

Förhöjd nollpunktsspänning i distributionsnätet

Per Ekelöf

Examensarbete – Högskoleingenjör
Huvudområde: Elektroteknik
Högskolepoäng: 15 p
Termin/år: VT/2020
Handledare: Göran Thungström
Examinator: Johan Sidén

Förord

Denna rapport är resultatet av ett tio veckors långt examensarbete under vårterminen 2020 och är det avslutande momentet i utbildningen till högskoleingenjör för inom elkraftteknik. Utbildningsprogrammet har genomförts på distans och är ett samarbete mellan Mittuniversitetet, Umeå universitet och Luleå tekniska universitet.

Arbetet har huvudsakligen utförts hos Kristinehamns Energi och jag vill tacka för möjligheten att få insyn i ett nätbolags verksamhet. Ett speciellt tack till driftingenjören Peter Gustavsson som hjälpt till med fakta och möjliggjort omkopplingarna i nätet.

Jag vill också tacka Mikael Carlsson på Sweco som varit min handledare och även förmedlat kontakten med Kristinehamns Energi.

Tack även till min handledare på Mittuniversitet Göran Thungström som hela tiden kommit med snabba återkopplingar.

Sist men inte minst tackar jag min fru Mari för stödet under dessa tre år och för att hon dragit det tunga lasset där hemma.

Örebro maj 2020

Per Ekelöf

Sammanfattning

Kristinehamns Energi har under en längre tid haft problem med en förhöjd nollpunktsspänning i sitt distributionsnät. Nollpunktsspänningen varierar en hel del och verkar enligt uppgift vara väderberoende, något vi kan bekräfta då det mättes upp mycket låga nivåer efter en torrperiod i våras.

Studien syftar till att ta upp möjliga orsaker till en förhöjd nollpunktsspänning. Teorin tas upp för hur strömmar fördelar sig vid jordfel och vid olika former av jordningar. De speciella förhållandena i det stort kablfierade nätet med dess höga kapacitans går också igenom.

Målsättningen är att hitta anledningen till Kristinehamns energis höga nollpunktsspänning och i så fall även att ge förslag på åtgärder för avhjälpande av felet.

Vi vill också ge ökad förståelse för problemet samt beskriva hur ett distributionsnät i allmänhet är uppbyggt och därigenom hitta vägar framåt för det fortsatta arbetet.

Den befintliga nollpunktsspänningen i nätet beror på en osymmetri mellan faserna och denna osymmetri är något som är naturligt förekommande i distributionsnätet. Detta eftersom det inte är realistiskt att de tre faserna belastas helt lika.

Förhöjd nollpunktsspänning beror i de allra flesta fall på ett begynnande jordfel.

Det konstateras genom ett antal mätningar, efter omkopplingar i nätet, att felet kan avgränsas till ett område runt stationen i Kroksvik och att nivån på nollpunktsspänningen är belastningsberoende.

I Kroksvik kan de båda inkommande kablarna från Stensta uteslutas från fel liksom det utgående facket mot Båtbyggaren.

För att komma vidare i utredningen bör de tre övriga linjerna från stationen Kroksvik undersökas. Där är kabeln mot Mathall mest intressant då den vid mätning visar sammanfallande kurvor mellan förbrukning och nollpunktsspänning.

Det finns också möjlighet att göra omkopplingar i nätet för att utföra dessa undersökningar utan att störa driften.

Abstract

Kristinehamns Energi has for a long time had problems with an elevated residual voltage in its distribution network. The zero voltage varies a lot and reportedly seems to be weather dependent, something we can confirm after measuring exceptionally low levels after a dry period this spring.

The study aims to address possible causes of an elevated residual voltage. The theory is taken up for how currents are distributed in the case of earth faults and in different forms of earthing. The special conditions of the network containing much cable, with its high capacitance, are also passed through.

The aim is to find the reason for Kristinehamns Energis high residual voltage and, if so, also to propose measures to remedy the fault. We also want to give a better understanding of the problem and describe how a distribution network is generally structured and thereby find ways forward for further work.

The existing residual voltage in the network is due to an asymmetry between the phases and this asymmetry is something that is naturally occurring in the distribution network. This is because it is not realistic that the three phases are loaded completely equally. Increased residual voltage is in most cases due to an incipient earth fault.

We conclude through some measurements, after switching in the network, that the fault can be limited to an area around the station in Kroksvik and that the level of residual voltage is load dependent. In Kroksvik, the two incoming cables from Stensta can be excluded from faults as well as the outgoing cables towards Båtbyggaren.

To proceed with the investigation, the three other lines from Kroksvik station should be investigated. There the cable towards Mathall is most interesting as it when measuring shows converging curves between consumption and residual voltage. It is also possible to make switching in the network to carry out these investigations without interfering with operation.

Innehåll

1	Introduktion.....	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Syfte och mål	1
1.3	Metod	1
2	Teori.....	2
2.1	Tekniska förutsättningar mellanspänningsnät	2
2.1.1	Matande transformator från direktjordat nät.....	2
2.1.2	Matande transformator från icke effektivt jordat nät.....	3
2.1.3	Jordningstransformatorn	4
2.1.4	Kapacitiv generering	4
2.1.5	Nollpunktspänning.....	4
2.2	Symmetriska komponenter	5
2.3	Systemjordning.....	7
2.3.1	Isolerat system	8
2.3.2	Resistansjordat system	8
2.3.3	Reaktansjordat system.....	8
2.4	Nollpunktsutrustning.....	9
2.4.1	Central kompensering.....	10
2.4.2	Utlokaliserad kompensering	11
2.5	Felströmmar	12
2.5.1	Kortslutningsströmmar	12
2.5.2	Jordfelsströmmar	13
2.6	Jordfelsskydd	13
2.6.1	Oriktat jordfelsskydd.....	14
2.6.2	Riktat jordfelsskydd.....	14
2.6.3	Nollpunktsspänningsskydd (NUS)	15
2.7	Orsaker till jordfel	15
2.7.1	Luftledningarna	15
2.7.2	Kablar	15
2.7.3	Konstaterade fel från verkligheten	16
3	Förutsättningar för mätningarna	16
3.1	Mätinstrument Dranetz HDPQ Xplorer	17

3.2 Kristinehamns energis distributionsnät.....	17
4 Resultat.....	17
4.1 Tidigare mätningar.....	18
4.2 Nya mätningar	20
5 Diskussion.....	23
5.1 Samhälleliga och etiska aspekter.....	24
6 Slutsatser	24
7 Referenser	26
8 Appendix A : Driftlägeskarta.....	28
9 Appendix B : Mätuppkopplingar	33
9.1 Bilder.....	33
9.2 Kretsscheman	35

1 Introduktion

Denna rapport behandlas problemet med en förhöjd nollpunktsspänning i mellanspänningsnät. Speciellt att kommer förhållanden och förutsättningar i Kristinehamns energis distributionsnät att utredas.

1.1 Bakgrund

Kristinehamns energi, som är ett kommunalt ägt bolag, har under en längre tid haft problem med en förhöjd nollpunktsspänning i sitt distributionsnät. Kristinehamns energi har i nuläget 10423 lågspänningskunder och 43 högspänningskunder. Nätet består av ungefär 25 km friledning, 8 km hängspiralkabel och 322 km kraftkabel. Totalt finns 355 nätstationer och två mottagningsstationer.

Det är okänt när den förhöjda nollpunktsspänningen uppkom men den varierar något över tid. Den håller sig dock på så pass låg nivå att inte felskydden löser ut. Två mätningar är redan utförda av Kristinehamns energi och dessa utgör basen i arbetet.

Kristinehamns energis distributionsnät matas från två håll med två 25 MVA transformatorer på var sida. Transformatorerna är impedansjordade genom varsin automatiskt reglerande petersenspole och ett 5A motstånd. Två lokala reaktorer finns också utplacerade i centrum av nätet.

Överliggande nät har spänningen 40 kV som sedan transformeras ned till 11 kV i distributionsnätet. Nätet är sedan uppdelat i tre zoner som vid normal drift är skilda från varandra. Kristinehamns distributionsnät är till största delen kablifierat och vi kommer även titta på vad detta innebär med den ökande driftkapacitansen i nätet och påverkan vid ett jordfel.

1.2 Syfte och mål

Syftet med studien är att undersöka möjliga orsaker till en förhöjd nollpunktsspänning. Målet är, i första hand, att hitta en möjlig anledning till Kristinehamns energis ökade nollpunktsspänning och ge förslag på åtgärder för avhjälpan av felet.

I andra hand ge ökad förståelse för problemet och därigenom hitta vägar framåt för ett fortsatt arbete i saken.

1.3 Metod

Genom litteraturstudier samt samtal med personal på Kristinehamns energi och Sweco kommer nödvändiga fakta i ämnet inhämtas.

Tidigare utförda mätningar kommer att granskas och analyseras för att förstå utgångsläget. Sedan kommer ytterligare mätningar att göras där sektioneringar i nätet utförs för att få varierade data beroende på driftläge. En första mätning utförs i syfte att bestämma nollpunktsspänningens eventuella lastberoende. Därefter görs mätningar efter möjliga omkopplingar i nätet som inte stör driften. Vid dessa mätningar kommer i första hand nollpunktsspänningen att kontrolleras och jämföras med belastningen när omkopplingarna

sker. Detta måste sanktioneras av Kristinehamns energi eftersom dessa åtgärder både kräver personal ute i fält samt att det påverkar driftläget.

2 Teori

Inledningsvis görs en teoretisk genomgång av vad som gäller för ett mellanspänningsnät.

2.1 Tekniska förutsättningar mellanspänningsnät

Mellanspänningsnäten är uppbyggda på olika sätt. Detta kräver också varierade tekniska lösningar när systemen utformas för att tillgodose kraven på drift- och personsäkerhet.

När det gäller felströmmar i samband med jordfel i icke direktjordade mellanspänningsnät kan dessa komma från:

- Transformatorer anslutna till Överliggande nät. Vilka kan vara direkt- eller högimpedansjordade.
- Transformatorer anslutna till underliggande impedansjordade nät med ansluten produktion eller maskning till Överliggande nät
- Transformatorer anslutna till underliggande direktjordade nät med ansluten produktion.
- Elproduktionsanläggning direkt ansluten eller ansluten via aggregattransformator till det berörda mellanspänningsnätet.

Transformeringen av nollföljdsström mellan nät i olika spänningsnivåer, beror till stor del på transformatorns kopplingsart och jordning.

Normalt matas mellanspänningsnätet från ett överliggande 40 – 130 kV nät. Det överliggande nätet kan då bidra med den spänning som matar ett jordfel i mellanspänningsnätet, även om strömmen från det överliggande nätet har låg nivå. Det skulle kunna uttryckas som att överliggande nät bidrar med plusföljdsspänning och plusföljdsström men inte med motsvarande nollföljdsspänning och nollföljdsström. Normalt kan de matande transformatorerna från överliggande nät inte överföra nollföljdsstorheter, men det finns undantag, såsom när YNyn-kopplade transformatorer används.

Distribuerad generering, såsom enstaka vindkraftverk, är oftast anslutna till mellanspänningsnät. Detta innebär att också de bidrar till spänningsmatningen av ett jordfel i nätet. Jordfelsskydden i nätet måste därför kunna detektera och koppla bort felströmmar från produktionsanläggningar anslutna till nätet.

2.1.1 Matande transformator från direktjordat nät

För transformatorer som matar mellanspänningsnät är, som tidigare nämnt, kopplingsarten av betydelse. Den styr anslutningsmöjligheterna av nollpunktsutrustningen och

nollföljdskopplingen mellan upp- och nedsida av transformatorn. Vidare är också transformatorns nollföljdsimpedans beroende av kopplingsart.

Nedan följer några exempel på möjliga transformatorkopplingar. I beteckningarna för de olika kopplingarna används gemener för att beskriva lågspänningslindningarna och versaler för högspänningslindningen. Högspänningsledningen nämns alltid först. Om lindningen är jordad (försedd med en neutralpunkt) läggs ett N eller n till i beteckningen för kopplingsarten till varje jordad lindning.:

- **YNyn**
Här fås en transformering av nollföljdsström och nollföljdsspänning mellan nivåerna. Storleken på transformeringen beror av bakomliggande nollföljdsimpedans på den matande sidan.
- **Yyn**
Vid denna koppling kan inte nollföljdsström flyta genom lindningen. Detta beror på att transformatorns uppsida inte är jordad.
- **YNd**
Inte heller här kan nollföljdsström transformeras mellan nivåerna. En nollföljdsström i uppsidans lindning kan dock ge upphov till en cirkulerande ström i nedsidans deltakoppling. Transformatorns nollföljdsimpedans blir då ungefär lika med dess kortslutningsimpedans.
- **YNynd** (deltakopplad utjämningslindning)
Eftersom utjämningslindningen ger låg impedans till jord får vi nu en begränsad transformering av nollföljdsström och nollföljdsspänning mellan nivåerna.

2.1.2 Matande transformator från icke effektivt jordat nät

Vid en jämförelse av transformeringen i direktjordade nätet med ett 40 – 70 kV nät, som i regel är icke effektivt jordade, så är till att börja med bakomliggande nollföljdsimpedans stor. Vid matning från ett icke effektivt jordat nät finns ett antal alternativ för transformatorns kopplingsart.

- **YNyn**
Här fås en transformering av nollföljdsström och nollföljdsspänning. Storleken på denna beror på bakomliggande nollföljdsimpedans på den matande sidan.
- **YNynd**
I detta fall kan en viss del av transformering förekomma. Dock kommer den deltakopplade utjämningslindningen att shunta denna transformering och därmed minska risken för att ett jordfel i det ena nätet påverkar det andra.
- **Yyn**
Ingen nollföljdsström kan flyta i lindningen eftersom uppsidans nollpunkt inte är jordad.
- **YNd**
Nollföljdsström transformeras inte mellan nivåerna. En nollföljdsström i uppsidans lindning kan dock ge upphov till en cirkulerande ström i nedsidans deltakoppling. Transformatorns nollföljdsimpedans blir då ungefär lika med dess

kortslutningsimpedans. Det är inte möjligt att ansluta nollpunktsutrustning till den deltakopplade lindningen. Vanligtvis används då en jordningstransformator på nedspänningssidan.

2.1.3 Jordningstransformatorn

Jordningstransformatorn, även populärt kallad nollpunktsbildare, används för att skapa en fysisk nollpunkt på huvudtransformatorer med delta-lindning på nedsidan.

Nollpunktsbildarens fysiska nollpunkt har låg impedans och lämpar sig för olika typer av nollpunktsbehandling såsom direktjordning eller impedansjordning.

Nollpunktsbildaren kan även användas då den matande transformatorn är kopplad enligt YNyn, där högspänningslindningen är direktjordad eller ansluter nollpunktsutrustning.

Jordningstransformatorn är normalt sett en Z-kopplad reaktor [1].

2.1.4 Kapacitiv generering

I distributionsnätet finns det två komponenter som genererar kapacitiv ström. Dessa två är den oisolerade luftledningen och i systemet ingående kablar.

För överslagsberäkning av den kapacitiva genereringen från en luftledning gäller:

$$I_{C_{luft}} = \frac{U_h * L_{luft}}{300} \quad (2.1)$$

$I_{C_{luft}}$ = kapacitiv genererad ström (A)

U_h = systemets huvudspänning (kV)

L_{luft} = ledningens längd (km)

För kabel gäller istället:

$$I_{C_{kabel}} = \frac{U_h * L_{kabel}}{\alpha} \quad (2.2)$$

För pappersisolerad kabel sätts $\alpha = 10$ och för tvärbunden polyeten- och etenplast sätts $\alpha = 5$. Notera att båda dessa formler endast bör användas för överslagsberäkning [3].

Vi kan dock konstatera att den kapacitiva genereringen i en kabel är cirka 30 – 60 gånger högre än i en luftledning.

2.1.5 Nollpunktsspänning

Nollpunktsspänningen kommer av en osymmetri i nätet. I icke direktjordade nät, såsom distributionsnätet, ska det rent teoretiskt inte finnas någon nollpunktsspänning. Detta

förutsätter i första hand att nätet är symmetriskt belastat, vilket i praktiken inte är realistiskt. Istället förekommer i stort sett alltid en naturlig nollpunktsspänning i systemet. Denna är dock i normalfallet mycket låg [14].

En ytterligare orsak till uppkomst av nollpunktsspänning, i icke direktjordade system innehållande en kombination av central- och utlokaliserad kompensering, är att även vid en korrekt placerad lokal reaktor så kommer ett bidrag ges till nollpunktsspänningen genom de resistiva förlusterna i reaktorn.

I händelse av ett jordfel med lågt övergångsmotstånd så ser vi en ökad ström genom nollpunkten och vi får härmed ett spänningsfall över nollpunktsreaktorn proportionerligt med nollföljdsspänningen. I ekvation (2.3) nedan beskrivs sambandet mellan spänningsfall över nollpunktsutrustningen samt kompenseringsströmmen från nollpunktsreaktorn. Ur denna ekvation kan även utläsas att spänningen över nollpunktsutrustningen sjunker i samma takt som kompenseringsströmmen [11].

$$I_L = \frac{U_N}{2\pi fL} \quad (2.3)$$

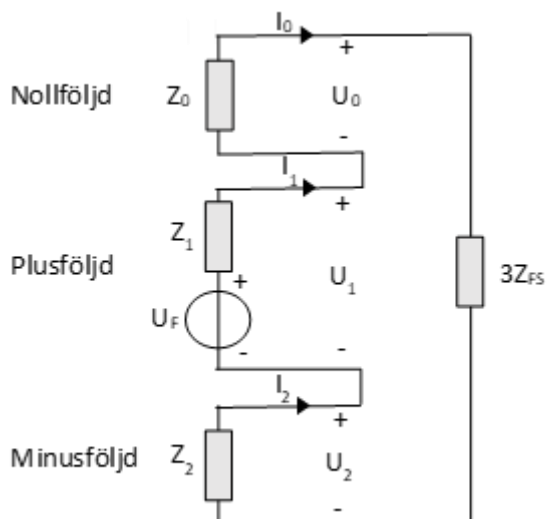
2.2 Symmetriska komponenter

För att beräkna osymmetriska förhållanden i ett trefassystem så används systemets symmetriska komponenter. Beräkningarna bygger på att ett osymmetriskt trefassystem, både när det gäller osymmetriska spänningar såväl som osymmetriska strömmar, alltid kan delas upp i tre helt symmetriska delsystem. De tre symmetriska komponentsystemen är [10]:

- **Plusföljdsystemet** – symmetriskt trefassystem med positiv fasföljd.
- **Minusföljdsystemet** – symmetriskt trefassystem med omvänd fasföljd gentemot plusföljdsystemet.
- **Nollföljdsystemet** – system med tre likadana enfasstorheter, både när det gäller storlek såväl som fasförskjutning.

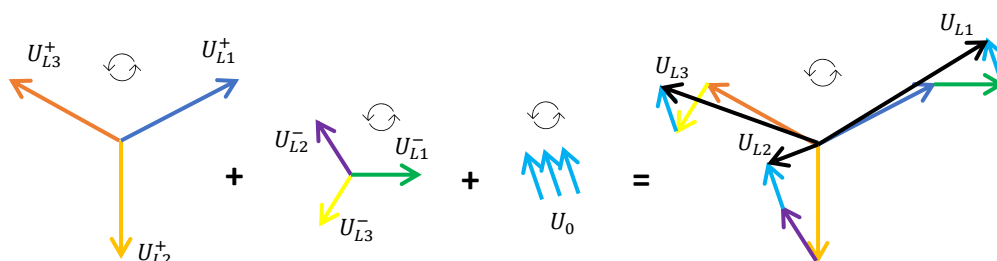
I normalfallet i trefasnätet förekommer i allmänhet bara plusföljd men bland annat på grund av varierande enfaslaster uppstår också en viss minus- och nollföljd. Även långa överföringar ger osymmetri i nätet och därmed minus- och nollföljdsspänning. Vid ett enfasigt jordfel uppkommer asymmetri i systemet och detta är det som används i skydden för att detektera felet [8].

Ett ekvivalent schema för ett enfasigt jordfel ritas upp som består av systemets plus-, minus- och nollföljdsimpedans. Övriga komponenterna i felkretsen är U_F som representerar matande fasspänning och Z_{FS} som är impedansen i felstället. Vid ett stumt jordfel är Z_{FS} lika med noll och då begränsas jordfelströmmen endast av nätets plus-, minus- och nollföljdsimpedanser. I det impedansjordade systemet är nollföljdsimpedansen mycket större än plus- och minusföljdsimpedanserna men dessa bör ändå tas med i beräkningen [9].



Figur 2.1. Modell av enpolig jordslutning.

Nedan visas hur de symmetriska delsystemen summerar med vektorer i det verkliga osymmetriska systemet. I nämnd ordning från vänster, plusföljdsystemet där respektive fas markeras med ett plus, minusföljdsystemet där varje fas markeras med ett minus och nollföljdsystemet som innehåller likvärdiga spänningar visas med den gemensamma beteckningen U_0 . Det resulterande osymmetriska systemet markeras sedan med svarta pilar.



Figur 2.2. De symmetriska komponenterna.

Vi kan alltså dela upp varje huvudspänning i tre av varandra oberoende komponenter. De tre huvudspänningarna innehåller alla komponenter från plus-, minus- och nollföljdsystemet:

$$U_{L1} = U_{L1}^+ + U_{L1}^- + U_{L1}^0 \quad (3.1)$$

$$U_{L2} = U_{L2}^+ + U_{L2}^- + U_{L2}^0 \quad (3.2)$$

$$U_{L3} = U_{L3}^+ + U_{L3}^- + U_{L3}^0 \quad (3.3)$$

En operator a införs sedan. Multiplikation med a motsvarar en vridning av 120° i positiv led och multiplikation med a^2 motsvarar en vridning av 240° i positiv led och så vidare.

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.4)$$

U_{L1} väljs som riktstorhet och med hjälp av a -operatorn kan nu de tre huvudspänningarna uttryckas i de symmetriska komponenterna:

$$U_{L1} = U^+ + U^- + U^0 \quad (3.5)$$

$$U_{L2} = a^2U^+ + aU^- + U^0 \quad (3.6)$$

$$U_{L3} = aU^+ + a^2U^- + U^0 \quad (3.7)$$

Det är även möjligt att lösa ut komponentspänningarna för att uttrycka dessa genom huvudspänningarna [10]:

$$U^+ = \frac{1}{3}(U_{L1} + aU_{L2} + a^2U_{L3}) \quad (3.8)$$

$$U^- = \frac{1}{3}(U_{L1} + a^2U_{L2} + aU_{L3}) \quad (3.9)$$

$$U^0 = \frac{1}{3}(U_{L1} + U_{L2} + U_{L3}) \quad (3.10)$$

2.3 Systemjordning

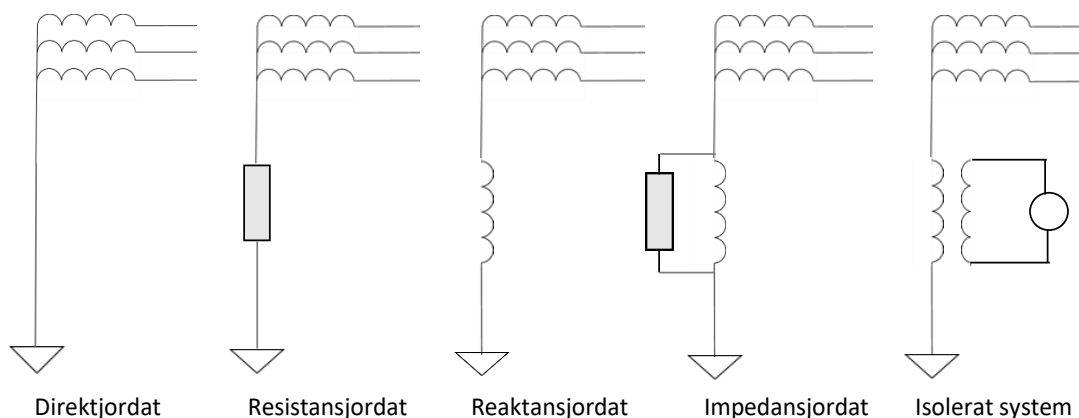
Begreppet jordning kan avse antingen skyddsjordning eller systemjordning. Skyddsjordning innebär *jordning av ledande del som inte tillhör spänningsförande delar för att skydda personer mot elchock*. Skyddsjordning kommer inte att behandlas här.

Systemjordning avser *jordning av en punkt i en aktiv krets, erforderlig för riktig drift av utrustning och transformatorstationer* [2].

I distributionssystemet är målet med systemjordningen att påverka felströmmen i händelse av ett jordfel, utan att det inverkar på driftspänningar och strömmar. Målet är även att se till att laster påverkas så lite som möjligt av ett jordfel [13].

Förbindelsen till jord utförs huvudsakligen på två olika sätt och använd jordningsteknik beror av nätets utformning. De olika teknikerna benämns direktjordning och höghmig jordning. Direktjordningen innebär att nollpunkten jordas impedanslöst. Denna metod används vid alla de högsta spänningsnivåerna samt nästan alltid i lågspänningsnät. Den höghmiga jordningen innebär i sin tur att nollpunkten jordas över en vald impedans.

Nollpunktsimpedansen är, vid höghmig jordning, så stor att nätets övriga impedanser kan försummas vid jordfelsberäkningar. Ingående komponenter i jordningens utförande benämns nollpunktsutrustning. Vilken typ av systemjordning som används i nätet avgörs av storleken på förekommande jordfelsströmmar, samt på vilket sätt dessa strömmar ska detekteras [4].



Figur 2.3. Systemjordningar.

2.3.1 Isolerat system

I ett isolerat nät saknas direkt anslutning mellan jord och nollpunkt. Här sker kopplingen till jord via en spänningstransformator och/eller en överspänningsavledare. I ett isolerat system leder ett första fel inte till någon påverkan på driften. Felströmmarna är avsevärt mycket lägre än i ett direktjordat system men vi får överspänningar i de friska faserna. Den enda felström som kan flyta i det isolerade nätet är den kapacitivt kopplade strömmen. En viss risk för intermittenta fel föreligger. Det isolerade systemet används till exempel i geografiskt små nät.

2.3.2 Resistansjordat system

I det resistansjordade nätet kopplas transformatorns nollpunkt till jord över en höghög resistor. Även låghög resistansjordade system förekommer men dessa är ovanliga och kommer inte vidare att behandlas. Det höghög resistansjordade systemet används där den kapacitiva jordslutningsströmmen är liten ($< 0,5 \text{ A}$) för att få en bättre koppling till jord. Införande av en resistiv komponent i jordningen har till syfte att skapa en väldefinierad ström vid jordslutning. Strömmen som resistansen ger upphov till brukar benämnas aktiv ström. Resistansen väljs så att felströmmen blir i storleksordningen $5 - 25 \text{ A}$, allt beroende på spänningsnivå och utgående ledningars utlösningsskrav. I detta fall karakteriseras nätet av att det är geografiskt litet och i huvudsak består av luftledning med försumbara kapacitanser.

2.3.3 Reaktansjordat system

Nät med en stor mängd installerad kabel betyder också stora kapacitiva strömmar. För att kompensera dessa, i händelse av jordslutning, används en nollpunktsreaktor. Reaktorn består av en induktor som inducerar en motriktad ström vid jordfel och minskar därmed den kapacitiva felströmmen. Reaktansjordning innebär även fördelen med självsläckning av en eventuell ljusbåge i felstället.

Ofta monteras en resistans parallellt med induktorn för att ge en mätbar aktiv ström vid ett jordfel. Denna kombination kallas för impedansjordning och är den som används allmänt i de svenska mellanspanningsnäten [5][13].

2.4 Nollpunktsutrustning

Systemjordningens utförande är av största betydelse för personsäkerheten och storleken på den felström som uppstår vid enfasigt jordfel. I Sverige är ett 45 – 10 kV nät alltid impedansjordat med en centralt placerad reaktor, en så kallad Peterséns pole. Orsaken till detta är Elsäkerhetsverkets föreskrifter som anger krav på högsta tillåtna spänning av utsatta delar vid enfasigt jordfel [3]. Kraven för systemspänningar under 25 kV ses nedan i tabell 1.

Tabell 1.

Högsta tillåtna spänning av utsatt del vid jordfel för icke-direktjordat system för systemspänning < 25 kV [6].

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
	- vid skilda jordningar	200 V	200 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

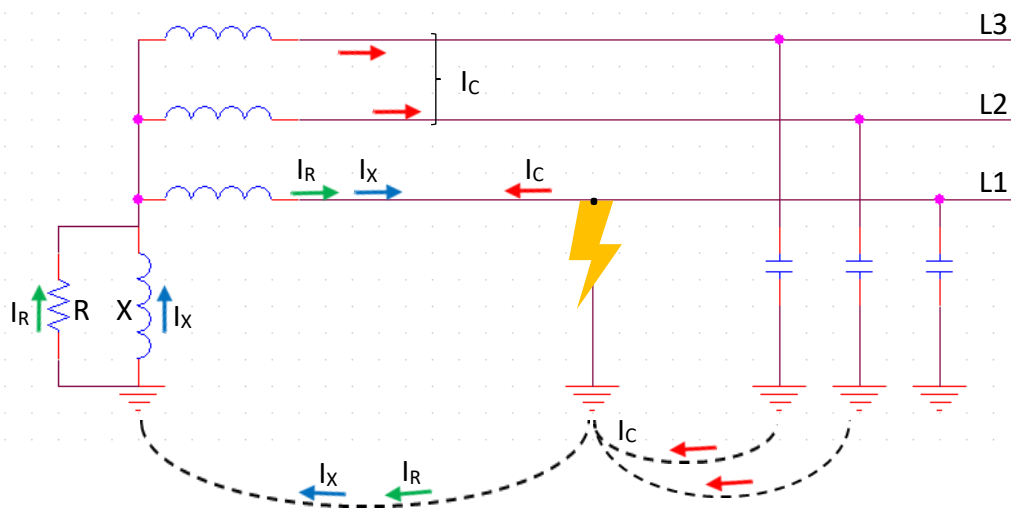
För systemspänningar över 25 kV i icke-direktjordade nät säger ELSÄK-FS 2008:1 :

”7 § 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 spänningsställning av jordade delar som jordslutningsströmmen orsakar begränsas till värdena i tabell 1”[6].

Spänning av utsatta delar kan beräknas genom att multiplicera jordfelsströmmen med jordtagsresistansen. Skulle då jordtagsresistansen vara 20 Ohm blir maximalt tillåten felström 5 A vid spänningsgränsen 100 V. Detta ger att man redan vid liten mängd utlagd kabel kommer att överskrida maximalt tillåten spänning av utsatta delar. Det är alltså helt nödvändigt att kompensera för den kapacitiva genereringen i nät med kabel och geografiskt utbredda luftledningsnät.

2.4.1 Central kompensering

Den centralt utplacerade nollpunktsutrustningen är den vanligaste lösningen när det gäller jordning av distributionsnät. Vid ett jordfel ska den induktiva ström reaktorn genererar balansera ut den kapacitiva strömmen som nätets kapacitans till jord genererar. Nätet är vid normal drift i allmänhet väl symmetriskt och har en mycket liten nollföljdström i systemets nollpunkt.



Figur 2.4. Strömmar vid enfasigt jordfel och impedansjordning.

Vid ett jordfel i ledningen för fas L1 så kommer energin i ledningens kapacitans laddas ur till jord. Samtidigt kommer ledningarna på de friska faserna att generera kapacitiv ström som sluter sig via marken upp genom felstället, in i transformatorns fas L1 och ut genom dess fas L2 och L3. Ett väl avstämt nät resulterar i en ytterst liten felström, i teorin lika med noll. I praktiken nås dock aldrig en total kompensering utan man får räkna med att en liten restström adderas till den aktiva strömmen I_R . Den resulterande felströmmen får därmed en fasvinkel som avviker från $3U_0$. Om nätet är underkompenserat så blir restströmmen kapacitiv och dess vinkel blir då positiv. Är nätet överkompenserat fås följaktligen en negativ vinkel och en induktiv restström.

För ett fullständigt kompenserat nät ska reaktorns reaktans X_s uppfylla sambandet:

$$X_s = \frac{X_0}{3} = \frac{1}{3\omega C_0} \quad (5.1)$$

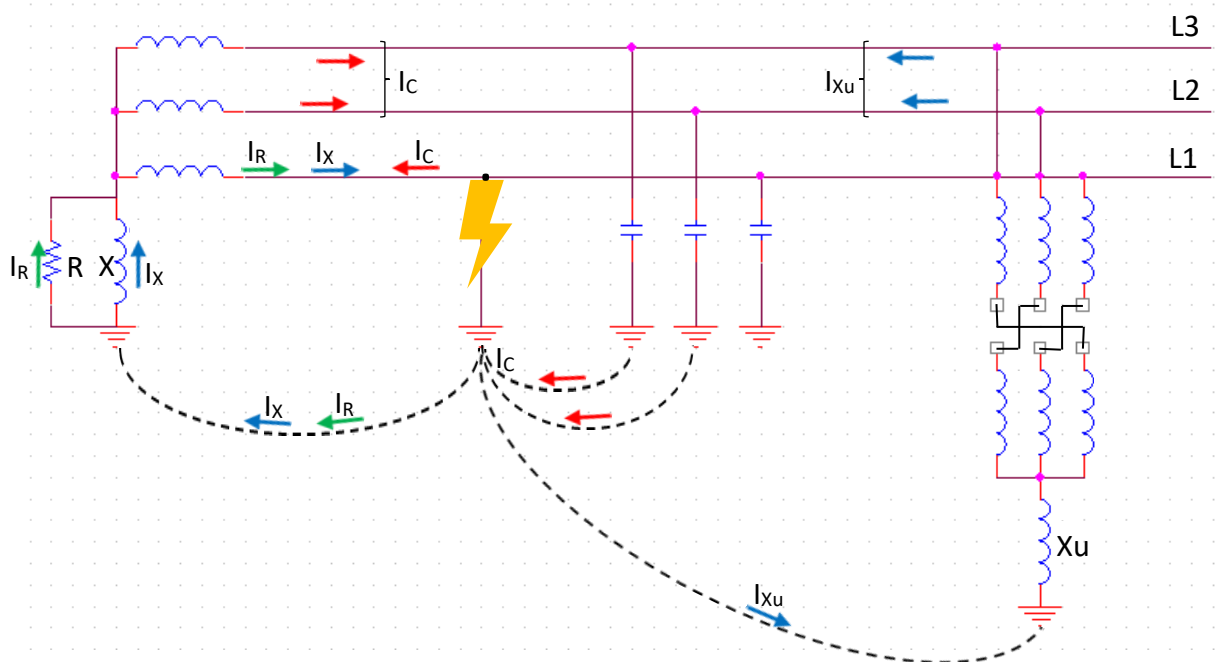
X_0 = nätets sammanlagda nollföljdsreaktans

I ett väl avstämt nät blir jordfelsströmmen mycket liten. Rent teoretiskt genereras endast en liten aktiv komponent av nollpunktsreaktors och transformatorns aktiva förluster. Vanligtvis installeras därför ett motstånd parallellt med nollpunktsreaktorn, för att på så vis ge tillräcklig ström till jordfelskydden. Motståndets storlek dimensioneras utefter det specifika systemets driftspänning.

2.4.2 Utlokaliserad kompensering

Det allt större användandet av kabel i näten ger att den kapacitiva genereringen nu ofta överskrider vad som är möjligt att kompensera centralt. Gränsen sätts av att de aktiva förlusterna i reaktorn blir för stora. Detta har fört med sig att man nu som komplement till den centrala kompenseringen använder lokalt utplacerade reaktorer i näten. Även de lokalt utplacerade reaktorerna kan vid behov utrustas med ett nollpunktsmotstånd. Observera dock att detta ökar den totala felströmmen i felstället och risken finns att kraven om maximal spänning av utsatt del överskrids.

I elektriska kretsar innehållande kapacitanser och induktanser finns alltid risk för uppkomst av resonans. Användandet av lokalt utplacerade nollpunktsreaktorer minskar dämpningen i nätet, detta på grund av den kortare transporten av de kapacitiva strömmarna. Följden blir också att nollföljdspänningen ökar, vilket i sin tur ger högre känslighet för ledningarnas jordfelskydd [3].

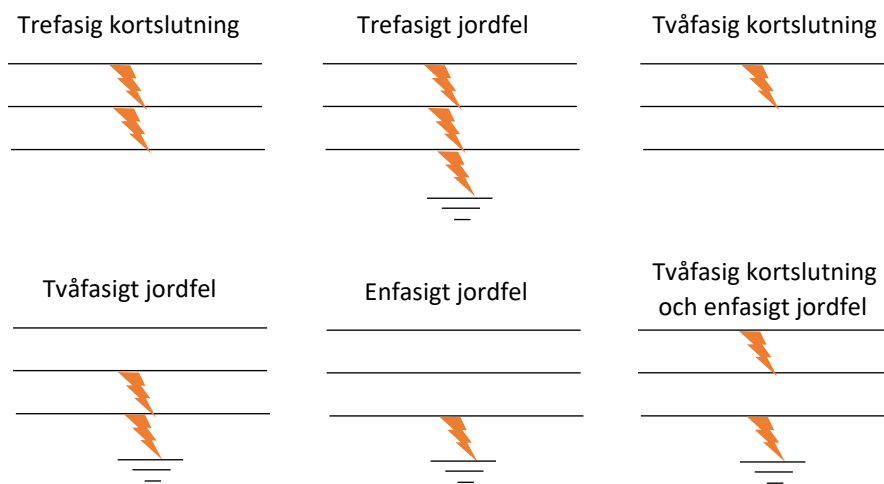


Figur 2.5. Strömmar vid enfasigt jordfel, impedansjordning och utlokaliserad kompensering.

I och med den utlokaliserade nollpunktsreaktorn delar nu denna och den centrala reaktorn på kompenserings av de kapacitiva strömmarna. Avståndet som de induktiva strömmarna måste färdas minskar. Ovan ses hur strömmarna fördelas under ett enpoligt jordfel.

2.5 Felströmmar

I ett trefassystem kan en mängd olika varianter av överslag förekomma. Dessa kan ske mellan två eller tre faser samt till jord. Amplituder på spänningar och strömmar under felet bestäms av felets karaktär och resistans, kortslutningsimpedansen samt av nätets uppbyggnad.



Figur 2.6. Olika typer av kortslutningsfel.

2.5.1 Kortslutningsströmmar

”Med kortslutning menas en elektriskt ledande förbindelse mellan två eller flera ledare i ett ledningssystem, en förbindelse som har låg impedans, så att spänningen i felstället sjunker från sitt normala värde till noll eller nästan noll.”

Dagens kraftnät är mycket kraftfulla med stora anslutna generatoreffekter och kraftigt dimensionerade ledningar. Detta leder till mycket stora kortslutningsströmmar, i storleksordningen kA, med allvarliga termiska och mekaniska påverkningar vid fel.

I trefassystemet kan kortslutningsströmmar uppkomma mellan två eller tre separata fasledningar. Den tvåfasiga kortslutningen ger jämfört med den trefasiga något lägre felströmmar. I allmänhet uppstår den trefasiga kortslutningen i kablar innehållande tre ledare och initieras då vanligen av en tvåfasig kortslutning.

Kortslutningen över tre faser är symmetrisk vilket innebär att strömmen är noll i minus- och nollföljdskomponenterna och endast plusföljdskomponenter förekommer. Den tvåfasiga kortslutningen däremot innebär osymmetri i nätet vilket leder till minusföljd.

Nollföljdskomponenterna påverkas bara vid uppkomst av ett jordfel.

Den stationära kortslutningsströmmen (I_k) beräknas med Ohms lag enligt:

$$\text{Tvåfasig kortslutning i trefasnät: } I_{k2} = \frac{U_h}{2Z_k} \quad (6.1)$$

$$\text{Trefasig kortslutning i trefasnät: } I_{k3} = \frac{U_f}{Z_k} \quad (6.2)$$

U_h = huvudspänning

U_f = fasspänning

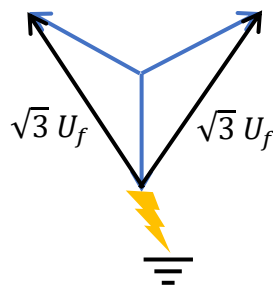
Z_k = ledningens impedans

2.5.2 Jordfelsströmmar

Jordfelströmmar eller jordslutningsströmmar är strömmar som vandrar från fasledning till jord. En faktor som påverkar strömmens storlek vid jordfel är impedansen i felstället. Vid ett så kallat stumt jordfel är impedansen i felstället mycket liten vilket ger en stor felström. Vid en- och tvåfasiga jordfel beror felströmmens storlek mycket av jordningsmetod. Ett tvåfasigt jordfel ger i ett direktjordat nät mycket höga felströmmar medan felströmmen i ett högimpedansjordat nät, jämfört med det direktjordade, blir något lägre. Dock i storleksordningen kA för båda jordningsalternativen.

Det enfasiga jordfelet innebär i det direktjordade nätet relativt höga strömmar medan felströmmen i ett högimpedansjordat nät blir liten, i storleksordningen tiotals ampere.

Det vanligast förekommande jordfelet i nätet är det enpoliga. När ett stumt enpoligt jordfel inträffar får det till följd att spänningen ökar i de friska faserna, med en faktor av $\sqrt{3}$, det vill säga lika med Huvudspänningen. Den ökade belastningen på de felfria faserna kan i värsta fall ge upphov till ytterligare ett fel [7].



Figur 2.7. Fasspänningar vid felfritt högimpedansjordat nät (blå färg), och vid enfasigt stumt jordfel i samma nät (svart färg).

2.6 Jordfelsskydd

Jordfelsskyddet har till uppgift att detektera och ge signal om eventuella fel i nätet. Signalen kan sedan användas till att endast indikera felet eller för att direkt påverka brytare för att koppla bort felande komponent.

För att detektera eventuella jordfel i nätet mäter skyddet nollföljdsströmmen och nollföljdsspänningen eftersom dessa indicerar jordslutning.

2.6.1 Oriktat jordfelsskydd

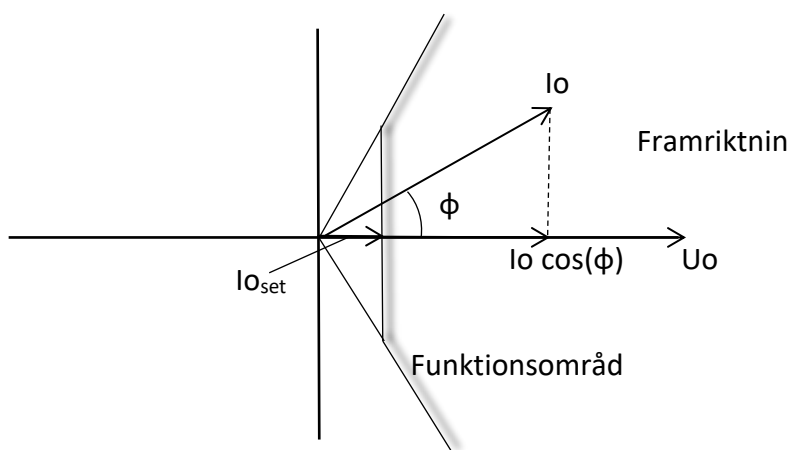
Det oriktade jordfelsskyddet består av ett känsligt strömrelä matat från summaströmmen $3I_0$ på skyddad ledning. Mätningen utförs endera från en kabelströmtransformator där järnkärnan omger de tre faserna eller från fasströmtransformatorerna som parallellkopplas på sekundärsidan.

De oriktade jordfelsskydden är lämpliga för att detektera och snabbt ge bortkoppling av simultana, dubbla jordfel. Däremot kan de normalt inte upptäcka och koppla bort intermittenta eller transienta jordfel på ett korrekt sätt.

2.6.2 Riktat jordfelsskydd

De riktade jordfelsskydden utför strömmätning på samma sätt som de oriktade jordfelsskydden. Sedan jämförs den uppmätta strömmens fasvinkel med fasvinkeln för en referensspänning. I de allra flesta fall är referensspänningen lika med nollföljdsspänningen $3U_0$ och den matas från en öppet-deltakopplad spänningstransformatorgrupp. Härmed kan alltså riktningen till jordfelet bestämmas och en selektiv bortkoppling i systemet är möjlig.

I bilden nedan ses funktionen för det riktade jordströmsskyddet. Framriktningen för strömmen ligger alltså i första och fjärde kvadranten. I_{0set} står för minsta utlösande ström och skyddets funktionsområde är skuggat. En viss korrigeringsvinkel är inlagd för att ta hänsyn till vinkelfel vid stora jordfelsströmmar. Skyddet löser sedan ut i framriktningen när vinkeln för nollföljdsströmmen avviker från nollföljdsspänningen mer än ett satt gränsvärde.



Figur 2.8. Funktion för det riktade jordfelsskyddet.

2.6.3 Nollpunktsspänningsskydd (NUS)

Ett effektivt och enkelt jordfelsskydd för mellanspänningsnäten som mäter nollföljdsspänningen. Spänningvärdena tas med fördel från en enfas spänningstransformator ansluten till krafttransformatorns nollpunkt eller från tre fasspänningstransformatorer med seriekopplade sekundärlindningar. Denna typ av skydd medför dock att en selektiv bortkoppling av jordfel inte är möjlig. Detta eftersom nollpunktsspänningen är ungefär densamma i hela nätet, oberoende av felets lokalisering.

Nollpunktsspänningsskyddets primära uppgift är att agera som skydd för samlingsskena och matande transformatorlindning. Det används dessutom som reservskydd för de riktade jordfelsskydden och använder en förhållandevis lång tidsfördröjning [1].

2.7 Orsaker till jordfel

Ett jordfel kan uppkomma på ett antal olika sätt. Vi belyser några av de vanligaste felorsakerna där problemen skiljer sig åt mellan luftledningarna och kablar.

2.7.1 Luftledningarna

När det gäller luftledningarna är den helt dominerande orsaken till jordfel att vegetation kommer i kontakt med faslinorna. Otillräckligt breda ledningsgator gör att träd eller grenar kan falla emot ledningen vid blåsig väderlek. Detta har genom åren varit ett stort problem och har därför motiverat den allt större användningen av kabel i utsatta områden.

En ytterligare förekommande orsak till jordfel hos luftledning är spruckna, eller på annat sätt skadade isolatorer. I detta fall sker den oönskade jordslutningen via linans upphängning ner genom stolpen.

De flesta nu förekommande luftledningarna är blanka linor, det vill säga helt oisolerade.

Numera blir det dock allt vanligare att man använder så kallad BLX eller BLL vid nybyggnation. Faslinan är då täckt med ett isolerande skikt vilket gör den mer motståndskraftig mot yttre påverkan. Denna typ av lina räknas trots dess beläggning inte som helt isolerad.

2.7.2 Kablar

Jordfel på kablar beror oftast på skador orsakade av yttre fysisk påverkan eller skador på grund av överspänningar. Exempelvis kan mekanisk påverkan ske vid grävningsarbeten där maskinen skadar kabeln så att dess skärm kommer i kontakt med en eller flera fasledare. Det kan även finnas en jordlina utlagd intill kabeln som den kan få kontakt med. Uppkomna jordfel mellan skärm och fasledare i en kabel kan orsaka höga jordfelsströmmar då resistansen i skärmen är förhållandevis låg.

Det kan även bildas något kallat vattenträd i kabelns isolering. Vattenträden uppkommer genom en växelverkan mellan det elektriska fältet i kabeln och fukt. Dessa skador kan observeras som tunna revor i kabelns isolering som förgrenar sig ner mot ledaren. Genom att betrakta ett tvärsnitt av kabeln kan man se sprickornas utbredning. De kan liknas vid en buske eller ett träd, därav namnet vattenträd. Sprickorna kan så småningom leda till att en

brygga av fukt skapas genom isoleringen mellan skärm och ledare och härmed får vi ett fasjordfel.

Problemet med vattenträd kan härledas till PEX-kablar och är mer vanligt för äldre kablar eftersom produktionsmetoder och material som användes då stängde in fukt i kabeln. Nyare kablar är mer förskonade från detta problem men man bör vara observant på att det kan förekomma även på dessa [9][11].

2.7.3 Konstaterade fel från verkligheten

Av intresse kan vara uppklarade fel med ursprung i verkligheten. För den icke belastningsberoende förhöjda nollpunktsspänningen finns ett problem med felaktigt placerade kapacitiva kopplingar.

Vid placering av flera kapacitiva kopplingar, för mätinstrument eller liknande, på samma fasledare skapar man en osymmetri fasledarna emellan och detta ger då upphov till en förhöjd nollpunktsspänning. Detta finns att läsa om i "Utredning avseende förhöjd nollpunktsspänning i Ljungs distributionsnät". Den exakta anledningen till varför de kapacitiva kopplingarna ger en förhöjd nollpunktsspänning diskuteras i skrivelsen. En möjlig förklaring anges som att genom snedbelastningen från de kapacitiva kopplingsenheterna uppstår en spänningshöjning i de faser med högst kapacitans, vilket i sin tur ger att fasspänningarnas amplitud förändras och därmed fås olika stora kapacitiva strömmar i de tre faserna och då summerar dessa inte till noll i jordkabeln [15].

Ett nytt problem har också uppstått i och med de moderna epoxiisolerade ställverken. De har visat sig ofullständiga i sin isolering och jordfel har här uppkommit vid ett flertal tillfällen.

Ett annat exempel från verkligheten är problemet med vattenfyllda kabelavslut. Luftledningarna som gick över till kabel och skarven däremellan fallerade alltså. Vattnet i kabelavsluten gav förändrade längsimpedanser i ledningarna. De ändrade impedanserna resulterade sedan i en osymmetri mellan faserna och uppkomst av en förhöjd nollpunktsspänning. Dessutom förstärktes effekten av den förändrade längsimpedansen av en transformatorverkan i konstruktionen som håller upp luftledningen [16].

3 Förutsättningar för mätningarna

De utförda mätningarna sätts alla upp på sekundärsidan av strömtransformatorerna i ställverken. Det innebär att uppmätta strömmar och spänningar ter sig förhållandevis låga. På sekundärsidan i ett ställverk är det vanligaste att spänningen är nertransformerad till 110 Volt, vilket också gäller i Kristinehamns energis fall. Att man transformerar ner på det här sättet beror på att felskydden annars skulle bli för otympliga och dyra.

Alla mätvärden som visas här är de primära värdena, alltså de reella ute i nätet.

När det gäller de tidigare mätningarna så var dessa från början redovisade som primära värden, dessa har alltså räknats om i efterhand. Vid de nya mätningarna gjordes

transformeringen från sekundär- till primärvärden med hjälp av mätinstrumenten redan vid utförandet.

För att kunna följa med i de beskrivna omkopplingarna i nätet finns, i appendix A, Kristinehamns energis driftlägeskarta, både i sin helhet samt i förstörade fjärdedelar av kartan.

3.1 Mätinstrument Dranetz HDPQ Xplorer

Vid mätningarna användes det amerikanska tillverkade instrumentet Dranetz HDPQ Xplorer. Det är en nätanalysator med åtta differentiella kanaler, fyra för spänning och fyra för ström. Förutom ström och spänning registrerar det även simultant effekt, övertoner, transienter, flimmar, inrush och enligt norm EN50160, IEEE 1159 och IEC 61000-4-30 Klass A.

Instrumentet är funktionellt i frekvensområdena 16 – 25 Hz samt 42,5 – 69 Hz, vilket gör att det även lämpar sig för mätningar i järnvägens kraftnät. Bland dess övriga funktioner kan nämnas att kurvform registreras och att även oscillerande transienter fångas upp. Det har ett minne på 4 GB vilket tillåter mätningar över längre tid och en stor mängd data kan lagras.

Programvaran som används tillsammans med Dranetz HDPQ Xplorer är Dran-View 7, vilken tillåter en mängd olika analyser av mätdatat i efterhand. Det är till exempel möjligt att välja ut vad du vill plotta av spänningar, strömmar eller övertoner. Man kan även transformera dessa i efterhand om man mätt på sekundärsidan av en transformator och vill ha primära värden till exempel [12].

3.2 Kristinehamns energis distributionsnät

Kristinehamns Energis distributionsnät matas i normalfallet från två överliggande nät och varje matning försörjer var sitt område av kommunen. Det finns alltså två områden som vid normal drift försörjs separat av varsitt överliggande nät. Appendix A visar driftlägeskartan där områdena markeras med olika färger. Röd färg visar området som matas norrifrån via fördelningsstationen Stensta medan blå och grön färg visar området som försörjs via stationen Norra Dye. Den blåa respektive gröna färgen markerar dessutom hur matningen sker i normalfallet via transformatorerna T1 och T2.

När omkopplingar i nätet görs för att koppla bort vissa kablar och därigenom utesluta dessa som felorsak, så måste man fördela om försörjningen i vissa områden. Detta innebär oftast att man måste lägga samman nätområden som annars är skilda. Det är då av största vikt att man innan dessa sammanslagningar sker kontrollerar matande spänningar i båda områdena så de inte skiljer sig åt allt för mycket.

4 Resultat

Här presenteras resultatet av de mätningar som är gjorda i Kristinehamns Energis distributionsnät. Det består dels av ett antal tidigare mätningar gjorda av Kristinehamns Energi själva, dels av de nya mätningar som genomförts i samarbete med Sweco.

4.1 Tidigare mätningar

Den första mätningen gjord av Kristinehamns energi syftar till att avgöra om den sjökabel som löper mellan transformatorstationen Båtbyggaren och Reningsverket kan vara orsak till den förhöjda nollpunktsspänningen. Vid denna mätning registrerades endast nollpunktsspänning med hjälp av en voltmeter. Spänningsmätningar utfördes simultant i både Stensta och i Norra Dye. Omkopplingar och spänningsvärden kan ses i Tabell 2 nedan.

Som första åtgärd sker ett tillslag i Terrierns fack H5 mot Presteruds udde. Detta markerar sammanslagningen av det röda och det blå nätet och har föregåtts av en spänningskontroll mellan T1 och T3 samt en urkoppling av automatjusteringen för nollpunktsutrustningen på båda transformatorerna. Sammanslagningen av näten gör att nollpunktsspänningen sjunker i Stensta och blir helt jämn över hela den nya nätkonfigurationen.

När sedan förbindelsen bryts i fack H6 Kroksvik mot Båtbyggaren så har stationen Stensta inte längre den nära kopplingen till sjökabeln. Detta medför dock endast en mindre sänkning av nollpunktsspänningen och den är fortfarande jämn mellan Stensta och Dye.

Det slås åter till mot Båtbyggaren från Kroksvik H6 och bryts istället i Båtbyggaren mot Reningsverket. Nu finns inte längre förbindelsen över sjön och U_o i Norra Dye halveras. I Stensta är den dock i stort sett oförändrad vilket bör betyda att felet härstammar från området.

Sjökabeln bryts även i andra änden och nollpunktsspänningen ökar därmed något i Dye. Helt klart är nu i alla fall att det inte är något fel på kabeln över sjön. Efter mätningarna görs kopplingarna i omvänd ordning för att återställa till ordinarie driftläge.

Tabell 2. Mätning av nollpunktsspänning i stationerna Stensta och Norra Dye.

Plats - Åtgärd	Stensta U_o	Norra Dye U_o
Utgångsläge innan åtgärd	420 V	340 V
Terriern H5 – Tillslag mot Presteruds udde	340 V	340 V
Kroksvik H6 – Bryt mot Båtbyggaren	300 V	300 V
Kroksvik H6 – Tillslag mot Båtbyggaren + Båtbyggaren – Bryt mot Reningsverket	320 V	150 V
Reningsverket – Bryt mot båtbyggaren	320 V	220 V

Den andra utförda mätningen syftar till att dela på det norra området mellan Kroksvik och Stensta för att på så sätt kunna minska sökområdet för felet.

Denna mätning inleds på samma sätt som den första med att spänningar kontrolleras vid T1 och T3 samt att respektive nollpunktsutrustningars automatik slås ifrån.

Näten slås sedan samman genom ett tillslag mot Presteruds udde i stationen Terriern. Denna gång mäts endast nollpunktsspänningen i Stensta och efter nätsammanslagningen sjunker den i likhet med den första mätningen.

Sedan bryts båda inkommande kablar mot Stensta i Kroksvik H3 och H4. Detta resulterar i att Uo sjunker drastiskt i Stensta vilket gör att vi lokaliserar den felande sidan till Kroksvik.

Förbindelsen mot Kroksvik bryts även från Stenstasidan och nollpunktsspänningen sjunker ytterligare något men så lite att kablarna får anses som felfria. Spänningen slås till igen mellan Kroksvik och Stensta och Uo återgår till ursprungsvärdet. Det samma gäller när förbindelsen bryts mot Presteruds udde och näten åter är separerade. I tabell 3 nedan redovisas de olika åtgärderna med tillhörande nollpunktsspänningar i Stensta.

Tabell 3. Mätning av nollpunktsspänning i fördelningsstation Stensta.

Plats - Åtgärd	Uo Stensta
Utgångsläge innan åtgärd	440 V
Terriern H5 – Tillslag mot Presteruds udde	260 V
Kroksvik H3 och H4 - Bryt mot Stensta 1 och Stensta 2	100 V
Stensta H10 - Bryt mot Kroksvik 1	92 V
Stensta H30 - Bryt mot Kroksvik 2	86 V
Stensta H10 och H30 - Tillslag mot Kroksvik 1 och 2 + Kroksvik H4 - Tillslag mot Stensta 2	250 V
Kroksvik H3 - Tillslag mot Stensta 1	250 V
Terriern H5 - Bryt mot Presteruds udde	420 V

4.2 Nya mätningar

Den första mätningen syftar till att ta reda på om den förhöjda nollpunktsspänningen är beroende av belastningen på nätet. Därför sätts mätningar upp i Kroksviks station över en längre tid.

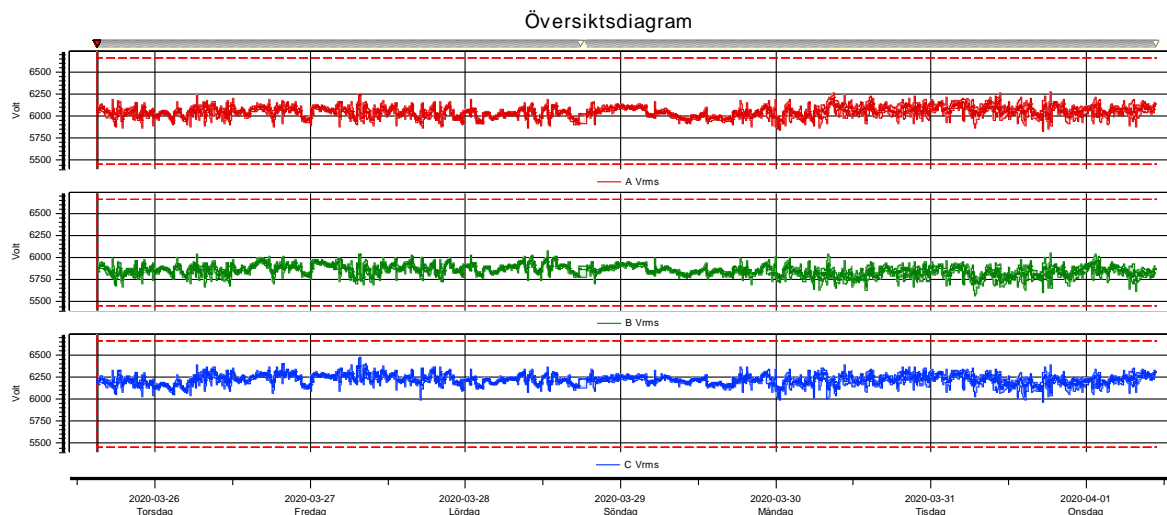
Här används nu Dranetz-instrumentet för att få ytterligare information från nätet men även ett Chauvin-Arnoux instrument nyttjas för att kunna mäta på ännu ett fack, det utgående fack H7 mot Mathall. I fack H7 mäts utgående strömmar för två av faserna.

Dranetz-instrumentet sätts upp för att mäta samtliga fasspänningar samt nollpunktsspänningen i mätfacket H1 men också för att mäta fasströmmarna i det inkommande facket H3 från Stensta. I fack H1 mäts fasspänningarna på terminalerna 4, 6 och 8 samt nollpunktsspänningen över terminal 18 och 19. Mätningen för fasströmmarna i fack H3 sätts upp på kablarna innan felskyddet, vid terminal 4, 6 och 8. Intervall mellan samplingarna sätts till tio minuter.

Kretsscheman samt bilder på hur mätuppkopplingarna är gjorda kan ses i appendix B. Mätningarna inleds klockan 15.00 den 25 mars 2020 och får sedan pågå till klockan 10.00 den 1 april 2020 innan utrustningen plockas ner och resultatet analyseras.

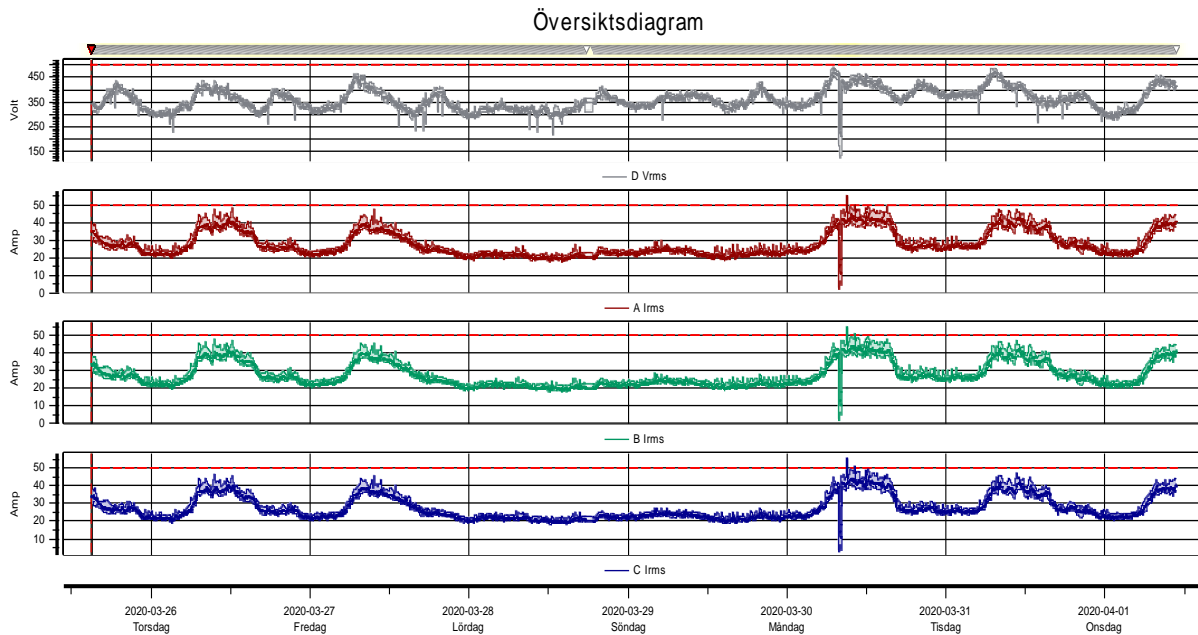
Nedan ses resultaten i diagramform.

Spänningarna i figur 4.1 visar endast små variationer över veckan och de håller sig även symmetriska.



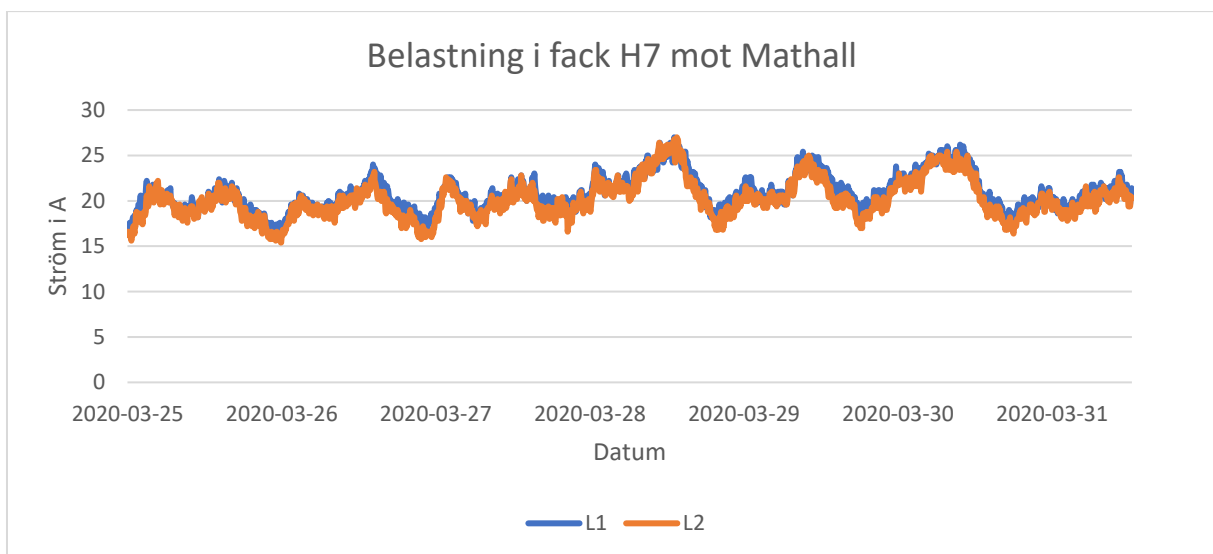
Figur 4.1. Fasspänningar

När nollpunktsspänningen jämförs mot fasströmmarna (figur 4.2) kan det konstateras att de sammanfaller till stora delar. Strömmarna från fack H3, de inkommande från Stensta, har de högsta topparna gemensamt med nollpunktsspänningen. På måndagen syns en dipp i kurvorna som markerar tillfället när en omkoppling i nätet gjordes.



Figur 4.2. Nollpunktsspänningen samt fasströmmarna i fack H3.

Vid en jämförelse mellan fasströmmarna i det utgående fack H7 (figur 4.3) och kurvan för nollpunktsspänningen så är dess kurvor mycket lika den för nollpunktsspänningen. Notabelt är att nollpunktsspänningens kurva är periodisk. Den följer det väntade mönstret över dygnet med förbrukningstoppar på morgnar samt kvällar.



Figur 4.3. Förbrukning fack H7 Mathall.

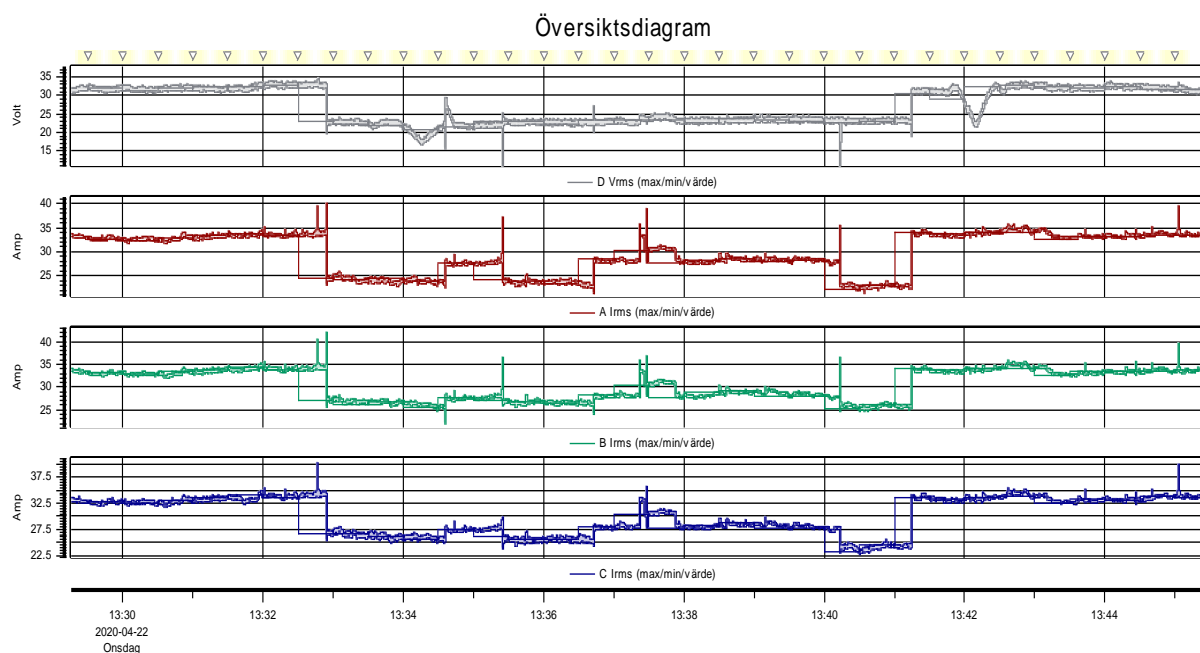
Ännu en mätning utförs den 22 april 2020. Denna gång sätts endast Dranetz-instrumentet upp i Kroksviks station. Uppkopplingen sker på samma sätt som i föregående mätning, det vill säga fasspänningar och nollpunktsspänning mäts i mätfack H1 och fasspänningar i fack H3. Avsikten är i första hand att kontrollera variationer i nollpunktsspänningen i stationen Kroksvik vid följande omkopplingar i nätet:

Tabell 4. Tidpunkter för omkopplingsåtgärder.

Plats - Åtgärd	Tidpunkt
Terriern H5 - Tillslag mot Presteruds udde	13.33
Kroksvik H6 - Bryt mot Båtbyggaren	13.34
Kroksvik H6 - Tillslag mot Båtbyggaren	13.35
Båtbyggaren H2 - Bryt mot Reningsverket	13.37
Reningsverket H3 - Bryt mot Båtbyggaren	13.38
Reningsverket H3 - Tillslag mot båtbyggaren	13.39
Båtbyggaren H2 - Tillslag mot Reningsverket	13.40
Terriern H5 - Bryt mot Presteruds udde	13.41

Först konstateras att vid detta tillfälle är nollpunktsspänningen mycket låg i förhållande till tidigare mätningar. Enligt uppgift från Kristinehamns energi brukar den ligga på 300 – 500 volt primärt ute i nätet. Detta motsvarar ju också de noterade värdena från föregående mätning. Vid det här tillfället är nollpunktsspänningen endast 20 – 30 Volt, vilket föranleder misstanken att vi har att göra med ett intermitterent jordfel.

Effekten av nätomkopplingarna syns i spänningskurvorna nedan (figur 4.4). Däremot sker den enda egentliga förändringen i nollpunktsspänningen nu vid sammanslagningen, samt vid delningen av näten. Nollpunktsspänningen sjunker på samma sätt som vid tidigare mätning när näten slås samman och höjs igen när de åter delas.



Figur 4.4. Nollpunktsspänning överst samt fasströmmar i Kroksvik fack H3.

5 Diskussion

Konstaterat är att en förekommande nollpunktsspänning är följden av en osymmetri i nätet. I distributionsnätet ska det rent teoretiskt inte finnas någon nollpunktsspänning vilket skulle förutsätta att nätet alltid är symmetriskt belastat, vilket inte är realistiskt. Det man istället ser är att det i stort sett alltid förekommer en naturlig nollpunktsspänning i systemet. Denna är dock i de flesta fall mycket låg. Vid en för nätet förhöjd nollföljdsspänning kan man i de allra flesta fall konstatera att orsaken är ett höghmigt jordfel.

I Kristinehamns energis fall har de i normalfallet en nollpunktsspänning som pendlar mellan 300 – 500 Volt ute i nätet, vilket får anses som högt.

Deras transformatorer som matar distributionsnätet är samtliga Dyn-kopplade, vilket gör att vi kan utesluta transformerade nollföljdsströmmar från det överliggande nätet.

Tidigare mätningar visar att den misstänkta sjökabeln inte har med saken att göra. De indikerar också att felet troligen härstammar från området runt Kroksvik, eller med det nära anslutna delar av nätet, vilket skulle vara ungefär lika med området i appendix A del 1.

De senare mätningarna klargör att felet är beroende av belastningen på nätet. Här ser vi också att förbrukningskurvan för utgående fack 7 mot Mathall mycket väl sammanfaller med kurvan för nollpunktsspänningen. Denna del av nätet bör därför vara intressant i den vidare utredningen i saken.

Vid den andra av de nya mätningarna konstaterades en mycket låg nollpunktsspänning, endast 20–30 Volt. Denna nivå kan till och med anses vara normal för ett distributionsnät på grund av dess naturliga osymmetrier. Nollpunktsspänningen förändras heller inte nämnvärt vid omkopplingarna i annat än när näten slås ihop samt delas.

Enligt Kristinehamns energi har man konstaterat ett visst väderberoende för nivån på nollföljdsspänningen. Vädret kan också vara en orsak till de låga nivåer vi konstaterade vid den sista mätningen, då det hade varit mycket torrt en längre tid. Det kan även noteras att veckan efter mätningen, då det hade regnat under helgen, så var nollpunktsspänningen enligt uppgift uppe på sin höga nivå igen.

5.1 Samhälleliga och etiska aspekter

En viss nollpunktsspänning i distributionsnätet är, som sagt, något naturligt förekommande på grund av osymmetrisk belastning av faserna. Den förhöjda nollpunktsspänningen däremot, som i Kristinehamns Energis fall, är något man bör åtgärda.

Den främsta orsaken till detta är inte att nollpunktsspänningen belastar felskydden, då jordfelsströmmen i det närmaste är obefintlig. Det kan däremot förutsättas att nollpunktsspänningen beror på ett höghmigt jordfel. Detta höghmiga jordfel kan sedan utvecklas till en stum jordslutning, med ett långvarigt strömavbrott som följd.

Diskussionen har även kommit upp angående lämpligheten att publicera Kristinehamns Energis driftlägeskarta. Den visar ju med tydlighet hur kommunens energiförsörjning ser ut, med reservationen att geografin inte stämmer, och detta skulle kunna utnyttjas i illvilliga syften. Vissa företag vill inte ens att deras stationsnamn ska nämnas vid publicering. Frågan har också ställts till Kristinehamns Energi och tillåtelse har givits till att använda driftlägeskartan. Detta uppskattas då det annars blivit mycket svårt att beskriva arbetet på ett vettigt sätt.

6 Slutsatser

Det fortsatta arbetet bör även i fortsättningen koncentreras till området runt Kroksvik (Appendix A del 1).

Väderberoendet säger att man ska kontrollera alla eventuella kabelavslut vid övergångar från luftledning.

Med utgångspunkt i station Kroksvik kan vi konstatera att felfria linjer är:

- Facken H3 och H4 inkommande från Stensta.
När dessa kablar bröts visades en signifikativ sänkning av nollpunktsspänningen i Stensta, vilket friar dem från problemet.
- Fack H6 mot Båtbyggaren.
När denna kabel bröts förekom endast små förändringar i nollpunktsspänningen.

Övriga utgående linjer från station Kroksvik att kontrollera är:

- Fack H2 mot Tenneco.
Denna kabel kan brytas om man slår till i Marieberg S:a mot Tenneco.
- Fack H5 mot Kroksvik 2.
Här skulle man kunna slå till i Båtbyggaren 2 mot Plastal för att få möjligheten att bryta i Kroksvik.
- Fack H7 mot Mathall.
Detta var ju den linje som uppvisade de största likheterna i jämförelsen mellan värdena för förbrukning och nollpunktsspänning och borde kanske därför prioriteras. Här finns möjligheten att slå till i Bockserud mot Sörkastet för att sedan kunna bryta fack H7 i Kroksvik.

Det finns alltså möjlighet att bryta och kontrollera samtliga återstående utgående kablar i stationen Kroksvik utan att göra något område strömlöst.

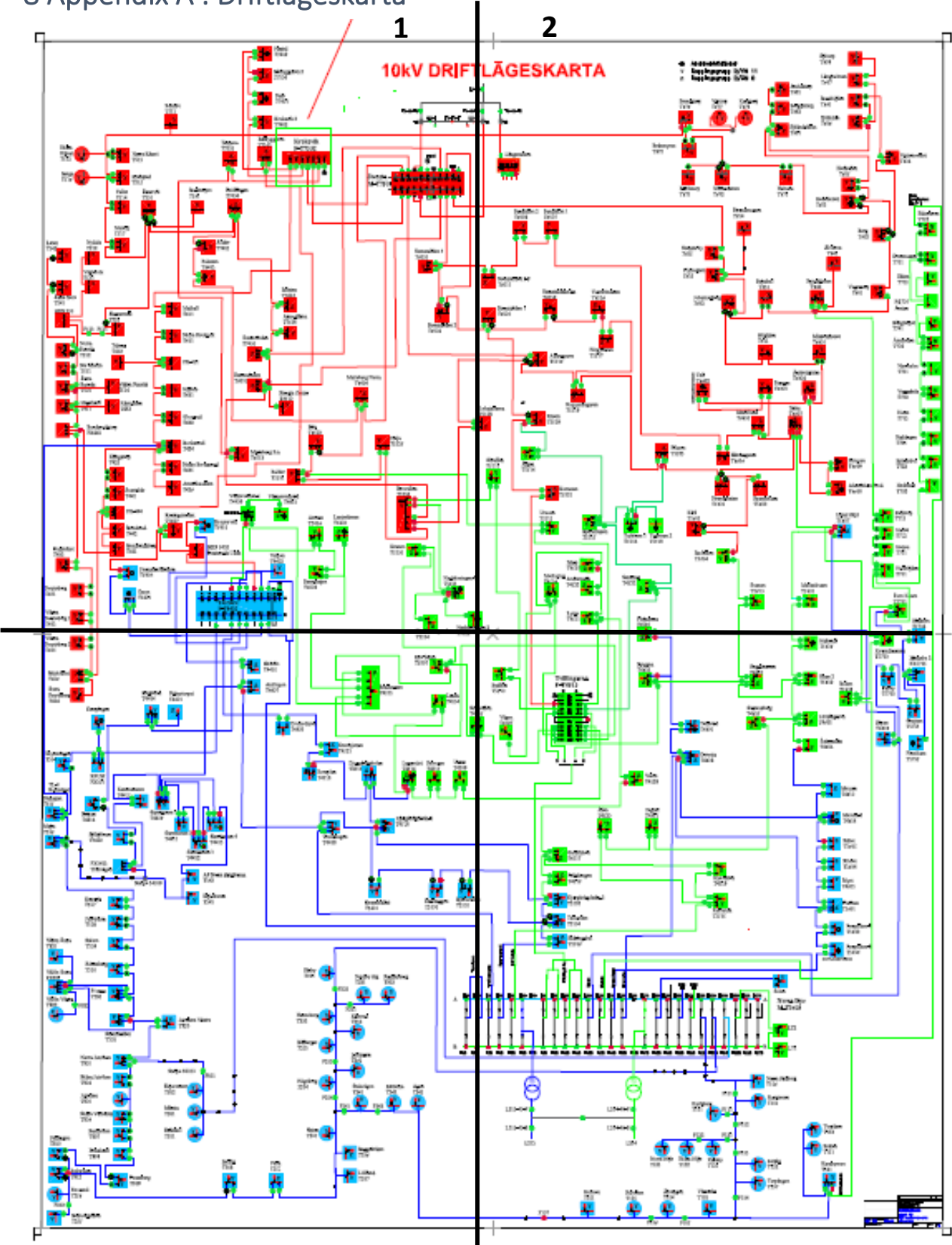
Det har tyvärr inte varit möjligt att genomföra dessa omkopplingar under tiden för detta examensarbete, men visar ändå vägen för den fortsatta utredningen.

7 Referenser

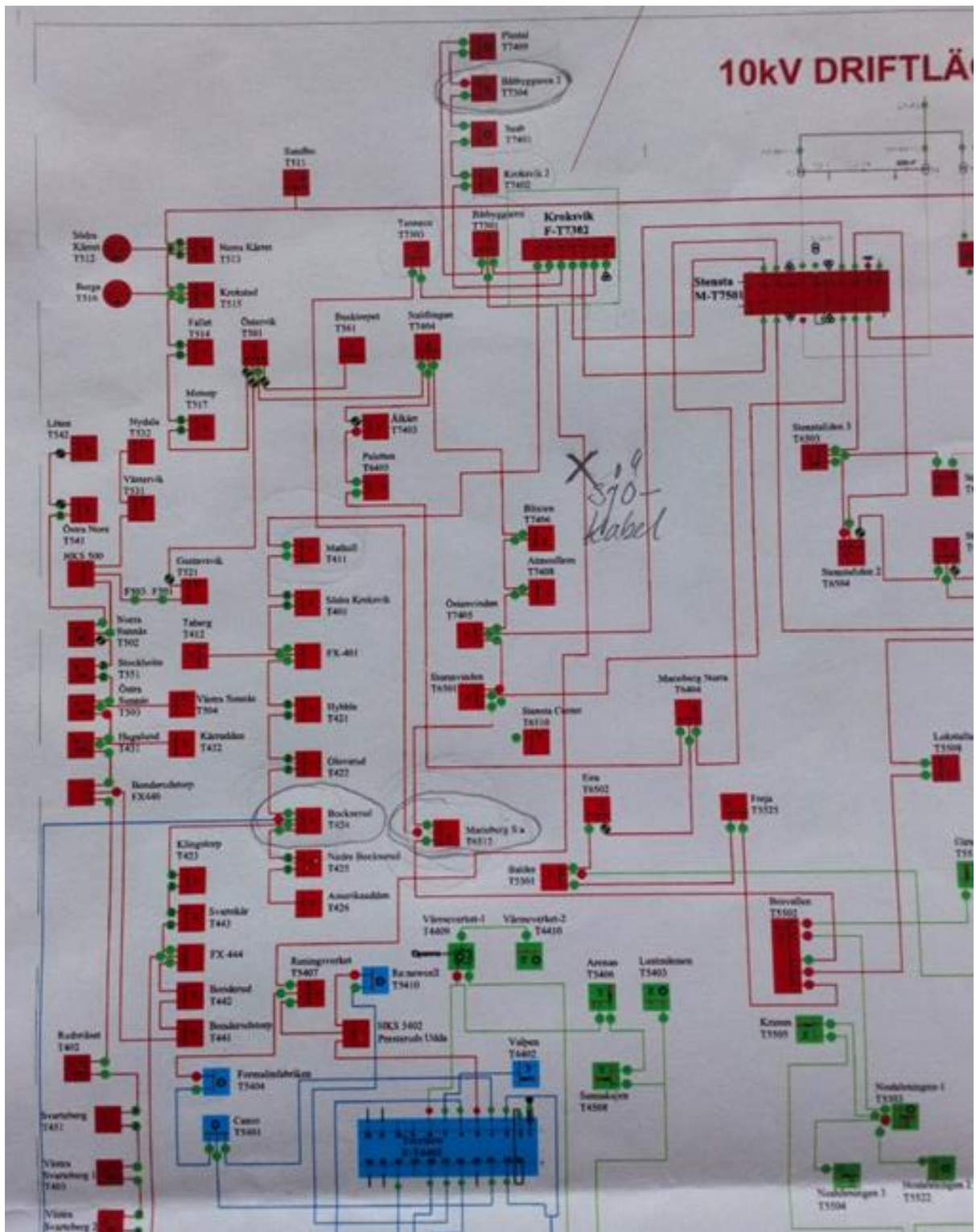
- [1] Lars Messing, Jens Sloth. Elforsk, rapport 2015:128 Jordfelsdetektering i mellanspänningsnät. [online] <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/24866/jordfelsdetektering-i-mellanspänningsnat-energiforskrapport-2015-128.pdf>
- [2] Svensk standard SS-EN 505 22, Starkströmsanläggningar med nominell spänning överstigande 1kV AC - Jordning, svenska elektriska kommissionen, SEK 2011-03-09.
- [3] Lidström S, Jacobsson K, Öhlén C. Elkrafthandboken Elkraftsystem. 1. Tredje upplagan. Stockholm: Liber; 2016.
- [4] Stenborg B. Elkraftsystem. D. 2, Analys av onormala tillstånd. Göteborg: Gothia Power; 1997.
- [5] J. Persson. "Jordfelsproblematik i icke direktjordade system". Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University 2005. [online] http://www.iea.lth.se/publications/MSTheses/Full%20document/5205_full_document.pdf
- [6] Elsäkerhetsverkets författningssamling, ELSÄK-FS 2008:1, [online] <https://www.elsakerhetsverket.se/globalassets/foreskrifter/2008-1konsoliderad.pdf>
- [7] Andersson L, Blomqvist H. Elkrafthandboken Elkraftsystem, 1. Stockholm: Liber; 1997.
- [8] Almgren NCÅ, Blomqvist H. Elkrafthandboken Elkraftsystem, 2. 1. uppl. Stockholm: Liber; 1997.
- [9] Elforsk. Tillståndskontroll av tripplextruderade PEX-kablar för 12 och 24 kV: rapport från norsk/svenskt samarbetsprojekt 2002 - 2004. Stockholm: Elforsk; 2004.
- [10] Alfredsson A. Elkretsteori. Stockholm: Liber; 2009.
- [11] Stråth N, Elfving H. Nätkonsekvenser vid kablifiering av luftledningsnät. Stockholm: Elforsk; 2006.
- [12] Produktinformation nätanalysator Dranetz HDPQ-Xplorer, [online] <https://www.dranetz.com/product/dranetz-hdpq-xplorer/>

- [13] Bollen M, Föreläsningsmaterial ur kursen Stor- och småskalig generering av elenergi, transmission och distribution, W0014T. [online]
<https://ltu.instructure.com/courses/7283/pages/stor-och-smaskalig-generering-av-elenergi-transmission-och-distribution>.
- [14] Elforsk. EBR, Kapacitiva jordfelsströmmar i kabelnät på landsbygden. Rapport B17:09, Stockholm: Elforsk; 2009.
- [15] Svensson J, Tackmann A. "Utredning avseende förhöjd nollpunktsspänning i Ljungs distributionsnät". [online] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1044103/FULLTEXT02.pdf>
- [16] Carlsson Mikael, Sweco. [intervju]

8 Appendix A : Driftlägeskarta

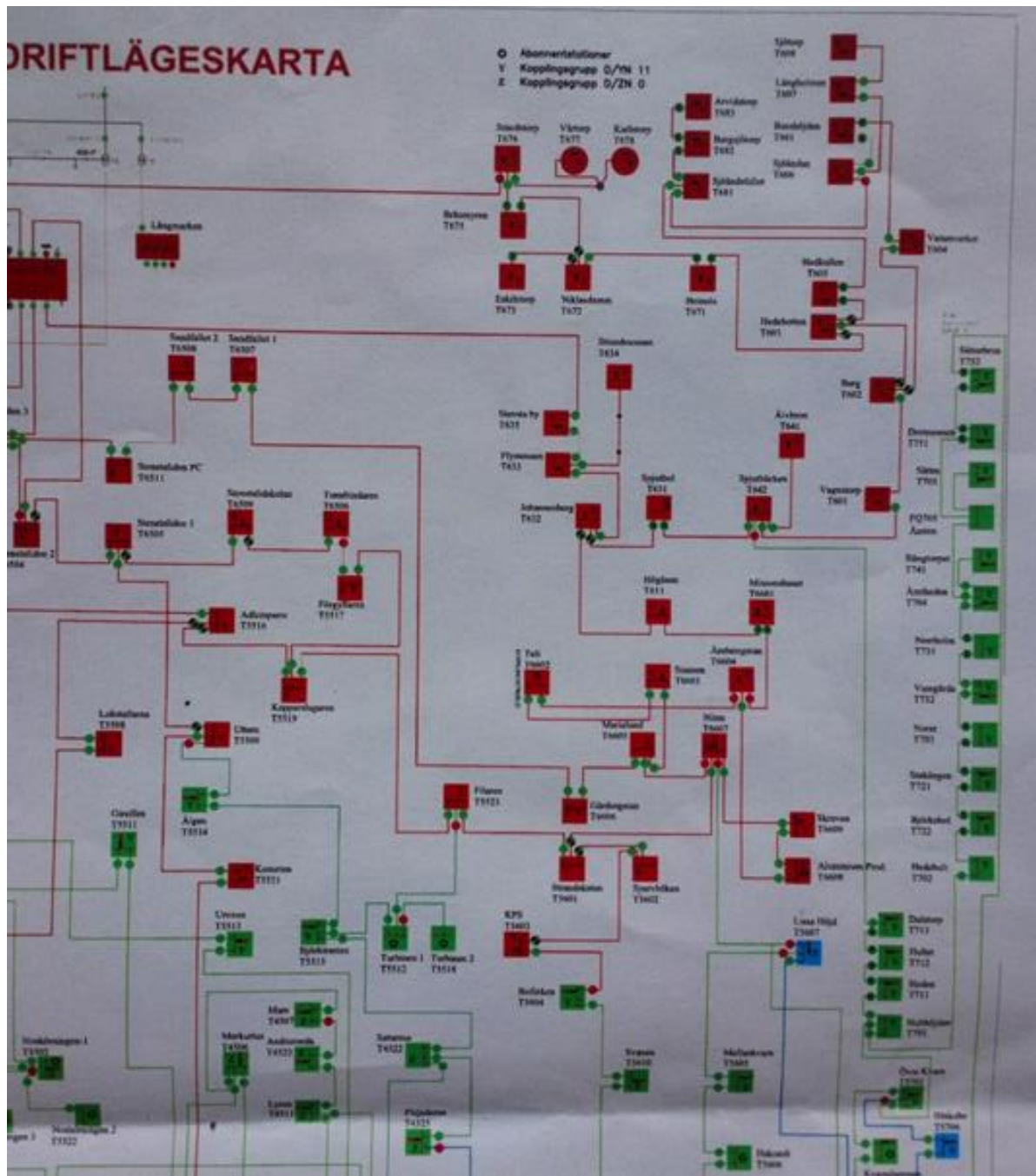


Figur 13.1. Driftlägeskarta över Kristinehamns distributionsnät.



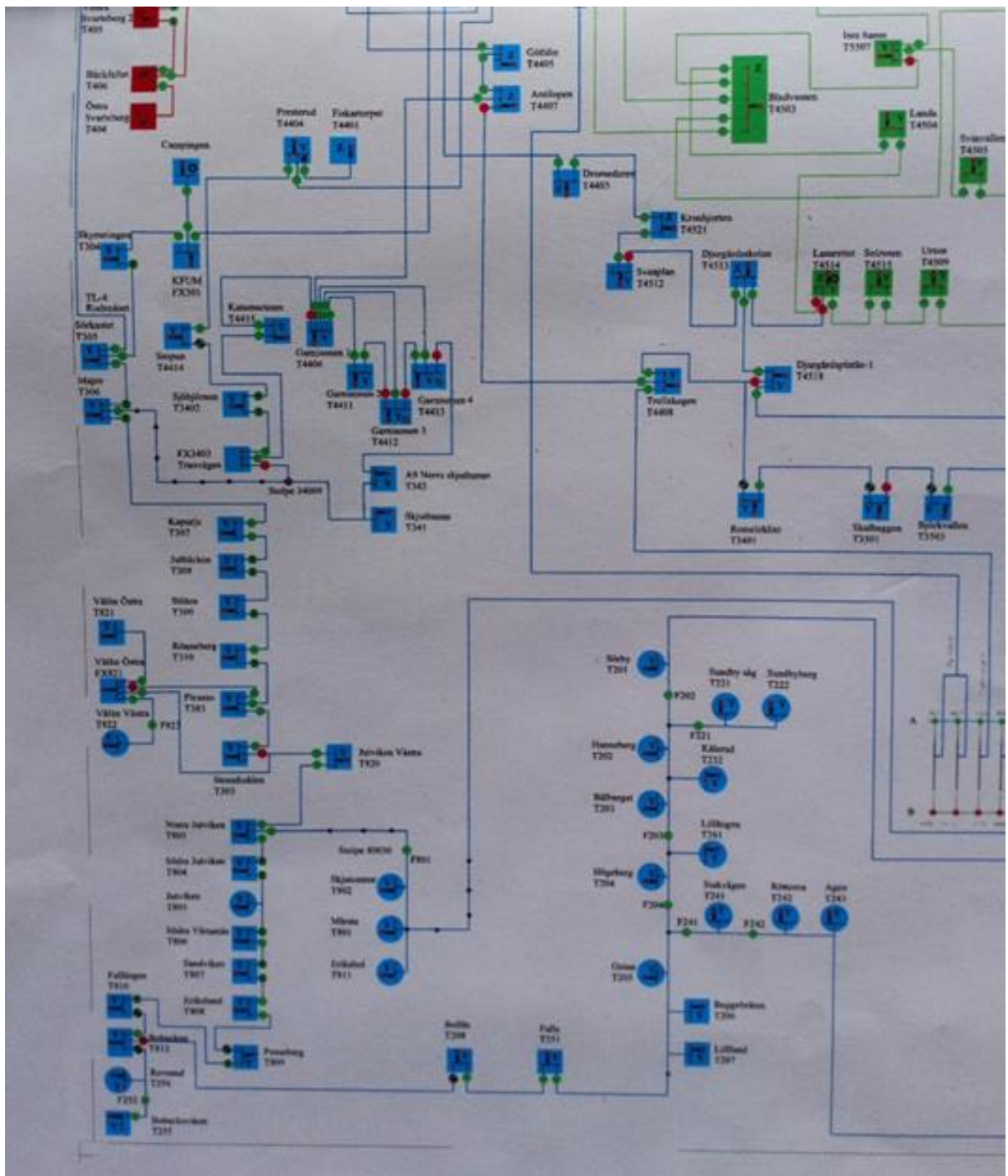
1

Figur 13.2. Driftlägeskarta del 1.



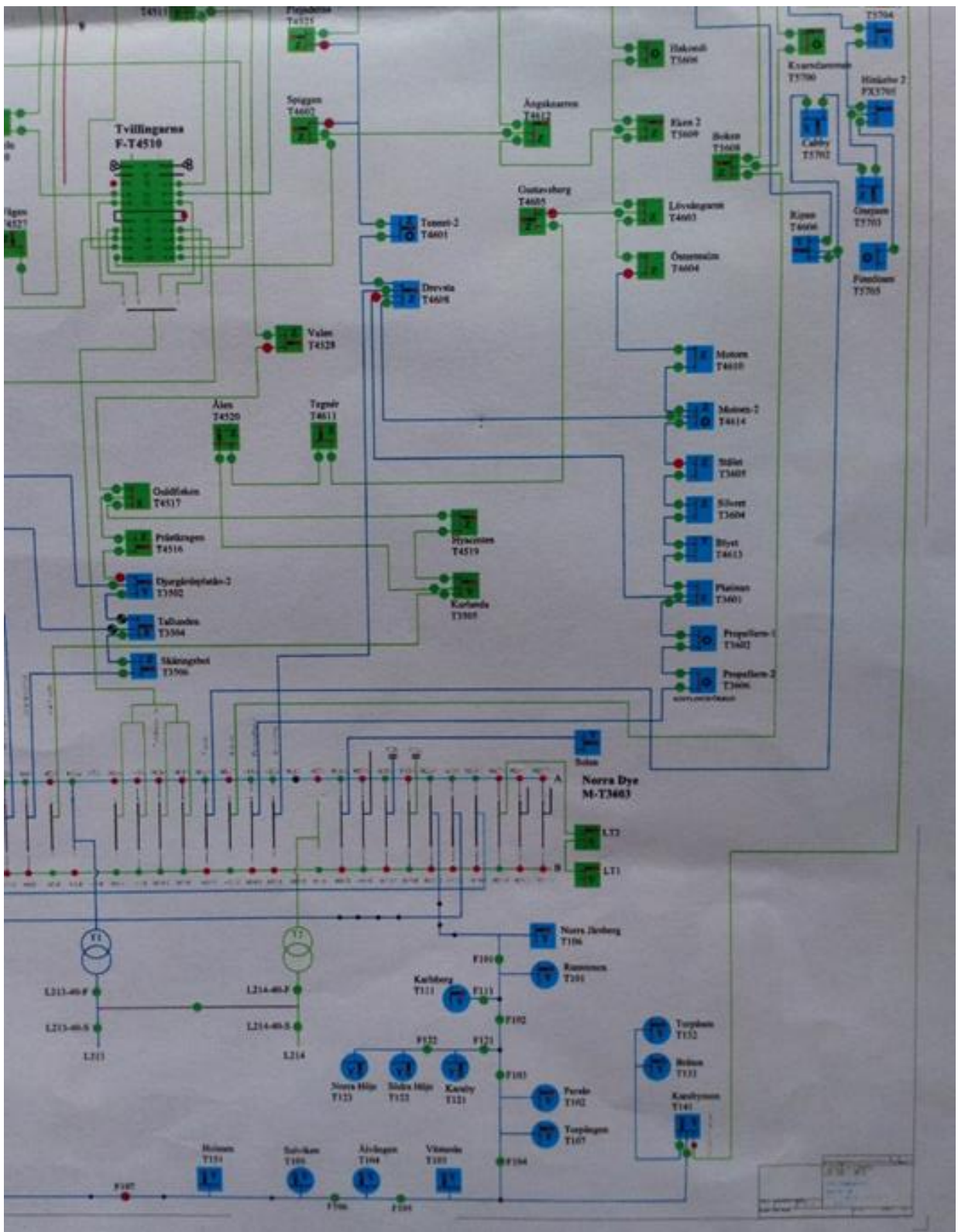
2

Figur 13.3. Driftlägeskarta del 2.



3

Figur 13.4. Driftlägeskarta del 3.



4

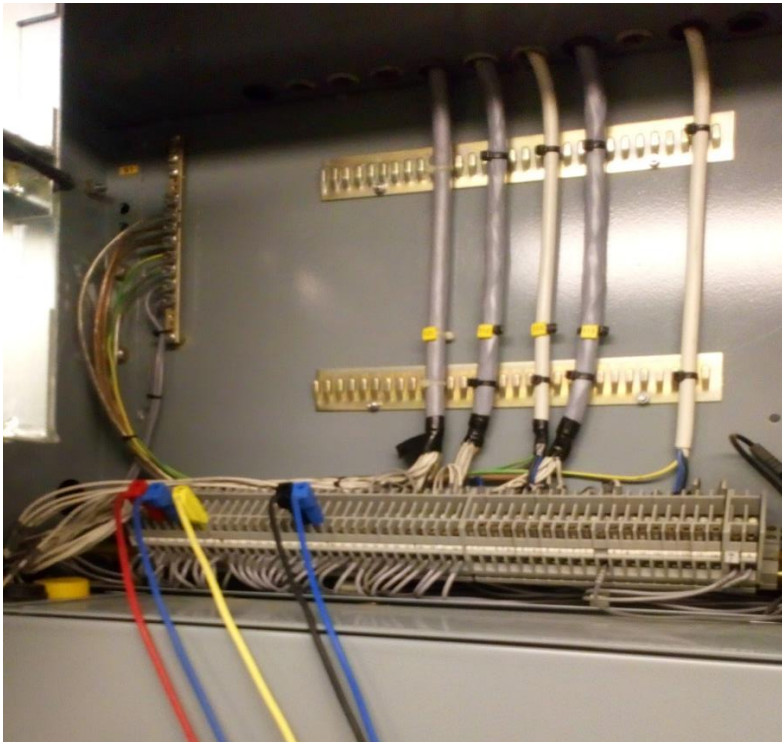
Figur 13.5. Driftlägeskarta del 4.

9 Appendix B : Mätuppkopplingar

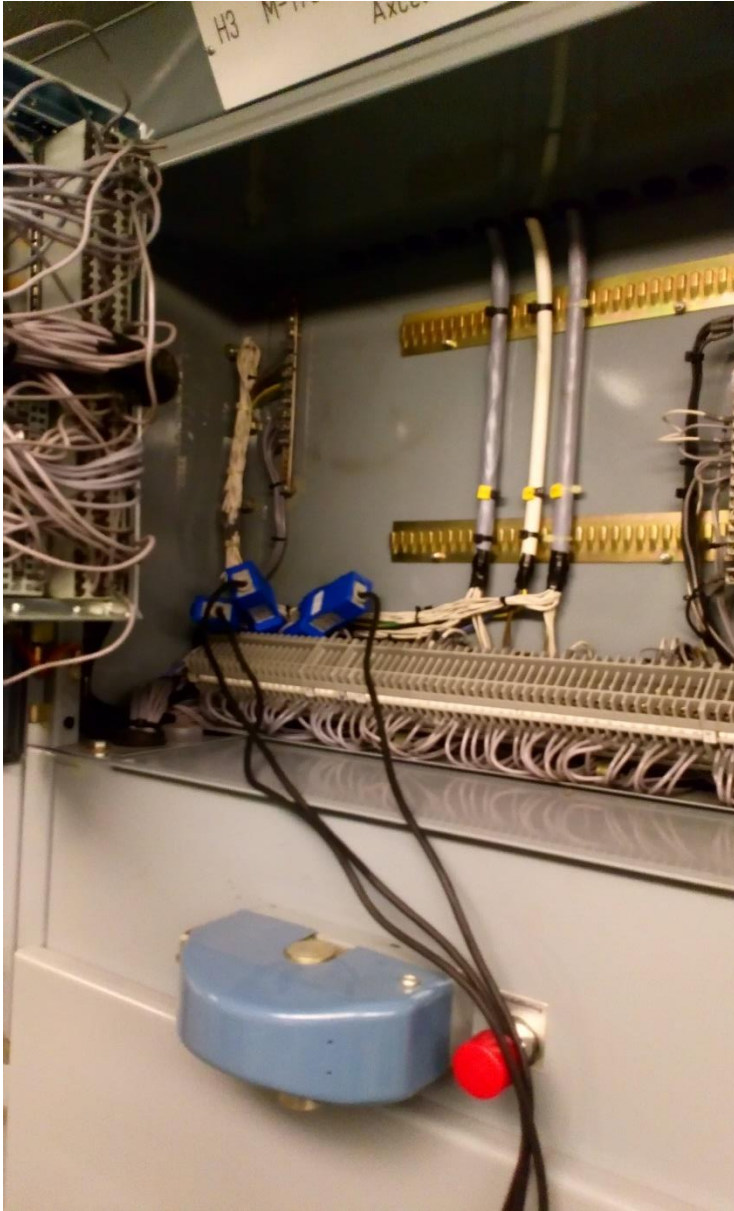
9.1 Bilder



Figur 14.1. Instrumenten – Dranetz HDPQ och Chauvin Arnoux

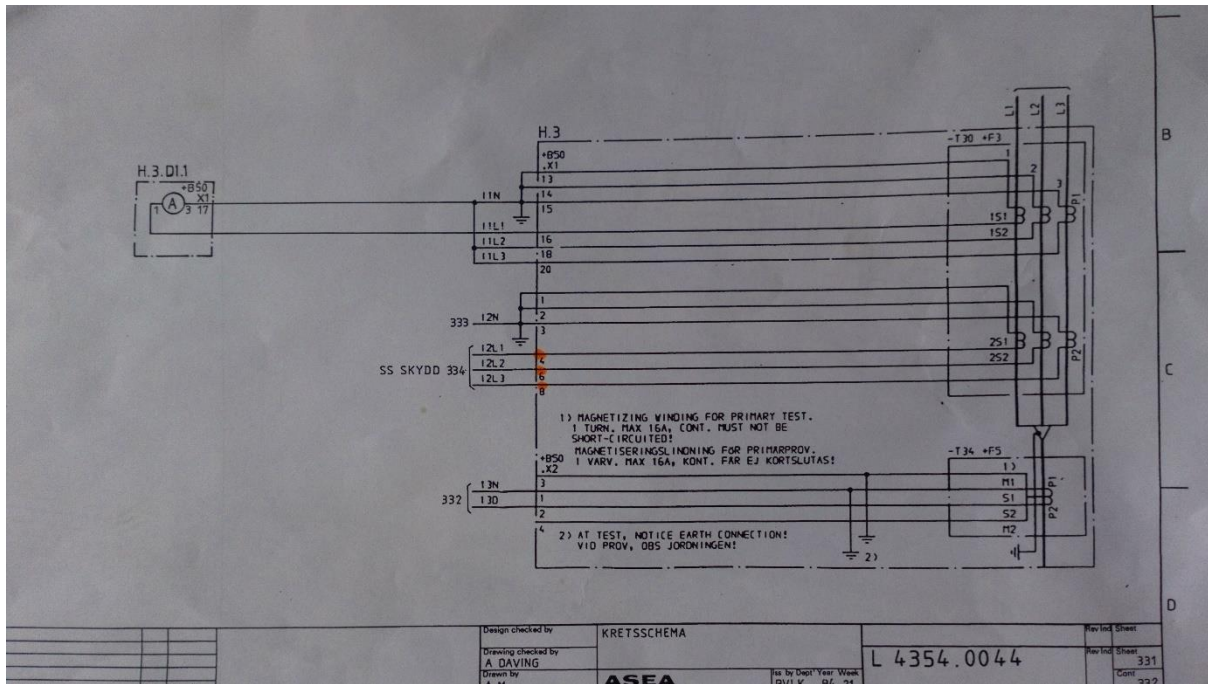


Figur 14.2. Spänningsmätning i mätfack H1.

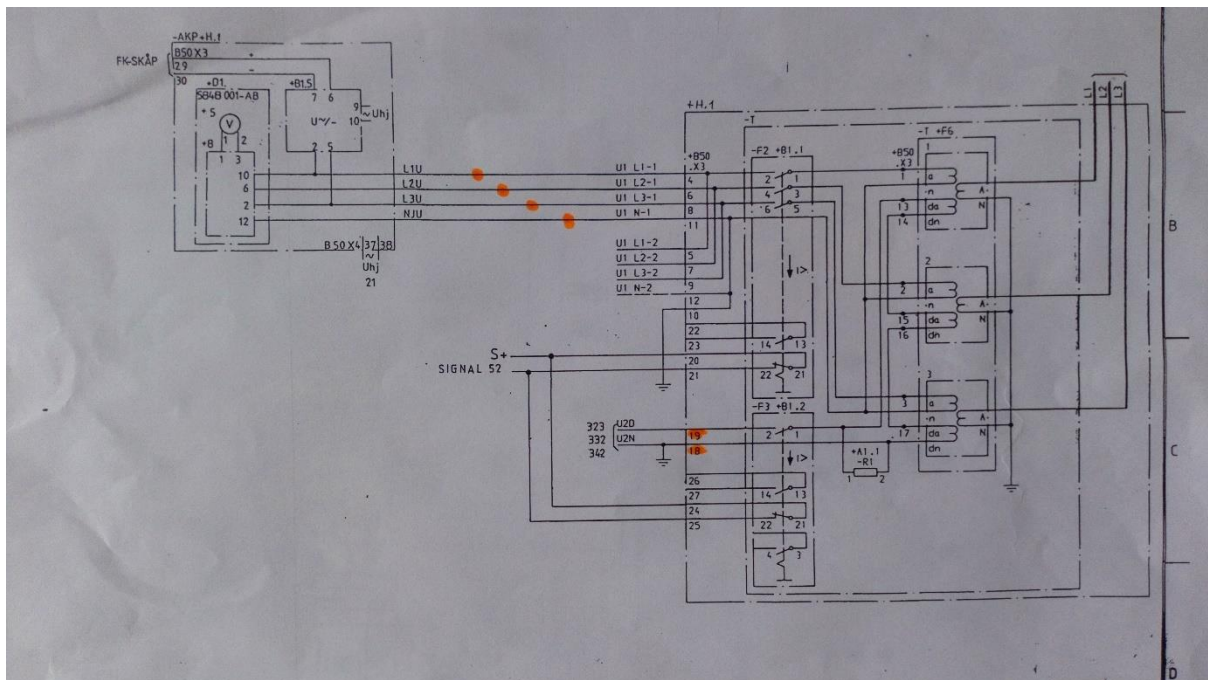


Figur 14.3. Strömmätning fack H3.

9.2 Kretsscheman



Figur 14.1. Inkoppling av strömtänger vid orange markering.



Figur 14.2. Mätning av fasspänningar samt nollpunktsspänning vid orange markering.