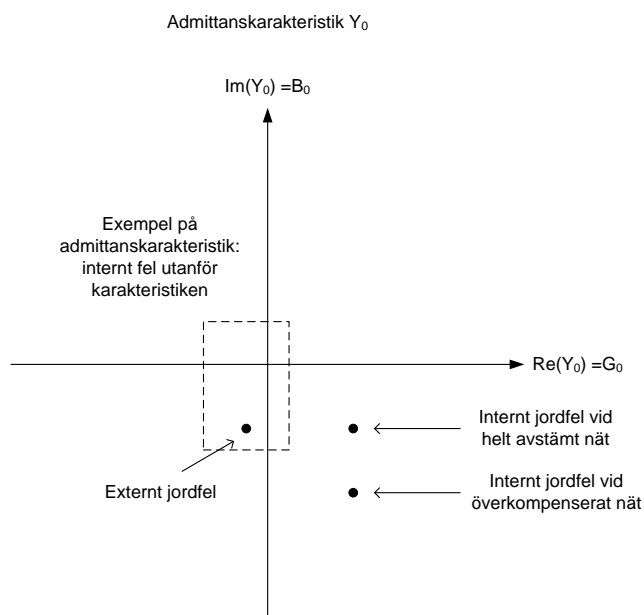
dvs. nollföljdsadmittansen för det bakomliggande nätet.

Det kan konstateras att admittansen Y_0 är oberoende av resistansen i felstället.

Skyddsfunktionen kan friges när nollföljdsspänningen U_0 överskrider inställd nivå.

Skyddet har en admittanskaraktistik för att kunna skilja mellan internt och externt jordfel. Metoden kräver att man beräknar nollföljdsadmittansen för den skyddade ledningen samt för det bakomliggande nätet, sett från denna ledning. Detta görs individuellt för inställning av varje ledningsskydd. För det bakomliggande nätet inkluderas admittans för nollpunktsutrustning (nollpunktsreaktor och nollpunktsmotstånd).

Exempel på funktionskaraktistik för det admittansmätande jordfelsskyddet visas i Figur 66.



Figur 66 Admittanskaraktistik för skyddet

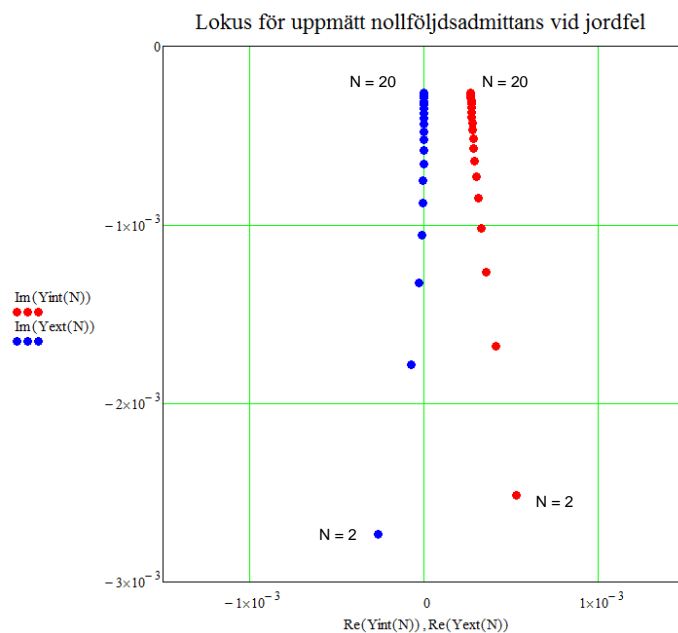
Det admittansmätande jordfelsskyddet har följande egenskaper:

- Skyddets känslighet bestäms av inställd nivå på nollföljdsspänningen U_0 som beräknas med hänsyn till maximal resistans i felstället som skall kunna detekteras.
- Vid val och inställning av admittanskaraktistik för skyddet måste hänsyn tas till möjliga kopplingslägen och admittans hos anslutna nollpunktsapparater (nollpunktsmotstånd och nollpunktsreaktorer). Detta medför omfattande analyser av nätet där varje utgående ledning måste studeras.

- I vissa fall används delstörheter i stället för absoluta belopp på nollföljdsström och nollföljdsspänning för att förbättra skyddets egenskaper.

Frågan är nu hur giltig algoritmen är om serieimpedanserna i nollföljdsnätet inte kan försummas, vilket kan vara aktuellt i nät med långa kabelsträckor.

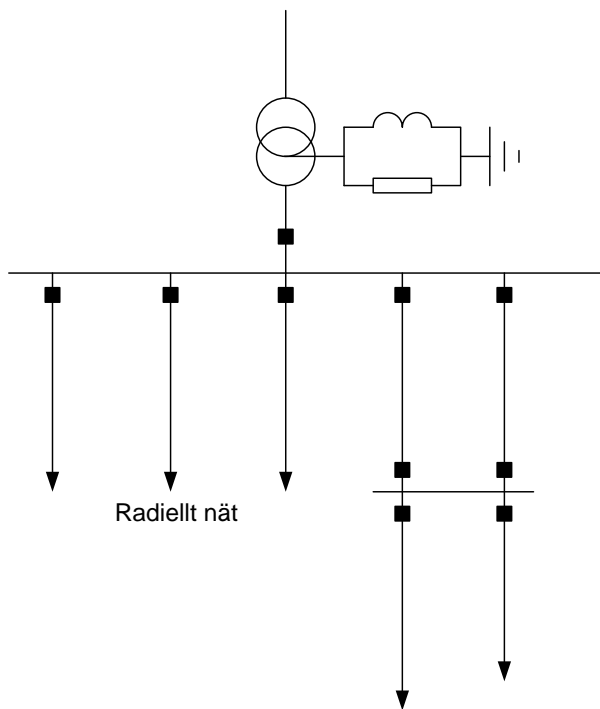
För ett testnät beskrivet i 6.1 visas i Figur 67 hur uppmätt admittans vid jordfel beror på serieimpedansernas inverkan. Det måste observeras att analysen är gjord på ett specifikt nät och skall ses som en fingervisning om fenomenet. Vid analys skall varje nät studeras individuellt.



Figur 67 Exempel på uppmätt admittans i ett nät med 200 A kapacitiv jordfelsström fördelat på N st. ledningar (Röd: internt fel, Blå: externt fel)

Om man försummar ledningarnas serieimpedanser i nollföljd är det relativt enkelt att beräkna admittans vid internt respektive externt jordfel, för varje utgående fack. I nät där serieimpedansen i nollföljd inte kan negligeras är det lämpligt att beräkna nollföljdsadmittansen (Y_0) för internt respektive externt jordfel. I komplexa nät görs detta lämpligen med ett nätberäkningsprogram (se 9.2).

I beskrivningar av admittansmätande jordfelsskydd utgår man från att nätet drivs radiellt. I de flesta fall stämmer det men det förekommer idag att man har parallella förbindelser från matande station till ett annat ställverk, t.ex. enligt Figur 68. I framtiden kan det vara aktuellt att driva maskade mellanspänningsnät. Vid nominell spänning i området 50 – 70 kV sker det i viss mån redan i dag.



Figur 68 Nät med parallella ledningar

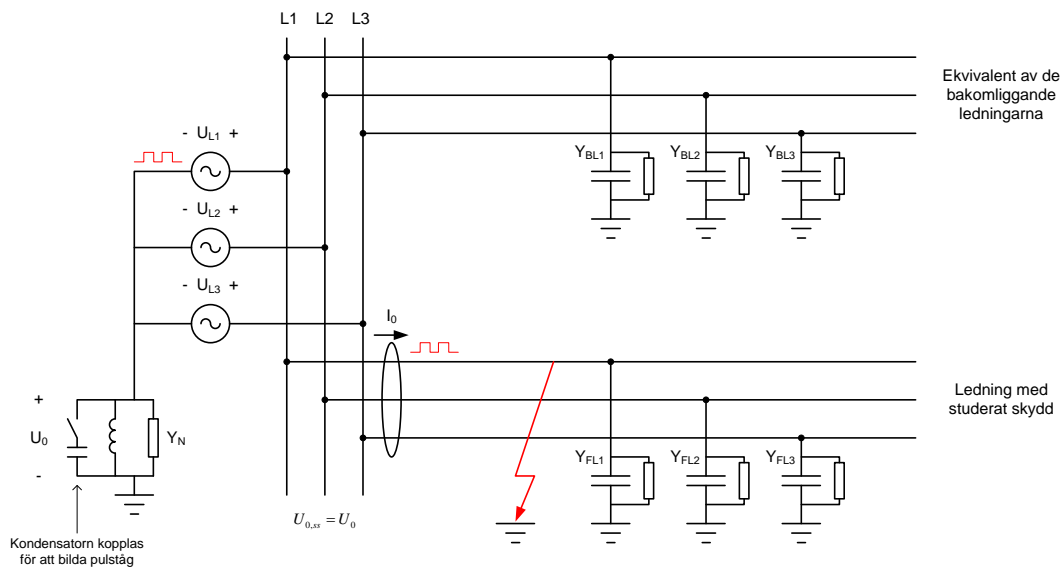
6.4 Admittansmätning med ströminjicering

I vissa fall används utökad funktion hos admittansmätningen där ströminjicering i nollpunkten kompletterar detekteringsfunktionen. Mätenheten använder nollpunktsspänningen U_0 i matande station och nollföljdsströmmen $3I_{0,N}$ ut på varje ansluten ledning. Förenklat kan den injicerade strömmen ses som ett externt jordfel för varje ledning. Därmed fås ett ungefärligt värde på nollföljdsadmittansen ($Y_{0,N}$) för varje ledning. Eftersom det finns osymmetri mellan faserna för de olika ledningarna kommer detta att påverka strömmen ut på varje ledning. För att få ett mer tillförlitligt värde görs analys av mätvärdena vid varierad grad av injicering.

Enligt uppgift finns utrustning för avstämning och detektering av jordfel som är adaptiv, varför omfattande nätberäkningar inte skall vara nödvändiga.

6.5 Jordfelsskydd med pulstågsinjicering

Jordfelsskyddsprincipen beskrivs i Figur 69.



Figur 69 Jordfelsdetektering med pulstågsinjicering

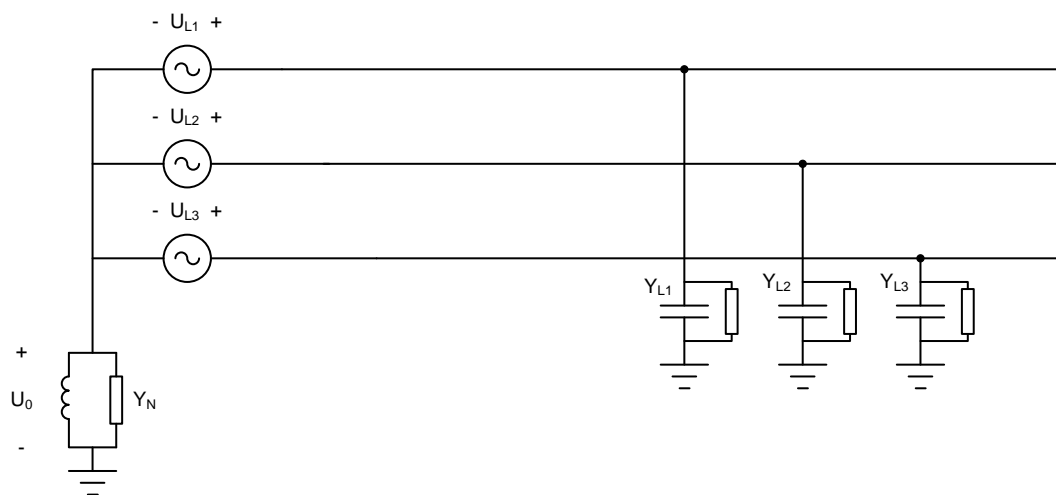
Genom att styra pulsfrekvensen kan man använda skydd med detektering inom ett lämpligt frekvensband. Därmed fås reducerad inverkan från grundtonsstörningar.

Skyddsprincipen är använd i Tyskland.

6.6 Nollpunktsanalys

Grunden för nollpunktsanalys är snarlikt principen för admittansmätning.

Utgående från ett förenklat schema av ett mellanspanningsnät enligt Figur 70 kan nollpunktsspänningen U_0 tecknas enligt [6].



Figur 70 Trefassystemets koppling till jord

De trefasiga späningskällorna, med spänningen i fas L1 som vinkelreferens, kan tecknas:

$$\bar{U}_{L1} = U$$

$$\bar{U}_{L2} = a^2 U$$

$$\bar{U}_{L3} = a U$$

$$\text{Där } a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = 1 \angle 120^\circ$$

Vidare kan admittanserna för ledningarna tecknas enligt $\bar{Y}_{Lx} = G_{Lx} + jB_{Lx}$

Admittansen för nollpunktsutrustningen kan tecknas enligt $\bar{Y}_N = G_N - jB_N$

Nollpunktsspänningen kan tecknas:

$$\frac{\bar{U}_0}{U} = -\frac{\bar{Y}_{L1} + a^2 \bar{Y}_{L2} + a \bar{Y}_{L3}}{\bar{Y}_N + \bar{Y}_{L1} + \bar{Y}_{L2} + \bar{Y}_{L3}} = -\frac{G_{L1} + jB_{L1} + a^2(G_{L2} + jB_{L2}) + a(G_{L3} + jB_{L3})}{G_N - jB_N + G_{L1} + jB_{L1} + G_{L2} + jB_{L2} + G_{L3} + jB_{L3}}$$

Tre storheter definieras enligt:

$$\text{Snedavstämningensgraden: } v = \frac{-B_N + B_{L1} + B_{L2} + B_{L3}}{B_{L1} + B_{L2} + B_{L3}}$$

$$\text{Dämpningsgraden: } d = \frac{G_N + G_{L1} + G_{L2} + G_{L3}}{B_{L1} + B_{L2} + B_{L3}}$$

$$\text{Osymmetrigraden: } k = \frac{\bar{Y}_{L1} + a^2 \bar{Y}_{L2} + a \bar{Y}_{L3}}{B_{L1} + B_{L2} + B_{L3}}$$

Med dessa storheter kan den relativa nollpunktsspänningen tecknas:

$$\frac{\bar{U}_0}{U} = \frac{-k}{d + jv}$$

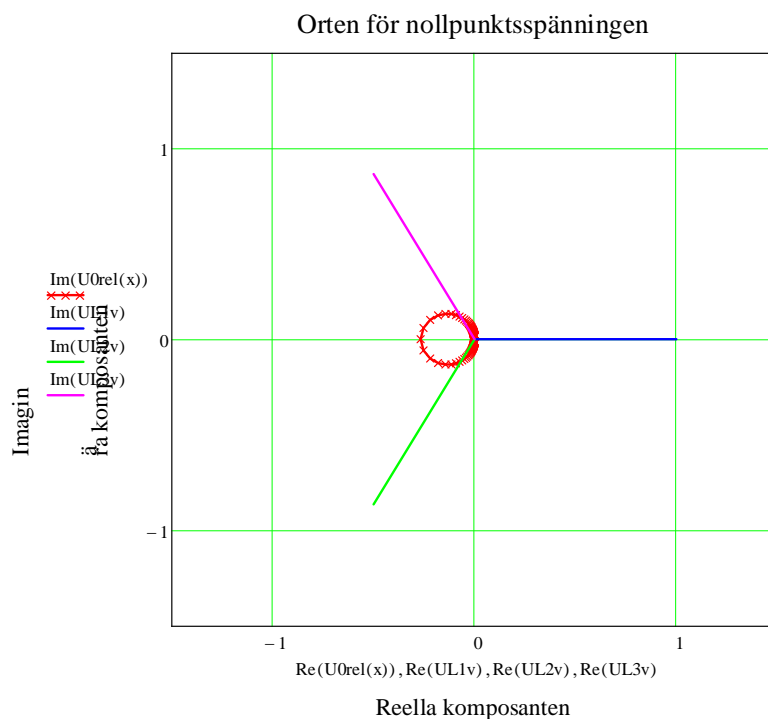
Dämpningsgraden d och osymmetrigraden k är nätspecifika parametrar som vid oförändrad nätkoppling är teoretiskt sett konstanta. De förändras dock vid t.ex. omkopplingar i nätet. Snedavstämningensgraden påverkas dock av inställning av nollpunktsreaktorn (Nollpunktsreaktorn).

Vid perfekt avstämning av nollpunktsreaktorn är snedavstämningensgraden 0 och detta ger maximal nollpunktsspänning i nätet:

$$\frac{\bar{U}_{0,max}}{U} = \frac{-k}{d}$$

$$\left| \frac{U_{0,max}}{U} \right| = \frac{k}{d}$$

Man kan visa att orten för den komplexa nollpunktsspänningen U_0 kan beskrivas med en cirkel i det komplexa planet då snedavstämningensgraden v , dvs. avstämningen av Nollpunktsreaktorn, varieras (Figur 71).



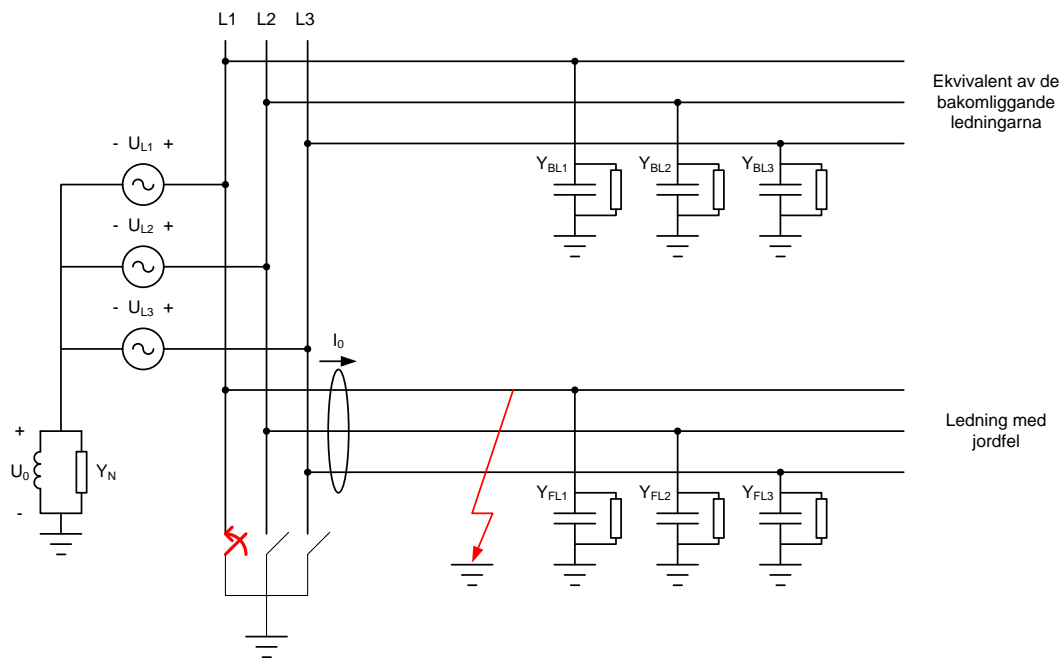
Figur 71 Exempel på hur orten för nollpunktsspänningen varierar med varierande avstämning av nollpunktsreaktorn

Genom variation av avstämningen kan storheterna k , d och v beräknas eftersom orten för nollfölgdsspänningen följer en cirkelbåge. Med två olika mätvärden kan analys ske som fås med variation av avstämningen av nollpunktsreaktorn fås värden på dämpningsgraden d och osymmetrigraden k .

6.7 Shuntning av jordfel

Det finns applikationer där man vid detektering av jordfel slår till en jordning av felbehäftad fas i matande station. Därmed är tanken att jordfelsströmmen i det initiala felstället minskas radikalt och därmed kan driften bibehållas utan fränkoppling av felbehäftad ledning.

Systemet kräver detektering av jordfel och detektering av felbehäftad fas, vilket är relativt enkelt.



Figur 72 Shuntning av jordfel

Lösningen är tveksam p.g.a. följande:

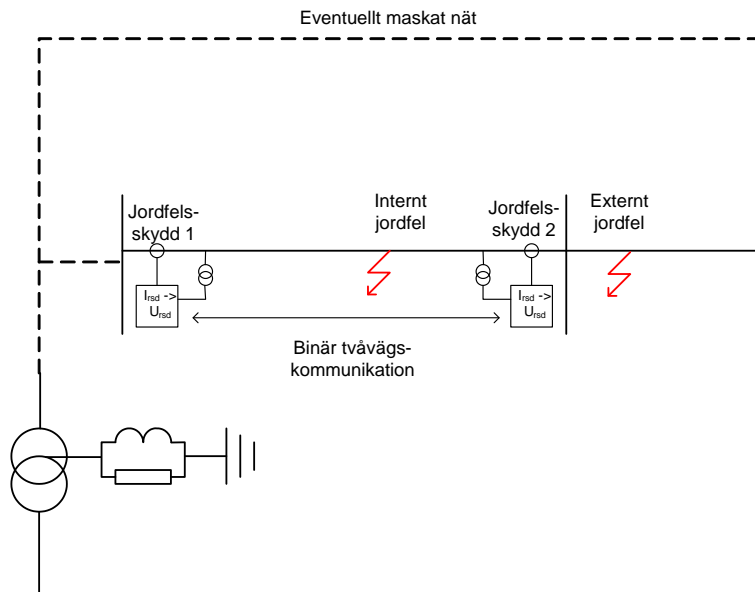
- Lastströmmen ger ett spenningsfall till felstället och därmed en spenningsättning som kan vara betydande. Det är därför troligt att lösningen inte är tillåten enligt föreskrifterna.
- Drift med kvarvarande stumt jordfel på samlingsskenan ger ökad risk för ett andra jordfel i en annan fas i nätet.

6.8 Telesamverkande jordfelsskydd

I transmissionsnät har man sedan länge använt kommunikation mellan ledningsskydd i de båda ledningsändarna. Traditionell har detta varit relativt dyrt. Dock har man i nät med relativt korta kablar (tätortsnet och industrinät) ofta använt längsdifferentialskydd med samverkan via galvanisk trådförbindelse. Beträffande jordfelsskydd är det inte helt enkelt att använda differentialskydd i icke effektivt jordade nät. Utvecklingen med kommunikation med fiber har gjort att det är fullt möjligt att använda kommunikationslösningar även för mellanspänningsnät med relativt långa ledningssträckor.

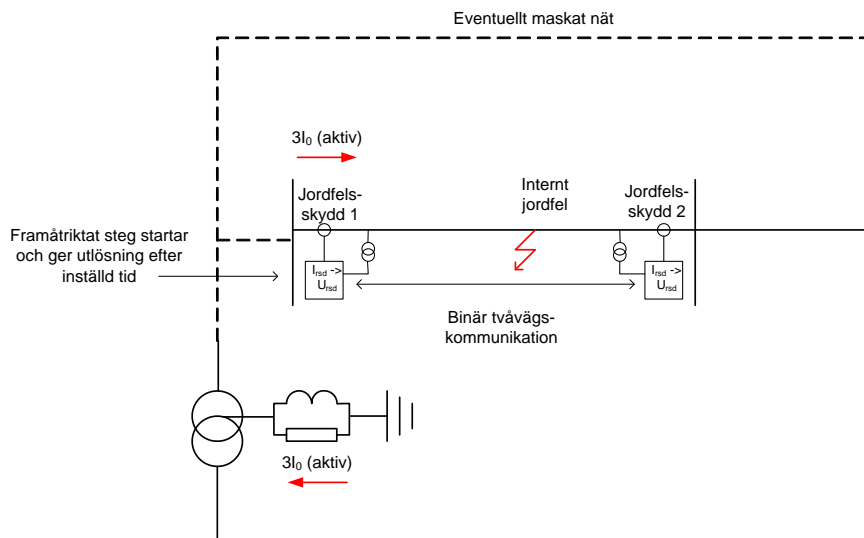
Ett exempel på princip för telesamverkande jordfelsskydd kan beskrivas enligt:

I vardera änden på skyddad ledning/kabel finns en skydds-enhet med två riktade jordfelsskyddsfunktioner. Dessa kan vara riktade grundtonsmätande jordströmsskydd eller transientmätande jordfelsskydd (Figur 73). En jordfelsskyddsfunktion är riktad mot skyddad ledning (framåt) och ger utlösningssignal efter inställd tid. Den andra jordfelsskyddsfunktionen är riktad från skyddad ledning (bakåt) och ger momentan blockeringsignal som skickas till skyddet i motstående ledningsände.



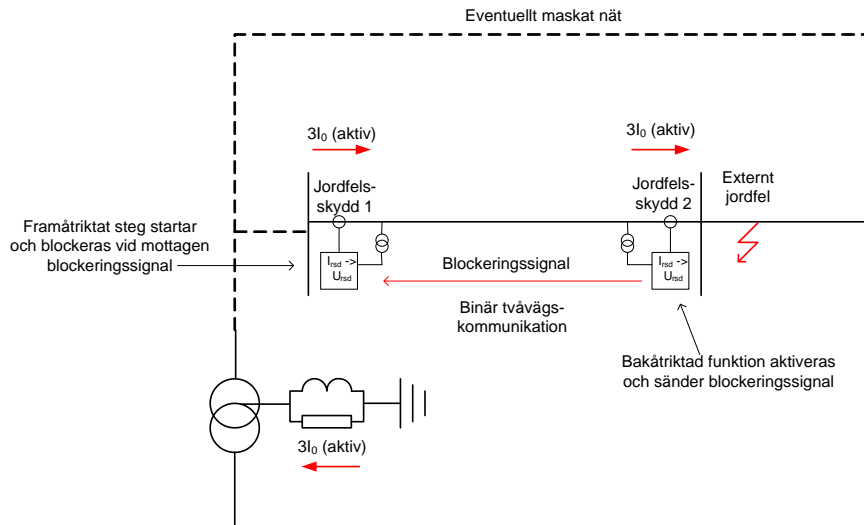
Figur 73 Exempel på samverkande jordfelsskydd

Vid jordfel på den skyddade ledningen (Figur 74) startar det framåtriktade steget i jordfelsskydd 1 medan jordfelsskydd 2 inte startar. Efter inställd tid ger det framåtriktade steget i jordfelsskydd 1 utlösningssignal till ledningsbrytaren. Lämpligen skickas fjärrutlösning till brytaren i motstående ledningsände.



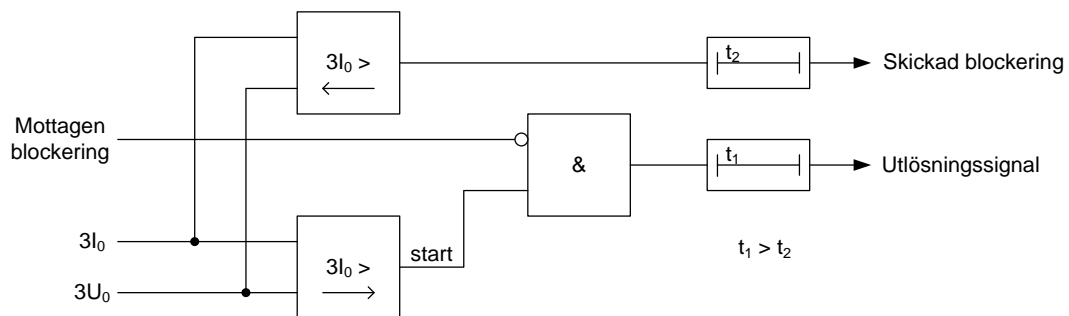
Figur 74 Jordfel på skyddad ledning/kabel

Vid jordfel bortom den skyddade ledningen (Figur 75) startar det framåtriktade steget i jordfelsskydd 1. Det bakåtriktade steget i jordfelsskydd 2 startar och skickar momentant eller efter kort fördröjning en blockeringsignal till jordfelsskydd 1 varvid oselektiv utlösning förhindras.



Figur 75 Jordfel utanför skyddad ledning

Ett enkelt logikschema enligt Figur 76 beskriver uppbyggnaden i respektive skydd.



Figur 76 logikschema för telesamverkande jordfelsskydd

Skyddsprincipen har följande egenskaper:

- Felbortkopplingen är absolut selektiv
- Bortkoppling av jordfel kan ske snabbt
- Om kommunikationen faller bort riskeras oselektiv felbortkoppling men inte utebliven felbortkoppling
- Skyddsprincipen möjliggör selektiv bortkoppling av jordfel i maskade mellanspänningsnät
- Metoden kräver att skyddad ledning/kabel har fack med skydd och brytorgan i båda ledningsändar

Med etablerad kommunikation kombineras lämpligen jordfelsskyddsfunktionen med differentialskydd för snabb och selektiv bortkoppling av kortslutningar på skyddad ledning/kabel.

7 Lokalisering av jordfel

Vid jordfel på friledning eller kabel fås bortkoppling i matande fack. Driftmässigt läggs matningen till reservmatningsvägar. För att kunna göra detta och för att kunna reparera den felbehäftade anläggningen måste felstället lokaliseras. Traditionellt sker detta genom manuell sektionering i nätet med påföljande manuell provtillkoppling. För en distributionsledning kan detta innebära ett flertal provtillkopplingar med olika sektioneringsalternativ. Beroende på feltyp (t.ex. nedfallen lina) kan detta medföra personfara. Det är därför önskvärt att snabbt kunna lokalisera felläget för att etablera reservmatning.

Det finns olika nya alternativ för att kunna lokalisera felbehäftade anläggningsdel (kabel- eller friledningssträcka).

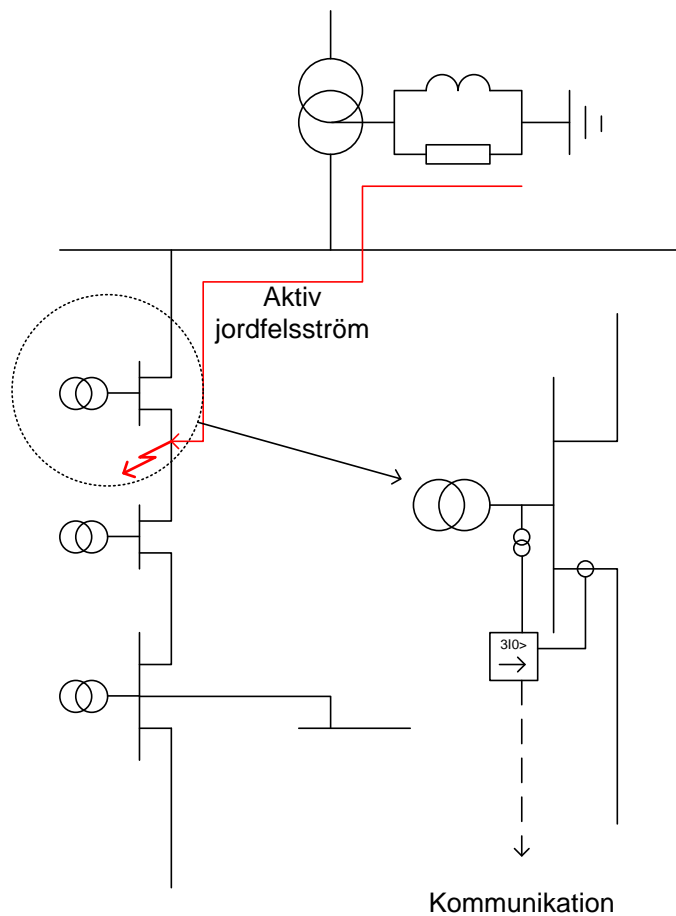
7.1 Lokalisering med slingkoppling

Distributionsnäten är ofta uppbyggda som slingnät men drivs med radialmatning. Vid jordfel på en radial kan man koppla ihop denna radial med en annan ledning och med hjälp av admittansmätning skall man kunna identifiera felbehäftad ledningssektion. Denna metod förutsätter dock att det primära felet inte bortkopplas, dvs. man måste använda restströmskompensering.

7.2 Utlokaliserad mätning av jordfelsström

I ett nät med nollpunktsmotstånd fås en väldefinierad aktiv jordfelsström från nollpunktsmotståndet till felstället. Denna ström kan detekteras ute i nätstationer om man har möjlighet att mäta nollföljdsspänning och nollföljdsström i utgående fack enligt Figur 77.

Skyddet utgörs av ett enkelt riktat jordfelsskydd som endast ska ge indikering på att aktiv jordfelsström ut på nästa ledningssektion, dvs. jordfelet är längre ut i nätet. Genom att denna information kan överföras till driftcentral kan felbehäftad anläggningsdel identifieras genom att identifiera det sista skydd ut på en radial som signalerar.



Figur 77 Utlokaliserad jordfelsmätning

7.3 Lokalisering av jordfel/begynnande jordfel med hjälp av PD-mätning

Detektering och lokalisering av begynnande jordfel i kabelnät kan göras med PD-mätning (partial discharge dvs. partiella urladdningar i isolation). Normalt kan det finnas en viss grad av PD även under normal drift. När isolationen bryts ner så att man riskerar genomslag genom kabelisolationen fås en accelererande grad av PD-urladdningen. PD-mätning ger även information avstånd till den svaga punkten i nätet där graden av partiella urladdningar är hög.

Normalt sker denna typ av mätning på fränkopplad anläggningsdel som spänningssätts med en separat justerbar spänningskälla. Det pågår dock utveckling av on-line PD-mätning där spänningen kan ändras genom spänningsinjicering i nollpunkten. Med denna spänningsinjicering, där amplitud och fasläge kan användas för att fritt variera fasspänningarna till jord. Med hjälp av detta kan man öka/minska PD-aktiviteten och därmed lokalisera begynnande jordfel, både beträffande kritisk fas och lokalisering.

8 Erfarenhetssammanställning

I detta projekt har synpunkter samlats in från ett antal nätbolag med olika typer av nät. Nedan görs en översiktlig redogörelse av de olika erfarenheterna.

8.1 Vattenfall Eldistribution

Vattenfall Eldistribution har mellanspänningsnät med mycket varierande total kapacitiv jordfelsström:

12 kV: upp till 500 A

24 kV: upp till 600 A

I norr har man ännu inte kablifierat distributionsnäten i full utsträckning men troligen kommer näten även där att få mycket höga värden på kapacitiv jordfelsström vid kablifiering, eftersom den geografiska utsträckningen är stor.

Antalet fack per station är 5 – 10 i ca 80 % av näten, dvs. det är ganska vanligt med enskilda ledningar med stor generering av kapacitiv jordfelsström.

Inom Vattenfall Eldistribution finns många olika lösningar beträffande utformning av systemjordning och felbortkopplingssystem.

Vattenfall Eldistribution använder utlokaliserade nollpunktsreaktorer i relativt stor omfattning. Erfarenheterna är goda.

Man strävar efter så bra avstämning av näten som möjligt. Märkström för nollpunktsmotstånd är 5 A för 12 kV nät och 15 A för 24 kV nät. För avstämning av nollpunktsreaktorer används ofta automatik. En aktuell fråga är vilken grad av redundans man skall ha för avstämningsautomatiken och nollpunktsreaktorerna. Om avstämningen inte är tillfredsställande kan inte kraven på spänningssättning av utsatta anläggningsdelar vid jordfel uppfyllas. Inte heller jordfelsskyddens känslighet blir acceptabel.

Angående jordfelsskydd använder Vattenfall Eldistribution både konventionella jordfelsskydd och admittansmätande skydd. Omfattande prov av olika skyddsfabrikat har gjorts där Trench admittansmätande skydd har visat goda resultat.

Transientmätande jordfelsskydd installeras i alla nya anläggningar och bedöms vara nödvändiga i nät med kabelsträckor.

Med de nät som har stor andel kabel bedömer Vattenfall Eldistribution att kraven på jordfelsskyddens känslighet att kunna detektera och koppla bort jordfel med felresistans upp mot 3000/5000 Ω är orimliga. Vidare är kraven på maximal spänningssättning av skyddsjordade anläggningsdelar svåra att uppfylla.

En problemställning som uppmärksammas på senare tid är skador och avbrott på kabelskärm på äldre PEX-kablar.

8.2 E.ON Elnät

E.ON Elnät har mellanspänningsnät med nominell spänning om 6 – 24 kV med mycket varierande total kapacitiv jordfelsström:

12 kV: upp till 300 A

24 kV: upp till 500 A

Antalet fack per station är 4 - 8 i landsbygdsnäten, dvs. det är ganska vanligt med enskilda ledningar med stor generering av kapacitiv jordfelsström.

E.ON Elnät har relativt många omkopplingsorgan i nätet som möjliggör alternativa matningsvägar. Dessa har visat sig mycket värdefulla vid återuppbyggnad efter större driftstörningar.

E.ON Elnät använder utlokaliserade nollpunktsreaktorer i viss omfattning. Om en enskild ledning har större kapacitiv jordfelsström än ca 30 – 40 A etableras utlokaliserad kompensering. Erfarenheterna är goda.

Man strävar efter en avstämning om ca -2 A. Märkström för nollpunktsmotstånd är 5 A för 12 kV nät och 10 A för 24 kV nät. Vissa undantag finns. För avstämning av nollpunktsreaktorer används oftast automatik. En aktuell fråga är vilken grad av redundans man skall ha för avstämningsautomatiken och nollpunktsreaktorerna. Om avstämningen inte är tillfredsställande kan inte kraven på spänningssättning av utsatta anläggningsdelar vid jordfel uppfyllas. Inte heller jordfelsskyddens känslighet blir acceptabel. E.ON Elnät har viss redundans för att kunna uppfylla kraven.

Angående jordfelsskydd använder E.ON Elnät konventionella jordfelsskydd. Användning av admittansmätande skydd är under utvärdering.

Transientmätande jordfelsskydd installeras i alla nya anläggningar och vid förnyelse av äldre stationer.

E.ON Elnät installerar oriktade jordfelsskydd med relativt hög ströminställning för detektering och bortkoppling av dubbla jordfel (cross country faults).

Med de nät som har stor andel kabel bedömer E.ON Elnät att kraven på maximal spänningssättning av skyddsjordade anläggningsdelar är den största utmaningen.

E.ON Elnät gör följande bedömningar om orsak till oönskade eller uteblivna jordfelsskyddfunktioner:

- Felriktade skydd (tyvärr relativt vanligt i nya anläggningar)
- Intermittenta jordfel som leder till funktion hos nollpunkts-spänningsskydd i stationer med äldre generation av skydd
- Äldre jordfelsskydd med analog elektronik tenderar att ge både över- och underfunktion

E.ON Elnät anser att branschen bör ta initiativ djupare utredning för att ta reda på hur stor spänningssättning man kan få vid intermittenta jordfel och vid dubbla jordfel.

8.3 Fortum Distribution

Fortum distribution har mellanspänningsnät (6 – 24 kV) med mycket varierande total kapacitiv jordfelsström:

12 kV: upp till 300 A

24 kV: upp till 300 A

Näten är ofta blandade, dvs. med både kabelsträckor och friledningar.

Antalet fack per station är 3 - 15 i landsbygdsnäten. Normalt kan den kapacitiva strömmen för ett fack vara upp till 50 A men i vissa fall finns fack med ända upp till 75 A kapacitiv jordfelsström.

Näten har ofta omkopplingsmöjligheter för alternativa matningsvägar. Dessa har i vissa fall fjärrmanövrerade kopplingsorgan.

Nollpunktsutrustning ansluts direkt till nollpunkten på matande transformator med kopplingsart Yy. Transformatorn har normalt inte utjämningslindning.

Anslutna nollpunktsreaktorer har automatisk avstämning där avstämning +3 A eftersträvas. Nollpunktsmotstånd väljs 5 A i 12 kV nät och 10 A i 24 kV nät. Fortum distribution använder utlokaliserade nollpunktsreaktorer.

Grundtonsmätande jordströmsskydd används alltid. Transientmätande skydd används i alla nya stationer och i stationer där problem identifierats. Redundans fås med centralt nollpunktsspänningsskydd (NUS).

Angående erfarenheter:

Intermittenta jordfel är relativt ovanliga.

Uteblivna jordfelsskyddsfunktioner är sällsynta.

Sympatiutlösning vid fel på annan ledning förekommer ibland.

8.4 Mälarenergi

Mälarenergi har mellanspänningsnät med total kapacitiv jordfelsström inom intervallet 30 – 250 A där de flesta näten är blandade, dvs. inkluderar både kablar och friledningar.

Antal fack/station varierar från stationer med ned till 3 utgående fack till stationer med mer än 15 utgående fack. Även kapacitiv jordfelsström per fack varierar med 96 A som det mest extrema.

Nollpunktsutrustning ansluts till 12 kV nollpunkten på Yyn-kopplade och YNyn-kopplade transformatorer.

Mälarenergi har infört transientmätande jordfelsskydd i ca 2/3 av stationerna.

Man har viss erfarenhet av intermittenta jordfel. Ett par gånger om året leder dessa fel till utlösning av hela nätet efter funktion hos nollpunktsspänningsskydd. En följd är långa avbrottstider.

Det krav som är svårast att uppfylla är känslighetskravet för bortkoppling av jordfel.

8.5 Sundsvall Elnät

Sundsvall Elnät har mellanspänningsnät med total kapacitiv jordfelsström inom intervallet 100 – 600 A med mestadels små kapacitiva jordfelsströmmar per ledning. Näten är i stort sett rena kabelnät.

Antal fack per station är i snitt ca 20. Kapacitiv jordfelsström kan vara upp till 60 A för enstaka fack.

Mellanspänningsnäten har omfattande omkopplingsmöjligheter som tillsammans med omfattande slingstruktur ger alternativa matningsvägar. Fjärrmanövrerade kopplingsorgan finns endast i mottagningsstationer.

Nollpunktsutrustning ansluts till 12 kV nollpunkten på Yyn-kopplade 130/10 kV transformatorer. Avstämning av nollpunktsreaktorerna sker automatiskt i 4 av 6 mottagningsstationer. I övriga två sker detta manuellt. Principen för avstämning är kompensering fullt ut. Utlokaliserade nollpunktsreaktorer används ej.

Admittansmätande skydd samt ofta även transientmätande skydd används som ledningsskydd. Redundans fås genom att man använder dubbla jordfelsskydd samt nollpunktsspänningsskydd.

Felorsaker i rangordning är: avgrävning, okända fel, kabelfel, trädpåfall, åska och apparatfel. Tidigare har intermittenta jordfel varit relativt vanliga men dessa har reducerats på senare tid efter aktiva åtgärder (ej specificerade).

Antalet önskade funktioner från jordfelsskyddet är få.

På Sundsvall Elnät upplevs att kravet på spänningssättning av utsatt del är svårast att uppfylla.

Angående uppföljning finns lite statistik. Orsak till önskade jordfelsskyddsfunktioner anges vara brist i tillverkning av skydd.

Det finns intresse att i framtiden kunna köra näten med kvarvarande jordfel. I detta sammanhang är restströmskompensering av intresse.

9 Analyismetoder

För att kontrollera att krav på spänningssättning av utsatt anläggningsdel samt att kraven på jordfelskyddens känslighet är uppfyllda krävs analys av näten. De storheter som skall beräknas är:

- Jordfelsströmmens storlek vid jordfel till skyddsjordad anläggningsdel där jordfelsresistansen är liten.
- Storlek och fasvinkel hos jordfelsström och nollpunktsspänning matade till jordfelsskydd vid stumt enfasigt jordfel ($R_f = 0$). Denna analys görs främst för att värdera risken för oönskad jordfelsskyddsfunktion som skulle kunna ge oselektiv bortkoppling av icke felbehäftad anläggning (sympatiutlösning).
- Storlek och fasvinkel hos jordfelsström och nollpunktsspänning matade till jordfelsskydd vid högresistivt enfasigt jordfel ($R_f = 3000/5000 \Omega$). Denna analys görs att kunna ställa in jordfelsskydden så att krav på känslighet uppfylls.
- Storlek hos nollpunktsspänning matad till jordfel detektering vid mycket högresistivt enfasigt jordfel ($R_f = 20000 \Omega$). Denna analys görs att kunna uppfylla krav på känslighet för detektering.

9.1 Grundtonsanalys med försummande av serieimpedanser

Dessa beräkningar kan enkelt göras för hand såsom beskrivet i 6.1. Frågan är dock i vilka fall denna analysmetod inte är acceptabel beroende på nätets kapacitiva jordfelsström, antal utgående fack, ledningarna serieimpedanser i nollföljdsnätet samt metod för kompensering av kapacitiv jordfelsström.

Vid en översiktlig analys av ledningarnas serieimpedans i nollföljdsnätet kan inverkan för varje utgående ledning uppskattas:

Kapacitiv jordfelsström för ledning med längd x km och kapacitiv jordfelsström I_c A/km: $I_{cl} = x \cdot I_c \text{ A} \Rightarrow -jX_{cl} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_h}{I_{cl}}$

Nollföljdsresistans för ledning med längden x och nollföljdsresistans $R_0 \Omega/\text{km}$: $R_{0l} = x \cdot R_0$

I värsta fall är ledningen helt radiell (inga avstick) varför det antas att den kapacitiva jordfelsströmmen i snitt flyter genom halva den beräknade nollföljdsresistansen för ledningen: $R_{0l}/2$

Ledningens totala nollföljdsimpedans blir nu: $\bar{Z}_{0l} = -jX_{cl} + R_{0l}/2$

Vid fullt utbildat jordfel kommer ledningen att leverera jordfelsströmmen enligt:

$$\bar{I}_{jl} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_H}{\bar{Z}_{0l}}$$

Realdelen av denna ström kommer inte att kompenseras utan adderas till den totala jordfelsströmmen.

Exempel: 15 km kabel i ett nät med driftspänning 22 kV, kapacitiv generering av nollföljdsström 2 A/km och serieresistans för nollföljdsström 1,5 Ω /km ger ett tillskott till den aktiva jordfelsströmmen om ca 0,25 A.

Vid en trädstruktur för den utgående ledningen blir det aktiva tillskottet till jordfelsströmmen mindre. Översiktsanalysen ger därför endast en grov uppskattning men kan tjäna som underlag för val av analysmetod.

Genom att addera tillskottet av aktiv jordfelsström från alla utgående ledningar fås ett totalt mått på tillskottet till felströmmen. Om detta värde understiger ca 1 A görs bedömningen att den förenklade analysen enligt 6.1 kan användas.

9.2 Grundtonsanalys med hänsynstagande till serieimpedanser

Om man gör bedömningen att det aktuella nätet har stor kapacitiv jordfelsström fördelat på få utgående ledningar är det visat att serieimpedanserna i nollföljdsnätet måste beaktas. Detta görs lämpligen genom att lägga in data för de olika nätkomponenterna i en fil lämpligt för datorprogram för felanalys.

Det bör observeras att beräkningar av kortslutningsströmmar i ett nät måste göras av följande orsaker:

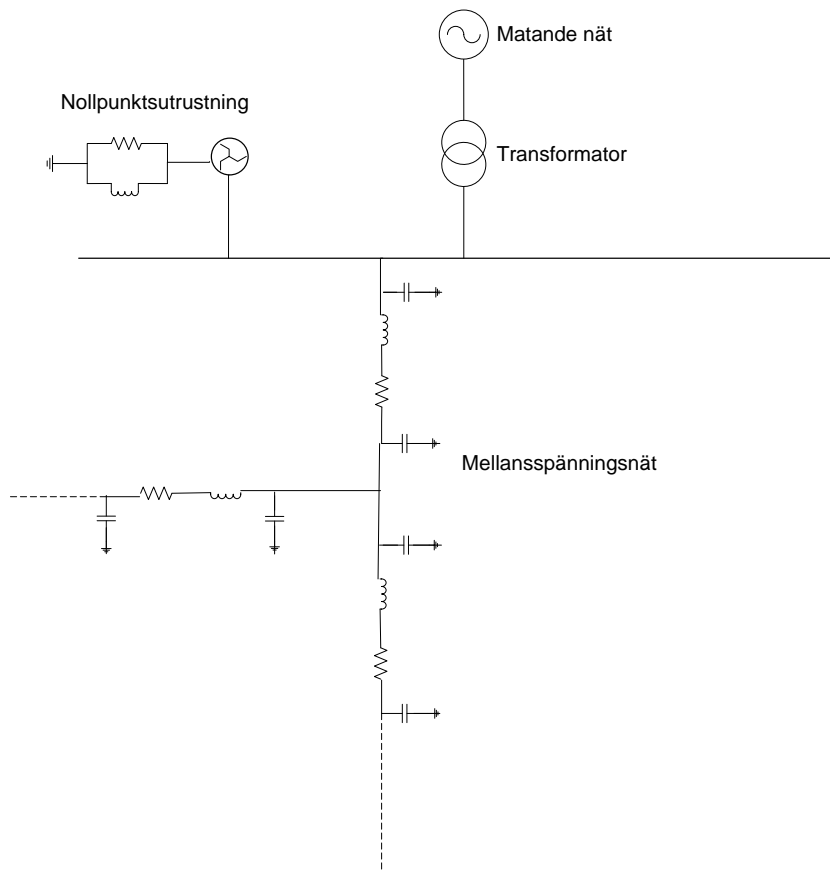
- Kontroll av felströmstålighet
- För val av inställningsparametrar för kortslutningsskydd (fasöverströmsskydd)

Eftersom sådana beräkningar bör genomföras finns normalt beräkningsprogram och nätdata tillgängliga. Dessa program bör kunna användas för beräkning av jordfel efter komplettering av nollföljdsdata.

Nedan visas hur sådan analys kan användas för att uppskatta aktuella jordfelsströmmar och spänningar vid jordfel i ett nät.

9.2.1 Modellering

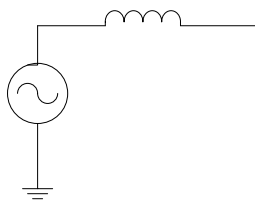
En generell översiktsmodell av ett elnät kan ses i Figur 78 nedan där matande nät, transformator, nollpunktsutrustning och mellanspänningsnät är sammankopplade.



Figur 78 Generell modell för ett reaktansjordat mellanspänningsnät

Modell för överliggande matande nät

En ekvivalent modell av matande nät kan bestå av en enkel generatormodell med reaktans och bakomliggande spänningskälla.



Figur 79 Matande nät modellerad med enkel generatormodell

Normalt läggs följande data in i generatormodellen:

- Märkeffekt S_N (MVA)
- Märkspänning U_N (kV)
- Generatorreaktans Z_{Gen} (pu)

I ekvivalenten används lämpligen:

- U_N = Aktuell driftspänning (huvudspänning) i matande nät

- S_N = Kortslutningseffekt i matande nät (MVA)
- $Z_{Gen} = j1,0$ pu (ren reaktans)

För nollföljd antas $Z_{0,Gen} = Z_{Gen}$.

Om nollföljdskopplingen till mellanspänningsnätet är 0 kan nollföljdsreaktansen för generatormodellen väljas godtyckligt.

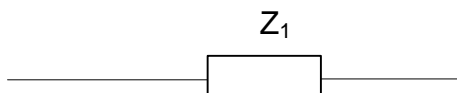
Om transformatorn kan transformera nollföljdsström/nollföljdsspänning, vilket är fallet för transformator med kopplingsart YNyn, bör verkligt värde på nollföljdsreaktansen användas.

Transformatormodell

Följande data för verklig transformator läggs in i transformatormodellen:

- Märkeffekt S_N (MVA)
- Märkspänning uppsida U_{N1} (kV)
- Märkspänning nedsida U_{N2} (kV)
- Kopplingsart t.ex. Yyn
- Plusföljdsimpedans Z_1 (pu)
- Nollföljdsimpedans Z_0 (pu)

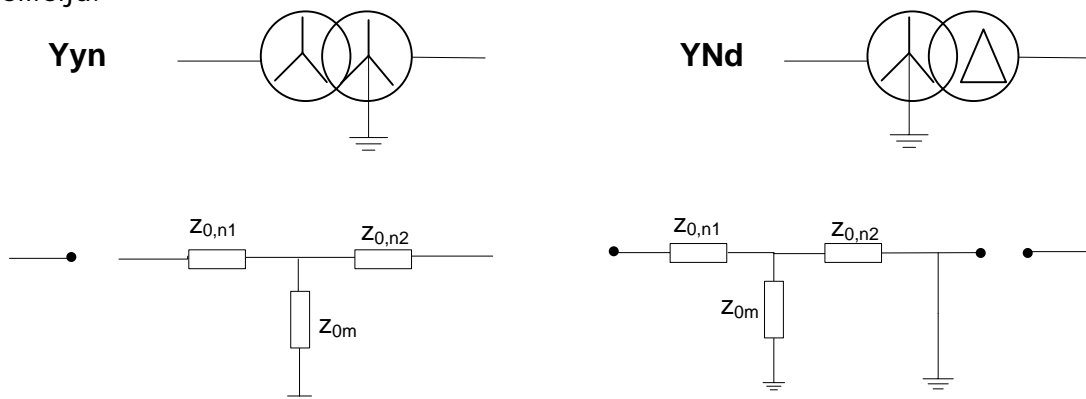
Plusföljd modelleras med en serieimpedans:



Figur 80 Plusföljdsrepresentation av transformator

Hur nollföljdsimpedansen anges beror på transformatorns kopplingsart. Nedanstående figur visar två olika kopplingsarter, ytterligare exempel finns beskrivna i kap 4.1 och 4.2.

Nollföljd:

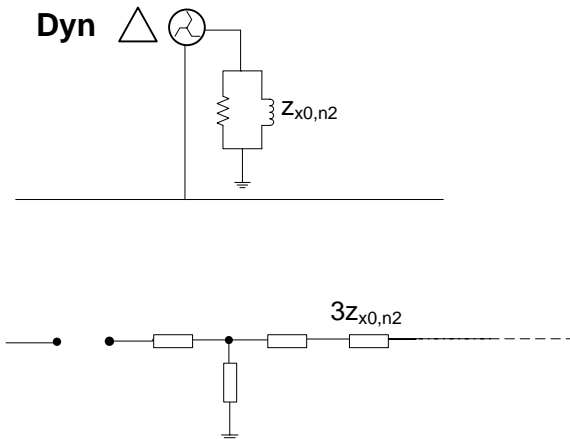


Figur 81 Exempel på olika kopplingsarter för transformatorer YNyn och YNd

Om transformatorn är kopplad i Yyn kan nollpunktsutrustning kopplas in på nedspänningssidan. Men om transformatorn är YNd-kopplad finns det ingen möjlighet att ansluta nollpunktsutrustning. I sådant fall får nollpunkts-

utrustningen kopplas mellan en jordningstransformator och jord. En jordningstransformator kan modelleras som en Dyn kopplad transformator och på så sätt uppnås mmk balans.

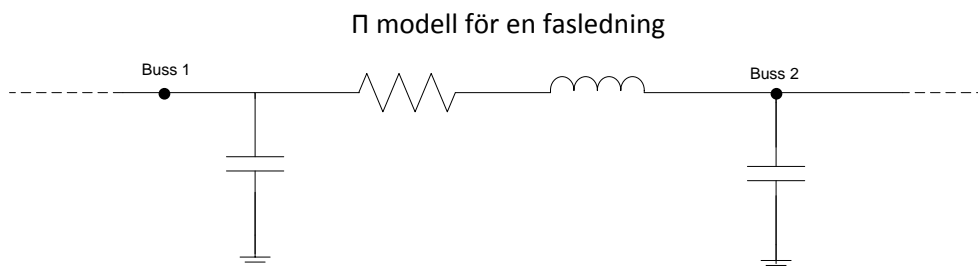
Modell för ansluten nollpunktsutrustning och jordningstransformator:



Figur 82 Jordningstransformator och nollpunktsutrustning direkt kopplad till samlingskena

Modell för ledningar/kablar

En distributionsledning mellan två knutpunkter modelleras som en π -ekvivalent. Ledningens/kabels serieimpedans för plus- respektive nollföljd anges tillsammans med ledningens shuntadmittans för nollföljd.



Figur 83 π -representation av ledning eller kabel i mellanspänningsnät

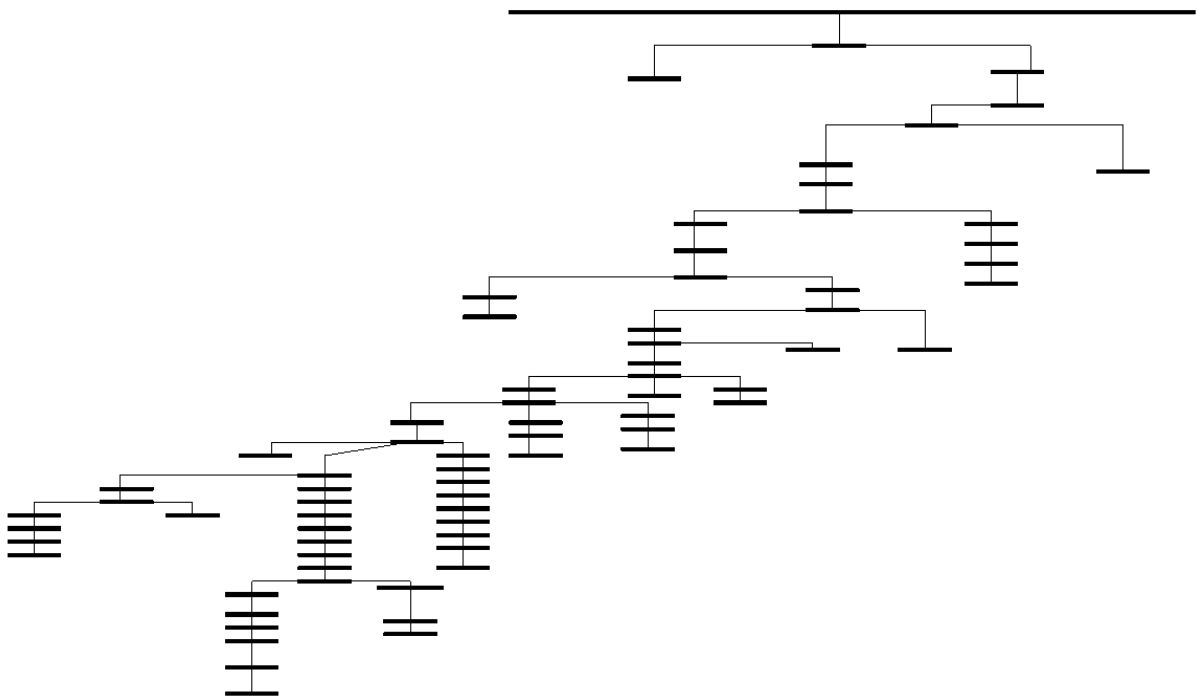
9.2.2 Landsbygdsnät med både friledningar och kabelledningar

Ett område på Skånes landsbygd har valts för att exemplifiera ett elnät med relativt få fack och långa ledningar. Analysen är gjord på ett mellanspänningsnät (konstruktionsspänning 24 kV) där matningsstationen består av två skenor (A och B). Dessa är kopplade till ett nät med nominell spänning 130 kV via en Yd-kopplad transformator vilket medför att ingen nollföljdsström kan transformeras mellan spänningsnivåerna. Det är dessutom inte möjligt att ansluta någon nollpunktsutrustning till den delta-kopplade lindningen vilket gör att nollpunktsutrustningen istället kopplas till respektive skena via jordningstransformator. Till skena B finns det två jordningstransformatorer med nollpunktsutrustning anknutna.

En fullständig beräkningsmodell har byggts upp i beräkningsprogrammet PSS/E[®]. Modellen omfattar:

- Ekvivalent modell av matning från 130 kV nät
- Plus- och nollföljdsimpedans för varje friledning/kabelsträcka i nätet (både serie- och shuntimpedanser)
- Nollpunktsutrustning: jordningstransformator, nollpunktsreaktor och nollpunktsmotstånd

Ledningarna i dessa typer av landsbygdsnät har ofta en trädstruktur vilket försvårar en beräkning av ledningens totala nollföljdsimpedans (se Figur 84). Figuren visar varje ledningssegment mellan nätstationerna.



Figur 84 En ledning i nätet (fack 13 skena B). Trädstrukturen försvårar beräkningen av ledningens totala nollföljdsimpedans

För att kunna dra några slutsatser av nollföljdsimpedansens inverkan på denna typ av nät kan en analys med utgångspunkt från autentiska data för kablar och friledningar i området göras.

Genom att jämföra nollföljdsstorheter för jordfel placerat nära matningsstationerna med jordfel längst ut i trädstrukturen kan man få en uppskattning av nollföljdsimpedansens inverkan. Analysen grundas på följande fall:

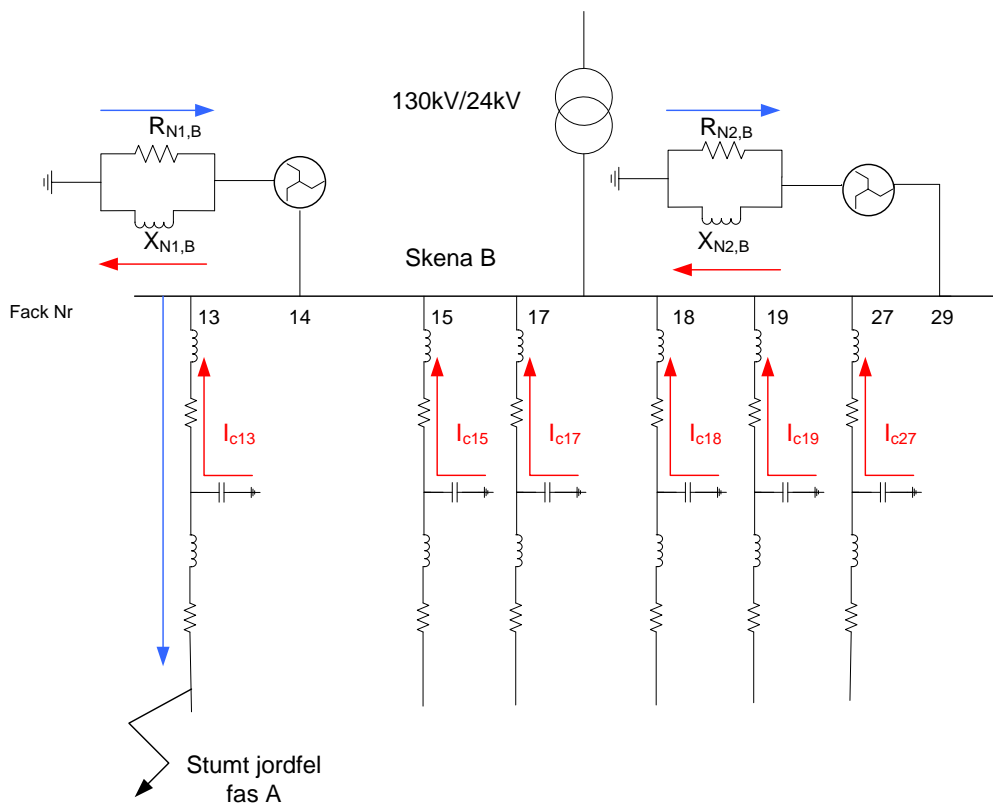
- Fall 1: Stumt jordfel i fas A på ledning 13 längst ut i trädstrukturen
- Fall 2: Stumt jordfel i fas A på ledning nära skena A respektive B
- Fall 3: Resistivt jordfel ($5k\Omega$) på fas A i ledning längst ut i trädstrukturen
- Fall 4: Resistivt jordfel ($5k\Omega$) på ledning nära skena A respektive SBYB

Fall 5: Samma som fall 1 men med jordningstransformator och nollpunktsreaktorer kopplade till två olika ställen på ledning 13

Fall 6: Stumt jordfel i fas A på ledning 18 längst ut i trädstrukturen

En av de mer kompliserade nätstrukturerna är kopplad till skena B. Därför har resultaten för detta nät valts som exempel hur serieimpedanserna i nätet kan påverka jordfelsström och nollpunktsspänning vid olika felfall.

Fall 1



Figur 85 Stumt jordfel i fas L1 på ledning längst ut i trädstrukturen tillhörande skena B

Nollpunktsutrustningen består av ett nollpunktsmotstånd parallellt med en nollpunktsreaktor. En resistiv felström på 15 A ger följande värden på nollpunktsmotstånden:

$$R_{N,A} = 923,8 \Omega$$

$$R_{N1,B} = R_{N2,B} = 1848 \Omega.$$

Till skena B finns det två uppsättningar av nollpunktsutrustning anslutna som delar på den resistiva strömmen. Nollpunktsreaktorn avstäms så att felströmmen på felbehäftad ledning nära skenorna endast är resistiv. Detta ger följande värden på nollpunktsreaktanserna:

$$X_{N,A} = 58,36 \Omega$$

$$X_{N1,B} = X_{N2,B} = 95,84 \Omega.$$

Då ett jordfel införs längst ut i nätet (ledning 13) studeras förutom matande skena (B) och felbehäftad knutpunkt även ledningar med närmast anknytning till skena B.

Tabell 2 Nollföljdsspänning på matande skena samt i felstället

	V0 effektivvärde (kV)	V0 fasvinkel (grader)
Matande skena B	12,69	-178,6
Felbehäftad knutpunkt	13,82	179,5

I nedanstående tabell relateras felströmmens vinkel till fasspänningen för felbehäftad fas i felstället. Vinkeln för nollföljdsströmmarna i utgående fack relateras till fasvinkeln för nollpunktsspänningen på samlingsskenan.

Tabell 3 Nollföljdsström i felstället samt i ledningar närmast matande skena

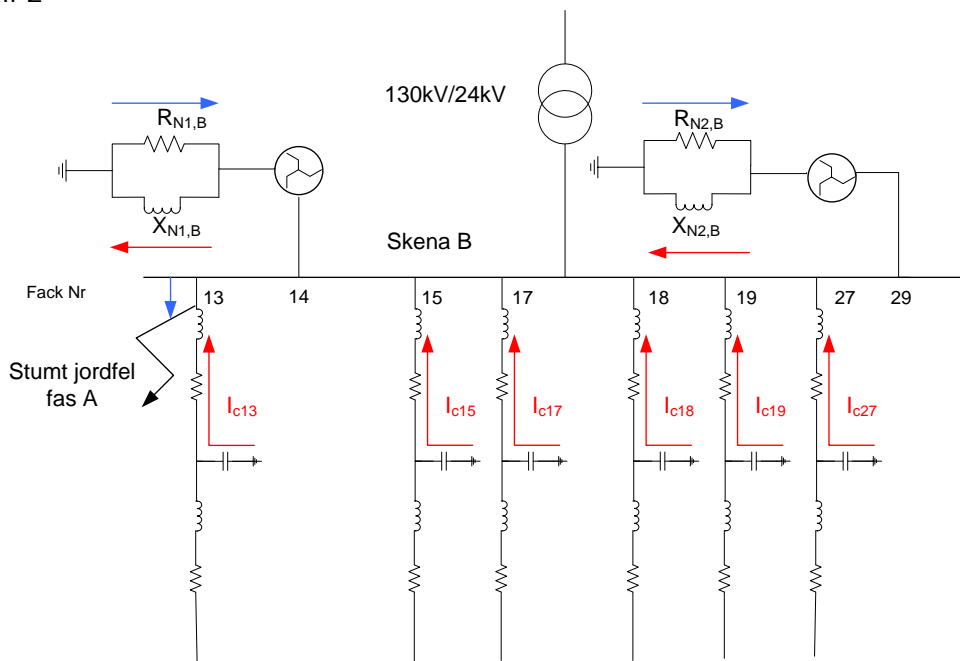
	3I0 (A)	I0 (fasvinkel)	Re 3I0 (A)	Im 3I0 (A)
Felbehäftad knutpunkt	18,91	4,680	18,85	1,540
Fack 13	134,2	276,3	14,82	-133,4
Fack 14	132,3	92,98	-6,890	132,3
Fack 15	7,095	270,0	-0,003119	-7,095
Fack 17	25,79	269,9	-0,05995	-25,79
Fack 18	5,954	270,0	-0,001132	-5,954
Fack 19	18,43	269,9	-0,01806	-18,43
Fack 27	73,94	269,3	-0,9565	-73,94
Fack 29	132,5	92,98	-6,890	132,3

Total kapacitiv felström ges av:

$$\sum I_{cn} = 264,61 A$$

Det kan konstateras att spänningssättande ström i felstället är ca 19 A i stället för förväntade 15 A. Samtidigt är den aktiva strömmen ut från facket för den felbehäftade ledningen lite mindre än 15 A vilket torde bero på den något sänkta nollpunktsspänningen i matande station. Vidare kan konstateras att serieresistansen för den felbehäftade ledningen, tillsammans med den betydande ledningskapacitansen till jord, ger ett tillskott till den totala jordfelsströmmen om ca 4 A.

Fall 2



Figur 86 Stumt jordfel i fas L1 på ledning nära skena B

Nollpunktsutrustningen är samma som i fall 1.

Då ett jordfel införs nära skena B (ledning 13) studeras förutom matande skena (B) och felbehäftad knutpunkt även ledningar anslutna till skena B.

Tabell 4 Nollföljdsspänning i matande skena samt i felstället

	V0 effektivvärde (kV)	V0 fasvinkel (grader)
Matande skena B	13,85	-179,6
Felbehäftad knutpunkt	13,86	179,6

Tabell 5 Nollföljdsström i felstället samt i ledningar närmast matande skena

	3I0 (A)	I0 (fasvinkel)	Re 3I0 (A)	Im 3I0 (A)
Felbehäftad knutpunkt	22,26	-0.05752	22,26	-0,02235
Fack 13	146,6	-83,66	16,18	-145,7
Fack 14	144,7	-267,0	-7,524	144,5
Fack 15	7,748	-90,03	-0,003406	-7,748
Fack 17	28,17	-90,13	-0,06547	-28,17
Fack 18	6,502	-90,01	-0,001236	-6,502
Fack 19	20,12	-90,06	-0,01972	-20,12
Fack 27	80,75	-90,74	-1,044	-80,74

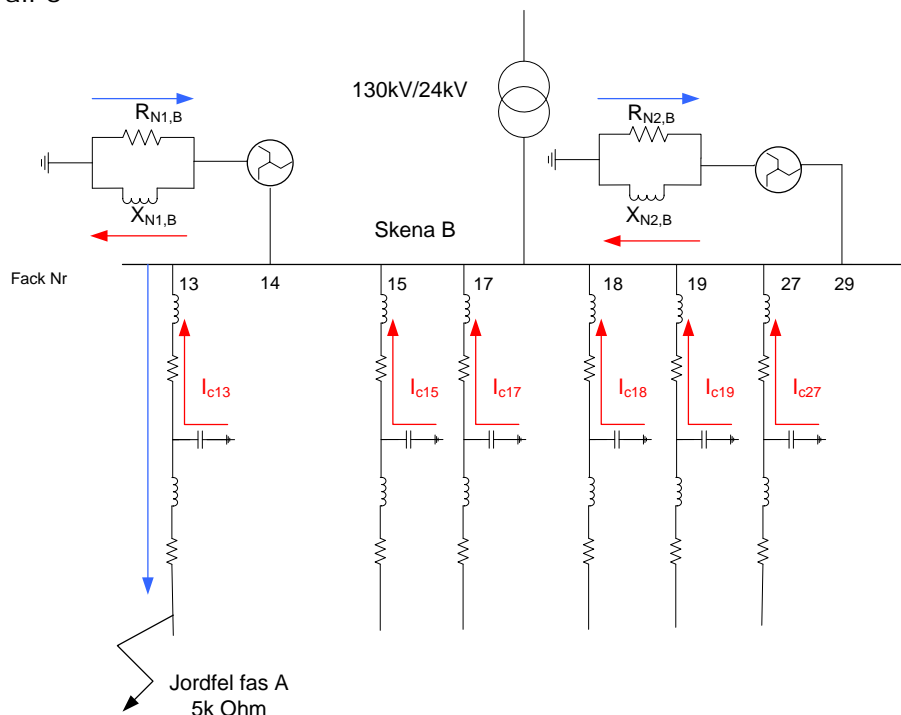
	310 (A)	I0 (fasvinkel)	Re 310 (A)	Im 310 (A)
Fack 29	144,7	-267,0	-7,524	144,5

Total kapacitiv felström ges av:

$$\sum I_{cn} = 289,0 \text{ A}$$

Det kan konstateras att spänningssättande ström i felstället är ca 22 A i stället för förväntade 15 A. Detta betyder att serieresistanserna för ledningarna, tillsammans med den betydande ledningskapacitansen till jord, ger ett tillskott till den totala jordfelsströmmen om ca 7 A.

Fall 3



Figur 87 Resistivt jordfel (5k Ω) i fas L1 på ledning längst ut i trädstrukturen tillhörande skena B

Nollpunktsutrustningen är samma som i tidigare fall.

Då ett jordfel införs längst ut i nätet (ledning 13) studeras förutom matande skena (B) och felbehäftad knutpunkt även ledningar anslutna till skena B.

Tabell 6 Nollföljdsspänning på matande skena samt i felstället

	V0 effektivvärde (kV)	V0 fasvinkel (grader)
Matande skena B	1,622	177,4
Felbehäftad knutpunkt	1,767	175,4

Tabell 7 Nollföljdsström i felstället samt i ledningar närmast matande skena

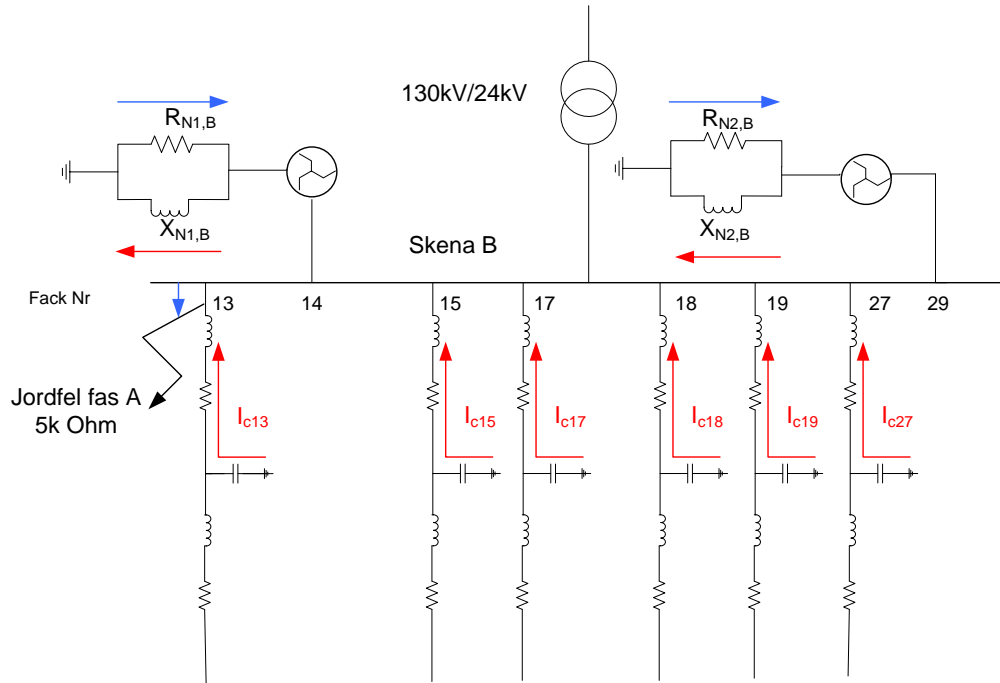
	3I0 (A)	I0 (fasvinkel)	Re 3I0 (A)	Im 3I0 (A)
Felbehäftad knutpunkt	2,418	0,5973	2,418	0,02520
Fack 13	17,16	-83,66	1,895	-17,06
Fack 14	16,94	-267,0	-0,8810	16,92
Fack 15	0,9071	-90,03	-0.0003988	-0.9071
Fack 17	3,298	-90.13	-0.007665	-3.298
Fack 18	0,7612	-90,01	-0,0001447	-0,7612
Fack 19	2,356	-90,06	-0,002309	-2,356
Fack 27	9,454	-90,74	-0,1223	-9,454
Fack 29	16,94	-267,0	-0,8810	16,92

Total kapacitiv felström ges av:

$$\sum I_{cn} = 33,84 A$$

Det torde inte vara några problem att detektera detta fel på ett korrekt sätt.

Fall 4



Figur 88 Resistivt jordfel (5k Ω) i fas L1 på ledning nära skena B

Nollpunktsutrustningen är samma som i tidigare fall.

Då ett jordfel införs nära skena B (ledning 13) studeras förutom matande skena (B) och felbehäftad knutpunkt även ledningar anslutna till B.

Tabell 8 Nollföljdsspänning på matande skena samt i felstället

	V0 effektivvärde (kV)	V0 fasvinkel (grader)
Matande skena B	1,533	179,7
Felbehäftad knutpunkt	1,533	179,7

Tabell 9 Nollföljdsström i felstället samt i ledningar närmast matande skena

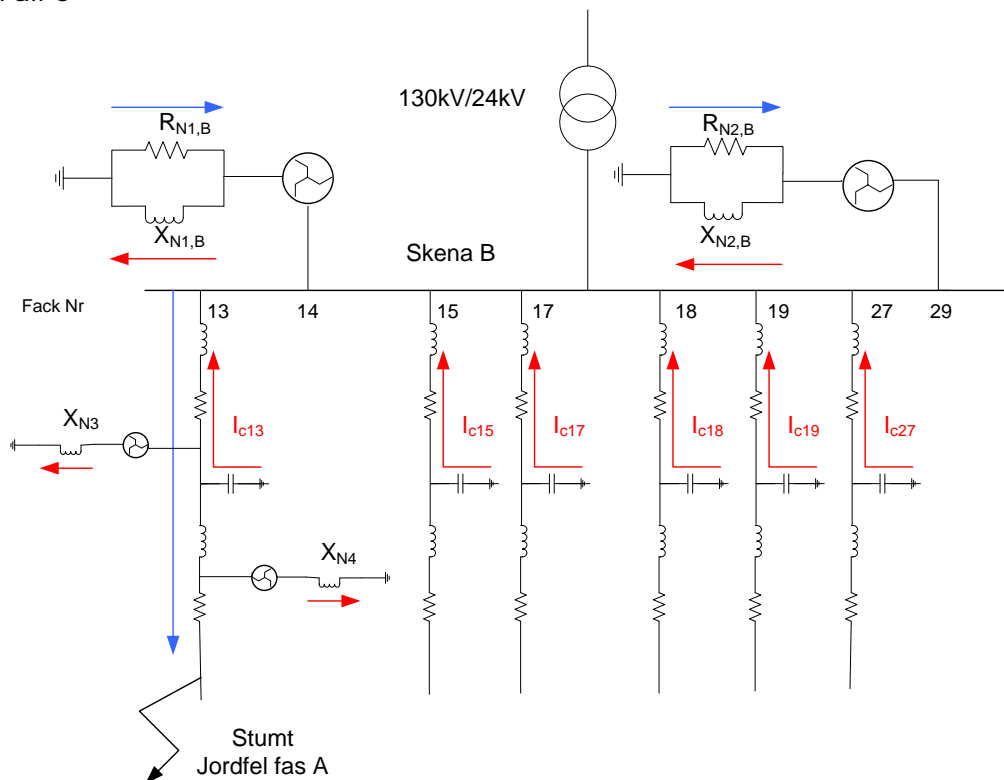
	3I0 (A)	I0 (fasvinkel)	Re 3I0 (A)	Im 3I0 (A)
Felbehäftad knutpunkt	2,465	-0,006367	2,465	-0,0002739
Fack 13	16,23	-83,66	1,791	-16,13
Fack 14	16,02	-267,0	-0,8329	15,99
Fack 15	0,8577	-90,03	-0,0003771	-0,8577
Fack 17	3,1180	-90,13	-0,007247	-3,118

Fack 18	0,7197	-90,01	-0,0001369	-0,7197
Fack 19	2,227	-90,06	-0,002183	-2,227
Fack 27	8,939	-90,74	-0,1156	-8,938
Fack 29	16,02	-267,0	-0,8329	15,99

Total kapacitiv felström ges av:

$$\sum I_{cn} = 32,00 \text{ A}$$

Fall 5



Figur 89 Stumt jordfel i fas L1 på ledning längst ut i trädstrukturen tillhörande skena B. Petersenspolar är kopplade till två olika knutpunkter på ledningen.

Nollpunktutrustningen är kopplad till två olika knutpunkter via jordningstransformator. En kompenseringström på 15 A ger följande värden på nollpunktsreaktanserna:

$$X_{N,HS473} = X_{N,HS483} = 923,8 \Omega$$

Då ett jordfel införs längst ut i nätet (ledning 13) studeras förutom matande skena (B) och felbehäftad knutpunkt även ledningar anslutna till B.

Tabell 10 Nollföljdsspänning på matande skena samt i felstället

	V0 effektivvärde (kV)	V0 fasvinkel (grader)
Matande skena B	12,94	-179,2
Felbehäftad knutpunkt	13,82	179,6

Tabell 11 Nollföljdsström i felstället samt i ledningar närmast matande skena

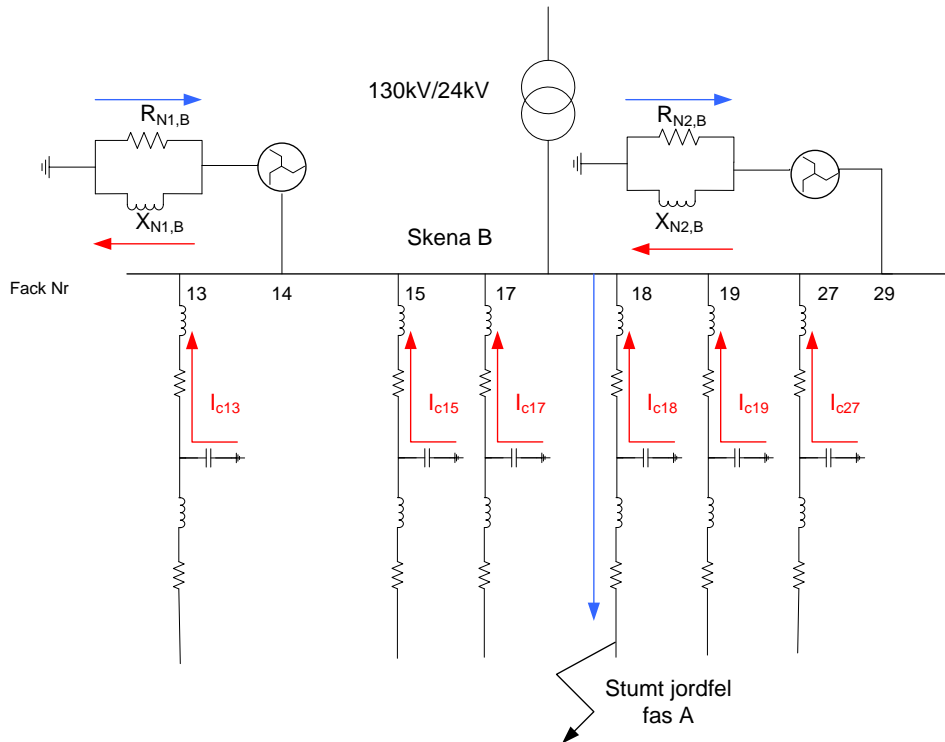
	3I0 (A)	I0 (fasvinkel)	Re 3I0 (A)	Im 3I0 (A)
Felbehäftad knutpunkt	17,07	3,256	17,05	0,9699
Fack 13	105,4	278,2	15,11	-104,3
Fack 14	119,3	93,38	-7,024	119,1
Fack 15	7,238	270,0	-0,003182	-7,238
Fack 17	26,31	269,9	-0,06116	-26,31
Fack 18	6,074	270,0	-0,001155	-6,074
Fack 19	18,80	269,9	-0,01842	-18,80
Fack 27	75,44	269,3	-0,9758	-75,43
Fack 29	119,3	93,38	-7,024	119,1

Total kapacitiv felström ges av:

$$\sum I_{cn} = 238,152 \text{ A}$$

Jämfört med fall 1 reduceras strömmen i felstället från 22 A till 17 A vilket innebär att utlokaliserad kompensering är mycket effektiv i detta fall.

Fall 6



Figur 90 Stumt jordfel i fas L1 på ledning längst ut i trädstrukturen tillhörande fack 18 skena B

Tabell 12 Nollföljdsspänning på matande skena samt i felstället

	V0 effektivvärde (kV)	V0 fasvinkel (grader)
Matande skena B	13,80	179,3
Felbehäftad knutpunkt	13,84	179,6

Tabell 13 Nollföljdsström i felstället samt i ledningar närmast matande skena

	3I0 (A)	I0 (fasvinkel)	Re 3I0 (A)	Im 3I0 (A)
Felbehäftad knutpunkt	22,18	-0,3629	22,17	-0,1404
Fack 13	145,4	-92,39	-6,062	-145,3
Fack 14	144,1	-267,0	-7,496	143,9
Fack 15	7,719	-90,03	-0,003393	-7,719
Fack 17	28,06	-90,13	-0,06522	-28,06
Fack 18	23,08	-16,00	22,18	-6,362

	3I0 (A)	I0 (fasvinkel)	Re 3I0 (A)	Im 3I0 (A)
Fack 19	20,05	-90,06	-0,01965	-20,05
Fack 27	80,45	-90,74	-1,041	-80,44
Fack 29	144,1	-267,0	-7,496	143,9

Total kapacitiv felström ges av:

$$\sum I_{cn} = 287,9 A$$

Här kan konstateras att fack 13 bidrar med en ström om ca 145 A. Om strömtransformatorn har ett vinkelfel $> +3^\circ$ finns risk att skyddet mäter en falsk aktiv ström $> 1 A$ och därmed kan det finnas risk för oönskad skyddsfunktion.

Diskussion

Fall 1 och fall 2:

Thevenin-ekvivalenten är beräknad från felstället vilket förklarar att nollföljdsspänningen där är i samma storleksordning som fasspänningen 13,82 kV (se Tabell 2 för fall 1). Nollföljdsspänningen på 12,69 kV innebär att serieimpedansen för nollföljd orsakar ett spänningsfall på 1,13 kV längs felbehäftad ledning (ut från fack 13). (Den lägre nollpunktsspänningen i matande station gör att strömmen från respektive nollpunktsmotstånd blir 6,89 A i stället för förväntade 7,5 A.)

I båda fallen är den resistiva strömmen ut från fack 13 lägre än den resistiva delen av strömmen i felstället. Detta indikerar att det bildas en resistiv ström längs ledning 13 på grund av serieimpedansens resistiva del.

Vidare kan konstateras att avstämningen av nollpunktsreaktorn i princip förutsätter jordfel i matande station (fall 1). Vid fel längst ut på ledningen (fall 2) har felströmmen en viss reaktiv komponent, dvs. avstämningen av nollpunktsreaktorn är inte helt korrekt för denna felpunkt.

Fall 1 och fall 5:

Genom att tillföra kompensering ute i nätet kan man se att total kapacitiv ström i nätet (framförallt ledning 13) minskar. Detta leder till att spänningsfallet längs ledning 13 minskar. Dessutom minskar skillnaden i den resistiva strömmen mellan felstället och den resistiva ström som kommer ut från fack 13. Detta betyder att den ström som bildades i ledning 13 i föregående fall är lägre. Inverkan av serieimpedansens resistiva del har alltså minskat genom införandet av nollpunktsreaktorer i nätet.

Fall 1 och fall 6:

Ledning 18 är betydligt kortare och strukturellt mindre komplicerad än ledning 13. I Tabell 13 (fall 6) kan man se att den resistiva strömmen som går ut från fack 18 är i samma storleksordning som den i felstället. Den resistiva delen av

serieimpedansen verkar inte ge bidrag till någon felström. Spänningsfallet längs ledningen är betydligt mindre än i fall 1 vilket gör att strömmen från respektive nollpunktsmotstånd är 7,5 A.

Det resistiva strömbidraget från fack 13 är 6 A vilket får anses betydande.

Fall 3 och fall 4:

I fall 3 kan man notera ett spänningsfall längs ledning 13. Dessutom är det liksom i fall 1 och fall 2 en skillnad i resistiv ström ut från fack 13 och ström i felstället.

Slutsats

För längre kabelledningar har serieimpedansen framförallt det resistiva delen inverkan på nollföljdsspänning och felströmmar. Kompensering med nollpunktsreaktorer i nätet minskar total kapacitiv felström och därmed även inverkan av en lednings serieimpedans. Genom att studera varje ledning kan man urskilja de nät (tex ledning 13) som har en signifikant inverkan och lägga till kompensering i dessa nät.

Det kan konstateras att nätberäkningar med analysprogram, av typ PSS/E[®] eller motsvarande, är ett värdefullt hjälpmedel för kontroll av jordfelsströmmens storlek och skyddens möjlighet att ge korrekt skyddsfunktion.

9.3 Transientanalys

Det är fullt möjligt att analysera transienta förlopp vid jordfel i spoljordade mellanspänningsnät. Detta görs med tidssimulering i dator med datorprogram av typ EMTDC. Varje komponent representeras med differentialekvationer av första ordningen.

För att bygga upp en simuleringsmodell för ett helt mellanspänningsnät krävs en mycket stor mängd indata, oftast mer än vad som krävs för statiska beräkningar enligt 9.2. Det bedöms att sådana analyser medför stor arbetsvolym till relativt begränsad nytta.

10 Kontroll och provning

Felaktig funktion hos felbortkopplingsystemet för jordfel har olika orsaker:

- Olämplig/felaktig konstruktion
- Felaktigt montage
- Fel i kontroll- och provningsförfarande (instruktioner, rutiner, provningsutrustning m.m.)
- Olämplig/felaktig konfigurering
- Hårdvarufel i skydds-/kontrollutrustning
- Programvarufel i skydds-/kontrollutrustning
- Fel i mätgivare (ström- eller spänningstransformatörer)
- Olämplig dimensionering av mätgivare
- Fel i likströmssystemet (likriktare, batteri och likströmskretsar)
- Olämpliga/felaktiga parameterinställningar
- Miljö (kyla, fukt, värme, torra (statisk urladdning), djur (råttor, möss, fåglar, fladdermöss m.m.)
- Olämplig driftläggning (onormalt driftläge)
- Otillräcklig kompensering av kapacitiv jordfelsström

Många av de ovanstående punkterna är generellt giltiga för felbortkopplingsystem.

Nedan diskuteras ett antal orsaker som kan vara speciellt viktiga för jordfelsskydd i reaktansjordade mellanspänningsnät.

10.1 Olämplig/felaktig konstruktion och/eller montage

Det har uppmärksamats att skador på kabelskärmar är relativt vanliga. En skadad kabelskärm ger förändring av nollföljdsimpedanserna i nätet och kan därmed ge utebliven eller oönskat skyddsfunktion för jordfelsskydden. Skador på kabelskärm kan vara orsakad av korrosion på grund av inträngande fukt. Det är därför lämpligt att genomföra mantelprov vid driftsättning och med återkommande intervall.

Det är relativt vanligt att felaktiga jordfelsskyddsfunktioner orsakas av felaktig riktningsfunktion hos jordfelsskydd med riktad funktion. Detta kan bero på felaktig inkoppling av ström- eller spänningskretsar till skyddsenheter. En annan orsak kan vara felaktig inställning där man i moderna skydd skall ange referensriktning, oftast som jordningspunkt för strömtransformatorns sekundärkrets. Ofta är det svårt att prova denna funktion. Därför är det ofta lämpligt att kontrollera riktningsfunktionen med primärprov, där ett

högresistivt jordfel appliceras i nätet. Ett sådant prov måste planeras noga för att säkerställa personsäkerhet och för att minimera risken för oönskad skyddsfunktion under provet.

10.2 Olämpliga/felaktiga parameterinställningar

För korrekt funktion hos jordfelsskydd måste skyddens inställningsparametrar ha lämpliga värden. Parametrarna är olika för olika skyddsprinciper. Gemensamt är normalt att parameteromställning kan behövas vid förändringar i nätet (främst installation av nya kablar). Därför är det lämpligt att analys för kontroll av parameterinställningar görs vid ombyggnad/utbyggnad av nätet.

10.3 Otillräcklig kompensering av kapacitiv jordfelsström

Under de senaste åren har omfattande kablifiering av landsbygdsnät genomförts. Detta har medfört en omfattande ökning av den kapacitiva jordfelsströmmen. I vissa fall har ökningen varit så stor att befintliga nollpunktsreaktorer blivit otillräckliga. Det är därför viktigt att under nätplanering regelmässigt kontrollera nollpunktsreaktorernas kapacitet i förhållande till planerade kablifieringar.

11 Störningsanalys och störningsregistreringar

Felaktigheter i felbortkopplingssystemet för jordfel kan vara svåra att upptäcka eftersom de endast ger sig tillkänna vid verkliga störningar. Därför är det lämpligt att utnyttja inträffade störningar för att kontrollera jordfelsskyddssystemet. Detta kan vara lämpligt även i de fall som jordfel kopplats bort som förväntat. Den information som kan användas för analys efter inträffade störningar med betydelse för jordfelsskydd är följande:

- Binära indikeringar från jordfelsskydd i nätet, både för felbehäftad anläggning (ledning/kabel) och andra objekt.
 - Utlösningssignaler
 - Startsignaler
 - Eventuella fasindikeringar
- Signalföljdslistor med tidsstämlade signaler, brytarlägen, brytarmanöver, mm.
- Störningsregistreringar där kurvform hos spänningar och strömmar, främst nollföljdsstorheter, kan studeras.

Analysen skall besvara en rad frågor:

- Kopplades jordfel bort på föreskriftsenligt sätt
 - Inom maximal feltid
 - Var jordfelsströmmen inom tillåtet område
- Var felbortkopplingen selektiv
- Var alla binära signaler från skyddsenheterna förväntade med registrerade spänningar/strömmar som bakgrund
- Identifierades saknade binära signaler från skyddsenheterna vilka kunde förväntas med registrerade spänningar/strömmar som bakgrund

12 Rekommendationer

Utgående från ovan beskrivna egenskaper för mellanspänningsnät ges i detta avsnitt rekommendationer för utformning av systemjordning och jordfelskyddssystem.

12.1 Principiell utformning av nätstruktur, systemjordning och felbortkopplingssystem för jordfel

Inom ett nätföretag är det värdefullt att ha en enhetlig princip för utformning av systemjordning och felbortkopplingssystem för jordfel. Detta för att underlätta och effektivisera drift- och underhållsrutiner.

Vi har två skilda problemställningar att hantera:

- Uppfyllande av kravet på maximal spänningssättning av skyddsjordad anläggningsdel (beröringsspänning)
- Uppfyllande av kravet på bortkoppling av högresistiva jordfel i nät med friledning

12.2 Planeringskedet

Vi har i de flesta fall att utgå från befintliga nät. I många fall rör det sig om att ersätta friledningar med jordkabel.

12.2.1 Nätstruktur

Nätstrukturen bestäms normalt av primärbehovet: var finns elkunderna och var kan anslutning ske till överliggande nät?

Det kan konstateras att nät med stor geografisk utbredning och med både kablar och friledningar ofta har stor generering av kapacitiv jordfelsström. Helst skulle man införa begränsningar hur stor total kapacitiv generering av jordfelsström som kan accepteras. Om en sådan gräns överskrids skall det övervägas att etablera ny inmatning för att kunna dela upp aktuellt mellanspänningsnät i flera delar, vart och ett med acceptabel nivå på generering av kapacitiv jordfelsström. Det är dock svårt att sätta absoluta gränser eftersom möjligheten att uppfylla krav på maximal spänningssättning av skyddsjordad anläggningsdel och jordfelskyddens funktion är beroende av fler parametrar.

Det bedöms dock att befintliga nät med kapacitiv jordfelsström om 600 A i 24 kV nät och 500 A i 12 kV nät utgör lämplig övre gräns.

För att hantera spänningssättningskravet rekommenderas att alltid förlägga kablar tillsammans med medföljande markledare. Denna ledare bör ligga oisolerad i marken för att kunna shunta jordtagets resistans och därmed minska spänningssättande ström. För friledning rekommenderas att ha medföljande jordlina i stolpe eller medföljande markledare helst oisolerad och förlagd i mark.

12.2.2 Systemjordning

Mellanspänningsnät skall ha nollpunktsreaktor i nätets anslutningspunkt till överliggande nät. Systemjordningen skall uppfylla följande:

- Central nollpunktsreaktor (i nätets anslutningspunkt till överliggande nät) skall vara kontinuerligt avstämbar alternativt avstämbar i steg om maximalt 2 A.
- Avstämning skall ske automatiskt med maximal snedavstämning om 2 A. Avstämning så nära den ideala skall eftersträvas. Vid omkopplingar i nätet som medför ändrad kapacitiv jordfelsström skall justering av avstämning ske inom 30 s.
- Avstämningsautomatiken skall kunna medge manuell avstämning via fjärr.
- För kabelledningar med stor generering av kapacitiv jordfelsström (>50 A) rekommenderas att installera utlokaliserade nollpunkts-reaktorer anslutna till 24/12 kV nollpunkt på distributions-transformatorer (till 0,4 kV) med lämplig kopplingsart: ZN/zn, YN/d/yn.
- Aktiva effektförluster (aktiv jordfelsström) hos nollpunktsreaktorer skall vara max 2 % av märkeffekt (märkström)
- Central nollpunktsreaktor skall anslutas enligt endera av följande alternativ:
 - Till nollpunkt på transformator med lämplig kopplingsart så att nollföljdsström/nollföljdsspänning inte kan transformeras mellan spänningsnivåerna: Ydyn, Dyn, YNdyn (där det skall visas at transformering av nollföljdsstorheter är försumbara). Transformatorns nollföljdsimpedans i serie med nollpunktsutrustningen skall vara begränsad: $Z_{OT} \leq 0,1 Z_{NP}$
 - Till separat jordningstransformator lämpligen med kopplingsart ZN. Alternativt kan stationstransformator med kopplingsart ZNzn eller YNdyn användas. Jordningstransformatorns nollföljdsimpedans i serie med nollpunktsutrustningen skall vara begränsad: $Z_{OT} \leq 0,1 Z_{NP}$
- Nollpunktsmotstånd kopplas normalt parallellt med nollpunktsreaktor. Om nollpunktsreaktorns ekvivalenta aktiva jordfelsström överstiger ca 5 A slopas nollpunktsmotståndet.
- Om nollpunktsutrustningen är tagen ur drift för underhåll eller fel skall åtgärder vidtas så snabbt som möjligt för att kompensera jordfelsströmmen till acceptabla nivåer. Alternativ:
 - Lagerhållning av nollpunktsutrustning så utbyte kan ske snabbt (inom ett dygn). Detta skall omfatta jordningstransformator om inkoppling av nollpunktsutrustning sker via jordningstransformator.
 - Möjlighet att koppla nollpunktsutrustning till mer än en transformatornollpunkt.
 - Omkoppling i nätet så att delar av den kapacitiva genereringen av jordfelsström ansluts till ett annat nät.

- Restströmskompensering genom injicering av ström i nollpunkten i motfas med nätets aktiva jordfelsström kan ske. I dagsläget är marknaden för denna typ av utrustning begränsad.

12.2.3 Jordfelsskyddssystem

Jordfel skall kopplas bort enligt de krav som ställs i "Elsäkerhetsverkets föreskrifter och allmänna råd om hur elektriska starkströmsanläggningar ska vara utförda; ELSÄK-FS 2008:1" [1].

- Jordfelsskyddssystemet skall ha redundans, dvs. jordfel skall kopplas bort även om en komponent i felbortkopplingskedjan är felbehäftad. Detta kan innebära:
 - Ordinarie skydd och reservskydd skall matas från separata likströmssystem, alternativt från ett likströmssystem med uppdelning på huvudsäkringsnivå.
 - Ordinarie skydd och reservskydd skall matas från separata mättransformatorer, alternativt från skilda strömtransformator-kärnor (strömmätande jordfelsskydd).
 - Det bör finnas ett nollpunktsspänningsskydd i matande station som utgör reservskydd för hela nätet och ordinarie skydd för jordfel på samlingsskena och i transformator i matande station.
 - Det är olämpligt att mata riktade jordströmsskydd från samma spänningstransformatorgrupp som matar nollpunktsspänningsskydd.
- För utgående ledningsfack rekommenderas att ha ett grundtonsmätande jordfelsskydd:
 - Riktat strömmätande jordfelsskydd som mäter den aktiva komponenten hos strömmen till skyddet (i fas med nollföljdsspänningen). Detta skydd skall vara inställt så att krav på känslighet är uppfyllt för alla de driftläggningar som kan förekomma i nätet. Vid nät med stor andel kabel rekommenderas att inställningarna baseras på nätberäkningar där hänsyn tas till serieimpedanserna i nollföljdsnätet.
 - Admittansmätande jordfelsskydd. Detta skydd skall vara inställt så att admittansområdet för fel på skyddad ledning (bakomliggande admittans) täcks för alla de driftläggningar som kan förekomma i nätet. Vid nät med stor andel kabel rekommenderas att inställningarna baseras på nätberäkningar där hänsyn tas till serieimpedanserna i nollföljdsnätet. Vidare kontrolleras att nollpunktsspänningen för frigivning av skyddsfunktionen ställs så att kravet på känslighet uppfylls.
- Parallellt med det grundtonsmätande jordfelsskyddet för utgående ledning rekommenderas att ha ett transientmätande (intermittent) jordfelsskydd. Detta gäller främst fack som ansluter ledning med kabelsträckor eftersom intermittenta jordfel ofta förekommer i kablar och kabelavslut. Dock kan intermittenta fel förekomma även för andra komponenter.

- Parallellt med riktat jordfelsskydd och transientmätande jordfelsskydd rekommenderas att använda ett oriktat strömmätande jordfelsskydd med ströminställning över förekommande jordfelsströmmar vid enfasigt jordfel och funktionstid om maximalt 0,5 s.
- För alla typer av jordfelsskydd gäller att de skall uppfylla krav i standarder beträffande:
 - Elektromagnetisk störmiljö: överspänning, högfrekventa störningar, mm
 - Hög/låg temperatur
- Mättransformatorerna skall uppfylla de krav som relätillverkarna ställer.
- Vid analys av aktuellt nät som görs för att beräkna resulterande jordfelsströmmar och inställningar av jordfelsskydd rekommenderas att använda nätberäkningsprogram med noggrann nollföljdsrepresentation. I de fall jordfelsströmmarna är små kan förenklad analys göras enligt avsnitt 6.1.1. Som vägledning om fullständiga nätberäkningar krävs bör följande vara uppfyllt:
 - Totala kapacitiva jordfelsströmmen i nätet överstiger 200 A
 - Antalet fack i matande station understiger 8
 - Kapacitiv jordfelsström från ett enskilt fack överstiger 50 A
 - Nätet har nätstationer med jordtagsresistans överstigande 10 Ω

12.3 Driftskedet

Även om nollpunktsutrustning avstäms automatiskt och jordfelsskydden skall fungera utan mänsklig inblandning bör följande beaktas under driftskedet:

- Kontroll av nollpunktsreaktorernas kapacitet (maximal kompenseringsström) skall ske vid om- och utbyggnad av nätet.
- Översyn av jordfelsskyddens inställning skall ske vid om- och utbyggnad av nätet. Det är även lämpligt att detta sker med regelbundna intervall (t.ex. vart 5:e år) för att fånga upp förändringar som inte observerats.
- Funktionsprov av jordfelsskydd och automatik för avstämning av nollpunktsreaktorer skall ske med regelbundna intervall (t.ex. vart 5:e år).

Referenser

- [1] Elsäkerhetsverkets föreskrifter och allmänna råd om hur elektriska starkströmsanläggningar ska vara utförda; ELSÄK-FS 2008: 1
- [2] Energimarknadsinspektionens föreskrifter och allmänna råd om krav som ska vara uppfyllda för att överföringen av el ska vara av god kvalitet; EIFS 2013: 1
- [3] Ari Wahlroos and Janne Altonen, ABB Oy Distribution Automation – Finland; 1MRS757370, Compensated networks and admittance based earth-fault protection
- [4] Användning av utjämningslindning i transformatorer, Svensk Standard SS 427 01 04, 1979-11-15
- [5] Cigré Report 531, Cable Systems Electrical Characteristics, WG B1.10, April 2013
- [6] Klaus Winter, Nollpunktsanalys – ny metod att detektera högohmiga jordfel, Tidskriften ERA nr 5: 1988
- [7] SS-EN 50522, Starkströmsanläggningar med nominell spänning överstigande 1 kV AC – Jordning
- [8] Glover, J. Duncan, Sarma, Mulukutla. (1994) "Power system analysis and design", Boston: PWS, cop. 1994, ISBN: 0534939600.
- [9] Hemmingsson, Morten (2008) "Nollföljdsdata för kabel Nätnyttomodellen Billeberga verkligt nät", Malmö, 2008-04-09, MHe-07-005
- [10] Henning, Gunnar "Nollföljdsimpedans för kablar". ABB High Voltage Cables

JORDFELSDETEKTERING I MELLANSPÄNNINGSNÄT

Tillgänglighetskraven på elförsörjningen och därmed även på mellanspänningsnäten i Sverige ökar. Som en följd av många och långvariga leveransavbrott orsakade av snö och blåst, samt skärpta ersättningsregler för avbrott i elanslutningen, har många elnätsföretag under senare år genomfört en omfattande kablifiering av sina mellanspänningsnät. Kablifieringen av näten medför ändrade förutsättningar för detektering och bortkoppling av jordfel. Kraven på hög känslighet hos jordfelsskydden står till viss del i motsatsförhållande till kraven på hög tillgänglighet på elanslutningen.

I denna rapport ges vägledning för nätbolagen vid utformning av mellanspänningsnät beträffande systemjordning och jordfelsskyddssystem. Krav på begränsning av jordfelsström och bortkoppling av jordfel beskrivs. Tekniska förutsättningar diskuteras: Nätstruktur, anslutning och utformning av nollpunktsutrustning, inverkan av ledningars serieimpedanser, feltyper, skyddsprinciper och analysmetoder.

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