

Optimal kabelförläggning för att minimera skärmströmmar i parallella enfaskablar

Ett led i optimeringen av framtidens elnät



Philip Damberg
Isak Shamun

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation
Faculty of Engineering, Lund University

Optimal kabelförläggning för att minimera skärmströmmar i parallella enfaskablar

Ett led i optimeringen av framtidens elnät



**LUNDS
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg

Industriell Elektroteknik och Automation

Examensarbete:

Philip Damberg

Isak Shamun

© Copyright Philip Damberg, Isak Shamun

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Målformulering.....	2
1.4 Problemformulering	2
1.5 Motivering av examensarbetet.....	2
1.6 Avgränsningar	3
2 Teknisk bakgrund.....	4
2.1 Elnätet.....	4
2.2 Kraftkablar	5
3 Metod	11
3.1 Allmänt.....	11
3.2 Beräkningsmodell.....	12
3.3 Implementering.....	15
3.3.1 Impedansmatrisen	15
3.3.2 Grafik	19
3.4 Verifiering.....	21
3.5 Kommunikation och arbetsgång	22
3.6 Källkritik	22
4 Analys.....	24
4.1 Programmering.....	24
4.2 Verifiering.....	25
4.3 Iakttagelser	26
5 Resultat	28
5.1 Planering jämfört med resultat	28
5.2 Räkneexempel.....	32
6 Slutsats.....	36

6.1 Reflektion över etiska aspekter.....	36
6.2 Framtida utvecklingsmöjligheter	37
7 Terminologi	38
8 Källförteckning	39
9 Appendix	41
9.1 Handhavandeinstruktioner	41
9.2 E/R-diagram.....	42

Sammanfattning

Arbetet har handlat om att implementera en beräkningsmodell i ett program som kan användas för att underlätta planering av kabelförläggning i mark. Detta görs på uppdrag av E.ON. Beräkningsmodellen nyttjas på så sätt att strömmar som går i samtliga kabelskärmar beräknas. E.ON är intresserade av hur mycket ström som går individuellt genom kabelskärmarna samt jordåterledaren, det vill säga summan av samtliga skärmströmmar. Programmet utvecklas i programspråket Python och nyttjar biblioteken Tkinter, NumPy och Matplotlib. Tkinter används för användargränssnittet, NumPy för mer krävande beräkningar såsom matrisinvertering och Matplotlib för grafisk representation av installationen. Arbetet resulterade i ett program som är dugligt för planering av kabelförläggning, bland annat platt formation och triangelformation. Det går att simulera en kabelinstallation med både korskopplingar av skärm och skruvning av fasledare där man tar hänsyn till relativt avstånd mellan alla ledare. Programmets beräkningsresultat har för det mesta verifierats och är i enlighet med teorin och verklighetstroga installationsexempel. Det som återstår är att jämföra beräkningsresultat med installationsexempel som har korskopplade skärmar då ett lämpligt exempel inte finns tillgängligt vid detta skede. Utmaningen låg i att finna en lämplig beräkningsmodell för E.ON och deras sätt att installera kablar, samt att utveckla programmet i ett språk som studenterna inte har använt tidigare.

Nyckelord

Skärmströmmar, kabelförläggning, Tkinter, Python, NumPy.

Abstract

This Bachelor's thesis investigates the implementation of a calculation model in the shape of a program that can be used as a planning tool for underground three-phase cable installations. The calculation model in question is used to calculate sheath currents. The company of which the thesis is being done at, E.ON, is interested in how much induced sheath current is in the installation as well as the current in the earth return path, which is the sum of all sheath currents. The program is developed in Python using the library Tkinter for the GUI, Matplotlib for graphical representation of the installation as well as NumPy for mathematics that is not possible in the standard Python library, such as matrix inversion. The thesis resulted in a program suitable for the planning of underground cable installations with different formations,

the default ones being trefoil and flat. The program enables simulation of a cable installation with or without crossbonding sheaths and transpositioning of phase conductors where the distance between each conductor is accounted for. The results from the program calculations have been compared to data from theoretical installations and have been deemed accurate. The simulations that incorporate crossbondings are theoretically correct. As for results that are true to life, since there has been no opportunity for comparison due to lack of data for crossbonded installations, the program remains to be verified in that aspect. The challenge of the thesis lay in finding a suitable calculation model for the way the company installs cables as well as having to learn Python and accompanying libraries from scratch.

Keywords

Sheath current, underground power cables, NumPy, Matplotlib, Tkinter

1 Inledning

Framtidens elnät står inför en rad utmaningar, både vad gäller kapacitet och hur ny infrastruktur installeras. Det är på flera håll inte möjligt eller tillåtet att dra luftledningarna med långa isolationsavstånd, vilket gör att utbyggnad i främst tätbebyggda områden är hänvisad till skärmade markkablar. Att installera markkablar kräver noggrann planering eftersom förläggningssätt samt antalet parallella förband kan ge upphov stora strömmar i kablarnas skärmar, vilka man vill minimera. Stora skärmströmmar leder till värmeutveckling i kablarna, vilket i sin tur minskar överföringsförmågan i ledaren och påskyndar åldrandet av kabeln. En olämplig placering av markkablar kan i värsta fall leda till att kablar helt förstörs genom att isoleringen smälter och ledaren kortsluts mot skärmen. Det finns alltså både tid och pengar att spara på att känna till fenomenen som ger upphov till skärmströmmar och att kunna planera kabelläggningen på ett optimalt sätt från början.

1.1 Bakgrund

Examensarbetet utförs på uppdrag av E.ON Energidistribution AB, ett elbolag som arbetar med energileverans och energiutveckling. E.ON Energidistribution AB ingår i den tyska energikoncernen E.ON SE vars huvudkontor ligger i Essen, Tyskland. Innan 2005 hette det svenska bolaget Sydkraft och namnbytet skedde efter att E.ON SE förvärvade majoriteten av andelar i företaget. Hädanefter benämns det svenska bolaget som E.ON i rapporten. Arbetet syftar till att underlätta för E.ON att planera kabelförläggning i avsikt att motverka skärmströmmar. Det finns information i rapporter och litteratur som delvis behandlar beräkning av skärmströmmar och optimal kabelförläggning för att minimera dessa [1]-[3], Däremot finns det inget examensarbete som sammanställer och implementerar denna information i form av ett beräkningsprogram.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att förstå hur skärmströmmar uppstår samt utveckla ett beräkningsprogram som används för att kunna se hur stora skärmströmmar

olika kabelförläggningssätt ger upphov till. Det förväntade resultatet av arbetet är att E.ON har en prototyp eller färdig lösning som kan användas eller finnas som underlag vid planering av kabelinstallationer.

1.3 Målformulering

Examensarbetet ska undersöka hur man på ett rimligt sätt kan beräkna skärmströmmar då man har kännedom om bland annat kabelns utförande, matningsström och kabelpositioner. Därefter ska ett beräkningsprogram utvecklas, vars beräkningsresultat skall kunna vara till nytta som underlag vid planering av kabelförläggning.

1.4 Problemformulering

Frågeställningar till arbetet, som besvaras under arbetsgången och bidrar till avgränsningar, är följande:

1. Vad ger upphov till skärmströmmar i enfaskablar?
2. Hur påverkar kabelns utförande, faser, jordningssätt med mera hur man minimerar skärmströmmar?
3. Är det genomförbart att utveckla ett beräkningsprogram som kan användas som underlag vid planering av kabelförläggning?

1.5 Motivering av examensarbetet

Examensarbetet valdes för att det behandlar både elenergi och programmering, två områden som vi tycker är intressanta och vill fördjupa oss inom. E.ON vill ha detta examensarbete utfört dels för att lära sig mer om hur man kan simulera kabelförläggning för att minimera skärmströmmar och dels för att kunna använda det i sitt arbete för planering av framtida kabelinstallationer. Vi ser det även som ett relevant område för framtiden då elnätets kapacitet på många håll behöver byggas ut för att bland annat möta behoven från en mer elektrifierad transportsektor. Det är viktigt att kunna göra detta på ett effektivt sätt som inte har negativ påverkan på befintlig infrastruktur.

1.6 Avgränsningar

Programmet utvecklas enbart för att möta E.ON:s behov och ska inte anpassas för andra aktörer eller konsumenter. Programmet skall kunna beräkna hur stora skärmströmmar en kabelinstallation ger upphov till vid ett givet driftfall utifrån inmatade kabeldata, förläggningssätt och driftparametrar.

För att göra en noggrann simulering krävs att programmet även beräknar och beaktar fler parametrar såsom kablarnas skineffekt, deras egen- och ömskapacitans, värmeutbyte med omgivningen, drifttemperatur, isolationsresistans med mera.

I många kablar finns en yttre metallfolie för att bland annat förhindra vattenintrång i kabeln. Denna folie kan också agera ledare, vilket innebär att den har ömsesidiga impedanser gentemot alla andra ledare i en installation. Folieströmmar kommer därför induceras via fasledarna, vilka också ger upphov till värmeutveckling i folien. Beräkning samt påverkan av folieström omfattas inte av detta arbete.

Ett beräkningsprogram som beaktar allt som har påverkan på skärmströmmar hade varit för omfattande för examensarbetet och försummandet av ovan nämnda parametrar har ingen avgörande betydelse för programmets noggrannhet. Programmet begränsas därför till att enbart behandla de parametrar som ger störst bidrag till skärmströmmar.

2 Teknisk bakgrund

2.1 Elnätet

Även om Sveriges befolkning ökar så har den totala energiförbrukningen inte ändrats särskilt mycket på flera årtionden [4]. Mer energieffektiv elektronik och optimering har till stor del kompenserat för en ökad befolkning. Den senaste tidens urbanisering i kombination med ökande användning av eldrivna transporter är något som har börjat ställa nya krav på elnätets kapacitet, inte minst i storstadsregionerna. Eftersom elförbrukningen på många håll väntas öka så görs det jobb med att möta detta kapacitetsbehov och framtidssäkra elnätet.

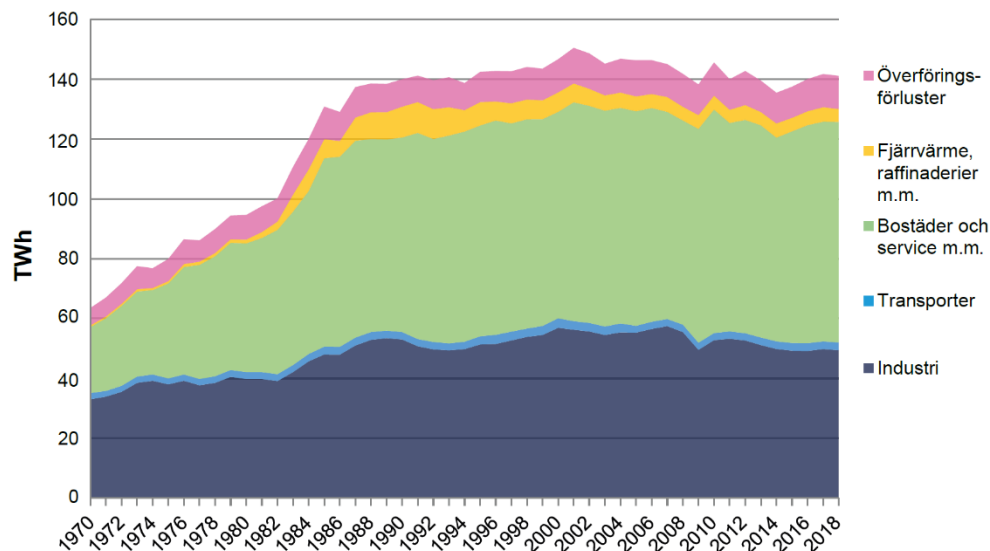


Bild 2.1.1. Elanvändning totalt och per sektor i Sverige 1970 - 2018 [4]

I många framför allt tätbebyggda områden är nya elinstallationer ofta hänvisade till nedgrävda kraftkablar i stället för luftledningar, vilka länge varit normen vid utbyggnad av elnät. Detta är i många fall att föredra då de nedgrävda kablarna är mindre känsliga för väder, sabotage och andra störningar samtidigt som deras installation tar mindre yta i anspråk. I många fall är det heller inte praktiskt möjligt att installera nya luftledningar på grund av befintlig eller planerad bebyggelse.

Tack vare effektiva isoleringsmaterial som korsbunden polyeten (XLPE), kan skärmade markkablar placeras tätare intill varandra än vad som hade varit möjligt för

oskärmade luftkablar, vilka kräver isolationsavstånd på cirka en centimeter per Kilovolt [5]. Ett exempel där markkablar används för högspänning är i Stockholm, där nio kraftledningar på 400kV installeras i en 13,4 km lång tunnel med fem meters diameter mellan Anneberg och Skanstull [6].

Även om fördelarna med skärmade markkablar är många så medför de större och mer tidskrävande jobb vid installation och reparation, vilket kan leda till längre perioder av strömbrott. Det finns också risker med resonansfenomen då luftledningar och markkablar kombineras eftersom de har olika reaktans. Om det uppstår resonans i elnätet så kan för stora strömmar rusa i ledningarna och orsaka skador [7].

Fler småskaliga och lokala elproducenter är också något som påverkar kvaliteten i elnätet och kan leda till eventuella resonansfenomen. Många förnybara energikällor genererar likspänning, vilken måste omvandlas till en växelspanning av samma amplitud, frekvens och fasläge som den på nätet. Detta görs ofta med switchade frekvensomvandlare, vilka kan bidra till oönskade övertoner på nätet. Om dessa högfrekventa övertoner inte tas om hand så kommer de ge ökade magnetiseringsförluster i transformatorer, vilket medför ytterligare förlusteffekt och i värsta fall överhettning [7].

2.2 Kraftkablar

Elektriska kraftkablar innehåller en eller flera kärnor av ett elektriskt ledande material, i regel koppar eller aluminium. Även om ett material är att betrakta som en elektrisk ledare så har alla material en resistans som beror på materialets resistivitet, ledarens tvärsnittarea och längd. Denna resistans ger upphov till en effektutveckling i form av värme, som blir särskilt påtaglig i applikationer där större strömmar överförs enligt $P = R * I^2$.

Utöver resistansen så har elektriska ledare även en induktans. Denna kallas ofta ströinduktans och är en oönskad egenskap i ledare som inte är tänkta att vara induktorer. En ledares induktans kan beräknas utifrån dess radie och alfakoefficient

[1], där alfakoefficienten beror på hur ledaren är uppbyggd avseende antalet kardeler och eventuell ihållighet.

Induktansen ger upphov till en reaktans, X_L , som beror på frekvensen hos den spänning som ledaren matas med enligt $X_L = 2\pi fL$. Då resistansen och induktiva reaktansen för en given frekvens är känd, kan ledarens egenimpedans beräknas som en komplex storhet enligt $Z = R + jX$.

Eftersom strömförande ledare ger upphov till ett cirkulerande magnetflöde så är det viktigt att markkablar är skärmade. På detta sätt löper det magnetiska flödet till största del i kabelskärmen tack vare att skärmens magnetiska permeabilitet är mycket högre än omgivningens.

Utöver det cirkulerande magnetflödet så ger ledare även upphov till ett längsgående magnetflöde som beror på ledarens longitudinella induktans. Eftersom alla fasledare och kabelskärmar i en installation har både egeninduktanser och ömsesidiga induktanser så kommer dessa verka som parallella spolar och inducera spänningar i varandra då det går ström i dem. Den ömsesidiga induktansen kan beräknas utifrån ledarnas medelavstånd från varandra.

Ömsinduktans per meter för två ledare med geometriskt medelavstånd g_{mn} , inom en fiktiv cylinder med radien r_{cov} , kan beräknas med formel 2.1 [1], där μ_0 är den magnetiska permeabiliteten i vakuum: $\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7}$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} * \ln\left(\frac{r_{cov}}{g_{mn}}\right) \text{ H/m} \quad (2.1)$$

Om det däremot är en induktans mellan fasledare och skärm i samma kabel så beräknas denna som en koaxial induktans, vilken baseras på skärmens radie r_s och beräknas enligt formel 2.2 [1].

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} * \ln\left(\frac{r_{cov}}{r_s}\right) \text{ H/m} \quad (2.2)$$

En ledare har i regel sin resistans angiven i sitt datablad, men dess induktiva reaktans behöver beräknas för att kunna ge en komplex egenimpedans. Induktiva

reaktansen beräknas enligt 2.1, men där g_{mn} i stället ges av formel 2.3, där r_m är ledarens radie. [1]

$$g_{mn} = \alpha * r_m \quad (2.3)$$

Alfakoefficienten, α , för en ledare enligt 2.3 kan beräknas från tabell A1 [1] och är i storleksordningen 0,772 till 0,779 för icke-ihåliga, cylindriska ledare med fler än 60st kardeler. För ihåliga ledare, exempelvis kabelskärmar, beräknas alfakoefficienten genom förhållandet mellan dess inner- och ytterdiameter. Denna multipliceras med ledarens radie, r_m , för att ge g_{mn} .

I nedgrävda kabelinstallationer används i regel skärmade kablar, där en skärm ligger utanpå ett isoleringsskikt runt fasledaren. Denna kabelskärm är också att betrakta som en elektrisk ledare, vilken har en egenimpedans och en ömsesidig impedans gentemot alla andra fasledare och skärmar i en installation.

Eftersom olika fasledare och skärmar inte har någon galvanisk kontakt så är alla ömsimpedanser rent reaktiva. Endast egenimpedanserna i fasledare och skärmar har en resistiv komponent.

Då ström går i en fasledare, kommer en spänning induceras i dess skärm, vilket gör att en ström går i skärmen. Denna benämns skärmström och är oönskad då den genom skärmens resistans leder till uppvärmning, alltså effektförlust. I ett kabelförband för trefasöverföring sammankopplas och jordas skärmarna, antingen i en ände eller i båda.

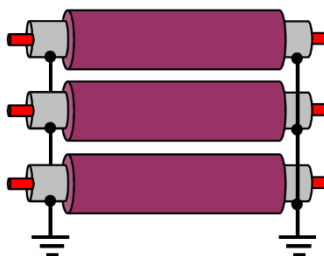


Bild 2.2.1. Tre parallella, skärmade kablar vilka är jordade i båda ändar [2]

Ett sätt att motverka och minimera skärmströmmar är att korskoppla kabelskärmar på olika ställen längs installationssträckan, så att den delas upp i flera sektioner. Detta

innebär att skärmar i en installation byter fasledare mellan sektionerna och får löpa längs flera ledare med olika faslägen.

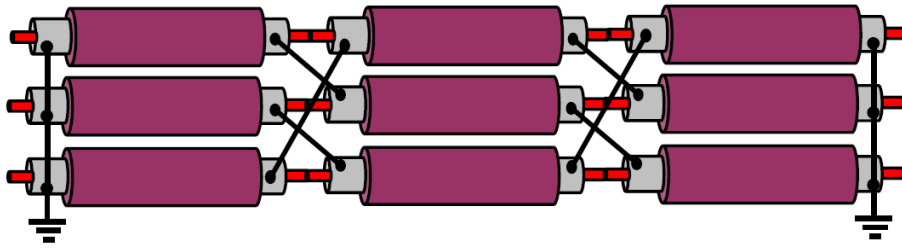


Bild 2.2.2. Tre parallella kablar med sektionvis korskopplade skärmar [2]

Genom välplanerade korskopplingar kan skärmströmmar motverkas och minimeras då de inducerade spänningarna från varje sektion tar ut varandra.

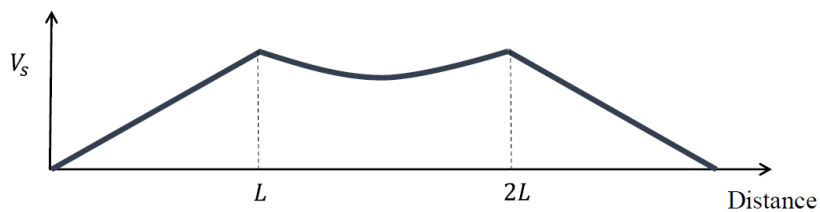


Bild 2.2.3. Bidrag till skärmspänning för tre lika långa, korskopplade sektioner [3]

Korskoppling görs i en korskopplingsbox, vilket i regel är en vattentät och skärmad låda med interna kopplingspunkter.



Bild 2.2.4. Öppnad korskopplingsbox [8]

Det vanligaste sättet att minimera det sammanlagda magnetfältet i en kabelförband är att placera de tre kablarna i en triangelformation, även kallad trefoil. Även platt

formation är vanligt förekommande trots att det inte är lika effektivt som triangelformation när det gäller att jämna ut skärmströmmar.

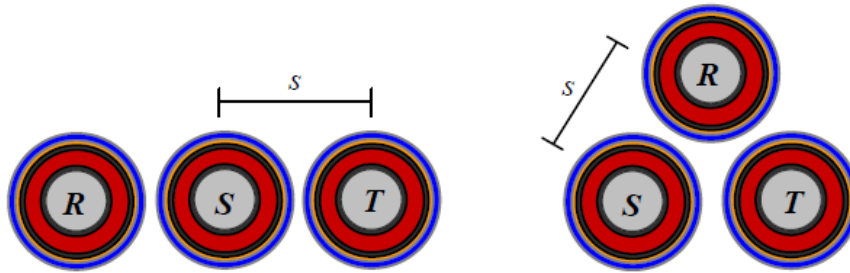


Bild 2.2.5. Platt formation (vänster) och triangelformation (höger) [2]

Eftersom alla kablar i en triangelformation har samma avstånd gentemot varandra, kommer det sammanlagda magnetfältet för formationen till stor del elimineras vid symmetrisk trefasdrift. I en platt formation så har de två yttre ledarna ett längre avstånd till varandra än vad de har till ledaren i mitten, vilket gör att det samverkande magnetfältet blir starkare.

Även fasledarnas ömsesidiga påverkan kan motverkas genom att låta dem skifta plats sektionvis i en installation, så kallad skruvning. Genom att dela upp denna formation i sektioner med olika lägen för fasledare och skärmar så kan den sammanlagda skärmströmmen och därmed effektförlusten för installationen bli mycket liten.

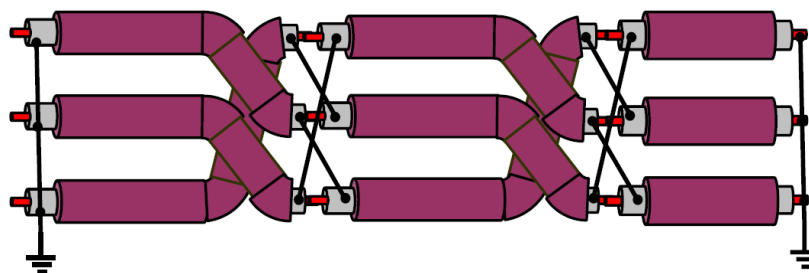


Bild 2.2.6. Kabelförband med sektionvis korskoppling och skruvning [2]

Varje installationsmiljö är unik och det finns inte alltid möjlighet att placera ledarna i triangelformation enligt bild 2.2.5. Vägar och annan infrastruktur kan ställa vissa krav på att ledarna måste ligga i platt formation eller på annat vis under en viss sträcka, vilket behöver beaktas vid planering av kabelförläggning.

Vid kabelförläggning så installeras ofta två eller fler kabelförband i samma utgrävning. Dessa förband brukar placeras med viss separation, men de kommer ändå påverka varandra induktivt. Det arrangemang som ger minst skärmströmmar för ett förband kan alltså se annorlunda ut beroende på intilliggande förband.



Bild 2.2.7. Tvärsnitt av tre nedgrävda kabelförband

Vid korskoppling och skruvning flyttas skärmar och fasledare enbart inom sitt eget kabelförband. Detta innebär att kabelförband tillfälligt kan stängas av för underhåll och felsökning utan att det går några större skärmströmmar som induceras via andra kabelförband.

Det finns alltså mycket att ta i beaktande vid planering av en kabelinstallation och antalet impedanser som behöver beräknas ökar med fyra gånger för varje fördubbling av antalet kabelförband. Ett beräkningsprogram kan därför bidra till att spara mycket tid och ge ett bättre beslutsunderlag då flera förläggningssätt snabbt kan simuleras och jämföras.

Utöver kablars egen- och ömsimpedans finns det andra storheter att ta hänsyn till för att kunna göra en noggrann simulering. Dessa är exempelvis kabelns kapacitans mellan fasledare och skärm, jordens magnetiska permeabilitet och aktuella temperaturer. Dessa storheters bidrag till skärmström är i normala driftfall små för moderna, välisolerade kablar [1].

Vid planering av kabelförläggning räcker det ofta med att basera simuleringar på enbart longitudinella reaktanser, vilket förenklar beräkningarna avsevärt jämfört med om alla tillgängliga storheter skulle beaktas. Om denna simulering visar en hög skärmström så kommer effektutveckling i kabelskärmen göra att andra driftparametrar ändras, vilket ytterligare försvårar beräkningar. Om simuleringen däremot visar på väldigt små skärmströmmar så blir effektutvecklingen inte större än

några få Watt per kilometer, vilket kan avledas till omgivningen utan att det ger någon nämnvärd påverkan på driftparametrar.

3 Metod

3.1 Allmänt

Examensarbetet har efter överenskommelse med E.ON delats upp i tre faser; instudering, programmering samt verifiering.

Instudering har utförts genom att med nyckelord som är relevanta för arbetet söka i LUBsearch. IEEE Xplore med mera. Företaget har även tillgång till dokument från bland annat CIGRÉ, som de kunde bistå med. Information som till exempel kabeldata som används för verifiering och utförande av beräkningar, försågs av E.ON. Då företaget står för en del av informationen och har varit delaktig i samtliga delar av arbetet, har det säkerställts att teori/metoder som hittas i dokument samt programfunktioner passar för företagets val av kablar och förläggningssätt.

I denna fas av arbetet har ett flertal dokument lästs igenom och algoritmer/formler har efter diskussion med handledare bedömts vara antingen användbara eller irrelevanta för arbetet. Efter att ha läst i [1] om tre olika modeller för att beräkna strömmar och spänningar i högspänningskabelsystem, valdes den så kallade "Power frequency impedance model" då den bedömdes ligga på en rimlig nivå för arbetet och att försummelserna som görs i den påverkar slutresultatet ytterst lite.

Den mer omfattande "General impedance model" är riktad mot experter inom området och behandlar jordresistans samt kapacitiva strömmar som har en mindre inverkan på den resulterande skärmströmmen [1]. Den enklare "Simplified power frequency impedance model" försummar skärmströmmar helt [1] och hade därav inte varit lämplig för arbetet.

3.2 Beräkningsmodell

För den valda modellen som framöver benämns PFIM, kan man ställa upp en impedansmatris som består av induktanser och resistanser. Dessa impedanser beräknas med formlerna 2.1–2.3.

Impedansmatrisen är en del av ekvationen 3.1 som ställs upp för spänningsfall över ledare per meter, där $[Z]$ är impedansmatris och $[I]$ är strömmatris [9].

$$[\Delta V] = [Z] * [I] \quad (3.1)$$

Impedansmatrisen i bild 3.2.1 består av ömsimpedanser och egenimpedanser, det vill säga alla impedanser som förekommer i en sektion. Fasledare betecknas med R , S och T medan kabelskärmar betecknas med s_n . Index anger specifik skärm eller fasledare i respektive kabelförband. Bindestrecket agerar riktningspil och visar vilka fasledare eller kabelskärmar impedansen agerar mellan, exempelvis Z_{s3-s5} , som betecknar ömsimpedansen från skärm 3 till skärm 5.

$$\begin{bmatrix} Z_{R0-R0} & Z_{S0-R0} & Z_{T0-R0} & Z_{R1-R0} & Z_{S1-R0} & Z_{T1-R0} & Z_{s0-R0} & Z_{s1-R0} & Z_{s2-R0} & Z_{s3-R0} & Z_{s4-R0} & Z_{s5-R0} \\ Z_{R0-S0} & Z_{S0-S0} & Z_{T0-S0} & Z_{R1-S0} & Z_{S1-S0} & Z_{T1-S0} & Z_{s0-S0} & Z_{s1-S0} & Z_{s2-S0} & Z_{s3-S0} & Z_{s4-S0} & Z_{s5-S0} \\ Z_{R0-T0} & Z_{S0-T0} & Z_{T0-T0} & Z_{R1-T0} & Z_{S1-T0} & Z_{T1-T0} & Z_{s0-T0} & Z_{s1-T0} & Z_{s2-T0} & Z_{s3-T0} & Z_{s4-T0} & Z_{s5-T0} \\ Z_{R0-R1} & Z_{S0-R1} & Z_{T0-R1} & Z_{R1-R1} & Z_{S1-R1} & Z_{T1-R1} & Z_{s0-R1} & Z_{s1-R1} & Z_{s2-R1} & Z_{s3-R1} & Z_{s4-R1} & Z_{s5-R1} \\ Z_{R0-S1} & Z_{S0-S1} & Z_{T0-S1} & Z_{R1-S1} & Z_{S1-S1} & Z_{T1-S1} & Z_{s0-S1} & Z_{s1-S1} & Z_{s2-S1} & Z_{s3-S1} & Z_{s4-S1} & Z_{s5-S1} \\ Z_{R0-T1} & Z_{S0-T1} & Z_{T0-T1} & Z_{R1-T1} & Z_{S1-T1} & Z_{T1-T1} & Z_{s0-T1} & Z_{s1-T1} & Z_{s2-T1} & Z_{s3-T1} & Z_{s4-T1} & Z_{s5-T1} \\ Z_{R0-s0} & Z_{S0-s0} & Z_{T0-s0} & Z_{R1-s0} & Z_{S1-s0} & Z_{T1-s0} & Z_{s0-s0} & Z_{s1-s0} & Z_{s2-s0} & Z_{s3-s0} & Z_{s4-s0} & Z_{s5-s0} \\ Z_{R0-s1} & Z_{S0-s1} & Z_{T0-s1} & Z_{R1-s1} & Z_{S1-s1} & Z_{T1-s1} & Z_{s0-s1} & Z_{s1-s1} & Z_{s2-s1} & Z_{s3-s1} & Z_{s4-s1} & Z_{s5-s1} \\ Z_{R0-s2} & Z_{S0-s2} & Z_{T0-s2} & Z_{R1-s2} & Z_{S1-s2} & Z_{T1-s2} & Z_{s0-s2} & Z_{s1-s2} & Z_{s2-s2} & Z_{s3-s2} & Z_{s4-s2} & Z_{s5-s2} \\ Z_{R0-s3} & Z_{S0-s3} & Z_{T0-s3} & Z_{R1-s3} & Z_{S1-s3} & Z_{T1-s3} & Z_{s0-s3} & Z_{s1-s3} & Z_{s2-s3} & Z_{s3-s3} & Z_{s4-s3} & Z_{s5-s3} \\ Z_{R0-s4} & Z_{S0-s4} & Z_{T0-s4} & Z_{R1-s4} & Z_{S1-s4} & Z_{T1-s4} & Z_{s0-s4} & Z_{s1-s4} & Z_{s2-s4} & Z_{s3-s4} & Z_{s4-s4} & Z_{s5-s4} \\ Z_{R0-s5} & Z_{S0-s5} & Z_{T0-s5} & Z_{R1-s5} & Z_{S1-s5} & Z_{T1-s5} & Z_{s0-s5} & Z_{s1-s5} & Z_{s2-s5} & Z_{s3-s5} & Z_{s4-s5} & Z_{s5-s5} \end{bmatrix}$$

Bild 3.2.1. Impedansmatris för två parallella förband med skärmade kablar

Matrisens dimensioner är sex gånger antalet kabelförband i en installation och

således är antalet strömmar och spänningsfall i skärmarna tre gånger antalet förband då ett förband innehåller tre skärmar. En impedansmatris beräknas för varje sektion och dessa summeras sedan för att beräkna de sammanlagda skärmströmmarna i installationen utifrån impedansen.

Om endast spänningsfallen i skärmarna beaktas, kan Ekvation 3.1 ställas upp med den summerade impedansmatrisen enligt bild 3.2.2.

Impedansmatrisen i bild 3.2.1 delas upp i lika stora delmatriser, där man nyttjar den nedre vänstra och nedre högra alternativt övre högra och nedre högra delmatrisen. Resultatet påverkas inte av valet som görs eftersom de nedre vänstra och övre högra delmatriserna, som båda innehåller impedanser mellan skärm och fasledare, är ekvivalenta fast med olika index. De valda matriserna sätts sedan ihop till en och om endast spänningsfallen i skärmarna beaktas, kan matrisekvationen sedan ställas upp med hjälp av ekvation 3.1 enligt bild 3.2.2.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{s0} \\ \Delta V_{s1} \\ \Delta V_{s2} \\ \Delta V_{s3} \\ \Delta V_{s4} \\ \Delta V_{s5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{R0-s0} & Z_{S0-s0} & Z_{T0-s0} & Z_{R1-s0} & Z_{S1-s0} & Z_{T1-s0} & Z_{s0-s0} & Z_{s1-s0} & Z_{s2-s0} & Z_{s3-s0} & Z_{s4-s0} & Z_{s5-s0} \\ Z_{R0-s1} & Z_{S0-s1} & Z_{T0-s1} & Z_{R1-s1} & Z_{S1-s1} & Z_{T1-s1} & Z_{s0-s1} & Z_{s1-s1} & Z_{s2-s1} & Z_{s3-s1} & Z_{s4-s1} & Z_{s5-s1} \\ Z_{R0-s2} & Z_{S0-s2} & Z_{T0-s2} & Z_{R1-s2} & Z_{S1-s2} & Z_{T1-s2} & Z_{s0-s2} & Z_{s1-s2} & Z_{s2-s2} & Z_{s3-s2} & Z_{s4-s2} & Z_{s5-s2} \\ Z_{R0-s3} & Z_{S0-s3} & Z_{T0-s3} & Z_{R1-s3} & Z_{S1-s3} & Z_{T1-s3} & Z_{s0-s3} & Z_{s1-s3} & Z_{s2-s3} & Z_{s3-s3} & Z_{s4-s3} & Z_{s5-s3} \\ Z_{R0-s4} & Z_{S0-s4} & Z_{T0-s4} & Z_{R1-s4} & Z_{S1-s4} & Z_{T1-s4} & Z_{s0-s4} & Z_{s1-s4} & Z_{s2-s4} & Z_{s3-s4} & Z_{s4-s4} & Z_{s5-s4} \\ Z_{R0-s5} & Z_{S0-s5} & Z_{T0-s5} & Z_{R1-s5} & Z_{S1-s5} & Z_{T1-s5} & Z_{s0-s5} & Z_{s1-s5} & Z_{s2-s5} & Z_{s3-s5} & Z_{s4-s5} & Z_{s5-s5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{R0} \\ I_{S0} \\ I_{T0} \\ I_{R1} \\ I_{S1} \\ I_{T1} \\ I_{s0} \\ I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \\ I_{s4} \\ I_{s5} \end{bmatrix}$$

Bild 3.2.2. Härledning steg 1 för skärmströmsberäkning [9]

Impedansmatrisen och strömmatrisen från Bild 3.2.2 delas upp för att sära på fasledar- och skärmströmmar enligt bild 3.2.3. De impedanser som verkar från fasledare till skärm multipliceras med fasströmmarna och de impedanser som verkar mellan skärmar multipliceras med skärmströmmarna.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{s0} \\ \Delta V_{s1} \\ \Delta V_{s2} \\ \Delta V_{s3} \\ \Delta V_{s4} \\ \Delta V_{s5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{s0-s0} & Z_{s1-s0} & Z_{s2-s0} & Z_{s3-s0} & Z_{s4-s0} & Z_{s5-s0} \\ Z_{s0-s1} & Z_{s1-s1} & Z_{s2-s1} & Z_{s3-s1} & Z_{s4-s1} & Z_{s5-s1} \\ Z_{s0-s2} & Z_{s1-s2} & Z_{s2-s2} & Z_{s3-s2} & Z_{s4-s2} & Z_{s5-s2} \\ Z_{s0-s3} & Z_{s1-s3} & Z_{s2-s3} & Z_{s3-s3} & Z_{s4-s3} & Z_{s5-s3} \\ Z_{s0-s4} & Z_{s1-s4} & Z_{s2-s4} & Z_{s3-s4} & Z_{s4-s4} & Z_{s5-s4} \\ Z_{s0-s5} & Z_{s1-s5} & Z_{s2-s5} & Z_{s3-s5} & Z_{s4-s5} & Z_{s5-s5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s0} \\ I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \\ I_{s4} \\ I_{s5} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{R0-s0} & Z_{S0-s0} & Z_{T0-s0} & Z_{R1-s0} & Z_{S1-s0} & Z_{T1-s0} \\ Z_{R0-s1} & Z_{S0-s1} & Z_{T0-s1} & Z_{R1-s1} & Z_{S1-s1} & Z_{T1-s1} \\ Z_{R0-s2} & Z_{S0-s2} & Z_{T0-s2} & Z_{R1-s2} & Z_{S1-s2} & Z_{T1-s2} \\ Z_{R0-s3} & Z_{S0-s3} & Z_{T0-s3} & Z_{R1-s3} & Z_{S1-s3} & Z_{T1-s3} \\ Z_{R0-s4} & Z_{S0-s4} & Z_{T0-s4} & Z_{R1-s4} & Z_{S1-s4} & Z_{T1-s4} \\ Z_{R0-s5} & Z_{S0-s5} & Z_{T0-s5} & Z_{R1-s5} & Z_{S1-s5} & Z_{T1-s5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{R0} \\ I_{S0} \\ I_{T0} \\ I_{R1} \\ I_{S1} \\ I_{T1} \end{bmatrix}$$

Bild 3.2.3. Härledning steg 2 för skärmströmsberäkning [9]

Skärmströmmarna återleds antingen genom skärmarna eller jorden. Om det antas att skärmströmmen återleds genom en gemensam jord så kan spänningsfallen mellan skärmarna betraktas vara ekvivalenta med produkten av jordåterledarresistansen och summan av samtliga strömmar enligt ekvation 3.2 [9].

$$\Delta V = -r_g (I_{1sa} + I_{1sb} + I_{1sc} + I_{2sa} + I_{2sb} + I_{2sc}) \quad (3.2)$$

Jordåterledarresistansen, r_g , kan representeras schematiskt som en resistor mellan skärmarnas sammankopplade ändar genom jord. Övergångsresistanserna mellan kabelförband och jord representeras som r_{erp1} och r_{erp2} .

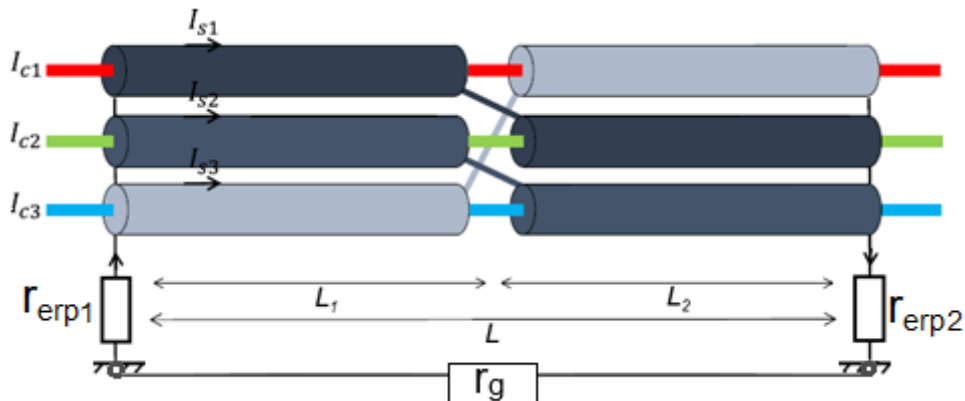


Bild 3.2.4. Kabelförband med jordåterledare och korskoppling av skärmar [3]

Om det antas att spänningsfallen över skärmarna är ekvivalenta med spänningsfallet över jordåterledaren samt att r_{erp1} och r_{erp2} försummas, kan ekvation 3.2 skrivas om enligt bild 3.2.5.

$$\begin{bmatrix} Z_{s0-s0} & Z_{s1-s0} & Z_{s2-s0} & Z_{s3-s0} & Z_{s4-s0} & Z_{s5-s0} & -1 \\ Z_{s0-s1} & Z_{s1-s1} & Z_{s2-s1} & Z_{s3-s1} & Z_{s4-s1} & Z_{s5-s1} & -1 \\ Z_{s0-s2} & Z_{s1-s2} & Z_{s2-s2} & Z_{s3-s2} & Z_{s4-s2} & Z_{s5-s2} & -1 \\ Z_{s0-s3} & Z_{s1-s3} & Z_{s2-s3} & Z_{s3-s3} & Z_{s4-s3} & Z_{s5-s3} & -1 \\ Z_{s0-s4} & Z_{s1-s4} & Z_{s2-s4} & Z_{s3-s4} & Z_{s4-s4} & Z_{s5-s4} & -1 \\ Z_{s0-s5} & Z_{s1-s5} & Z_{s2-s5} & Z_{s3-s5} & Z_{s4-s5} & Z_{s5-s5} & -1 \\ r_g & r_g & r_g & r_g & r_g & r_g & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s0} \\ I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \\ I_{s4} \\ I_{s5} \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{R0-s0} & Z_{S0-s0} & Z_{T0-s0} & Z_{R1-s0} & Z_{S1-s0} & Z_{T1-s0} \\ Z_{R0-s1} & Z_{S0-s1} & Z_{T0-s1} & Z_{R1-s1} & Z_{S1-s1} & Z_{T1-s1} \\ Z_{R0-s2} & Z_{S0-s2} & Z_{T0-s2} & Z_{R1-s2} & Z_{S1-s2} & Z_{T1-s2} \\ Z_{R0-s3} & Z_{S0-s3} & Z_{T0-s3} & Z_{R1-s3} & Z_{S1-s3} & Z_{T1-s3} \\ Z_{R0-s4} & Z_{S0-s4} & Z_{T0-s4} & Z_{R1-s4} & Z_{S1-s4} & Z_{T1-s4} \\ Z_{R0-s5} & Z_{S0-s5} & Z_{T0-s5} & Z_{R1-s5} & Z_{S1-s5} & Z_{T1-s5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{R0} \\ I_{S0} \\ I_{T0} \\ I_{R1} \\ I_{S1} \\ I_{T1} \end{bmatrix}$$

Bild 3.2.5. Härledning steg 3 för skärmströmsberäkning [9]

Den sökta skärmströmsmatrisen med spänningsfallen över skärmarna som sista element nedtill kan därefter brytas ut enligt bild 3.2.6.

$$\begin{bmatrix} I_{s0} \\ I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \\ I_{s4} \\ I_{s5} \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{s0-s0} & Z_{s1-s0} & Z_{s2-s0} & Z_{s3-s0} & Z_{s4-s0} & Z_{s5-s0} & -1 \\ Z_{s0-s1} & Z_{s1-s1} & Z_{s2-s1} & Z_{s3-s1} & Z_{s4-s1} & Z_{s5-s1} & -1 \\ Z_{s0-s2} & Z_{s1-s2} & Z_{s2-s2} & Z_{s3-s2} & Z_{s4-s2} & Z_{s5-s2} & -1 \\ Z_{s0-s3} & Z_{s1-s3} & Z_{s2-s3} & Z_{s3-s3} & Z_{s4-s3} & Z_{s5-s3} & -1 \\ Z_{s0-s4} & Z_{s1-s4} & Z_{s2-s4} & Z_{s3-s4} & Z_{s4-s4} & Z_{s5-s4} & -1 \\ Z_{s0-s5} & Z_{s1-s5} & Z_{s2-s5} & Z_{s3-s5} & Z_{s4-s5} & Z_{s5-s5} & -1 \\ r_g & r_g & r_g & r_g & r_g & r_g & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{R0-s0} & Z_{S0-s0} & Z_{T0-s0} & Z_{R1-s0} & Z_{S1-s0} & Z_{T1-s0} \\ Z_{R0-s1} & Z_{S0-s1} & Z_{T0-s1} & Z_{R1-s1} & Z_{S1-s1} & Z_{T1-s1} \\ Z_{R0-s2} & Z_{S0-s2} & Z_{T0-s2} & Z_{R1-s2} & Z_{S1-s2} & Z_{T1-s2} \\ Z_{R0-s3} & Z_{S0-s3} & Z_{T0-s3} & Z_{R1-s3} & Z_{S1-s3} & Z_{T1-s3} \\ Z_{R0-s4} & Z_{S0-s4} & Z_{T0-s4} & Z_{R1-s4} & Z_{S1-s4} & Z_{T1-s4} \\ Z_{R0-s5} & Z_{S0-s5} & Z_{T0-s5} & Z_{R1-s5} & Z_{S1-s5} & Z_{T1-s5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{R0} \\ I_{S0} \\ I_{T0} \\ I_{R1} \\ I_{S1} \\ I_{T1} \end{bmatrix}$$

Bild 3.2.6. Härledning steg 4 för skärmströmsberäkning [9]

3.3 Implementering

3.3.1 Impedansmatrisen

Impedansmatrisen byggs upp i Python med biblioteket NumPy [10] genom att först skapa en komplex matris av nollelement, vars rad- och kolumntal är sex gånger antalet kabelförband. Detta eftersom varje förband innehåller tre fasledare med varsin skärm, vilket ger sex ledare totalt.

Matrisen är strukturerad så att kolumnindex anger vilken ledare impedansen beräknas *från* och radindex anger vilken ledare impedansen beräknas *till*. Vid fler än ett förband indexeras först samtliga fasledare och därefter skärmarna. I en impedansmatris med två förband har en rad följande ordning på *frånimpedans*

representerade i sina kolumner: $R_1, S_1, T_1, R_2, S_2, T_2, s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$, där R_n, S_n, T_n är fasledare och s_n är kabelskärmar. Motsvarande *tillimpedans* representeras i rader.

Med denna struktur på impedansmatrisen så kommer alla element med samma rad- och kolumnindex, alltså diagonalen, representera egenimpedanser, medan alla övriga element är olika typer av ömsimpedanser. Genom att dela matrisen på mitten både lodrätt och vågrätt så ges fyra lika stora delmatriser, vilka innehåller olika impedanstyper.

För att kunna dela impedansmatrisen på mitten används en hjälpvariabel: $mid = circcount*3 - 0.5$, där *circcount* anger antalet kabelförband. $circcount*3$ subtraheras med 0.5 eftersom rad- och kolumnindex anges i heltal och den faktiska mittpunkten, som representeras av *mid*, kommer vara ett decimaltal då matrisen alltid har jämnt antal element.

Indexeringen i Pythons listor och arrayer utgår från 0, vilket gör att det största index kommer ha värdet $n-1$, där n är antalet element i listan eller arrayen. Mittpunkten i en lista eller array är således $n/2 - 0.5$. I fallet med hjälpvariabeln *mid* så representeras n av $circcount*6$, eftersom det totala antalet ledare är sex gånger antalet kabelförband.

Den delmatris vars rad- och kolumnindex är mindre än *mid* representerar egen- och ömsimpedanser för fasledare. Den delmatris vars rad- och kolumnindex är större än *mid* representerar egen- och ömsimpedanser för kabelskärmar. De två resterande delmatriserna, (rad- eller kolumnindex större än *mid*, men inte båda), representerar ömsimpedanser från fasledare till skärm och vice versa. Ömsimpedanserna mellan fasledare och skärm måste vid beräkning även ta hänsyn till om skärmen är monterad runt fasledaren i den aktuella sektionen.

Z_{R0-R0}	Z_{S0-R0}	Z_{T0-R0}	Z_{R1-R0}	Z_{S1-R0}	Z_{T1-R0}	Z_{s0-R0}	Z_{s1-R0}	Z_{s2-R0}	Z_{s3-R0}	Z_{s4-R0}	Z_{s5-R0}
Z_{R0-S0}	Z_{S0-S0}	Z_{T0-S0}	Z_{R1-S0}	Z_{S1-S0}	Z_{T1-S0}	Z_{s0-S0}	Z_{s1-S0}	Z_{s2-S0}	Z_{s3-S0}	Z_{s4-S0}	Z_{s5-S0}
Z_{R0-T0}	Z_{S0-T0}	Z_{T0-T0}	Z_{R1-T0}	Z_{S1-T0}	Z_{T1-T0}	Z_{s0-T0}	Z_{s1-T0}	Z_{s2-T0}	Z_{s3-T0}	Z_{s4-T0}	Z_{s5-T0}
Z_{R0-R1}	Z_{S0-R1}	Z_{T0-R1}	Z_{R1-R1}	Z_{S1-R1}	Z_{T1-R1}	Z_{s0-R1}	Z_{s1-R1}	Z_{s2-R1}	Z_{s3-R1}	Z_{s4-R1}	Z_{s5-R1}
Z_{R0-S1}	Z_{S0-S1}	Z_{T0-S1}	Z_{R1-S1}	Z_{S1-S1}	Z_{T1-S1}	Z_{s0-S1}	Z_{s1-S1}	Z_{s2-S1}	Z_{s3-S1}	Z_{s4-S1}	Z_{s5-S1}
Z_{R0-T1}	Z_{S0-T1}	Z_{T0-T1}	Z_{R1-T1}	Z_{S1-T1}	Z_{T1-T1}	Z_{s0-T1}	Z_{s1-T1}	Z_{s2-T1}	Z_{s3-T1}	Z_{s4-T1}	Z_{s5-T1}
Z_{R0-s0}	Z_{S0-s0}	Z_{T0-s0}	Z_{R1-s0}	Z_{S1-s0}	Z_{T1-s0}	Z_{s0-s0}	Z_{s1-s0}	Z_{s2-s0}	Z_{s3-s0}	Z_{s4-s0}	Z_{s5-s0}
Z_{R0-s1}	Z_{S0-s1}	Z_{T0-s1}	Z_{R1-s1}	Z_{S1-s1}	Z_{T1-s1}	Z_{s0-s1}	Z_{s1-s1}	Z_{s2-s1}	Z_{s3-s1}	Z_{s4-s1}	Z_{s5-s1}
Z_{R0-s2}	Z_{S0-s2}	Z_{T0-s2}	Z_{R1-s2}	Z_{S1-s2}	Z_{T1-s2}	Z_{s0-s2}	Z_{s1-s2}	Z_{s2-s2}	Z_{s3-s2}	Z_{s4-s2}	Z_{s5-s2}
Z_{R0-s3}	Z_{S0-s3}	Z_{T0-s3}	Z_{R1-s3}	Z_{S1-s3}	Z_{T1-s3}	Z_{s0-s3}	Z_{s1-s3}	Z_{s2-s3}	Z_{s3-s3}	Z_{s4-s3}	Z_{s5-s3}
Z_{R0-s4}	Z_{S0-s4}	Z_{T0-s4}	Z_{R1-s4}	Z_{S1-s4}	Z_{T1-s4}	Z_{s0-s4}	Z_{s1-s4}	Z_{s2-s4}	Z_{s3-s4}	Z_{s4-s4}	Z_{s5-s4}
Z_{R0-s5}	Z_{S0-s5}	Z_{T0-s5}	Z_{R1-s5}	Z_{S1-s5}	Z_{T1-s5}	Z_{s0-s5}	Z_{s1-s5}	Z_{s2-s5}	Z_{s3-s5}	Z_{s4-s5}	Z_{s5-s5}

Bild 3.3.1.1 Impedansmatrix för två kabelförband med markerade delmatriser

För att programmet skall kunna hantera olika stora matriser och identifiera rätt fasledare och skärm baserat på index så används två hjälpvariabler för rader respektive kolumner. Dessa översätter rad- och kolumnindex till fasledar- eller skärmnummer och vilket kabelförband den tillhör.

Eftersom ett kabelförband alltid innehåller tre ledare och tre skärmar så kan ett elements förbandstillhörighet avgöras med hjälpvariabeln $fromCircuit = ((int)(c/3)) \bmod circcount$, där c anger kolumnindex och $circcount$ antalet förband. I det fall två förband används så kommer $fromCircuit$ ändras enligt: 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1... då c ökar. Motsvarande formel används för att beräkna $toCircuit$ baserat på radindex.

För att identifiera en fasledare eller skärm så behöver också dess nummer i förbandets fasledar- eller skärmlista avgöras. Detta löses hjälpvariabeln $toWire = c \bmod 3$, där c anger kolumnindex. På detta sätt kommer $toWire$ ändras enligt 0, 1, 2, 0, 1, 2... då c ökar.

Genom att undersöka vilken delmatrix ett element tillhör så kan programmet avgöra vilken typ av impedans som skall beräknas. När impedanstypen är bestämd så anropas den beräkningsmetod som är aktuell för impedanstypen. Vad gäller

ömsimpedanser så hämtas koordinater från de två aktuella ledarna och avståndet beräknas av programmetoden *getDistance*.

Det är viktigt för programmet att det framgår vad impedansen utgår från och till vad, detta eftersom metoden för att hämta position fungerar olika för fasledare och skärm. Varje fasledare har koordinater som anger dess placering i tvärsnittet medan skärmar har en tilldelad fasledare med vilken den delar koordinater. Programmet behöver således hämta skärmkoordinaterna från skärmens tilldelade fasledare.

Om *getDistance* ger samma koordinater för fasledare och skärm så är det för att skärmen löper runt den aktuella ledaren i sektionen och ömsimpedansen skall då behandlas som en koaxial ömsimpedans, vilket beräknas i en separat metod som utgår från skärmens diameter och beräknar impedansen enligt formel 2.2. För egenimpedanser används inmatade kabeldata.

Impedanserna per enhetslängd läggs in i matrisen på komplex form enligt $Z = R + jX$ Ω/m , vilket sedan multipliceras med sektionens längd för att erhålla den totala impedansmatrisen för sektionen. Då programmet har beräknat impedansmatriserna för samtliga sektioner så summeras dessa till en total impedansmatris, Z_{tot} , för hela installationen.

Då en total impedansmatris har beräknats så kan dess delmatriser användas till att räkna ut olika storheter. För att beräkna skärmströmmen utifrån impedansmatrisen och fasströmmarna används NumPy, vilket erbjuder de metoder som behövs för att kunna invertera och multiplicera matriser enligt bild 3.2.5.

Delmatrisen med enbart skärmimpedanser (nedre högra) utökas nedtill med jordåterledarens resistans, r_g , högst till med -1 och elementet längst ned till höger sätts till 1. Modifieringen av delmatrisen görs genom programmetoden *getSSmatrixMod*.

Delmatrisen med impedanser från fasledare till skärmar (nedre vänstra) utökas nedtill med en rad nollor genom programmetoden *getWSmatrix*. Dessa delmatrisermetoder

fungerar oberoende av storlek på totala impedansmatrisen då de tar antalet förband i beaktning.

På grund av matrisernas rad- och kolumnantal så behöver beräkningen på bild 3.2.5 göras från höger till vänster. Matrisen med samtliga fasströmmar multipliceras därför med den modifierade delmatrisen från *getWSmatrix*. Den resulterande matrisen får samma format som fasströmmatrisen, fast med ett ytterligare nollelement nedtill. Denna multipliceras slutligen med inversen av matrisen som erhöles från *getSSmatrixMod*, vilket ger en matris med samtliga skärmströmmar samt ΔV .

3.3.2 Grafik

Användargränssnittet utvecklades i Tkinter[11] som är Pythons standard-bibliotek för GUI. Användargränssnittet, som hädanefter benämns GUI, planerades med hjälp av Balsamiq Wireframe [12] och planeringen kan ses i bilderna 3.3.2.1 och 3.3.2.2.

Det första fönstret som finns i Bild 3.3.2.1 är till för inmatning av system- och kabelparametrar. När användaren har matat in alla parametrar och trycker på "BEKRÄFTA"-knappen öppnas fönstret "Sektionskonfiguration", som tillsammans med resterande fönster finns i bild 3.3.2.2.

I detta fönster går det att välja sektion via flikar och komma åt dess förbandskonfigurationer, ändra sektionslängd samt få samtliga fasledare representerade i ett koordinatsystem om användaren trycker på "Visa tvärsnitt"-knappen. I ett tvärsnittsfönster får varje fasledare i ett kabelförband en unik färg utifrån dess fasläge. Detta ska göras i Matplotlib[13] som är ett Python-bibliotek för grafisk representation av data, figurer med mera.

Vid knapptryckning på en av dessa "Förband"-knappar, öppnas ytterligare ett fönster, "Förbandskonfiguration". I detta fönster kan baskoordinater för ett förband anges, det vill säga mittpunkten mellan de två fasledarna i botten om det är en triangelformation eller mittledaren i förbandet om det är en platt formation. Om baskoordinater och ledaravstånd anges samt att ett önskat förläggningssätt väljs med knapp, sparas

ledarpositioner enligt förläggningssättet och ledaravståndet i respektive rad för faserna R, S och T i form av X och Y-koordinater.

Därefter är det lämpligt att korskoppla skärmar, vilket görs genom att bocka kryssrutor för skärmen man vill ha på respektive fasledare. I efterföljande sektion för samma förband kan skärmarna lämpligen byta plats genom att man ger fasledaren en annan skärm än den i föregående sektion. I planeringsfasen av arbetet benämndes kabelförband som "krets".

Om så önskas kan varje enskild ledares koordinater redigeras genom att ändra i ledarens X- och Y-rutor och sparas genom att trycka på knappen "Spara krets", precis som man gör för alla inmatningar i fönstret. Det går även att skruva på fasledarna, det vill säga att byta plats på dem. Detta görs med en knapptryckning på antingen "Växla R och S"-knappen eller "Växla R och T"-knappen. Importering av föregående kabelförbands fasledarkoordinater samt korskoppling ska kunna göras för en kabelinstallation med mer än en sektion och endast från och med sektion två. Detta görs via knapptryckning på knappen "Importera föregående inmatning" i en förbandskonfiguration.

I fliken översikt ges antal sektioner och kretsar enligt det som angavs i systemfönstret samt total längd för installationen. Trycker användaren på "Beräkna"-knappen, öppnas ett fönster med en tabell som har två kolumner och rader enligt antalet fasledare. I första kolumnen anges skärmströmsindex enligt exempelvis I1s1 som anger strömmen i skärm 1 för krets 1 och så vidare. I andra kolumnen anges värdet för respektive skärmströmsindex och längst ner i fönstret finns medelvärdet av skärmströmmarna.

System

<p>Systemdata</p> <p><input type="text" value="Linjeström[A]"/></p> <p><input type="text" value="Antal sektioner"/></p> <p><input type="text" value="Antal kretsar"/></p> <p><input type="button" value="BEKRÄFTA"/></p>	<p>Kabeldata</p> <p><input type="text" value="Alfakoefficient"/></p> <p><input type="text" value="Skärmdiameter[mm]"/></p> <p><input type="text" value="Nominell skärmarea[mm^2]"/></p> <p><input type="text" value="Skärmens inre radie[mm]"/></p> <p><input type="text" value="Skärmens yttre radie[mm]"/></p> <p><input type="text" value="Kabelns diameter[mm]"/></p> <p><input type="text" value="Ledarradie[mm]"/></p> <p><input type="text" value="Ledarresistans[ohm/km]"/></p> <p><input type="text" value="Skärmresistans[ohm/km]"/></p>
---	---

Bild 3.3.2.1 Fönster för inmatning av system- och kabelparametrar.

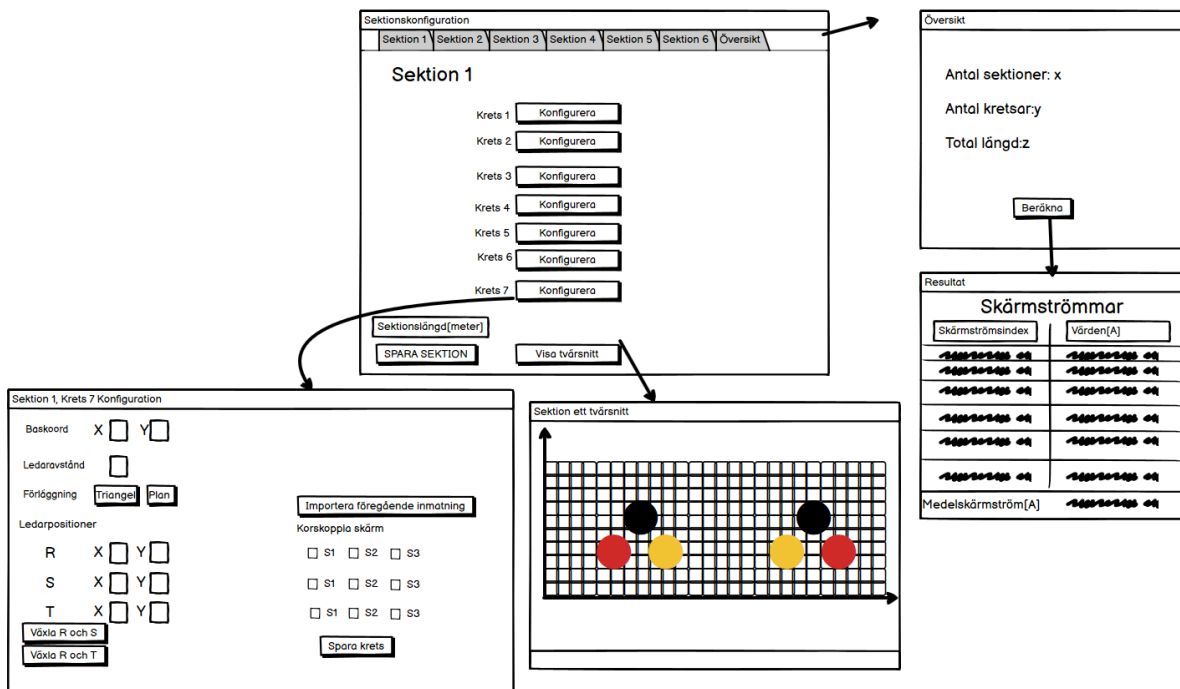


Bild 3.3.2.2 Resterande fönster i användargränssnittet.

3.4 Verifiering

Verifiering av beräkningar påbörjades efter framsteg med utvecklingen av beräkningsmodellen. Ett exempel, som i rapporten benämns *exempel 1*, som erhöles

från E.ON användes för detta ändamål. I *exempel 1* har beräkningar utförts för att uppskatta skärmströmmar som går i en viss kabelinstallation.

Parametrar från *exempel 1* användes som indata till beräkningsfunktionerna.

Exemplet i fråga behandlar en kabelinstallation av en sektion med tre förband.

Resultatet från beräkningsfunktionerna stämde inte överens med det i *exempel 1*.

Genom att tillsammans med handledare från företaget jämföra med ett annat exempel som i rapporten benämns *exempel 2*, och behandlar samma installation, utröntes att beräkningsfunktionerna var korrekta. Det föregående exemplet som resultatet jämfördes med visade sig vara felaktigt då resulterande skärmströmmar i det var orimligt låga enligt handledaren. Efter verifiering av beräkningsfunktionerna påbörjades utvecklingen av programmets användargränssnitt.

3.5 Kommunikation och arbetsgång

Kommunikation mellan studenterna har skett via röst- och chattprogrammet Discord, där det finns möjlighet för användare att dela sin skärm i realtid, skicka bilder med mera. Skärmdelningen i synnerhet har varit ett användbart verktyg för samarbete i programmering såväl som litteraturstudier.

Mellan studenterna och representanter från företaget samt universitetet har Zoom och Microsoft Teams använts, där skärmdelning och chatt även finns tillgängligt, vilket underlättade vid handledning. Inga fysiska möten förekom dels på grund av rådande omständigheter och dels för att det inte var nödvändigt med tanke på arbetets natur. Studenterna arbetade mestadels gemensamt men enskilt arbete har förekommit.

3.6 Källkritik

- [1,3,9] är publicerade av CIGRÉ. CIGRÉ är en ideell organisation som verkar för internationell utveckling samt informationsbyte och har kunniga medlemmar från de flesta länder i världen. CIGRÉ-materialet erhöles från E.ON och ansågs därav vara pålitligt.

- [2] Rapporten "Effects of the circulating sheath currents in the magnetic field generated by an underground power line" anses vara betrodd då den publicerades av den elektrotekniska avdelningen vid UPC: Universitat Politècnica de Catalunya, ett tekniskt universitet i Barcelona och använder IEEE samt CIGRÉ som källor.
- [4] är publicerad av Statens energimyndighet som är en svensk statlig förvaltningsmyndighet och som därför är pålitlig.
- [5] är skriven av elkraftsingenjörer samt en ingenjör med elkraftteknisk lärarutbildning. Samtliga har flerårig erfarenhet inom industrin där en av författarna även har arbetat för Energimyndigheten.
- [6] Svenska kraftnät är statligt ägt och är mest kvalificerade för att ge information om sina egna kabelinstallationer.
- [7] IEEE är en väletablerad internationell organisation vilken innefattar över 360 000 ingenjörer och vetenskapspersoner. IEEE förekommer ofta i hänvisningar bland de andra källorna som har behandlats under examensarbetet.
- [8] Raychem är en väletablerad tillverkare av kablar och anslutningsdon, vilket gör dem till en rimlig källa för bild på korskopplingsbox.
- [10,11,12,13] Varje angiven källa är respektive programmens/bibliotekens officiella dokumentation
- [14] ABB's officiella användarguide för sina egna kablar. ABB är ett internationellt väletablerat företag inom elkraft- och automationsteknik.

4 Analys

4.1 Programmering

Programmet har skrivits i programspråket Python i samråd med E.ON eftersom det anses vara ett växande programspråk som även erbjuder många verktyg för beräkningar och gränssnitt, vilka kan komma till användning i exjobbet och för framtida utveckling av programmet.

Under utbildningen på LTH har programspråken Java och C använts i flera kurser, men för att komma i gång med Python så behövdes påläsning om syntax och exempel på hur de tänkta programfunktionerna kan omsättas till fungerande Python-kod.

Även om det finns stora syntaxskillnader i Python jämfört med Java och C så är den grundläggande programstrukturen med satser, klasser och metoder till stor del densamma, vilket gjorde att programmeringen kunde inledas tidigt. Efter hand som funderingar dök upp så hittades svaren i Python och dess biblioteks dokumentationer. Mycket kod kunde provköras och verifieras snabbt, men för att få ett fullt funktionellt program så behövdes ett systematiskt tänk avseende listor och indexering för att få det skalbart. Programmet skall exempelvis kunna ta fram rätt format på matriser och listor utifrån inmatat antal kabelförband och sektioner.

Vad gäller användargränssnitt så erbjuder Python många möjligheter med olika för- och nackdelar. Fokus låg tidigt på att få ihop ett användargränssnitt, men efter ett konsulterande möte med Marcus Klang från institutionen för Datavetenskap på LTH, beslutades att ett fungerande program med en genomtänkt hierarkisk struktur först skrivs, varpå ett användargränssnitt appliceras.

Till användargränssnitt valdes Tkinter, vilket är Pythons egna bibliotek för användargränssnitt. PyQt, PySci, Material-UI och pySide är exempel på några andra verktyg som undersöktes för ändamålet. För de mer avancerade beräkningarna så som matrismultiplikation används huvudsakligen NumPy som är ett mångsidigt bibliotek för vetenskaplig beräkning. Något som saknas i NumPy är stöd för polära

tal, något som har kringgåts genom att använda sig av komplexa tal i rektangulär form.

För grafisk representation av kabelplaceringar används Matplotlib, vilket tar fram en tvärsnittsvy av kabelplaceringarna i den givna sektionen. Bild 2.2.7 visar ett exempel från Matplotlib med tre parallella kabelförband, där färgerna anger fasläget. Andra alternativ för grafik undersöktes, exempelvis Tkinter canvas. Att Matplotlib valdes beror även på att det frekvent dök upp vid sökningar på hur önskad grafik kan skapas i Python, tillsammans med handledande videor och instruktioner [13].

4.2 Verifiering

För att verifiera programmets beräkningar simulerades en installation, från vilken det fanns sedan tidigare beräknade data. Programmets beräkningsmodell matades med aktuella kabel- och positionsdata för installationen, varpå skärmströmmens amplitud och fasläge presenterades i utvecklingsmiljöns konsol.

För att beräkna en kabelinstallations impedansmatris används PFIM enligt [9], skärmströmsberäkningen utgår från denna matris, som gäller för hela installationen.

Då fasström och jordåterlederresistans är känt, kan dessa användas tillsammans med delar av impedansmatrisen för att beräkna den inducerade strömmen för varje skärm.

Beräkningsmodellen visade sig stämma bra för ett av fallen, men avvek från referensdata vid ett annat fall. Detta misstänktes bero på jordåterlederresistansen, varpå flera beräkningssätt testades i syfte att erhålla likvärdigt resultat som i tillgängliga mätdata.

Samtliga programmetoder felsöktes och försök gjordes med en annan metod för att beräkna skärmströmmen utifrån skärmens inducerade spänning. Genom att räkna vidare med den beräknade skärmströmsmatrisen kan en kabelskärms inducerade spänningsmatris, ΔV_s , beräknas. Denna metod ansågs vara mer korrekt eftersom den innefattar samtliga strömmar och impedanser som kan påverka

skärmströmmarna, dvs fasledarström som påverkar genom impedansen mellan fasledare och kabelskärm samt skärmströmmar som påverkar intilliggande kabelskärmar genom deras ömsimpedanser.

Försök gjordes sedan med att dividera skärmarnas ΔV_s -matris med dess impedansmatris, för att få ut en skärmström som skulle vara mer korrekt. Det visade sig dock att resultaten av denna uträkning hade väldigt liten skillnad gentemot de tidigare erhållna skärmströmmarna.

Efter ett par dagar av fortsatt felsökning och redovisning av uträkning visade det sig att de beräknade skärmströmmarna stämde väl med ett annat beräkningsexempel från samma installation, vilket talade för att olika mät- och beräkningsmetoder använts.

Även om skärmströmmarna avvek med några enstaka Ampere från dessa referensdata så stämmer de tillräckligt bra för att avslöja ifall skärmströmmarna är för stora. I samråd med E.ON beslutades att programmet utgår direkt från skärmströmsmatrisen utan att ta hänsyn till ΔV_s .

Vikten av en ledares alfakoefficient diskuterades med handledarna. Denna förekommer vanligtvis inte i kabeldatablad och kan därför bli omständlig att räkna ut. Eftersom alfakoefficienten inte varierar mer än några enstaka tusendelar för olika kabelformer så bedöms den ha försumbar påverkan på mätresultatet. Försök med olika alfakoefficienter visade att detta stämde och alfakoefficientens värde är därför satt till 0,779, vilket är vanligast för de kabeltyper som E.ON i regel använder.

4.3 lakttagelser

Ömsimpedanserna från fasledare till skärm är identiska med motsvarande från skärm till fasledare, vilket skulle kunna användas för att optimera programmet vid större matrisberäkningar.

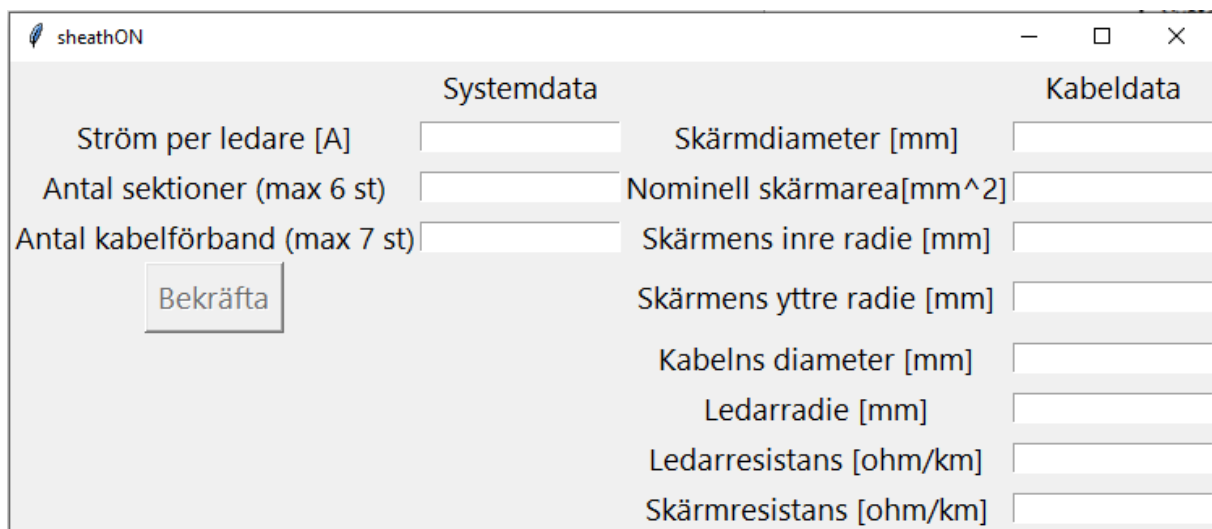
I simulering av en optimal installation med ett kabelförband i triangelformation med tre lika långa sektioner, korskopplade sinsemellan, visar den totala

impedansmatrisen att samtliga impedanser från fasledare till kabelskärm är exakt lika stora. Detta gör att varje skärm kommer få en lika stor inducerad ström från varje fas, vars summa därför blir noll, förutsatt att fasströmmarna är lika stora.

5 Resultat

5.1 Planering jämfört med resultat

Den slutliga versionen av programmet ser ut och fungerar nästan som planerat. Beräkningsmodellen är oförändrad då den verifierades av handledare i ett tidigt skede av arbetet. Det som har modifierats och avviker från planeringen som finns i metodkapitlet är användargränssnittet. Bland annat beskrivs skillnader mellan det planerade programmet och resultatet.



The screenshot shows a window titled 'sheathON' with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close). The window is divided into two main sections: 'Systemdata' and 'Kabeldata'. Under 'Systemdata', there are three input fields: 'Ström per ledare [A]', 'Antal sektioner (max 6 st)', and 'Antal kabelförband (max 7 st)'. A 'Bekräfta' button is located below these fields. Under 'Kabeldata', there are seven input fields: 'Skärmdiameter [mm]', 'Nominell skärmarea [mm²]', 'Skärmens inre radie [mm]', 'Skärmens yttre radie [mm]', 'Kabelns diameter [mm]', 'Ledarradie [mm]', and 'Ledarresistans [ohm/km]'. The 'Skärmresistans [ohm/km]' field is also present but appears to be empty or partially obscured.

Bild 5.1.1 Fönster för inmatning av system- och kabelparametrar.

Jämförs det implementerade systemfönstret i bild 5.1.1 med det i planeringsfasen på Bild 3.3.2.1, kan man se att inmatning för alfakoefficient har slopats enligt motivering i analyskapitlet. Kretsar benämns numera som kabelförband och linjeström benämns som ström per ledare, efter konsultation med E.ON. Samtliga fönsters teckenstorlek har gjorts större för ökad användarvänlighet.

Då användaren har matat in ett antal sektioner och kabelförband, max 6 respektive 7, blir en del förbandkonfigurationsknappar och sektionflikar tillgängliga att trycka på, beroende på vilket antal som har matats in i respektive fält. Har man exempelvis matat in två sektioner och två kabelförband så kan man endast redigera till och med sektion två och kabelförband två. Detta kan ses på Bild 5.1.2 där endast de två första sektionflikarna samt kabelförbandsknapparna är tryckbara.

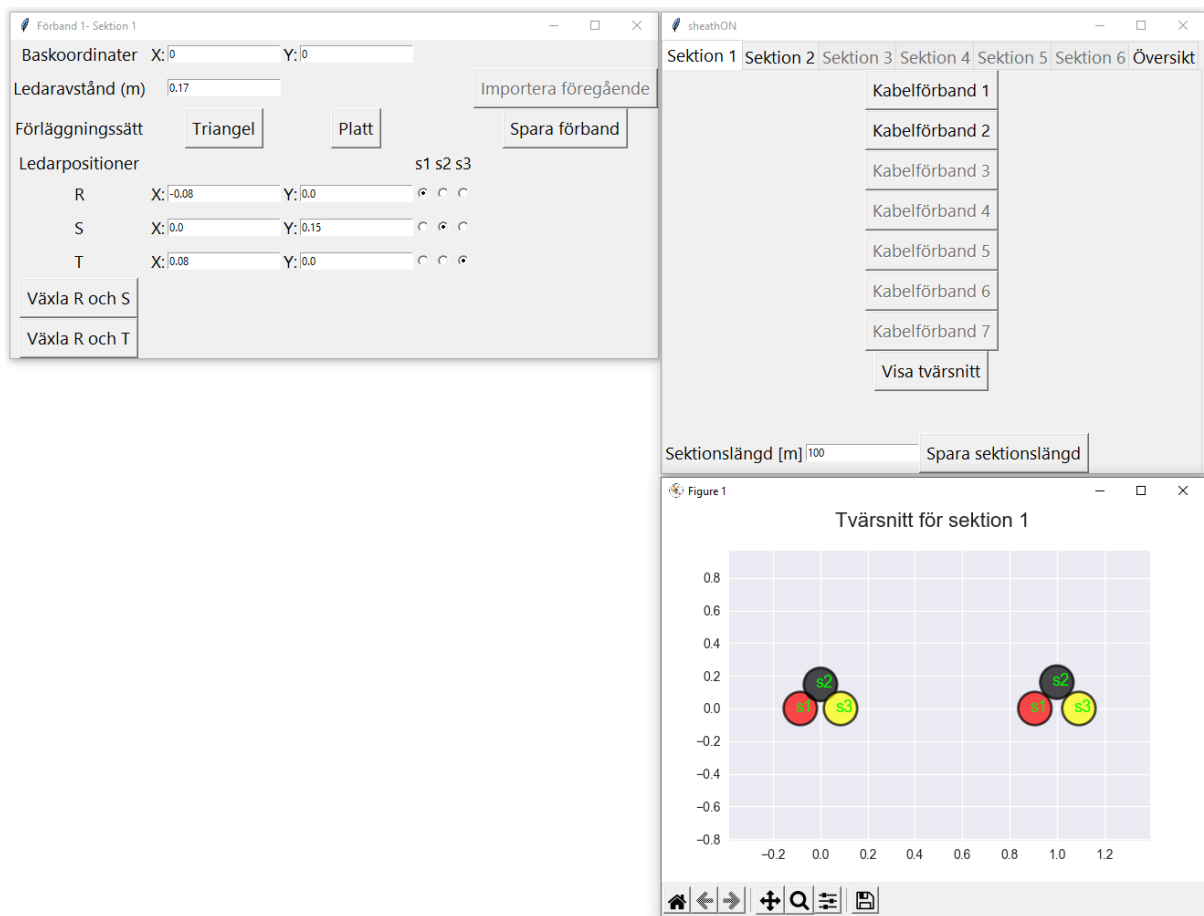


Bild 5.1.2 Fönster för förbandskonfiguration, sektionskonfiguration samt tvärsnittsbild av sektion.

Import av föregående sektionens förbandskonfiguration gör endast att ledarpositionsrutorna samt korskoppling matas in och inte något annat. Därav byttes namnet på knappen till "Importerera föregående" för att inte missleda användaren.

Tvärsnittsbild för en sektion inkluderar en grön skärmnumrering för varje kabelförband. Denna numrering blir irrelevant när det är längre än tre meter totalt mellan ledarna som är i ytterkanterna av koordinatsystemet då numreringen inte syns längre. Användaren kan oftast komma runt denna begränsning genom att ta en skärmbild av tvärsnittsbilden och förstora den. Begränsningen för denna metod är att det kan bli för suddigt vid förstoring beroende på hur långt det är mellan ledarna i ytterkanterna.

Checkboxarna i kabelförbandskonfigurationsfönstret byttes ut mot vertikallöpande radioknappar, detta på grund av att endast en fas ska kunna höra ihop med en skärm. Finessen med radioknappar är att endast en av knapparna kan vara ifyllda åt gången. Det finns dock inget som hindrar användaren från att välja flera skärmar för en fas, men detta dubbelkollas vid ett senare skede och användaren noteras enligt bild 5.1.5.

Då användaren trycker på översiktsfliken sammanfattas övergripande information om kabelinstallationen såsom antal sektioner, antal kabelförband, total längd, skärmkopplingar och eventuella fel. Även en tabell med skärmkopplingarna visas i översiktsfliken. Denna ger en snabb överblick i hur skärmarna sitter monterade på fasledare i sitt förband för varje sektion. På detta sätt kan användaren snabbt se att skärmarna korskopplats som tänkt och upptäcka eventuella fel.

The image shows two screenshots from the sheathON software interface. The left screenshot displays the 'Översikt' (Overview) window, which provides a summary of the installation: 'Sektioner: 2st.', 'Kabelförband per sektion: 2st.', and 'Total längd av installation 200.0m.'. It also indicates 'Kabel- och skärmpositioner ok!' (Cable and screen positions ok!) and features a 'Beräkna' (Calculate) button. Below this, it shows the selected section 'Sektion: [1] [2]' and lists cable connections for three phases: 'kf1s1: [R] [R]', 'kf1s2: [S] [S]', 'kf1s3: [T] [T]', and 'kf2s1: [R] [R]', 'kf2s2: [S] [S]', 'kf2s3: [T] [T]'. The right screenshot shows the 'Skärmströmmar' (Screen Currents) window, which contains a table with three columns: 'Skärmströmsindex', 'Absolutbelopp [A]', and 'Fasvinkel [grader]'. The table lists current values for connections I1s1 through I2s3. Below the table, it provides summary statistics: '{Medelskärmsström [A]: } 21.31', '{Komplex summa av skärmströmmar [A]: } (0.019+0.005j)', '{Absolutbelopp summa av skärmströmmar [A]: } 0.02', and '{Fasvinkel summa av skärmströmmar [grader]: } 15.357'.

Skärmströmsindex	Absolutbelopp [A]	Fasvinkel [grader]
I1s1	22.53	59.37
I1s2	20.75	177.07
I1s3	20.69	-55.56
I2s1	19.73	59.82
I2s2	22.37	-177.18
I2s3	21.77	-62.72

Bild 5.1.3 Fönster för översiktsflik samt resultat av beräkningar.

Användaren kan därefter trycka på "Beräkna" för att få reda på hur stor ström som går i varje skärm. Strömmarna presenteras på polär form med absolutbelopp och fasvinkel i en tabell. Under tabellen presenteras även medelvärdet av alla skärmströmmar tillsammans med den komplexa summan av alla strömmar, vilken även presenteras med absolutbelopp och fasvinkel.

Den komplexa summan av skärmströmmarna skall vid välplanerade korskopplingar bli liten eftersom skärmströmmarna då tar ut varandra. Denna summa kan betraktas som storleken på den ström som kommer gå genom jordåterledaren.

Då översiktsfliken tas fram undersöks även alla kablers avstånd gentemot varandra, för att upptäcka om det förekommer några placeringar som är omöjliga. Om användaren har placerat två kablar på varandra eller med ett avstånd mindre än en kabeldiameter från varandra så visas texten "Två eller fler kablar omöjligt nära!" med röd text och gul bakgrund. Även om det är praktiskt omöjligt att förlägga kablar på detta sätt så är det teoretiskt beräkningsbart.

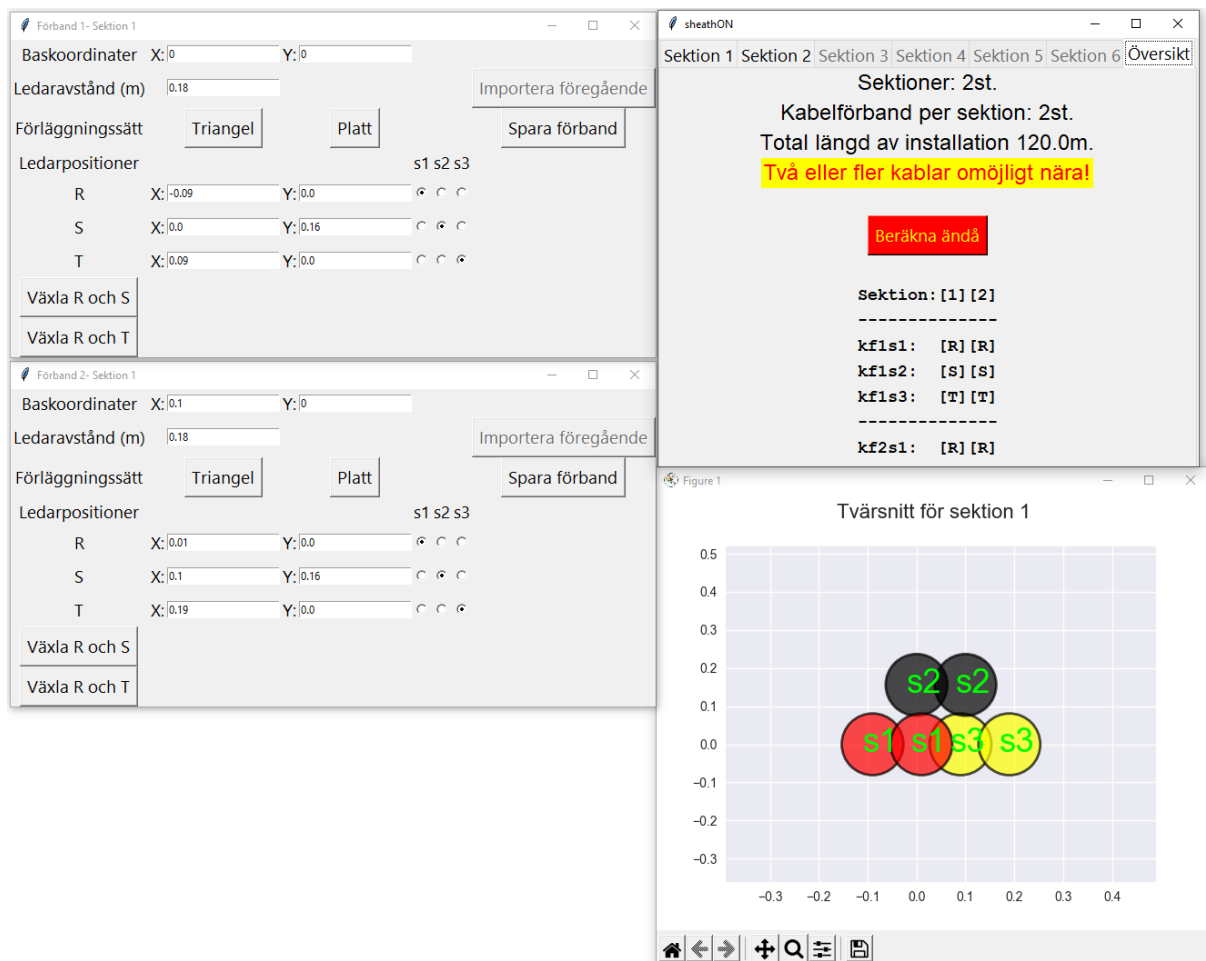


Bild 5.1.4 Scenario för omöjlig kabelplacering.

Även om radioknapparna för skärmplacering gör det omöjligt att välja samma skärm för flera fasledare så hindras inte användaren från att välja samma fasledare för två eller flera skärmar. I det fall en fasledare har tilldelats flera skärmar så kommer

varningstexten "Omöjliga skärmlaceringar" visas med röd text då användaren tar fram översiktsfliken.

I bild 5.1.5 visas ett exempel där samtliga kabelskärmar från förband 1 i sektion 2 tilldelats samma fasledare. Genom att undersöka korskopplingstabellen i översiktsfliken så kan användaren upptäcka var de eventuella felen finns utan att behöva ta fram de enskilda kabelförbandskonfigurationsfönstren.

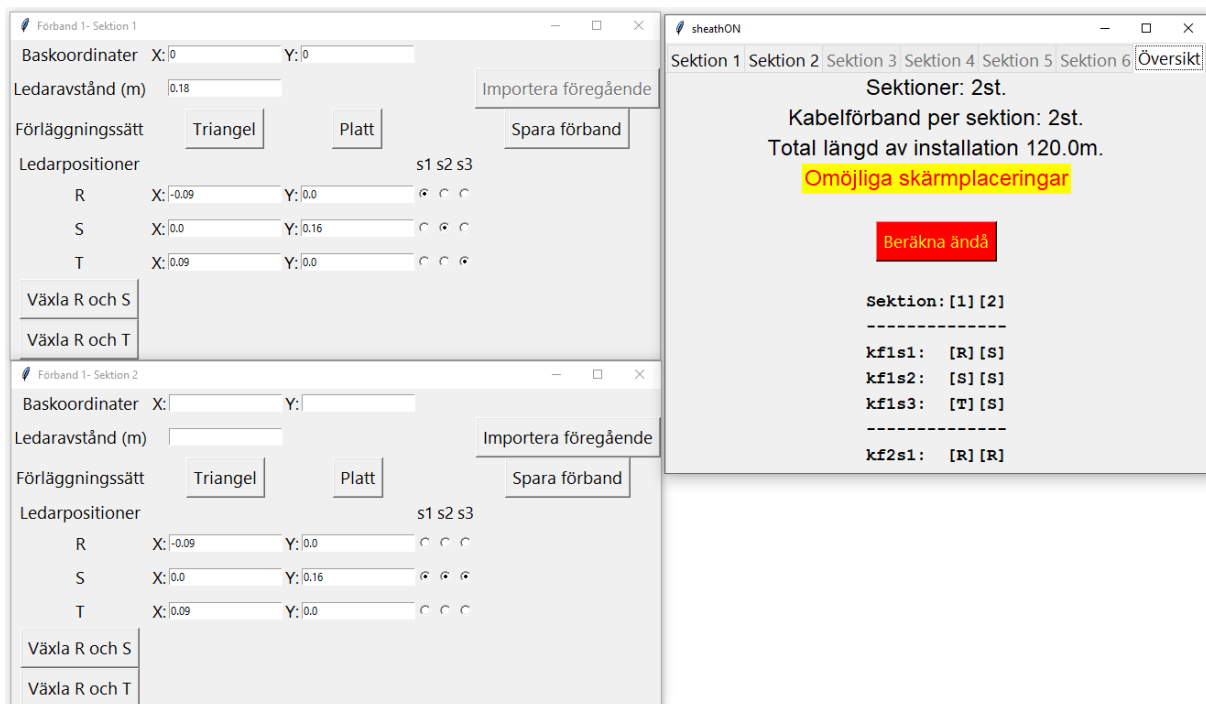


Bild 5.1.5 Scenario för omöjliga skärmlaceringar.

5.2 Räkneexempel

I detta räkneexempel används programmet för att beräkna hur stora skärmströmmar som induceras i en kabelförläggning med två parallella förband i tre sektioner, där korskoppling av skärmar görs mellan varje sektion. Strömmen som går i varje fasledare sätts till 370 Ampere.

Systemdata		Kabeldata	
Ström per ledare [A]	370	Skärmdiameter [mm]	81.93
Antal sektioner (max 6 st)	3	Nominell skärmarea[mm ²]	95
Antal kabelförband (max 7 st)	2	Skärmens inre radie [mm]	40.4
Bekräfta		Skärmens yttre radie [mm]	41.53
		Kabelns diameter [mm]	93
		Ledarradie [mm]	21.1
		Ledarresistans [ohm/km]	0.0247
		Skärmresistans [ohm/km]	0.387

Bild 5.2.1. Systemfönster

Bild 5.2.2. visar hur förbanden har konfigurerats i varje sektion, endast förbandens korskopplingar förändras mellan sektionerna. Fasledarplaceringarna som görs i sektion 1 är alltså samma i sektion 2 och 3.

The image shows six configuration windows arranged in a 2x3 grid. The top row shows 'Förband 1- Sektion 1', 'Förband 1- Sektion 2', and 'Förband 1- Sektion 3'. The bottom row shows 'Förband 2- Sektion 1', 'Förband 2- Sektion 2', and 'Förband 2- Sektion 3'. Each window contains the following information:

- Baskoordinater:** X:0, Y:0
- Ledaravstånd (m):** 0.18
- Förläggningssätt:** Triangel, Platt
- Ledarpositioner:** s1 s2 s3
- Lead R:** X: -0.09, Y: 0.0
- Lead S:** X: 0.0, Y: 0.16
- Lead T:** X: 0.09, Y: 0.0
- Buttons:** Växla R och S, Växla R och T, Importera föregående, Spara förband

In the bottom row, the X-coordinates for leads R and T are updated: R is 0.91 and T is 1.09 in sections 2 and 3, while S remains 0.0.

Bild 5.2.2. Konfigurationsfönster för samtliga kabelförband i varje sektion

Vidare kan man se i bild 5.2.3 att den enda skillnaden från sektion till sektion är att skärmarna byter fasledare.

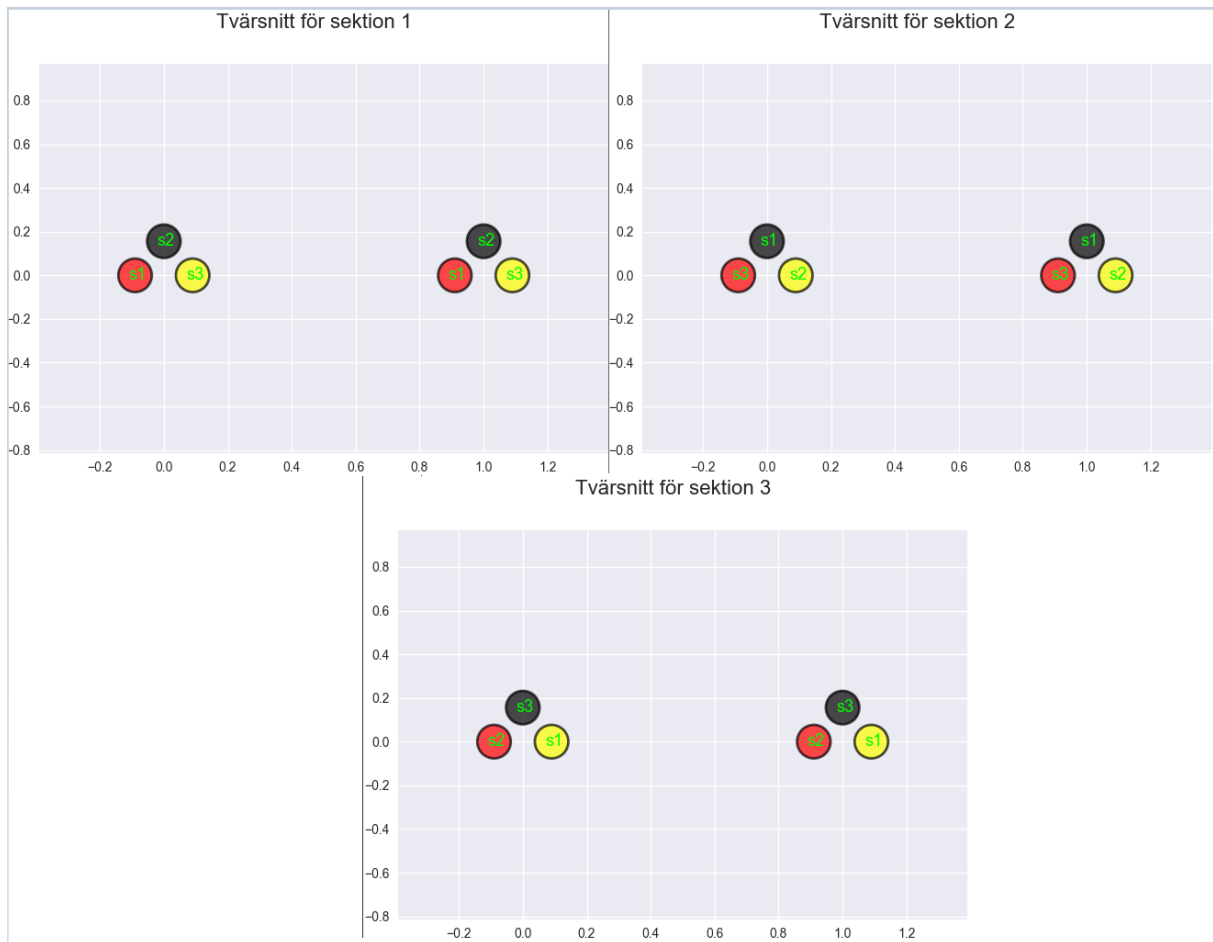


Bild 5.2.3. Tvärnittsbilder för varje sektion

På bild 5.2.4 visas översiktsfliken med överblick av korskopplingar för hela kabelinstallationen under “Beräkna”-knappen. Bredvid översiktsfliken visas resultatet där absolutbeloppet av skärmströmmarna har ett medelvärde på 5.44 A och där absolutbeloppet av summan av alla dessa blir ca 0.2 A.

sheathON			
Sektion 1 Sektion 2 Sektion 3 Sektion 4 Sektion 5 Sektion 6 Översikt			
Sektioner: 3st. Kabelförband per sektion: 2st. Total längd av installation 600.0m. Kabel- och skärmpositioner ok!			
<input type="button" value="Beräkna"/>			
Sektion: [1] [2] [3]			

kf1s1: [R] [S] [T]			
kf1s2: [S] [T] [R]			
kf1s3: [T] [R] [S]			

kf2s1: [R] [S] [T]			
kf2s2: [S] [T] [R]			
kf2s3: [T] [R] [S]			

sheathON			
Skärmströmmar			
Skärmströmsindex	Absolutbelopp [A]	Fasvinkel [grader]	
I1s1	5.46	65.22	
I1s2	5.46	65.22	
I1s3	5.46	65.22	
I2s1	5.41	-114.24	
I2s2	5.41	-114.24	
I2s3	5.41	-114.24	
{Medelskärmström [A]: } 5.44 {Komplex summa av skärmströmmar [A]: } (0.194+0.084j) {Absolutbelopp summa av skärmströmmar [A]: } 0.212 {Fasvinkel summa av skärmströmmar [grader]: } 23.267			

Bild 5.2.4. Översikt och beräkningsresultat

I resultatet som visas i bild 5.2.5 har skärmarna för båda kabelförband behållit sin placering från sektion 1 till sektion 3 och därmed har högre skärmströmmar inducerats. Absolutbeloppet av skärmströmmarnas medelvärde har ett värde på ca 77,31 A och absolutbeloppet av skärmströmmarnas summa har ett värde på ca 0,19 A.

sheathON			
Sektion 1 Sektion 2 Sektion 3 Sektion 4 Sektion 5 Sektion 6 Översikt			
Sektioner: 3st. Kabelförband per sektion: 2st. Total längd av installation 600.0m. Kabel- och skärmpositioner ok!			
<input type="button" value="Beräkna"/>			
Sektion: [1] [2] [3]			

kf1s1: [R] [R] [R]			
kf1s2: [S] [S] [S]			
kf1s3: [T] [T] [T]			

kf2s1: [R] [R] [R]			
kf2s2: [S] [S] [S]			
kf2s3: [T] [T] [T]			

sheathON			
Skärmströmmar			
Skärmströmsindex	Absolutbelopp [A]	Fasvinkel [grader]	
I1s1	81.71	59.61	
I1s2	75.25	177.36	
I1s3	75.12	-55.39	
I2s1	71.73	60.1	
I2s2	81.06	-176.99	
I2s3	78.97	-62.44	
{Medelskärmström [A]: } 77.31 {Komplex summa av skärmströmmar [A]: } (0.189+0.038j) {Absolutbelopp summa av skärmströmmar [A]: } 0.193 {Fasvinkel summa av skärmströmmar [grader]: } 11.249			

Bild 5.2.5. Översikt och beräkningsresultat utan korskopplingar

6 Slutsats

SheathON har nyttjats till att simulera ett antal fall, för att se hur skärmströmmarna påverkas av korskopplingar och skruvning. Skillnaderna i skärmström mellan bilderna 5.2.4 och 5.2.5 visar att korskoppling är ett effektivt sätt att reducera skärmströmmar då koaxiella ömsimpedansen mellan en fasledare och skärm är det största bidraget till skärmström.

Alla ledare har ströinduktanser och kommer därför ge upphov till ömsimpedanser gentemot intilliggande fasledare och skärmar. Ekvation 2.3 visar att alfakoefficienten tillsammans med ledarens radie är de två faktorer som påverkar en ledares induktans. För att en ledare ska ha så låg induktans som möjligt bör den ha stor radie och hög alfakoefficient. Hög alfakoefficient kan erhållas genom att använda en kabel med många kardeler som komprimerats för att minimera tomrum sinsemellan.

Programmets alla funktioner har testats och den nuvarande versionen bedöms vara duglig för planering av kabelförläggning. Ett rimligt resultat fås vid simulering av kabelinstallationer utan korskopplingar, enligt bild 5.2.4. På grund av avsaknaden av exempel/mätdata för en installation med korskopplingar att jämföra programmets resultat med, garanteras inte att en simulation av en sådan installation ger realistiska resultat. Däremot stämmer korskopplade simuleringar med teorin, det vill säga att skärmströmmarna reduceras. Skulle exempel/mätdata för en installation med korskopplingar göras tillgänglig så kan programberäkningar i samband med korskoppling verifieras ordentligt.

Jämförelse mellan exempel/mätdata och programresultat för en installation av detta slag kan göras om informationen görs tillgänglig.

6.1 Reflektion över etiska och samhällsnyttiga aspekter

SheathON har en stor potentiell samhällsnytta då det kan bidra till att minimera förlusteffekten i kabelskärmar vid nya installationer. En installationsplats kan ställa flera olika krav på kabelförläggningen, vilket gör att befästa metoder för optimal

förläggning inte alltid går att tillämpa. Simulerade resultat från olika förläggningssätt kan därför vara ett bra underlag vid planering av installationen.

6.2 Framtida utvecklingsmöjligheter

SheathON kan utvecklas på flera håll. En funktion som diskuterats är att programmet skall kunna beräkna fasströmmarna i en installation utifrån fasspänning samt impedanserna i last och ledare. Eftersom kabelinstallationer dimensioneras för en viss överföringskapacitet så är dock den maximala fasströmmen vid symmetrisk drift i regel känd, vilket även ligger till grund för valet av kabel.

Användarvänligheten skulle kunna förbättras genom att implementera knappar för att spara och importera data, vilket möjliggör återupptagning av installationskonfiguration vid ett annat skede.

Inmatning av kabeldata i programmet kan effektiviseras genom att lägga till några snabbknappar, vilka automatiskt fyller i data för de vanligast förekommande kabeltyperna.

SheathON kan i nuläget endast simulera installationer där skärmen är jordad i båda ändar. En utvecklingsmöjlighet vore om det även kunde beräkna skärmströmmarna då skärmen enbart är jordad i en ände, så kallad öppen skärm.

Tvårsnittsbilden för sektionerna skulle även kunna göras mer verklighetstrogen avseende avstånd och kabelstorlekar med ett helt kvadratisk rutnät.

Något annat som skulle kunna vara till nytta i framtiden är om maskininlärning kan användas för att simulera flera förläggningssätt och korskopplingar för att hitta det som blir optimalt inom ramarna för installationsplatsen. Detta skulle ge den teoretiskt optimala installationen samtidigt som det avlastar användaren.

7 Terminologi

Förklara facktermer och förkortningar som inte kan anses tillhöra allmänkunskapen hos en student i sista årskursen i utbildningen. Sortera dem i till exempel bokstavsordning.

Ledare – Alla elektriska ledare. Detta innefattar både fasledare och kabelskärm.

Kardeler – Trådar av ledande material, vilka tillsammans utgör en ledare.

Reaktans – Det frekvensberoende växelströmsmotstånd som induktanser och kapacitanser ger upphov till.

Impedans – Summan av en ledares resistans och reaktans, vilka är förskjutna 90 grader gentemot varandra. Denna kan anges på komplex- eller polärform.

Korskoppling – Korskoppling innebär att skärmen från en kabel seriekopplas med skärmen från en annan kabel i förbandet, vars ström har ett annat fasläge.

Skruvning – Skruvning innebär att fasledare byter position med varandra vid sektionsovergång.

GUI – Grafiskt användargränssnitt (Graphical User Interface), det vill säga den del av programmet som användaren får interagera med.

8 Källförteckning

[1] CIGRE Technical Brochure 283, Special Bonding of High Voltage Power Cables, WG B1.18, October 2005.

[2] Jordi-Roger Riba Ruiz, 2006, "Effects of the circulating sheath currents in the magnetic field generated by an underground power line", in Proc.International Conf.Renewable Energies and Power Quality,2006.

[3] CIGRÉ Technical Brochure 797, "Sheath bonding systems of ac transmission cables", WG B1.50, 2020.

[4] *Energiläget 2020*. Stockholm: Statens energimyndighet, 2021.

[5] K. Jacobsson, S. Lidström and C. Öhlén, *Elkraftshandboken. Elkraftsystem 1*. Liber.

[6] "Anneberg – Skanstull" [Online]. Tillgänglig på:
<https://www.svk.se/anneberg-skanstull> [Åtkomst år 2021]

[7] O. Lennerhag and M. H. J. Bollen, "Power system impacts of decreasing resonance frequencies," 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2018

[8] *Raychem Link Boxes* [Online]. Tillgänglig på:
https://www.mikomi.hu/files/catalogs/EPP-1665-5_13.pdf [Åtkomst år 2021]

[9] K. Alexandrou , C. Tastavridis , G. Georgallis , G. J. Anders , "Sheath circulating currents calculation in asymmetrical installation schemes for power frequency models" 2018 CIGRE SESSION.

[10] "NumPy reference" [Online]. Tillgänglig på:
<https://numpy.org/doc/stable/reference/index.html#reference> [Åtkomst år 2021]

[11] "Graphical User Interfaces with Tk" [Online]. Tillgänglig på:

<https://docs.python.org/3/library/tk.html> [Åtkomst år 2021]

[12] " Balsamiq for Desktop Documentation" [Online]. Tillgänglig på:

<https://balsamiq.com/wireframes/desktop/docs/> [Åtkomst år 2021].

[13] "Matplotlib: Visualization with Python" [Online]. Tillgänglig på:

<https://matplotlib.org/> [Åtkomst år 2021].

[14] " XLPE Land Cable Systems User's Guide" [Online]. Tillgänglig på:

<https://library.e.abb.com/public/ab02245fb5b5ec41c12575c4004a76d0/XLPE%20Land%20Cable%20Systems%20GM5007GB%20rev%205.pdf> [Åtkomst år 2021].

9 Appendix

9.1 Handhavandeinstruktioner

I systemfönstret får användaren ange systemdata och kabeldata för att sedan klicka på bekräfta alternativt endast mata in systemdata och trycka bekräfta. I det senare fallet används kabeldata som finns i programmet från början, denna data är för kabeln "AXLJ-F TTCL 145kV 1x1200/95" [14].

Därefter möts användaren av Sektionskonfigurationsfönstret, där användaren anger sektionlängder för alla sektioner som har tänkts användas. Det går att växla aktuell sektion med flikarna i överkant. Sektionslängden sparas genom att trycka på knappen bredvid inmatningsfältet. Vidare kan ett kabelförband redigeras genom att trycka på en av de tillgängliga "kabelförband x"-knapparna, varpå användaren möts av ett kabelförbandskonfigurationsfönster, varav två sådana visas på Bild 5.1.5.

I det fönstret får användaren mata in baskoordinater för att sedan välja mellan förläggningssätten "Triangel" eller "Platt", som gör att ledarpositionsfälten fylls i enligt valt förläggningssätt, baskoordinater och kabelavstånd. Därefter är det lämpligt att sätta skärmarnas position. I sektion 1 är fasledarnas skärmar förvalda till s1 på R, s2 på S och S3 på T enligt bild 5.1.4. Korskoppling av skärmar görs genom att gå till samma kabelförband i efterföljande sektioner och byta skärmpositioner därigenom.

Användaren kan byta vissa fasledares koordinater med knapparna "Växla R och S" samt "Växla R och T", detta byte reflekteras i ledarpositionsfälten. Det går även att mata in koordinater i ledarpositionernas inmatningsfält manuellt vilket möjliggör andra förläggningar än enbart platt formation eller triangelformation. För att spara konfigurationen kan användaren trycka på knappen "Spara kabelförband" och stänga fönstret.

Det går att generera tvärsnittsbilder av sektionerna oberoende av hur långt konfigurationen har gått förutsatt att Systemfönstret har fyllts i och bekräftats. När användaren är färdig med inmatningen, kan man fortsätta till översiktsfliken, se bild 5.1.3.

Då användaren trycker på översiktsfliken sammanfattas övergripande information om kabelinstallationen såsom antal sektioner, antal kabelförband, total längd, skärmkopplingar och eventuella fel. Även en tabell med skärmkopplingarna visas i översiktsfliken. Denna ger en snabb överblick i hur skärmarna sitter monterade på fasledare i sitt förband för varje sektion. På detta sätt kan användaren snabbt se att skärmarna korskopplats som tänkt och upptäcka eventuella fel

Användaren kan därefter trycka på "Beräkna" för att få reda på hur stor ström som går i varje skärm. Strömmarna presenteras på polär form med absolutbelopp och fasvinkel i en tabell. Under tabellen presenteras även medelvärdet av alla skärmströmmar tillsammans med den komplexa summan av alla strömmar, vilken även presenteras med absolutbelopp och fasvinkel.

Den komplexa summan av skärmströmmarna skall vid välplanerade korskopplingar bli liten eftersom skärmströmmarna då tar ut varandra. Denna summa kan betraktas som storleken på den ström som kommer gå genom jordåterledaren.

9.2 E/R-diagram

Ett E/R-diagram över programhierarkin togs fram och visas i bild 9.2.1.

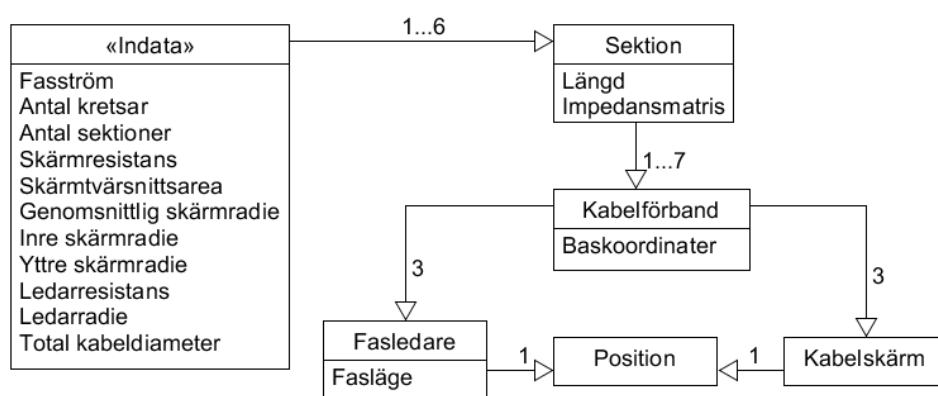


Bild 9.2.1. E/R-diagram över alla klasser förutom beräkningsklassen, som använder samtlig information som presenterats i E/R-diagrammet till beräkningar.