

Analys av reläskyddsinställningar för jordfelsskydd

Hampus Edblom

Dokumenttyp – Examensarbete för Högskoleingenjörer

Huvudområde: Elektroteknik

Högskolepoäng: 15

Termin/år: VT/2019

Handledare: Göran Thungström

Examinator: Kent Bertilsson

Kurskod/registreringsnummer: ET108G

Utbildningsprogram: Elkraftingenjör, 180 hp

Sammanfattning

Väl inställda reläskydd för ställverk är en nödvändighet för en person- och driftsäker anläggning. Rapportens mål är att undersöka om oriktade skydd med enbart signalering är tillräckligt för att skydda anläggningen som undersöks, och om riktade skydd har fördelen att förbättra felutpekning, minska risken för felaktig funktion eller minska funktionstiden. Anläggningen som undersökts är ett 6,3 kV industrinät med resistansjordning. I rapporten kontrolleras isolationsvärden och strömtoleranser för utrustningen, som sedan jämförs med beräknade spänningar och strömmar vid enfasiga jordfel. Rapporten beskriver också kort riktade skydd och dess funktioner i förhållande till frågeställningen om den eventuella fördelen med riktade skydd. Resultatet blev att överspänningar på grund av jordfel inte är något problem, men felströmmen genom nollpunktsmotståndet är för stor för enbart signalering. Vid stumma jordfel klarar nollpunktsmotståndet av att hantera felströmmen i 30 sekunder, varefter värmeutvecklingen resulterar i att nollpunktsmotståndet kopplas bort och anläggningen blir isolerad från nollpunkten. Riktade skydd behövs enligt studien inte i en anläggning som denna. Detta är baserat på att kabelsträckorna är för korta för att orsaka kapacitiva strömmar tillräckligt stora för att felaktig funktion ska uppstå i oriktade skydd, och att nätstrukturen inte genererar strömmar i oväntade riktningar. Rapportens resultat visar att oriktade skydd är tillräckligt men att funktionen bör ställas om till bortkoppling av felande krets.

Nyckelord: Enfasiga jordfel, Reläskydd, Riktade skydd, Kapacitiva strömmar

Abstract

Well-adjusted relay protection for electrical substations is a necessity for personal safety and reliable operation. The aim of the report is to investigate whether non-directional protection with signaling alone is sufficient to protect the facility being investigated, and if directional protection has the advantage of improving fault detection, reducing the risk of unnecessary operation or reducing the function time. The facility under investigation is a 6.3 kV industrial network with resistance grounding. The report checks the insulation values and current tolerances for the equipment, which are then compared with calculated voltages and currents at single-phase earth faults. The report also briefly describes directional protection and its functions in relation to the issue of the potential benefit of directional protection. The result was that overvoltages due to earth faults are not a problem, but the fault current through the neutral point resistance is too large for signaling alone. In the case of earth faults with very low fault impedance, the neutral point resistance can handle the fault current for 30 seconds. After which the heat development results in the neutral point resistance being disconnected and the facility being isolated from the neutral point. According to the study, targeted protection is not needed in a facility like this. This is based on the fact that the cable paths are too short to cause capacitive currents large enough to cause unnecessary operation in non-directional protection, and that the network structure does not generate currents in unexpected directions. The result of the report shows that non-directional protection is sufficient, but that the operation function should be changed to tripping of faulty circuits.

Keywords: Single-phase earth faults, Relay protection, Directional protection, Capacitive currents

Förord

Detta examensarbete utgör den avslutande delen på min distansutbildning "högskoleingenjör med inriktning mot elektroteknik", som har lästs via Mittuniversitetet, Umeå universitet och Luleå tekniska universitet.

Jag vill tacka Tomas Brink från Eurocon och Ola Löfgren samt Anders Hallgren från SCA, för att ha gjort detta arbete möjligt och svarat på mina många frågor under arbetets gång.

Jag vill även tacka Joakim Holm på NKT för värden på AXKJ 1x1000 som ej längre tillverkas och Jyrki Kaipainen på ABB för isolationsvärden på HXR-motorn.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	ii
Abstract	iii
Förord	iv
Innehållsförteckning	v
Terminologi	vii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund och problemmotivering	1
1.2 Syfte	2
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Konkreta mål.....	2
1.5 Disposition	3
1.6 Bidrag	3
2 Teori	4
2.1 Resistansjordning	4
2.2 Lagar och regelverk.....	4
2.3 Symmetriska komponenter.....	5
2.3.1 Strömmar och spänningar	8
2.4 Dissymmetriström.....	9
2.5 Impedans	9
2.5.1 Transformatorer.....	9
2.5.2 Kablar	11
2.6 Kapacitans	12
2.6.1 Beräkning av kapacitans för kablar	12
2.6.2 Kapacitiva strömmar.....	12
2.7 Jordfelsskydd	15
2.7.1 Nollföljdsströmskydd	16
2.7.2 Nollpunktspänningsskydd	16
2.7.3 Riktade skydd	17
3 Metod	19
3.1 Litteraturstudier kring jordfel och riktade skydd	19
3.2 Information om anläggningen.....	20
3.3 Beräkningar och jämförelse	20

4	Anläggningen	21
4.1	Transformator T53.....	21
4.2	Nollpunktmotstånd.....	22
4.3	Ställverk ST53.....	22
4.4	Ställverk ST53-61	23
4.5	Transformator T101.....	23
4.6	Reläskydd	23
4.7	Kablar	24
4.8	Jordlinor	25
4.9	Isolationsnivå	25
5	Beräkningar	26
5.1	Spänning vid jordfel.....	26
5.2	Transformator T53.....	26
5.3	Kablar	26
5.4	Kretsschema	34
5.5	Kapacitiva strömmar	36
5.6	Jordfelsström.....	37
5.7	Kontroll av funktion	37
5.8	Spänningsfall.....	38
5.9	Kontroll av belastning	39
5.10	Beröringsspänning	40
6	Resultat	41
7	Diskussion	42
7.1	Samhälleliga och etiska aspekter	43
8	Slutsatser	44
8.1	Felström genom nollpunktmotståndet.....	44
8.2	Riktade skydd	45
8.4	Fortsatt arbete	46
	Referenser	47
	Bilaga A:	49
	Bilaga B:	50

Terminologi

Primärt funktionsvärde	Värde på mätenheten i kretsen som skyddas.
Sekundärt funktionsvärde	Värde på sekundärsidan mättransformatorn, värde som reläskyddet mäter.
Obefogad/felaktig funktion	Funktion (bortkoppling eller signal) hos reläskydd där funktion ej är önskad.
Intermittenta jordfel	Jordfel som försvinner och återkommer i intervaller.
Stumt jordfel	Ett jordfel där felimpedansen är försumbar.
Funktionstid	Tiden från att ett skydd känner av ett fel (funktionsvärdet uppnås) till att funktion ges.

1 Inledning

Industrin vill ha driftsäkra system med väl implementerade skydd. Samtidigt är den ekonomiska aspekten av stor betydelse, att byta utrustning varje gång nya lösningar dyker upp på marknaden är inte hållbart. Denna rapport tittar på om nuvarande oriktade skydd är tillräckliga och om fördelar finns med att byta till riktade skydd i det radiella industrinätet som studeras.

1.1 Bakgrund och problemmotivering

”Elkraft utan reläskydd är som en bil utan broms” [1] s.5, så beskrev Söderlund vikten av reläskydd inom elkraft. Reläskydd skyddar elkraftsystemet så att ett fel inte blir flera fel som till slut kanske släcker hela anläggningen. Implementering av reläskydd är därför nödvändigt för att kunna få ett tillförlitligt system.

Jordfelsskydd kan ställas in för att antingen koppla bort jordfel direkt när de uppstår, eller endast signalera om jordfel för att felet manuellt ska kopplas bort vid ett planerat tillfälle.

Vid direkt bortkoppling minimerar man risken för att skada utrustning i systemet, men man stoppar också driften för den utrustning som matas från den felbehäftade kretsen.

Vid felsignalering kan utrustningen fortsätta att köras i drift medan åtgärder planeras och förbereds, men man riskerar att utrustningen skadas av felströmmar och felpänningar som uppstår till följd av jordfelet. Det är signalering som är vanligast i den berörda anläggningen, men då installationen skedde långt bak i tiden är det osäkert om detta är en bra lösning för anläggningen som den ser ut idag.

Troligen har beräkningar gjorts innan inställning av dessa skydd, som visat att utrustningen klarar av de felströmmar och felpänningar som uppstår vid enbart signalering. Troligtvis är även anläggningen så pass oförändrad att inställningarna för skydden fortfarande passar anläggningens behov. Detta måste dock bekräftas med nya beräkningar.

1.2 Syfte

Syftet med denna rapport är att utreda hur väl inställningarna för jordfelsskydd överensstämmer med anläggningens behov, om signalfunktion är tillräckligt som skydd och om användning av riktade skydd skulle förbättra felhanteringen i ett radiellt matat industrinät.

1.3 Avgränsningar

Denna rapport tittar endast på inställningarna för fack ST53-61:4 och kretsarna som påverkar detta fack. Hur det ser ut för skydd av andra delar i anläggningen tas inte upp i denna rapport.

Studien tittar enbart på enfasiga jordfel och hur dessa kan påverka utrustningen, andra typer av fel berörs ej. Studien tittar inte heller på direkta konsekvenser vid felstället så som värmebildning över felimpedansen, som kan orsaka onödiga skador på närliggande utrustning om felet tillåts fortgå som vid signalering. Intemittenta jordfel och transienter har endast berörts lätt i teori-delen av rapporten. Rapporten fokuserar istället på utrustningens tolerans mot strömmar och spänningar som kan uppstå.

I kapitel 4.2 antas även att det termiska skyddet för nollpunktsmotståndet löser ut efter 30 sekunder. Ingen beräkning på motståndets utvecklade effekt och värmedissipation görs.

1.4 Konkreta mål

Rapporten har som mål att besvara följande frågor:

- Vilka felströmmar och felspänningar uppstår i anläggningen vid ett enfasigt jordfel?
- Klarar utrustningen som ska skyddas av det berörda jordfelsskyddet strömmarna och spänningarna som uppstår vid enfasiga jordfel?
- Kan riktad funktion förbättra skyddet för anläggningen jämfört med oriktad funktion, genom att:
 - undvika obefogade funktioner
 - förbättra felutpekning
 - minska tiden för funktion

1.5 Disposition

Inledningen ger en kort introduktion och beskrivning av frågeställningen och rapporten i helhet. I kapitel 2, *Teori*, beskriver tidigare arbeten och framtagna formler som ligger till grund för beräkningar och slutsatser som dras senare i rapporten. I avsnittet *Metod* beskrivs kort hur arbetet utförts. Hur anläggningen ser ut och vilken utrustning som studerats beskrivs sedan i kapitel 4, *Anläggningen*. Beräkningarna som utförts kan ses i kapitel 5, *Beräkningar*, och resultatet från beräkningar och studier kan ses under *Resultat*. Sist i rapporten kommer *Diskussion* och *Slutsatser*, där författaren delar sina tankar om resultatet och vilka slutsatser som kan dras. Här finns också förslag på fortsatta arbeten relaterade till denna rapport.

1.6 Bidrag

Litteraturstudier kring relaterade tidigare arbeten, insamling av värden för utrustning i anläggningen, beräkningar utifrån insamlade värden och jämförelse med beräknade värden vid aktuella felfall har utförts och sammanställts av författaren.

Uppskattningar av längder på kabelsträckor och felfrekvens för jordfel inom anläggningen har tillhandahållits av handledare från SCA Ortviken.

2 Teori

I artikeln "*Improved Electrical Safety Through High Resistance Grounding*" [2]. beskrivs konsekvenserna av resistansjordning. Artikeln fokuserar på att beskriva och bevisa fördelarna med resistansjordning. Denna rapport fokuserar istället på att beräkna felströmmar och felpänningar som uppstår vid enfasiga jordfel och sedan använda dessa värden för att avgöra vilken typ av skydd som passar anläggningen.

Det finns mycket bra litteratur om reläskydd, olika systemjordningar och fel som kan uppstå i olika typer av nät. I "*Directional protection equipment*" från Group Schneider [3] beskrivs funktioner hos riktade reläskydd och i "*Jordfelsdetektering i mellanspänningsnät*" från Energiforsk [4] skrivs mer generellt om olika typer av jordfel i olika typer av nät.

2.1 Resistansjordning

Vid resistansjordning ansluts kretsens nollpunkt till jord via ett resistivt motstånd, ett så kallat nollpunktsmotstånd. Detta motstånd har som uppgift att begränsa felströmmarna vid ett jordfel. Syftet med detta kan vara att öka person- och utrustningssäkerheten och/eller möjliggöra fortsatt drift vid jordfel.

Vid resistansjordning blir det i princip nollpunktsmotståndet, motståndet i felpunkten och kapacitansen mot jord i nätet som bestämmer storleken på felströmmen [5], detta bekräftas med beräkningarna i kapitel 5.4.

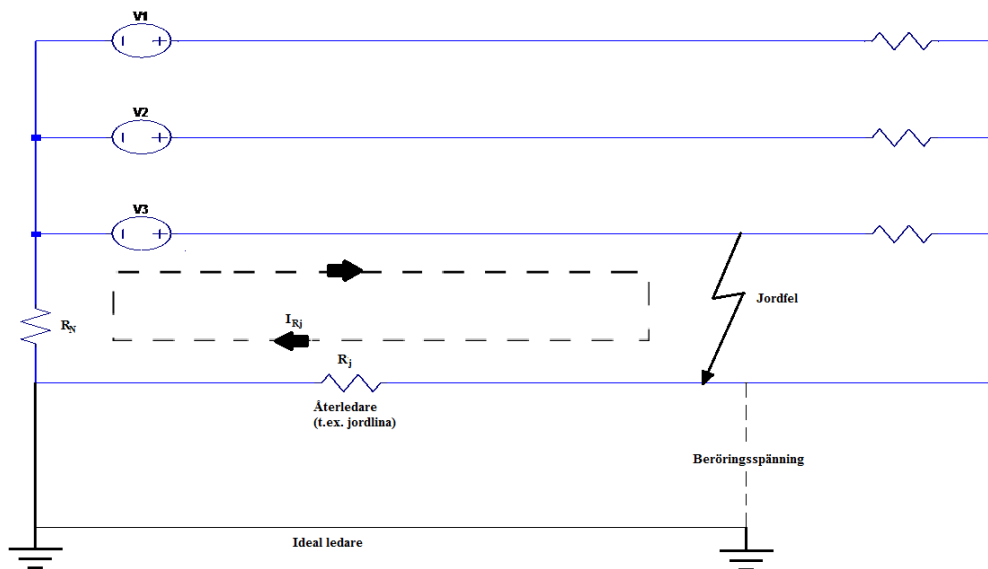
För att undvika intermittenta jordfel i en anläggning, bör nollpunktsmotståndet vara mindre än anläggningens totala kapacitiva reaktans [6]. Ett sådant förhållande hjälper också till att begränsa storleken på spänningstransienterna vid jordfel [5].

2.2 Lagar och regelverk

Enligt elsäkerhetsverkets föreskrifter är högspänningsanläggningar med en huvudspänning (U_h) under 25 kV utan luftledningar undantagen från kravet om snabb och automatisk fränkoppling vid jordfel. Krav på automatisk signalering finns då istället [7].

Vid enbart signalering av jordfel får beröringsspänningen (ΔU_b) inte överstiga 100 V [7]. Den största beröringsspänningen med en fungerande jordning uppstår vid ett stumt jordfel och en ideal ledare mellan

nollpunktsmotståndet och beröringspunkten. Denna spänning bestäms av nollpunktsmotståndet (R_N) och resistansen från beröringspunkten till nollpunktsmotståndet (R_j), se Figur 1. Den reaktiva delen (X_j) av impedansen i återledaren har då försumrats.



Figur 1: Beröringsspänning

Är nollpunktsmotståndet för litet blir felströmmen så pass stor att ΔU_b överstiger gränsen på 100 V enligt ekvation (2.1).

$$\Delta U_b = I_{Rj} * R_j = \frac{U_f}{R_N + R_j} * R_j \quad (2.1)$$

Föreskriften anger resistansvärden (3 eller 5 k Ω , beroende på anläggningens utförande) för vilka fränkoppling ska vara säkerhetsställd för anläggning där fränkoppling är ett krav. Är inte fränkoppling ett krav finns inga specifikationer på resistansvärden på felet för funktion, det är då beröringsspanningskraven som är styrande i utformandet av skyddet.

2.3 Symmetriska komponenter

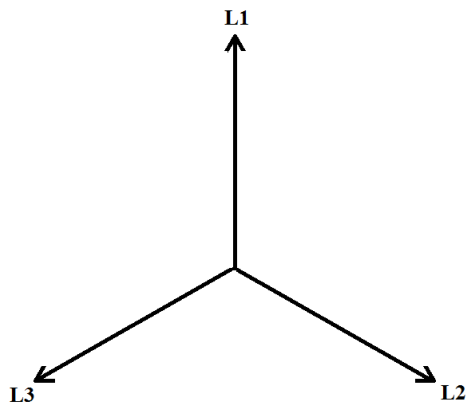
Osymmetri i ett trefassystem kan uppstå av olika anledningar. Olika stora laster på olika faser är en vanlig anledning i lågspänningsanläggningar där man har många enfaslaster. Jordfel är en annan anledning och är vad som berörs i denna rapport.

Symmetriska komponenter är ett sätt att modellera ett trefassystem som gör det möjligt att beräkna strömmar och spänningar vid osymmetri i systemet [8].

Modellen med symmetriska komponenter delar upp strömmar, spänningar och impedanser i tre delar, som har olika förutsättningar för att uppstå och som kan användas till olika funktioner. De tre delarna är:

- Plusföljd

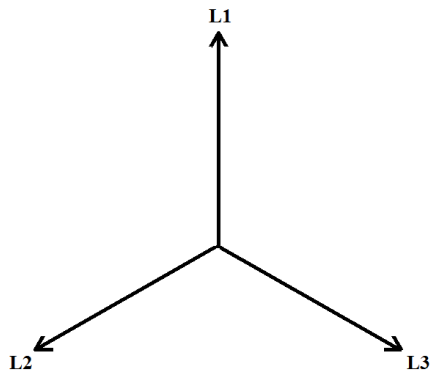
Plusföljdströmmar (I_+) och plusföljdspänningar (U_+) finns där en spänningskälla matar en ström i en krets. Plusföljden i trefassystem har tre komponenter av samma amplitud och med en fasvinkel på 120° mellan varje vektor enligt Figur 2. Detta är normaltillståndet för anläggningar och dessa komponenter används för detektering i underspänningsskydd och rikttningsbestämning i distansskydd [9].



Figur 2. Plusföljdsvektorer

- Minusföljd

Minusföljdströmmar (I_-) och minusföljdspänningar (U_-) uppstår vid tvåfasiga kortslutningar och vid jordfel. De tre minusföljddkomponenterna har även de samma amplitud sinsemellan, men har en motsatt fasföljd mot plusföljddkomponenterna, se Figur 3. Mätning av minusföljddkomponenter används för generatorskydd [9].

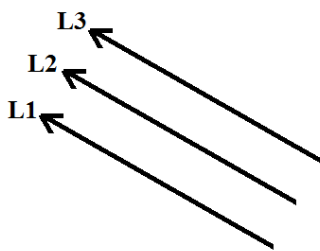


Figur 3. Minusföljdsvektorer

- Nollföljd

Nollföljdströmmar (I_0) och nollföljdspänningar (U_0) uppstår vid jordfel, och används därför i jordfelsskydd [9].

Nollföljdkomponenter har också de samma amplitud sinsemellan, men har ingen fasvridning mellan vektorerna enligt Figur 4.



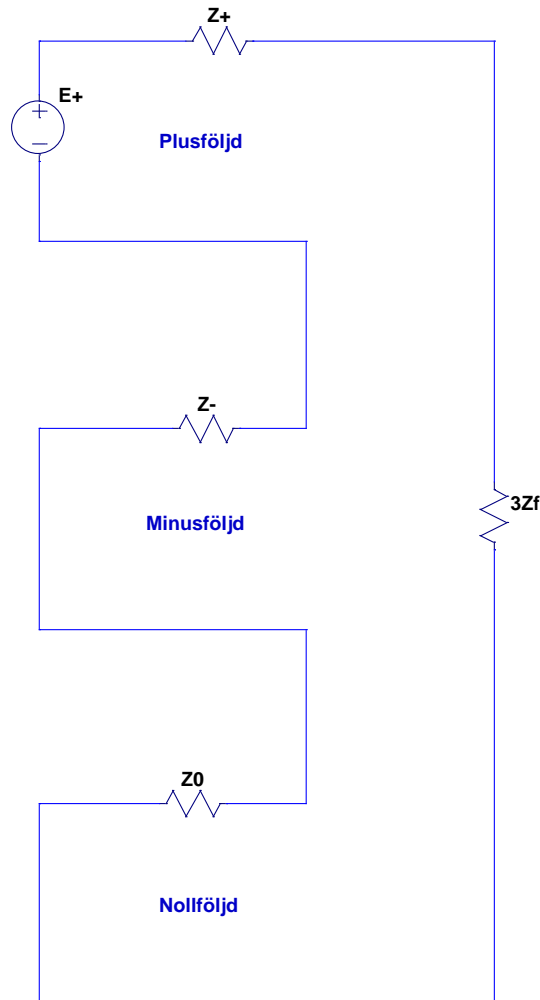
Figur 4. Nollföljdsvektorer

För att enkelt räkna med fasvridningen (120°) mellan de tre faserna används operatoren a enligt ekvation (2.2) och (2.3).

$$a = e^{j120^\circ} = \cos(120^\circ) + j\sin(120^\circ) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.2)$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = \cos(240^\circ) + j\sin(240^\circ) = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.3)$$

Vid enfasigt jordfel kopplas de tre delarna i serie enligt Figur 5, och jordfelsströmmen I_{Rj} sett från kretsen i Figur 1 blir tre gånger nollföljdsströmmen.



Figur 5. Symmetriskt system vid enfasigt jordfel

Där:

Z_f = impedansen i felstället

E^+ = plusföljdsspänningen (fasspänningen (U_f) för enfasiga jordfel)

2.3.1 Strömmar och spänningar

Komponentströmmarna kan beräknas från de olika fasströmmarna, enligt ekvation (2.4-2.6). Komponentspänningarna beräknas på samma sätt från fasspänningarna.

$$I_+ = \frac{1}{3}(I_{L1} + aI_{L2} + a^2I_{L3}) \quad (2.4)$$

$$I_- = \frac{1}{3}(I_{L1} + a^2I_{L2} + aI_{L3}) \quad (2.5)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) \quad (2.6)$$

På liknande sätt kan fasströmmarna beräknas från komponentströmmarna enligt ekvation (2.7-2.9). Även här kan fasspänningarna beräknas på samma sätt från komponentspänningarna.

$$I_{L1} = I_+ + I_- + I_0 \quad (2.7)$$

$$I_{L2} = a^2I_+ + aI_- + I_0 \quad (2.8)$$

$$I_{L3} = aI_+ + a^2I_- + I_0 \quad (2.9)$$

2.4 Dissymmetriström

Dissymmetriström, även kallad summaström, är summan av de tre fasströmmarna. Det är denna ström som går genom nollpunkten vid osymmetriska förhållanden, och från ekvation (2.6) kan vi se att denna ström är tre gånger nollföljdsströmmen enligt ekvation (2.10).

$$I_{dis} = 3 * I_0 \quad (2.10)$$

2.5 Impedans

Impedanserna för de olika komponentsystemen (plusföljd, minusföljd och nollföljd), ser olika ut beroende på det fysiska upplägget. I orörliga delar så som transformatorer och kablar är impedansen för plusföljd och minusföljd identiska [8]. Nollföljden däremot beror på vilken väg nollföljdsströmmen går genom kretsen.

2.5.1 Transformatorer

Så som tidigare beskrivits är impedansen för plusföljd och minusföljd identisk. Nollföljdsimpedansen ser olika ut för olika transformatorer. Finns det ingen nollpunktskoppling blir nollföljdsimpedansen sett från kretsen oändlig, då det inte finns någon väg för nollföljdsströmmen att

gå. Transformatorer med en D-kopplad sida är exempel på detta, då delta-kopplingen inte har någon nollpunkt. En nollföljdsström kan fortfarande uppstå, men kan bara cirkulera inom deltakopplingen och inte sprida sig till andra delar av kretsen [8].

Plus- och minusföljdsimpedanserna har samma värde som kortslutningsimpedansen (Z_k). Nollföljdsimpedansen beror på transformatorstypen. Trebenta Yy-kopplade transformatorer har en nollföljdsimpedans på ca 90% av plus- och minusföljden. Fembenta Yy-kopplade transformatorer har en nollföljdsimpedans som är motsvarande plus- och minusföljden [8].

För att få fram transformatorers impedanser kan man antingen göra egna mätningar eller utgå från märkskyltar. På märkskyltarna brukar antingen relativ kortslutningsimpedans (z_k) eller relativ kortslutningsspänning (u_k) finnas.

Kortslutningsspänningen (U_k) är den spänning som krävs för att uppnå märkström på transformatorns primärsida med kortsluten sekundärsida. Detta blir då ett mått på transformatorns kortslutningsimpedans (samma impedans som orsakar belastningsförlusterna) enligt ekvation (2.12) [10]. Är den relativa kortslutningsspänningen angiven i procent (u_k) är det procent av märkspänningen (U_n) enligt ekvation (2.11).

$$U_k = \frac{u_k}{100} * U_n \quad (2.11)$$

Kortslutningsimpedansen kan då beräknas enligt ekvation (2.12).

$$Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} * I_k} = \frac{\frac{u_k * U_n}{100}}{\sqrt{3} * I_k} = \frac{u_k * U_n^2}{100 * S_n} \quad (2.12)$$

Där I_k är lika med primärsidans märkström I_n .

För att överföra ett impedansvärde från primärsidan (Z_1) till sekundärsidan (Z_2) används omsättningsförhållandet enligt ekvation (2.13).

$$Z_2 = Z_1 * \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \quad (2.13)$$

2.5.2 Kablar

Plus- och minusföljdsimpedansen för kablar är helt enkelt impedansen för ledaren. Nollföljdsströmmen går precis som plusföljds- och minusföljdsströmmen genom kabelns ledare till felstället, därefter tar den dock en egen väg till nollpunkten. Nollföljdsimpedansen blir då alltså ledarens impedans (samma som för plus- och minusföljden) plus impedansen för återledaren [11].

Resistansen i kablar är temperaturberoende, och anges oftast i kabeltabeller som resistans vid 20 °C. Resistansen vid andra temperaturer kan beräknas enligt ekvation (2.14).

$$R_{T_2} = R_{20}(1 + \alpha_{20}(T_2 - 20)) \quad (2.14)$$

Där:

R_{T_2} = Resistansen vid temperaturen T_2 °C (Ω/km)

R_{20} = Resistansen vid temperaturen 20 °C (Ω/km)

α_{20} = Temperaturkoefficienten vid 20°C

α_{20} för aluminium = 0,00403 °C⁻¹

α_{20} för koppar = 0,00393 °C⁻¹

Induktansen för kablar kan beräknas med ekvation (2.15).

$$L = 0,05 + 0,2 * \ln\left(\frac{a}{r}\right) [\text{mH/km}] \quad (2.15)$$

Där:

a = axelavstånd mellan ledare [mm]

r = radien på kabeln [mm]

2.6 Kapacitans

2.6.1 Beräkning av kapacitans för kablar

Värden för kapacitans vid jordslutning brukar vara tillhandahållet av tillverkaren för kabeln. Finns inte sådana värden att tillgå går det att räkna ut med hjälp av isolermaterialets relativa permittivitet ϵ_r , kabellängden l , ledarens radie r_1 och ledarens plus isoleringens radie r_2 enligt ekvation (2.16). Denna ekvation gäller för en ledare som omsluts av en skärm.

$$C = \frac{2\pi * \epsilon_r * \epsilon_0 * l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} [F] \quad (2.16)$$

Där ϵ_0 är permittiviteten för vacuum.

Detta kan förenklas till kapacitans per kilometer enligt ekvation (2.17).

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 * \ln \frac{r_2}{r_1}} [\mu F / km] \quad (2.17)$$

2.6.2 Kapacitiva strömmar

I alla ledare, men framförallt kablar, finns en kapacitiv koppling mot jord. I denna koppling kan det uppstå en kapacitiv ström som benämns laddningsström (I_C), och kan uttryckas enligt ekvation (2.18).

$$I_C = U_f * \omega * C_d [A/km] \quad (2.18)$$

Där:

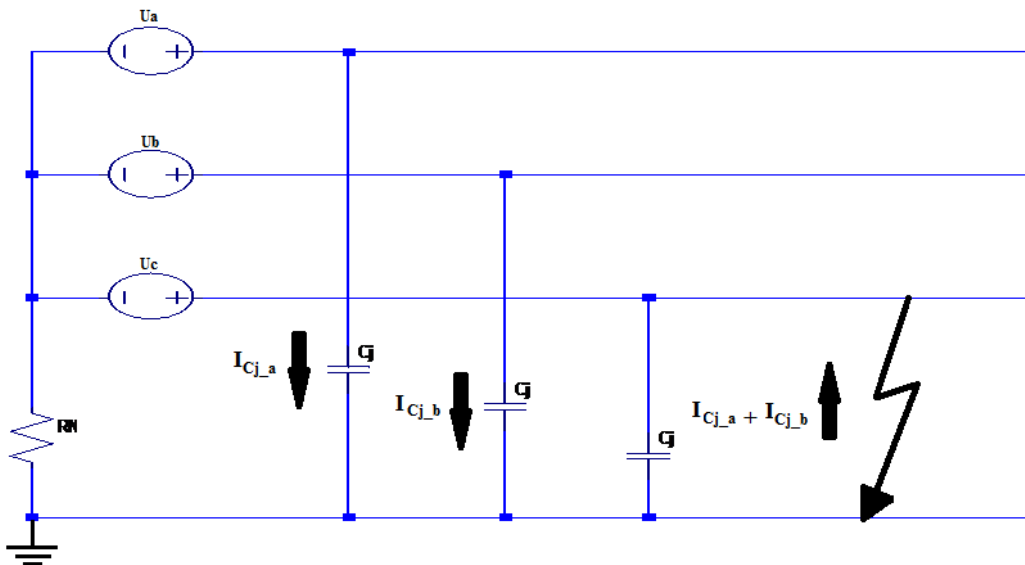
U_f = fasspänningen [V]

C_d = driftkapacitansen [F/km]

Vid ett stumt enfasigt jordfel i högresistansjordade nät får jordpunkten och den felaktiga fasen samma potential. Spänningen mellan de friska faserna och jord blir då lika med huvudspänningen, och den kapacitiva strömmen mellan de friska faserna och jord blir enligt ekvation (2.19) [8].

$$I_{Cj_a} = \sqrt{3} * U_h * \omega * C_d = \sqrt{3} * I_C [A/km] \quad (2.19)$$

I trefassystem blir vid stumma enfasiga jordfel den felande fasens kapacitans kortsluten, och bidrar inte till den kapacitiva strömmen, se Figur 6. Reläskydd som mäter dissymmetriströmmen mäter då endast den resistiva strömmen genom nollpunktsmotståndet, eftersom summan av de kapacitiva strömmarna från de två friska faserna går tillbaka i den felande fasen.

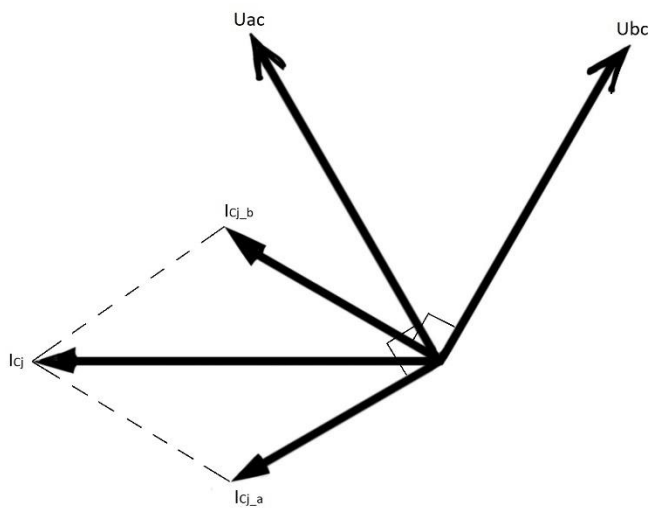


Figur 6. Kapacitiva strömmen

Den totala kapacitiva strömmen i kretsen blir då enligt ekvation (2.20).

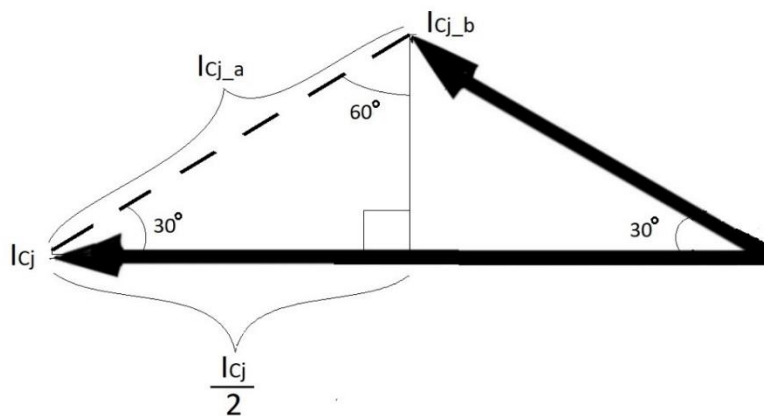
$$\overline{I_{Cj}} = \overline{I_{Cj_a}} + \overline{I_{Cj_b}} \quad (2.20)$$

Figur 7 visar dessa strömmar i förhållande till spänningarna som uppstår mellan de friska faserna och jord, där spänningarna, och därav de kapacitiva strömmarna dessa skapar, har en färförskjutning på 60° mellan varandra.



Figur 7. Vinkelskillnad kapacitiva strömmar (inspiration tagen från [8])

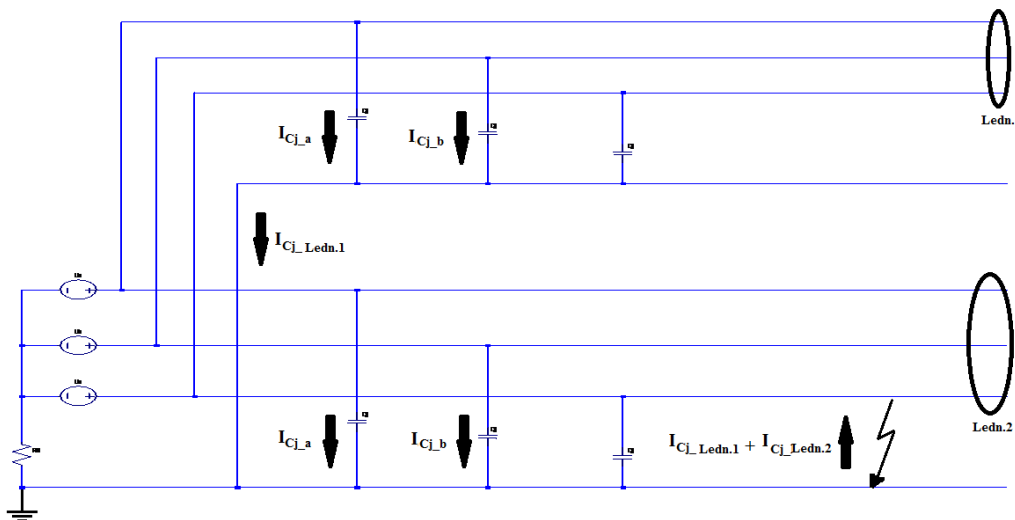
I Figur 8 kan vi sedan se att absolutbeloppet för summaströmmen I_{cj} kan beräknas trigonometriskt enligt ekvation 2.21.



Figur 8. Beräkning av kapacitiva strömmar

$$I_{cj} = 2 * \cos(30^\circ) * I_{cj_a} = \sqrt{3} * I_{cj_a} \quad (2.21)$$

I större nät med flera parallellkopplade ledningar bidrar även de friska ledningarna med kapacitiv jordslutningsström enligt samma princip, se Figur 9. Av denna anledning rekommenderas det att den kapacitiva jordfelsströmmen för en fas ej överstiger 0,33 gånger funktionsströmmen för oriktade skydd, då för stora kapacitiva strömmar kan ge en obefogad funktion för en frisk ledning [6].



Figur 9. Kapacitiva strömmar i parallella ledningar

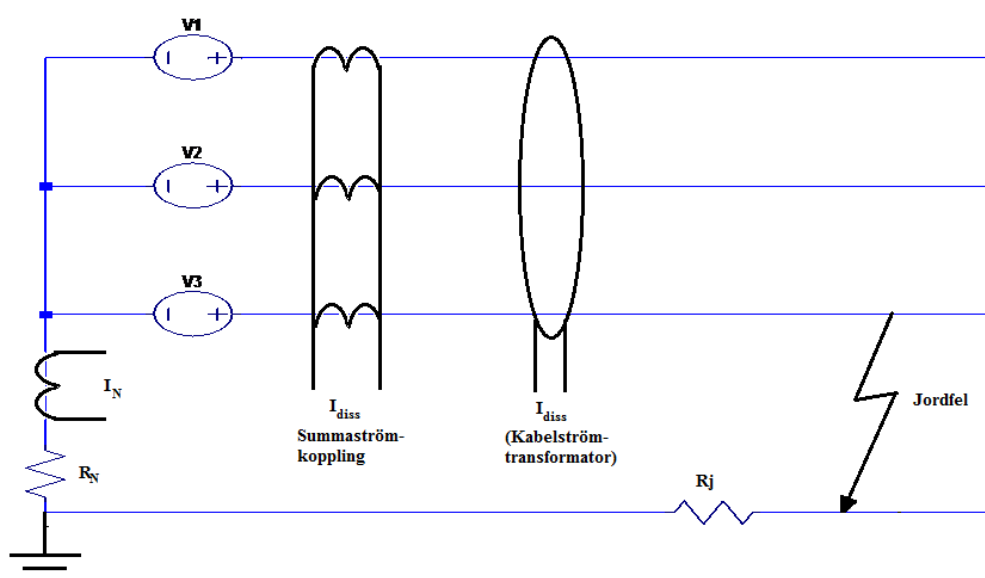
2.7 Jordfelsskydd

För att detektera jordfel används nollföljdskomponenterna. Det går att använda både nollföljdsspänning och nollföljdsström. Mätningen sker via mättransformatorer som på sekundärsidan ger ett önskat funktionsvärde för mätenheten på reläskyddet.

Tiden för funktion styrs i moderna reläskydd digitalt, och har ingen direkt koppling med detekteringsmetoden (riktat/oriktat) [12]. För att undvika felaktig funktion på grund av transienter bör funktionstiden inte understiga 0,5 sekunder [6].

2.7.1 Nollföljdsströmskydd

Mätning av nollföljdsström kan ske indirekt genom mätning av dissymmetriströmmen som kan ses i ekvation (2.10). Man mäter då strömmen genom alla tre fasledarna antingen med tre enfasiga strömtransformatorer, en så kallad summaströmskoppling, eller med en kabelströmtransformator. Dissymmetriströmmen kan också bestämmas genom mätning av strömmen genom nollpunktsjordningen (I_N) [9]. Exempel på dessa kopplingar ses i Figur 10.

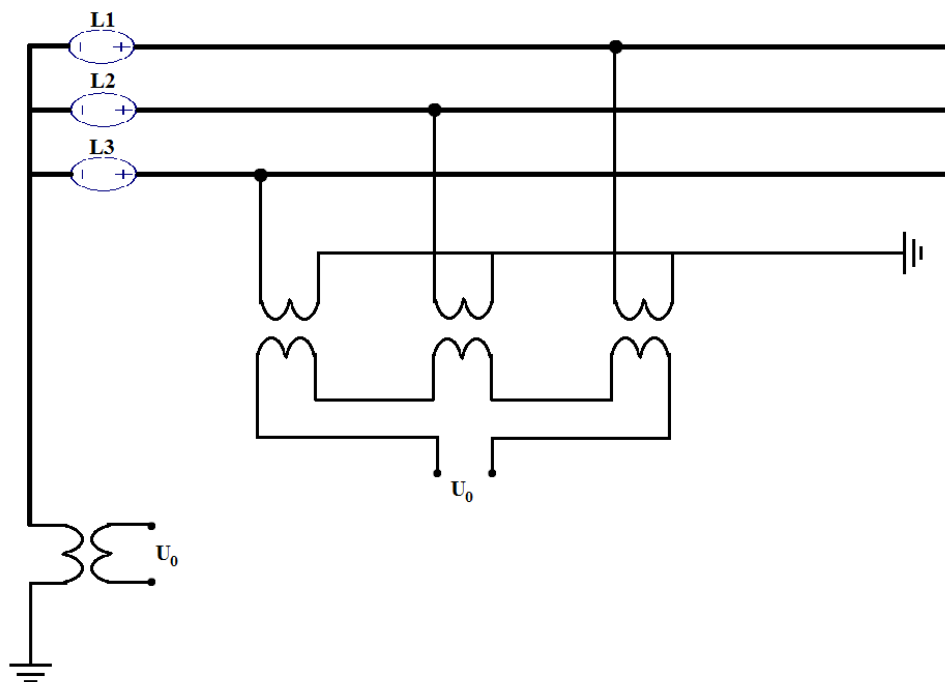


Figur 10. Mätning av nollföljdsström

2.7.2 Nollpunktspänningsskydd

Reservfunktion för jordfelsskydd bör finnas i alla elkraftsystem oavsett om riktade eller oriktade skydd används. Ett nollpunktspänningsskydd är en vanlig lösning [12].

Nollpunktspänningsskydd mäter som namnet antyder spänningen mot nollpunkten. Detta kan åstadkommas med en enfastransformator som mäter spänningen mellan nollpunkt och jord, eller genom en öppen deltakoppling på sekundärsidan av en trefasig transformatorkoppling som mäter summan av fasspänningarna i de tre faserna [6],[3], se Figur 11.

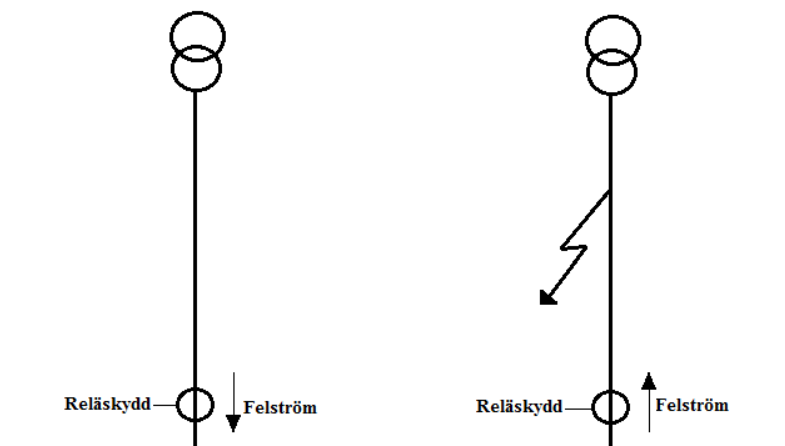


Figur 11. Mätning av nollpunktspänning

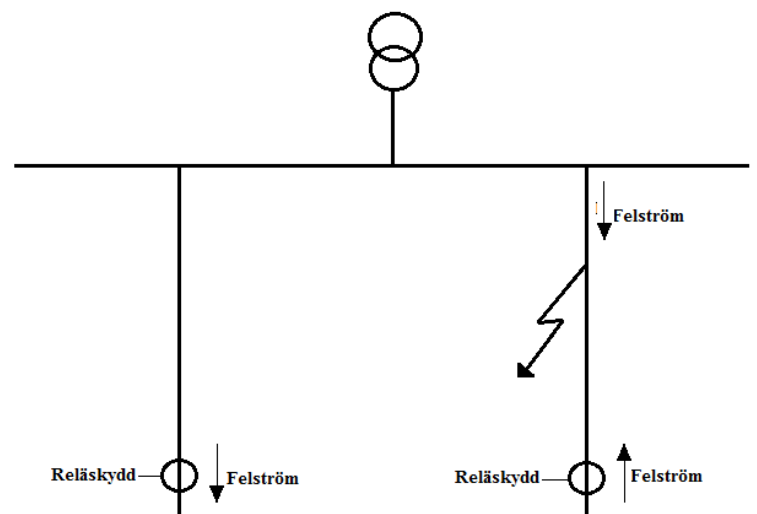
2.7.3 Riktade skydd

Med riktade skydd mäts fasvinkeln mellan strömmen och en polariseringsvariabel. Polariseringsvariabeln kan vara någon av strömmarna eller spänningarna i kretsen, och vanligtvis används nollpunktspänningen som polarisering för riktade jordfelsskydd. Genom att mäta fasvinkeln kan man skilja på resistiva- och kapacitiva strömmar, och på vilken sida av skyddet felet finns [6].

Riktade skydd kan behövas där det finns mer än en energikälla (Figur 12), i maskade nät, vid parallella matningar (parallella ledningar till samma objekt men med separata skydd, se Figur 13), eller i nät med en stor andel kapacitiv jordfelsström.



Figur 12. Mer än en energikälla (inspiration tagen från [3])



Figur 13. Parallella matningar (inspiration tagen från [3])

3 Metod

Tillvägagångssättet har i huvudsak bestått av litteraturstudier och beräkningar. Beräkningar har utförts utifrån aktuella värden för anläggningen (kan ses i kapitel 4, *Anläggningen*) och enligt beräkningsmodeller framtagna i *Teori* -delen, (kan ses i kapitel 5, *Beräkningar*). Mycket tid gick också åt till att hitta information om olika värden för utrustningen i fabriken. Bilder och figurer som används i rapporten är alla skapade av författaren.

En möjlig svaghet med metoden är att beräkningarna som görs endast baseras på vad författaren anser viktigt att veta för att kunna besvara frågeställningen. Om det skulle finnas aspekter viktiga för resultatet som inte författaren tänkt på är detta inte något som kommer att framgå av arbetet.

3.1 Litteraturstudier kring jordfel och riktade skydd

Först utfördes litteraturstudier kring jordfel och jordfelsströmmar, detta gjordes för att få en djupare förståelse för vad som händer vid jordfel i mellanspänningsanläggningar. Sist gjordes studier kring riktade och oriktade jordfelskydd, för att kunna bedöma om riktade skydd skulle vara fördelaktiga för anläggningen. Litteraturen som studerades kan hittas i referenslistan [1]-[19]. Merparten av resultatet från litteraturtiderna består av Teoridelen i denna rapport, men ligger även till grund för beräkningar som gjorts under arbetets gång.

3.2 Information om anläggningen

Andra steget var att titta på anläggningen i fråga, behovet av detta är självklart då vetenskap om hur verkligheten ser ut är avgörande för att kunna göra relevanta beräkningar och dra tillförlitliga slutsatser. Ortvikens stod till förfogande med listor och scheman där man kunde se vilka kabeltyper som användes, hur matningen såg ut, och vilka sorters transformatorer som användes. Längden på kabelsträckorna uppskattades i samråd med handledare från Ortvikens. Även provningsprotokoll och manualer för transformatorer, ställverk och reläskydd fanns tillgängliga för isolationsvärden, märkström och andra relevanta värden.

Märkskyltar, kabelkataloger och ibland kontakt med tillverkare eller återförsäljare användes för specifikationer som behövdes för beräkningarna. Där inga specifikationer fanns att tillgå gjordes beräkningar efter de värden som fanns att få tag på.

Information och värden för anläggningsdelar kan ses i kapitel 4.

3.3 Beräkningar och jämförelse

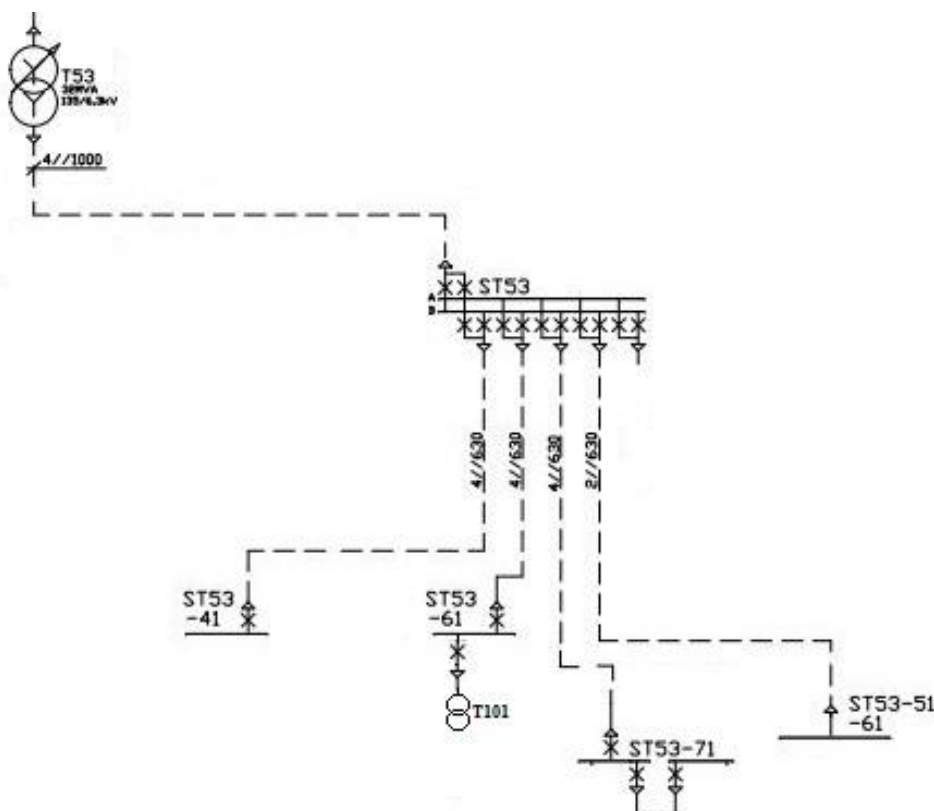
Beräkningar gjordes löpande allt eftersom information om nödvändiga värden togs fram och nya frågor dök upp. För att underlätta vissa beräkningar kring storleken på felresistans i kapitel 5.7 användes programmet Matlab. Beräkningarna ligger till grund för resultatet och slutsatserna som dras av rapporten.

De beräknade felströmmarna och felsepänningarna som uppstår i kretsen jämförs sedan med angivna värden för anläggningens utrustning enligt kapitel 4, för att se om anläggningen klarar av ett kontinuerligt fel.

Då resultatet bygger på att beräkningar och antaganden är korrekta är det viktigt att dessa är korrekt utförda och är därför jämförda med metoder som använts i tidigare arbeten (se referenslistan). Antaganden som gjorts har även de baserats på tidigare arbeten eller på utförda beräkningar.

4 Anläggningen

Anläggningsdelen som behandlas i denna rapport är transformator T53 och de ställverk och underställverk den matar, se Figur 14, samt till viss del även lasterna för underställverken.



Figur 14. Enlinjeschema för anläggningen (bild tagen och modifierad från Ortvikens pappersbruk med tillstånd)

Någon data för hur ofta anläggningen utsätts för jordfel fanns inte dokumenterat, men enligt handledare från Ortviken har mellanspänningsnätet i fabriken inte haft något jordfel sedan åtminstone 80-talet.

4.1 Transformator T53

Transformatorn är en trebent trefastransformator. På primärsidan är nollpunkten ansluten till en ventilavledare och på sekundärsidan är nollpunkten jordad via ett nollpunktsmotstånd. Värden enligt märskylt för transformator T53 kan ses enligt Tabell 1.

Tabell 1. Märkdata för T53

Märkeffekt (MVA)	Primärspänning (kV)	Sekundärspänning (kV)	Relativ kortslutningsspänning (%)	Kopplingsart
32	135 ± 9x1,67%	6,3	10,4	YNyn

Märkström för T53 kan beräknas enligt ekvation (4.22)

$$I_{T_n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (4.22)$$

4.2 Nollpunktmotstånd

Nollpunktmotståndet som används har ett resistansvärde på 254 Ω (vid 20°C), en maxbelastning på 15 A under 30 sekunder, och en kontinuerlig märkström på 3 A.

Nollpunktmotståndet är luftkylt och har ett termiskt utlösningsskydd som bryter kretsen vid för hög temperatur på motståndet. Detta sker vid en temperatur på cirka 300–350 grader. Vid bortkoppling skickas en indikering till ett separat system om att detta skett.

Hur lång tid det tar för motståndet att uppnå denna temperatur har ej tagits fram för arbetet, utan bortkoppling antas ske då strömmen är i samma storleksordning som maxbelastningen under en längre tid än 30 sekunder.

4.3 Ställverk ST53

ST53 matas direkt från transformator T53 och matar i sin tur fyra underställverk, ST53-41, ST53-51-61, ST53-61 och ST53-71, se Figur 14. Även en reservmatning till/från ST54 finns. Reservmatningen är som kanske kan förstås inte inkopplad i normalfall, utan används endast vid bortkoppling av fabriken GIS-ställverk, då ställverk som dessa kopplas i en typ av slingmatning runt fabriken för belysning och liknande laster. Detta driftfall behandlas inte i denna rapport.

Märkström för ställverksfacken är 3150 A.

4.4 Ställverk ST53-61

Reläskyddet som har studerats mäter utgående fack 4 (ST53-61:4) från ställverk ST53-61.

ST53-61:4 har som enda last transformator T101. De andra facken i ställverket matar andra transformatorer av samma typ men även en spädvattenpump och en reservmatningskabel finns som objekt.

Spädvattensumpen är en 400 kW, HXR-motor från ABB, och pumpar vatten till en värmeväxlare som står på samma våningsplan som pumpen.

Reservmatningen går till/från ST3-11:10. Reservmatningen används vid samma typ av driftfall som reservmatningen i ST53.

Märkström för ställverksfacken är 630 A.

4.5 Transformator T101

Denna transformator typ är den huvudsakliga lasten för ST53-61, och har märkvärden enligt Tabell 2.

Tabell 2. Märkdata för T101

Märkeffekt (kVA)	Primärspänning (kV)	Sekundärspänning (kV)	Kopplingsart
1600	6,3 ± 2x2,5%	0,4	Dyn

4.6 Reläskydd

Reläskyddet som mäter strömmen från ST53-61:4 är av typen SPAC 320 C från ABB, och feldetektering sker via mätning av summaströmmen, vilken då blir tre gånger nollföljdsströmmen enligt ekvation (2.10).

Skyddet har ett primärt funktionsvärde ($I_{0>}$) på 1,0 A och en funktionstid (t_0) på 2,0 s. Skyddet är oriktat och utan spänningsmätning. Vid funktion ger skydden enbart signal, ingen bortkoppling sker alltså vid jordfel. Skyddet signalerar bara så länge det känner av ett fel, men signalerna från skyddet sparas i en händelselista i ett separat system.

Reservskydd finns i form av nollpunktspänningsskydd i separata fack för ST53 och ST53-61. Nollpunktspänningsskydden är av typen SPAU 330 C1 och feldetektering sker via öppen deltakoppling av fasspänningarna mot jord.

Dessa skydd har ett primärt funktionsvärde ($U_{0>}$) på 945 V och en funktionstid (t_0) på 1,5 s. Även dessa har enbart signal vid funktion. Skyddet i ST53 signalerar bara så länge det känner av ett fel, medan skyddet i ST53-61 behåller felsignalen tills det blir manuellt återställt.

4.7 Kablar

Varje fas mellan T53 och ST53 matas med fyra stycken parallella AXKJ-kablar. Från ST53 till ST53-61 matas även där varje fas med fyra parallella AXKJ, men med en mindre dimension. Från fack ST53-61:4 går alla tre faserna genom en gemensam FXKJ-kabel. Märkspänning för alla kablarna är 12 kV (huvudspänning) vilket ger en fasspänning på cirka 6,9 kV enligt ekvation (4.23).

$$U_{f,n} = \frac{U_{h,n}}{\sqrt{3}} \quad (4.23)$$

Dimensioner kan ses i Tabell 3.

Tabell 3. Kablar för delsträckor

Position	Från T53 till ST53	Från ST53 till ST53-16	Från ST53-61:4 till T101
Benämning	Sträcka 1	Sträcka 2	Sträcka 3
Kablar per fas	4//AXKJ	4//AXKJ	1 FXKJ
Dimension	1x1000/35	1x630/35	3x185/35

4.8 Jordlinor

Jorrdon finns vid T53, ST53 och ST53-61. Dessa jorrdon är förbundna med jordlinor av koppar med arean 120 mm².

För beräkningarna antas linorna ha samma längd som kablarna mellan positionerna.

4.9 Isolationsnivå

För att kontrollera att utrustningen klarar av de överspänningar som uppstår vid enfasiga jordfel kontrollerades isolationsnivån på den berörda utrustningen. Det lägsta värdet blir styrande i analysen och var 7,2 kV för nollpunktsmotståndet och motorn.

Tabell för de olika anläggningsdelarna kan ses i Bilaga A.

För kablarna blir effekten av den ökade spänningen mot jord en ökning av den kapacitiva strömmen. Då alla kablarna har märkspänning på 12 kV huvudspänning blir fasspänningen vid märkspänning cirka 6,9 kV.

5 Beräkningar

5.1 Spänning vid jordfel

Vid ett stumt jordfel får jordpunkten samma potential som den felande fasen. Denna fasspänning lägger sig över impedansen i återledaren (jordlinor och skärmar), och nollpunktmotståndet. Potentialen mellan de friska faserna och jord blir då samma sak som potentialen mellan faserna innan felet (huvudspänning).

Då huvudspänningen var 6,3 kV blir alltså den kapacitiva jordslutningsströmmen för kablarna i anläggningen fortfarande mindre än den kapacitiva laddningsströmmen för kablarnas märkspänning, enligt kapitel 4.9.

5.2 Transformator T53

Kortslutningsimpedansen, och därmed plus- och minusföljdsimpedanserna, för transformatorn tas fram med hjälp av Tabell 1 och ekvation (2.12).

$$Z_{T53^+} = Z_{T53^-} = Z_{k1} = \frac{\frac{10,4}{100} * 6,3^2 (kV)}{32 (MVA)} \approx 0,1290 \Omega$$

Transformator T53 har en kärna av typen med tre ben, vilket resulterar i att nollföljdsimpedansen blir ca 10 % lägre än kortslutningsimpedansen, se kapitel 2.5.1.

$$Z_{T53^0} = 0,1290 * 0,9 = 0,1161 \Omega$$

5.3 Kablar

För kablarna är de värden som funnits angivna i Tabell 4. Där det inte funnits värden eller där värden ej var nödvändiga är tabellen markerad med ett streck (-). Resistansvärden för kablarna beräknades vid ledartemperatur 20°C, för vilken standard-värdena i kabeltabellerna var angiven, och vid ledartemperatur 90°C, vilket är den angivna maximala tillåtna ledartemperaturen för PEX-isolerade kablar [14].

Tabell 4. Kabeldata

Kabeltyp	AXKJ 1x1000/35	AXKJ 1x630/35	FXKJ 3x185/35	Jordlina 1x120
Driftkapacitans [$\mu\text{F}/\text{km}$]	0,82 ⁸	0,66 ⁶	0,42 ⁶	-
Driftinduktans [mH/km]	0,27 ⁵	0,29 ⁶	0,26 ⁶	-
Ledardiameter [mm]	37,5 ⁸	29,4 ¹	-	-
Tjocklek isolering [mm]	3,4 ⁸	3,5 ¹	-	-
Ytterdiameter [mm]	56 ⁴	47 ¹	-	-
Driftresistans vid 20°C [Ω/km]	0,0329 ⁶	0,0493 ⁶	0,0991 ^{2,3}	0,1433 ⁵
Driftresistans vid 90°C [Ω/km]	0,0422 ⁵	0,0601 ⁵	0,1264 ⁵	0,1828 ⁵
Driftreaktans [Ω/km]	j0,0846 ⁵	j0,0880 ⁵	j0,09 ²	-
Resistans i skärm [Ω/km]	0,6 ^{1,3}	0,6 ^{1,3}	0,6 ^{1,3}	-
Kapacitiv jordslutningsström I_{cj} vid $U_h = 12\text{kV}$ [A/km]	5,4 ⁵	4,3 ⁶	2,7 ⁶	-
Kapacitiv jordslutningsström I_{cj} vid $U_h = 6,3\text{ kV}$ [A/km]	2,8 ⁵	2,3 ⁵	1,4 ⁵	-
Belastningsförmåga [A]	940 ³	635 ^{1,3,6}	360 ^{3,6}	

¹Värden tagna från [15]

²Värden tagna från [8]

³Värden tagna från [16]

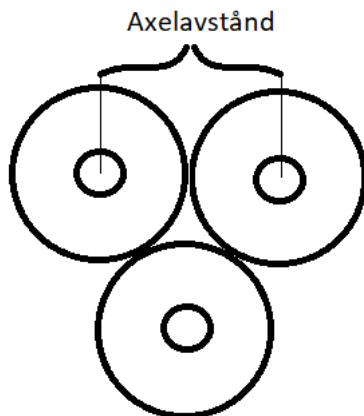
⁴Värden tagna från [17]

⁵ Beräknat enligt kapitel 5.3

⁶Värden tagna från [14]

⁸Värden tagna från Bilaga B

Driftinduktans AXKJ 1x1000 beräknades med hjälp av ekvation (2.15), axelavståndet mellan kablarna är uppskattat till 18,75 mm, vilket är fallet då kablarna för de tre faserna ligger mot varandra enligt Figur 15.



Figur 15. Axelavstånd

Resistansen för jordlinorna beräknades utifrån resistivitet för koppar ($1,72 \cdot 10^{-8} \Omega/m$) [18], enligt ekvation (5.24).

$$Resistans = resistivitet * \frac{längd}{area} \quad (5.24)$$

Reaktansen i jordlinor försummas.

Resistansen vid 90°C ledartemperatur räknades ut med ekvation (2.14).

Kapacitiv jordslutningsström för AXKJ 1x1000 vid märkspänning 12 kV enligt ekvation (2.19):

$$I_{Cj_{12}} = \sqrt{3} * 12 * 2\pi 50 * 0,82 * 10^{-3} \approx 5,4 [A/km]$$

För att räkna om de kapacitiva jordslutningsströmmarna för spänningen i anläggningen (6,3 kV) användes ekvation (5.25) nedan:

$$I_{Cj} = I_{Cj_{12}} * \frac{6,3}{12} [A/km] \quad (5.25)$$

Den kapacitiva jordslutningsströmmen angiven är summaströmmen (I_{Cj}) från två faser vid ett enfasigt jordfel i en trefaskrets enligt ekvation (2.21).

Belastningsförmågan för kablarna är angiven för slutna skärmkrets, triangelförläggning i markdjup på 0,65 meter, marktemperatur på 15°C och en maximal temperatur hos innerledare på 65°C. I verkligheten kan luftförläggning vara mer liknande de förutsättningar som finns i anläggningen, men då markförläggning gav det lägre värdet användes det som extra marginal. Ledartemperaturen har angetts vara 65°C istället för 90°C, även detta har gjorts för att få extra marginal vid beräkningarna.

Belastningsförmågan för AXKJ 1x1000 har antagits vara likvärdig med belastningsförmåga för 52 kV kabel med samma ledararea och förläggningssätt. Även här borde marginal finnas då belastningsförmågan sjunker vid högre märkspänning [16].

Värden för sträckorna tas fram enligt ekvation (5.26)-(5.30) nedan, och kan ses i Tabell 5.

Kapacitans:

$$C_{dS} = C_d * l * n_{//} \quad (5.26)$$

Där:

C_{dS} = driftkapacitans för sträckan

C_d = driftkapacitans enligt Tabell 4

l = kabelsträcka [km]

$n_{//}$ = antal parallella kablar enligt Tabell 4

Resistans/reaktans:

$$R_S = R * \frac{l}{n_{//}} \quad (5.27)$$

$$X_S = X * \frac{l}{n_{//}} \quad (5.28)$$

Där:

R_S = resistans för sträckan

X_S = reaktans för sträckan

R = resistans enligt Tabell 4

X = reaktans enligt Tabell 4

Kapacitiv jordslutningsström:

$$I_{CJS} = I_{Cj} * l * n_{//} \quad (5.29)$$

Där:

I_{CJS} = kapacitiv jordslutningsström för sträckan

I_{Cj} = kapacitiv jordslutningsström för $U_h = 6,3$ kV enligt Tabell 4

Belastningsförmåga:

$$I_{ZS} = I_Z * n_{//} \quad (5.30)$$

Där:

I_{ZS} = belastningsförmåga för sträckan

I_Z = belastningsförmåga enligt Tabell 4

Tabell 5. Kabelvärden för sträcka 1-3

Sträcka	Sträcka 1: T53 till ST53 (50 m)	Sträcka 2: ST53 till ST53-61 (25 m)	Sträcka 3: ST53-61 till T101 (100 m)
Kablar per fas	4//AXKJ	4//AXKJ	1 FXKJ
Dimension	1x1000/35	1x630/35	3x185/35
Driftkapacitans (C_{as}) [μ F]	0,164	0,066	0,042
Driftresistans vid 20°C [Ω]	0,0004	0,0003	0,0099
Driftresistans (R_s) vid 90°C [Ω]	0,0005	0,0004	0,0126
Driftreaktans (X_s) [Ω]	j0,0011	j0,0006	j0,0090
Resistans (R_{ss}) i skärm vid 90°C [Ω]	0,0096	0,0048	0,0765
Resistans (R_{js}) i jordlina vid 90°C [Ω]	0,0091	0,0046	0,0183
Kapacitiv jordslutningsström I_{cs} vid $U_h = 6,3$ kV [A]	0,56	0,23	0,14
Belastningsförmåga (I_{zs}) [A/fas]	4*940	4*635	360

Den största impedansen för nollföljdsströmmen i kretsen uppkommer i det fallet att strömmen endast går genom ledare och skärm, ledarna har en temperatur på 90°C och felstället är längst ut på kabeln till T101. Impedanserna blir då enligt ekvation (5.31)-(5.34):

$$\overline{Z_{kabl^+}} = \overline{Z_{kabl^-}} = \Sigma_1^n (R_{S_n} + X_{S_n}) = R_{kabl^+} + X_{kabl^+} \quad (5.31)$$

$$\overline{Z_{kabl^0}} = \Sigma_1^n (R_{S_n} + R_{SS_n} + X_{S_n}) = R_{kabl^0} + X_{kabl^0} \quad (5.32)$$

Där n = antal sträckor.

Vilket ger absolutbeloppen:

$$Z_{kabl^+} = Z_{kabl^-} = \sqrt{R_{kabl^+}^2 + X_{kabl^+}^2} \quad (5.33)$$

$$Z_{kabl^0} = \sqrt{R_{kabl^0}^2 + X_{kabl^0}^2} \quad (5.34)$$

Insättning av värden från Tabell 5 i ekvation (5.31)-(5.34) ger:

$$Z_{kabl^+} = Z_{kabl^-} \approx 0,0172 \Omega$$

$$Z_{kabl^0} \approx 0,1052 \Omega$$

Totala kapacitansen i nätet:

För att beräkna den totala kapacitansen i nätet måste man räkna med alla kablar som bidrar till nollföljdsströmmen. Fyra nya kabeltyper dyker då upp, driftkapacitanser (C_d) för dessa kan ses i Tabell 6 nedan.

Tabell 6. Kabeltyper i resten av anläggningen

Kabeltyp	Driftkapacitans (C_d) [$\mu\text{F}/\text{km}$]
3x240 (AXKJ)	0,46
3x150 (AXKJ)	0,38
3x120 (AXKJ)	0,35
3x120 (FXKJ)	0,35

Kabeltyp, antal parallella kablar och kabellängd för hela anläggningen kan ses i Tabell 7 tillsammans med kapacitansen för varje sträcka och den totala kapacitansen för hela anläggningen.

Tabell 7. Kapacitans för anläggningen

Sträcka ¹	Kablar	Kapacitans (μF)
T53 till ST53 (50m)	4//1000 (AXKJ)	0,164
ST53 till ST53-41 (25m)	4//630 (AXKJ)	0,066
ST53-41 till laster ² (100m)	2// 3x240 (AXKJ)	0,092
ST53 till ST53-51-61 (80m)	2//630 (AXKJ)	0,1056
ST53-51-61 till laster (100m)	5// 3x120 (FXKJ)	0,175
	2// 3x120 (AXKJ)	0,07
ST53 till ST53-61 (25m)	4//630 (AXKJ)	0,066
ST53-61 till laster (100m)	14// 3x185 (FXKJ)	0,588
ST53 till ST53-71 (150m)	4//630 (AXKJ)	0,396
ST53-71 till ST53-71 ³ (5m)	3//630 (AXKJ)	0,0099
ST53-71 till laster (100m)	10// 3x185 (FXKJ)	0,42
	1// 3x150 (AXKJ)	0,038
	C _{tot} :	2,1905

¹Sträckan till laster från underställverken har alla uppskattats vara likvärdiga med sträckan ST53-61 till T101.

²Med laster menas antingen transformatorer eller motorer, transformatorerna är alla D-kopplade. Förutom motorer och transformatorer av detta slag är de enda kopplingar som finns reservmatningar som inte används vid driftfall som berörs i denna rapport.

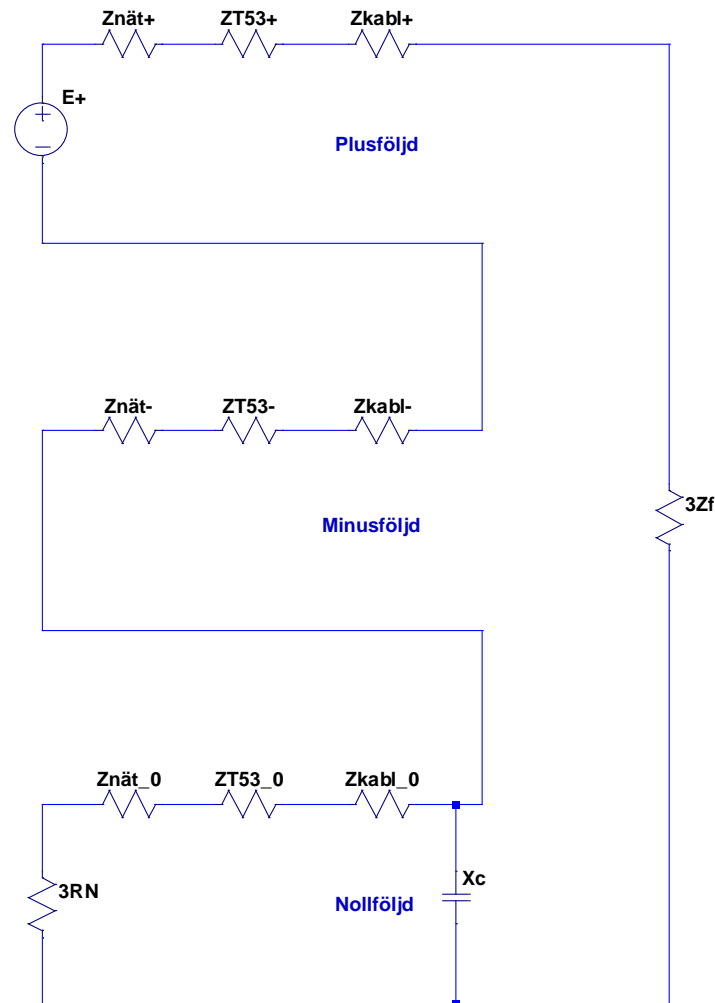
³Dessa kablar används istället för skena för att koppla ihop matningen till fack 1-14 och fack 15-22.

Vilket ger den kapacitiva reaktansen enligt ekvation (5.35).

$$-jX_C = \frac{1}{j\omega C_{tot}} \approx \frac{1}{j2\pi 50 * 2,1905} = -j1453 \Omega \quad (5.35)$$

5.4 Kretsschema

Vi sätter upp ett kretsschema enligt modellen symmetriska system, där den enfasisa jordslutningen skapar en koppling som kan ses i Figur 16.



Figur 16. Kretsschema enligt modellen symmetriska system

Där:

R_N = nollpunktmotståndet

X_C = kapacitiv reaktans i nätet

Förimpedansen från nätet är enligt ett tidigare examensarbete [19] 5,233 Ω på primärsidan (145 kV) av T53. På sekundärsidan (6,3 kV) blir då förimpedansen från nätet enligt ekvation 2.13:

$$Z_{\text{nät}} \approx 9,88 \text{ m}\Omega$$

Då denna förimpedans kommer från i huvudsak ledningar antas plusföljd- och minusföljdimpedansen vara identiska. Ingen nollföljdsimpedans för nätet beräknas då ventilavledaren på primärsidans nollpunkt fungerar som ett avbrott för nollföljdsströmmen, som då endast går genom transformator T53 och runt i felkretsen på sekundärsidan.

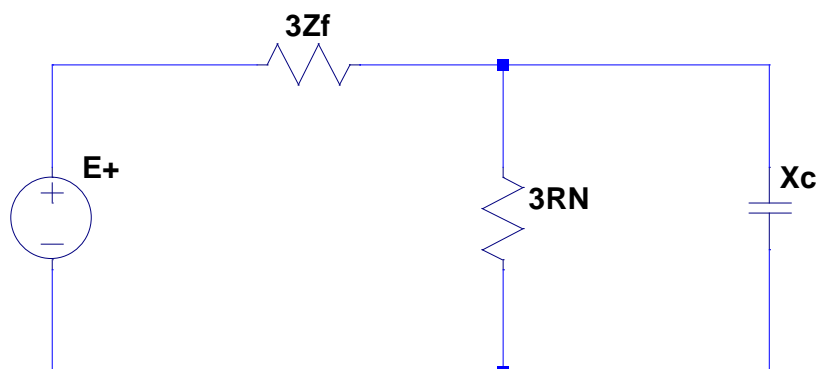
Impedansen i kablarna, transformatorn och nätet summeras enligt ekvation (5.36).

$$\begin{aligned} Z_{kabl^+} + Z_{kabl^-} + Z_{kabl^0} + Z_{T53^+} + Z_{T53^-} + Z_{T53^0} + Z_{nät^+} + \\ Z_{nät^-} \end{aligned} \quad (5.36)$$

Värden tidigare uträknade i kapitel 5 insatta i ekvation (5.36) ger ett värde på 0,5335 Ω .

Detta är endast cirka 0,2 % av nollföljdsmotståndets resistans, och vi väljer därför att försumma impedanserna i kablar, jordlina, transformator och nät vid beräkning av nollföljdsströmmen.

Kretsschemat ser då ut som i Figur 17.



Figur 17. Förenklat kretsschema enligt modellen symmetriska system

5.5 Kapacitiva strömmar

Vid ett enfasigt stumt jordfel i kretsen uppstår kapacitiva strömmar enligt kapitel 2.6.2. Dessa strömmar kan, om de är tillräckligt stora, orsaka en felaktig funktion i reläskydden de parallella utgående facken i ST53-61.

För att i sträcka 3 få en kapacitiv jordslutningsström som uppnår funktionsvärde i reläskyddet krävs en kabellängd enligt ekvation (5.37).

$$Kabellängd [km] = \frac{\text{Funktionsvärde [A]}}{\text{Kapacitiv jordslutningsström [A/km]}} \quad (5.37)$$

Insättning av funktionsvärdet för reläskyddet och den kapacitiva jordslutningsströmmen för kabeln i sträcka 3 i ekvation (5.37) ger en kabellängd enligt nedan:

$$\frac{1 \text{ (A)}}{1,4 \text{ (A/km)}} \approx 0,714 \text{ km} = 714 \text{ m}$$

Vid ett stumt jordfel blir den minsta kapacitiva strömmen genom reläskyddet för ST53-61:4 den ström som uppstår då endast ST53-61 är inkopplat i ST53, och endast ST53-61:4 är inkopplat i ST53-61.

Den kapacitiva strömmen blir då genererad av kablarna i sträcka 1–3, men då strömmen går från friska fas till felande fas enligt kapitel 2.6.2, blir dissymmetriska strömmen som reläskyddet mäter endast den kapacitiva strömmen från sträcka 1–2 enligt ekvation (5.38).

$$I_{Cj_min} = 3 * I_{0C_min} = 3 * \frac{U_f}{(X_{Cs1} // X_{Cs2})} \quad (5.38)$$

Beräkningen kan också ställas upp (enligt ekvation 2.19 och 2.21) som ekvation (5.39) nedan.

$$I_{Cj_min} = \sqrt{3} * U_h * \omega * (C_{s1} + C_{s2}) \quad (5.39)$$

Men värden från Tabell 5 blir $I_{Cj_min} \approx 0,79 \text{ A}$.

Alternativt kan man summera de kapacitiva jordslutningsströmmarna från kabeltabellerna enligt ekvation (5.40)

$$I_{Cj_min} = I_{CjS1} + I_{CjS2} \quad (5.40)$$

Med värden från Tabell 5 blir då $I_{Cj_min} = 0,79 \text{ A}$.

5.6 Jordfelsström

Vid beräkning av jordfelsströmmen (I_j) används kretsschemat i Figur 17. Nollföljdströmmen (I_0) beräknas och multipliceras sedan med tre för att motsvara jordfelsströmmen, vilket är samma sak som dissymmetrströmmen (I_{dis}) som mäts av reläskyddet (se kapitel 2.4).

5.7 Kontroll av funktion

Beräkningen görs för att kontrollera att felströmmen är tillräckligt stor för att ge funktion hos reläskyddet.

Vid ett stunt jordfel är felimpedansen $Z_f = 0 \Omega$.

Vid ett enfasigt jordfel blir plusföljdsspänningen E^+ lika med fasspänningen, $\frac{6300}{\sqrt{3}}$ V.

Från Figur 17 kan man då se att nollföljdsströmmen kan beräknas enligt ekvation (5.41).

$$I_0 = E^+ / \frac{(-jX_C * 3R_N)}{(-jX_C + 3R_N)} = I_{0R} + I_{0C} \quad (5.41)$$

Där den reella delen är den resistiva strömmen (I_{0R}) och den imaginära delen är den kapacitiva strömmen (I_{0C}).

Insättning av beräknade värden i ekvation (5.41) ger $I_0 = 4,77 + j2,50$ A.

Då den kapacitiva felströmmen går från fas till fas enligt Figur 6 blir det endast den resistiva strömmen som tar vägen genom nollpunktsmotståndet. Strömmen genom nollpunktsmotståndet (I_N) blir då 14,31 A enligt ekvation (2.10), där man istället för att räkna med hela I_0 istället tagit endast den resistiva delen I_{0R} .

$$I_N = 3 * I_{0R} \approx 3 * 4,77 = 14,31 \text{ A}$$

Den totala felströmmen som skyddet för det felande facket mäter blir tre gånger absolutbeloppet av summan av denna resistiva ström och den totala kapacitiva strömmen i anläggningen, borträknat den kapacitiva strömmen från de friska faserna i det felande facket enligt ekvation (5.42).

$$I_{dis} = 3 * I_0 = 3 * \sqrt{I_{0R}^2 + (I_{0C} - \frac{U_f}{X_{S3}})^2} \quad (5.42)$$

Där X_{S3} kan beräknas enligt ekvation (5.43).

$$X_{S3} = \frac{1}{\omega C_{S3}} \quad (5.43)$$

I övrigt gäller för ekvation (5.42) och (5.43):

$$U_f = \frac{6300}{\sqrt{3}}$$

C_{ds3} = driftkapacitansen för kabeln i sträcka 3 enligt Tabell 5

I_{dis} blir då enligt ekvation (5.42):

$$= 3 * \sqrt{4,77^2 + \left(2,5 - \frac{6300/\sqrt{3}}{1/(2\pi 50 * 0,042 * 10^{-6})}\right)^2} \approx 16,09 \text{ A}$$

Vid ett felfall då jordfallet inte är stumt blir ekvationen för nollföljdsströmmen enligt ekvation (5.44).

$$I_0 = \frac{E^+}{3R_f + \frac{(-jX_C * 3R_N)}{(-jX_C + 3R_N)}} \quad (5.44)$$

Efter uppställning av denna ekvation i Matlab visades att I_0 får ett värde på 0,33 (en tredjedel av funktionsvärdet för I_{dis}), vid $R_f \approx 3470 \Omega$. Detta är alltså den högsta resistansen i felstället för att jordfelet ska detekteras.

5.8 Spänningsfall

Spänningsfallet på grund av felet i den felande ledningen blir felströmmen I_{dis} multiplicerat med impedansen fram till felstället. Vi använder här plusföljdsimpedansen då vi inte är intresserade av spänningsfallet över återledningarna. Det största spänningsfallet fås när felet är längst ut på sträcka 3, och får då en storlek enligt ekvation (5.45).

$$\Delta U = I_{dis} * (Z_{nät^+} + Z_{T53^+} + Z_{s1^+} + Z_{s2^+} + Z_{s3^+}) \quad (5.45)$$

Insättning av värden från kapitel 5 i ekvation (5.45) ger ett spänningsfall $\Delta U \approx 3,88 \text{ V}$.

Då detta endast utgör cirka 0,1 % av märkspänningen ($\frac{6300}{\sqrt{3}}$), antar vi att detta spänningsfall är försumbart.

5.9 Kontroll av belastning

Beräkningen görs för att kontrollera att strömmarna vid enfasigt jordfel inte överstiger den maximala kontinuerliga strömmen för utrustningen. Den största felströmmen uppstår vid stumma jordfel, så detta är feltypen som beräknas. Impedanserna för kablar, jordlinor, transformator och nät försummas även här och kretsen är den vi ser i Figur 17.

Då huvudspänningen mellan faserna antas oförändrad kan jordfelet och nollpunktmotståndet ses som en parallell last med Dy-transformatorn T101. Strömmen genom den felande fasledaren blir då lastströmmen plus felströmmen. Lastströmmen antas vara Dy-transformatorns märkström. Även här har vi marginaler då strömmen till T101 är lägre än märkströmmen vid normal drift.

Insättning av märkvärden för T101 i ekvation (4.22) ger en märkström:

$$I_{T101_n} = \frac{1600 \text{ (kVA)}}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \text{ (kV)}} \approx 147 \text{ A}$$

Den största belastningen för kabeln uppstår om denna lastström och felströmmen I_{dis} har samma fasvinkel, beräkningen görs därför för detta fall enligt ekvation (5.46).

$$I_{belastning_{s3}} = I_{T101_n} + I_{dis} \approx 163 \text{ A} \quad (5.46)$$

Belastningen för sträcka 2 beräknas på samma sätt, men där är lastströmmen uppskattad till 1,1 kA (enligt värden från programmet MicroScada). Strömmen delas här även upp över fyra parallella kablar enligt ekvation (5.47).

$$I_{belastning_{s2}} = \frac{1100 + I_{dis}}{4} \approx 279 \text{ A} \quad (5.47)$$

För sträcka 1 uppskattas lastströmmen till 1,8 kA (enligt värden från programmet MicroScada), även där delas strömmen upp över fyra kablar, se ekvation (5.48) nedan.

$$I_{belastning_{s1}} = \frac{1800 + I_{dis}}{4} \approx 454 \text{ A} \quad (5.48)$$

5.10 Beröringsspänning

Beräkningen görs för att kontrollera att beröringsspänningen inte överstiger gränsen på 100 V. Vid beräkningen antas jordfelsströmmen gå igenom skärmen för kabeln i sträcka 3 till ST53-61 och igenom enbart jordlinor resten av vägen till T53. Detta görs för att beräkna den högsta beröringsspänningen som uppstår vid felet med en fungerande jordning.

Vid stumt jordfel längst ut på kabeln mellan ST53-61:4 och transformator T101 antas potentialen i jord och felände fas vara likvärdiga. Den maximala beröringsspänningen i jordade delar vid felet blir då spänningen mot jorddonet vid transformator T53 enligt Figur 1. Denna spänning blir fasspänningen innan felet fördelad över resistansen till jordskenan (R_j) och nollpunktsmotståndet (R_N) som ligger i serie. Beröringsspänningen räknas ut genom att använda ekvation (2.1). Där jordfelsströmmen $I_{j,R}$ är felströmmen. R_j blir då resistansen i kabelns skärm (för sträcka 3) plus resistansen i jordlinor (för sträcka 1 och 2) till jordskenan vid T53. Insättning av dessa värden från Tabell 5 i ekvationen ger en beröringsspänning enligt nedan.

$$\Delta U_b \approx 3,87 V$$

6 Resultat

En uppställning av värden på felströmmar och felpänningar som uppstår samt vilka strömmar och spänningar utrustningen klarar av ses i Tabell 8. Där kan vi se att all utrustning klarar av felpänningarna och transformatorer, kablar och ställverk klarar väl av felströmmarna. Dock är nollpunktsmotståndet inte dimensionerat för en kontinuerlig felström av den storlek som uppstår vid ett stumt jordfel i anläggningen.

Tabell 8. Sammanställning spänning och ström

Objekt	Belastningsström ¹ [A]	Märkström [A]	Felspanning ² [kV]	Isolationsvärde [kV]
Nollpunktsmotstånd	14,31	3	6,3	7,2
T53	1816	2933	6,3	28
Sträcka 1	454	940	6,3	6,9 ³
ST53	1116	3150	6,3	20
Sträcka 2	279	635	6,3	6,9 ³
ST53-61	163	630	6,3	20
Sträcka 3	163	360	6,3	6,9 ³
T101	-	-	6,3	20
400 kW motor	-	-	6,3	7,2

¹Högsta strömmen som uppstår vid fel, inkluderat lastströmmen.

²Spänning mot jord som uppstår vid stumt jordfel

³Spänning mot jord enligt märkspänningsvärden

Beröringsspänningen som kan uppstå är väl under godkänd nivå (se Tabell 9).

Tabell 9. Beröringsspänning

	Beräknad [V]	Godkänd (max) [V]
Beröringsspänning	3,87	100

7 Diskussion

Rapportens mål anses uppfyllda då anläggningens förmåga att klara av enfasiga fel har undersökts och en analys om värdet i en riktad funktion på skydden har gjorts. Resultatet var inte det väntade då det framgick att en del av anläggningen, nollpunktsmotståndet, inte var dimensionerat för att kontinuerligt klara av felströmmen vid ett stunt jordfel (se kapitel 8.1). Däremot finns inga tydliga fördelar med riktade skydd för anläggningen som den ser ut idag (se kapitel 8.2). Resultatet är beroende av hur anläggningen ser ut, vilket resulterar i att rapporten endast berör den anläggning som undersökts. Dock bör tillvägagångssättet och tankesättet kunna användas för andra liknande industrinät.

Några nya frågor som dykt upp under arbetets gång är hur det ser ut för andra delar av anläggningen, hur skydden skulle fungera vid speciella driftfall som reservmatning och om en minskning av funktionstiden skulle kunna leda till obefogade funktioner.

Metoden för utförandet bestod av litteraturstudier och beräkningar. En modell av anläggningen uppställd i labbmiljö eller uppbyggd i ett lämpligt simuleringsprogram hade varit en bra utvärdering av arbetet, men då resurser för detta ej fanns tillgängligt utfördes endast de teoretiska beräkningarna utifrån aktuella värden. Enkla simuleringar med de beräknade kapacitansen i kablarna gjordes i LtSpice för att kontrollera beräkningar på kapacitiva strömmar. Dessa valdes dock att inte tas med i rapporten då de inte tillförde någon ny information.

7.1 Samhälleliga och etiska aspekter

Att skyddsfunktioner i elanläggningar inte fungerar som tänkt kan vara farligt för både person och egendom. Felande skyddsfunktioner eller otillräcklig felutpekning kan innebära att onödigt mycket resurser läggs ner på felsökning. Det skulle även kunna skapa en känsla av otrygghet för personal som arbetar med en anläggning där man inte har tillit till skyddsfunktionerna som finns implementerade.

En anläggning där utrustningen inte är dimensionerad för strömmar som uppstår vid fel utsätts också för onödig förslitning. Detta kan leda till att utrustningen måste bytas ut i förtid, vilket är en direkt kostnad för anläggningsägaren men är också dåligt ur miljösynpunkt.

Utbyte av fungerande utrustning kan vara en fördel för anläggningsägaren om man kan öka produktionen med nya lösningar, men kan vara dåligt ur miljösynpunkt då material och energi går åt för att tillverka ny utrustning. Samtidigt måste företag ofta ständigt effektivisera produktionen för att hålla sig konkurrenskraftiga, alternativet kan annars vara att de anställda förlorar sina jobb på grund av uppsägningar eller att företaget går under.

8 Slutsatser

Riktade skydd behöver inte implementeras för selektiv bortkoppling av fel eller för att undvika felaktiga funktioner hos reläskydden. Om en kortare feldetekteringstid önskas går detta att implementera med nuvarande oriktade skydd. Oavsett om skyddsfunktionen är riktad eller oriktad bör dock ytterligare studier om transienter i anläggningen genomföras innan feldetekteringstiden minskas, för att undvika felaktiga funktioner.

Jordfelsskydden bör ställas om till bortkoppling av felande krets istället för nuvarande inställning på enbart signal om nollpunktsmotståndets funktion vill bevaras.

8.1 Felström genom nollpunktsmotståndet

Vid ett stumt jordfel blir felströmmen genom nollpunktsmotståndet nästan fem gånger större än den kontinuerliga märkströmmen. Detta kommer att resultera i varmgång som löser ut temperaturskyddet och bryter kretsen.

Då detta händer tappar anläggningen kontakten med transformatorns nollpunkt, och ingen resistiv felström till nollpunkten uppstår vid jordfel. Felströmmen vid enfasiga jordfel kommer då endast att bestå av den kapacitiva strömmen. Den minsta kapacitiva strömmen beräknades i kapitel 5.5 till cirka 0,79 A. Detta är inte tillräckligt för funktion hos reläskyddet, vilket innebär att inget enfasigt jordfel kommer detekteras av de strömmätande skydden. Nollpunktspänningsskydden kommer dock fortfarande att fungera, då summaspänningen blir oförändrad för enfasiga jordfel. Då reläskyddet för fack ST53-61:4 bara larmar så länge det känner av ett fel kommer larmet att försvinna och felsökning försvåras, även om historiken finns kvar i en händelselista.

Att systemet signalerar om bortkoppling av nollpunktsmotståndet är viktigt för att säkerhetsställa att nollpunktsmotståndet återställs efter åtgärdande av jordfel, så att framtida fel kan upptäckas av de strömmätande reläskydden.

En ändring av funktion för skydden till bortkoppling istället för signal skulle medföra att nollpunktspänningsmotståndet klarar av felströmmen, då funktionstiden för skyddet (1,5 sekunder) ligger långt under tiden nollpunktsmotståndet skalla klara av maximala felströmmen (15 A i 30 sekunder). Istället förlorar man drifttiden för åtgärdande av felet, men då jordfel ej verkar vara ett frekvent fel inom anläggningen kanske detta är överkomligt.

8.2 Riktade skydd

Riktade skydd kan ställas in så att funktion endast fås för resistiva strömmar, men då de kapacitiva strömmarna som bildas i ofelände fack inte blir stora nog att uppnå funktionsvärde (se kapitel 5.5), finns inget behov av detta i dagsläget. Skulle kabelsträckorna vara längre, uppemot 700 meter, skulle behov av riktade skydd finnas då kapacitiv felström kan ge obefogad funktion.

Då nätet är ett radiellt nät med endast en energikälla och utan parallella matningar behövs inte riktade skydd för att selektivt koppla bort fel.

I nät med stora motorer som vid fel kan övergå i generatordrift kan även där riktade skydd vara nödvändigt, då motorerna i dessa fall fungerar som en energikälla. Anläggningens anslutna motor anses inte vara trolig att övergå i generatordrift då motorn pumpar vatten från en tank genom en värmeväxlare i samma våningsplan. Inget vattentryck stort nog för att driva pumpen förväntas kunna uppstå från värmeväxlaren.

Då funktionstiden styrs separat och är inte beroende av detekteringsfunktionen (riktat/oriktat) så finns inga fördelar där med att byta till riktade skydd.

8.4 Fortsatt arbete

Då rapporten endast tittade på en specifik del av fabriken kan en kontroll av de inställda värdena för skydd av andra ställverksfack vara en bra fortsättning. De kan sedan jämföras med inställningarna för skydden som berördes i denna rapport.

I nuläget får vid jordfel efter ST53-61:4 nollpunktspänningsskydden för ST53 och ST53-61 samtidig funktion efter 1,5 sekunder, följt av det strömmätande skyddet i ST53-61:4 som får funktion efter 2,0 sekunder. En kontroll av selektiviteten och upprättade av en selektivitetsplan vid val av bortkoppling kan även det vara ett möjligt fortsatt arbete.

Vid avställning av GIS-ställverk används reserv-matningarna för att driva belysning och andra laster i fabriken. Nätstrukturen ser då ut som en typ av maskat nät och kan vara ett ytterligare fall att titta på.

Om minskning av funktionstiden önskas bör eventuella transienter i anläggningen studeras, då en för kort funktionstid i förhållande till dessa transienter kan ge obefogade funktioner.

Referenser

- [1] G. Söderlund, *Reläskydd i elkraftsystem, en introduktion*. 1 uppl. Stockholm: Almqvist & Wiksell Förlag AB, 1993
- [2] J.P.Nelson, "Improved Electrical Safety Through High Resistance Grounding", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, vol. 51, nr. 6, 2015, s.5198-5203
- [3] P.Bertrand, "Directional protection equipment", *Cahier technique, Groupe Schneider*, 1998, nr. 181, s. 4-20.
- [4] L.Messing, J.Sloth, "Jordfelstdetektering i mellanspänningsnät", Energiforsk, Rapport nr 2015:128, 2015, 117 sidor.
- [5] M.Lehtonen, T.Hakola, *Neutral Earthing and Power System Protection*. Vaasa: ABB, 1996
- [6] ABB, 1991: *Reläskydd för distributionsnät. Applikationsguide*.
- [7] Elsäkerhetsverkets föreskrifter och allmänna råd om hur elektriska starkströmsanläggningar ska vara utförda (ELSÄK 2008:1, konsoliderad version), <https://www.elsakerhetsverket.se/globalassets/foreskrifter/2008-1-konsoliderad.pdf>
Publicerad 2016-06-03. Hämtad 2019-05-14.
- [8] K.A.Jacobsson, S.Lidström, C.Öhlén, *Elkraftshandboken, Elkraftsystem 2*. 4 uppl. Stockholm: Liber, 2016
- [9] K.A.Jacobsson, S.Lidström, C.Öhlén, *Elkraftshandboken, Elkraftsystem 1*. 3 uppl. Stockholm: Liber, 2016
- [10] K.A.Jacobsson, S.Lidström, C.Öhlén, *Elkraftshandboken, Elmaskiner och elektriska drivsystem*. 3 uppl. Stockholm: Liber, 2016
- [11] M.Hemmingsson, D.Karlsson, M.Malm, A.Pettersson, J.Sloth, "Kablar nollföljdsimpedans, Beräkning och mätning av 36 kilovoltskablar", Energiforsk, Rapport nr 2015:101, 2015, 70 sidor.

- [12] ABB, 2018: *Relion Protection and Control, 615 series Technical Manual*
- [13] R.Larsson, Å.Larsson. "ASP, Anslutning av större produktionsanläggningar till elnätet", Elforsk, Rapport nr 06:79, 2006, 63 sidor.
- [14] NKT Cables AB, 2015: *Kraftkabelhandboken*.
- [15] REKA kabel. *Produktkatalog Mellan- och Högspänningskablar*. 2012.
- [16] Nexans Sweden AB. *Kabelboken. Eldistribution – Installation*. 2013.
- [17] Storel, "AXKJ 1X1000 12KV",
[https://www.storel.se/sto/Produktkatalog/Kabel-%2800-05%2C-48-49%29%2F00---Kraftkabel/Kraftkabel-12-kV/AXKJ-12-kV/AXKJ-1X1000-12KV/p/0073690?prevPageNumber=0](https://www.storel.se/sto/Produktkatalog/Kabel-%2800-05%2C-48-49%29%2F00---Kraftkabel%2FKraftkabel-12-kV%2FAXKJ-12-kV%2FAXKJ-1X1000-12KV%2Fp%2F0073690%3FprevPageNumber%3D0)
Publicerad 2018-05-25. Hämtad 2019-05-14.
- [18] A.Alfredsson, R.K.Rajput, *Elkretsteori*, Stockholm: Liber, 2009
- [19] B.Wiklander, "Utredning inför uppgradering av styrsystem på ett pappersbruk med tillhörande kortslutningsberäkningar", Chalmers Tekniska Högskola, examensarbete nr. 66/2011, 2011, 38 sidor.

Bilaga A:

Anläggningsdel	Isolationsnivå växelspänning (kV)	Isolationsnivå Stötspänning (kV)
T53	28	75
Nollpunktsmotstånd	7,2	-
T101	20	-
ABB motor 400 kW	7,2	-
ST53:	-	-
Spänningstransformator	20	60
Ström- transformator	28	75
Effektbrytarskåp	28	75
Brytare	28	75
Kontaktorskåp	20	60
ST53-61:	-	-
Spänningstransformator	20	60
Ström- transformator	28	75
Effektbrytarskåp	28	75
Brytare	28	75
Kontaktorskåp	20	60

Bilaga B:

AXKJ-LT-F 6/10(12)kV 1x1000/35 F4B

Ledare av aluminium, fåtrådig, rund.
Nominell area: 1000 mm².
Diameter: ca 37,5 mm.

Extruderat, inre ledande skikt.

Isolering av PEX, tripelextruderad,
torrvulkaniserad, peroxidförmätad.
Nominell tjocklek: 3,4 mm.
Diameter: ca 46,9 mm.

Extruderat yttre ledande skikt,
Fastsittande.

Beddingband.

Skärm av koppartrådar.
Nominell area: 35mm².

Bandad över skärm med glassfiber band.

Mantel av svart PVC.
Nominell tjocklek: 2,7 mm.

Tekniska data

Elektriska

Nominell spänning $U_D/U/U_m$ (kV)	6/10/12
L I W L (kV)	75
Ledarresistans max, vid 20°C (Ω /km)	0,0291
Skärmresistans (Ω /km)	0,6
Kapacitans (μ F/km)	0,82
Max kortslutningsström i 1 sek	
i ledaren (kA)	94,5
i skärmen (kA)	7

Mekaniska

Minimum bending radius	
vid fast förläggning (m)	0,8
vid installation (m)	0,6
Maximal dragkraft under utdragning	
vid angrep över manteln (kN)	15,6

Termiska

Minimal temperatur vid förläggning (°C)	-10
Maximal ledartemperatur vid drift (°C)	90