



**Fase-aardfouten in asymmetrische kabelsystemen:
modellering en analyse**

19-017 CW

3 juli 2019

Building 026
Koningstraat 27-1d
6811 DG Arnhem

P.O. Box 100
6800 AC Arnhem

026 352 37 00
www.phasetophase.nl



© Phase to Phase BV, Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Dit document bevat vertrouwelijke informatie. Overdracht van de informatie aan derden zonder schriftelijke toestemming van of namens Phase to Phase BV is verboden. Hetzelfde geldt voor het kopiëren van het document of een gedeelte daarvan.

Phase to Phase BV is niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

**INHOUD**

Inhoud	ii
1	Inleiding 1
2	Kabelimpedantiematrix 2
2.1	Eenaderige hoogspanningskabel 3
2.2	Eenaderige midden- en laagspanningskabel 8
2.3	LS-driefasensysteem uit eenaderige kabels 11
2.4	Meeraderige laagspanningskabel 14
3	Kabelparameters 17
3.1	Impedantiematrix FEA-simulatiesoftware 17
3.2	Correctie retourimpedantie 18
4	Fase-aardsluitingen sectorvormige LS-kabel in Gaia en Vision 21
4.1	Kabelgegevens 21
4.2	Fase-aardfout enkel retour 'oneindige' aarde 23
4.3	Fase-aardfout retour 'eindige' aarde 24
4.4	Fase-aardfout retourpad via aardscherm 25
4.5	Fase-aardfout retour via aardscherm en nulgeleider 27
4.5.1	Fase-aardfout, fase L_1 27
4.5.2	Fase-aardfout, fase L_2 29
4.6	Fase-aardfout retour aardscherm // nulgeleider // PE-geleider 31
4.7	Fase-aardfout aardscherm // nulgeleider // mutueelgekoppelde PE-geleider 34
5	Conclusie 38
6	Bibliografie 40
Bijlage A	41
Bijlage B	42
Bijlage C	43
Bijlage D	45
Bijlage E	47

1 INLEIDING

Gaia LV Network Design is een integraal programma voor analyse en ontwerp van LS-distributienetten. Laagspanningsnetwerken zijn veelal asymmetrisch, door de nulgeleider en complexe aarding is de toepassing van de symmetrische componenten methoden niet langer mogelijk. Gaia LV Network Design maakt gebruik van de gehele impedantiematrix, waarbij alle geleiders met inbegrip van de mutuele koppelingen meegenomen worden. Het totale elektrische systeem kan hierbij uitgebreid geconfigureerd worden door de vele schakelmogelijkheden.

In dit rapport wordt de totstandkoming van deze impedantiematrix toegelicht en worden de resultaten van eenfase-aardsluitingen in Gaia voor verschillende casussen met handberekeningen gevalideerd. Deze kortsluitstroomberekeningen worden ook in Vision Network Analysis uitgevoerd. Vision werkt wel met de symmetrische componentenmethode waardoor voor iedere afzonderlijke casus de kabelimpedanties (normaal en homopolaire) bepaald worden.

Leeswijzer

Hoofdstuk twee behandelt de totstandkoming van de impedantiematrix voor verschillende kabeltypen en configuraties. In dit hoofdstuk wordt de opbouw in zijn geheel behandeld hetgeen veel inzicht geeft en het mogelijk maakt de impedantiematrix analytisch te bepalen.

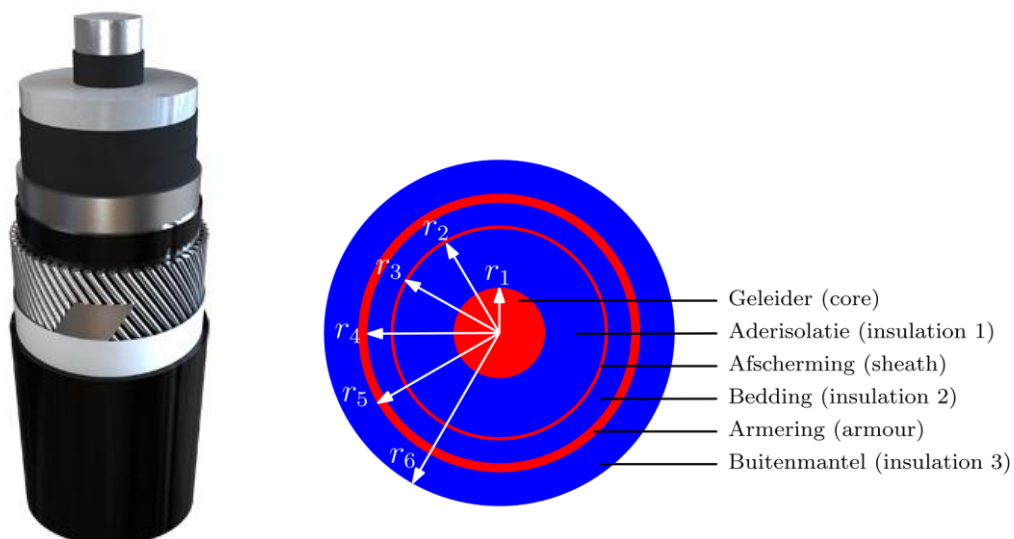
Hoofdstuk drie gaat in op de bepaling van de elementen in de impedantiematrix. Deze wordt bepaald met behulp van het FEA-simulatiesoftware en wordt gecorrigeerd voor de 'oneindige' omgeving met de inzichten uit hoofdstuk twee.

In hoofdstuk vier wordt de éénfase aardsluiting voor verschillende kabelconfiguraties berekend. Deze berekening geschied in eerste instantie middels de impedantiematrix waarna deze berekend wordt met Gaia LV Network design en Vision Network Analysis. Voor Vision wordt voor iedere configuratie de equivalente homopolaire impedantie bepaald.

2 KABELIMPEDANTIEMATRIX

De totstandkoming van de kabelimpedantiematrix wordt in dit hoofdstuk behandeld aan de hand van verschillende kabeltypen. Er zijn softwarepakketten op de markt die de impedantiematrix berekenen met behulp van de eindige-elementenmethode, een van deze programma's is Maxwell 2D van Ansoft. Deze programma's geven echter geen inzicht in de totstandkoming van de impedantiematrix. Daarnaast nemen deze pakketten maar een deel van de retouraarde mee in de berekening, hetgeen verder uitgewerkt is in Hoofdstuk 3. Naast de eindige-elementenmethode bestaat de mogelijkheid de impedantiematrix analytisch te bepalen. Deze methode is echter een benadering en kan complex worden voor sectorvormige kabels met meerdere geleiders. De methode tot het analytisch bepalen van de impedantiematrix wordt in detail beschreven door Wedepohl [1], Nguyen [2] en Ametani [3], [4]. Een methode tot bepaling van de impedantiematrix voor sectorvormige meeraderige kabels wordt beschreven door Ametani in [5].

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van de opbouw van verschillende kabels de totstandkoming van de impedantiematrix behandeld. Het betreft enkel de opbouw, de parameters worden later in dit rapport bepaald met behulp van FEA-software. De opbouw van een midden- en hoogspanningskabel is hieronder geïllustreerd in Figuur 1 en beschreven.



Figuur 1 links: kabelopbouw 87/150 kV kabel TKF
rechts: vereenvoudigde kabeldoorsnede

Van binnen naar buiten is de kunststof eenaderige kabel als volgt opgebouwd:

- Geleider van koper of aluminium.
- Halfgeleidende laag. Er kunnen zich oneffenheden voordoen in de geleideromtrek, waardoor het elektrische veld zich niet netjes rond de geleider verdeelt. Dit kan kleine ontladingen veroorzaken, waardoor de kabel snel verouderd. Om die oneffenheden op te heffen wordt een halfgeleidende laag om de geleider aangebracht, zodat het veld zich in de isolatie homogeen zal verdelen.
- Isolatiemateriaal van XLPE.

- Halfgeleidende laag. Er kunnen zich eveneens oneffenheden voordoen in het binnenoppervlak van de afscherming, zodat ook tussen de afscherming en de isolatie een halfgeleidende laag is aangebracht.
- Metalen afscherming. Deze zorgt voor een retourpad voor capacatieve- en kortsluitstromen, en sluit het elektrische veld zo veel mogelijk op binnen de kabel.
- Optioneel: armering. Tussen de afscherming en de armering bevindt zich dan de bedding. De bedding geeft een scheiding tussen de afscherming en de armering. De armering zorgt voor stevigheid van de kabel en beschermt de kabel tegen mechanische invloeden.
- Buitenmantel. Deze beschermt de kabel tegen invloeden van buitenaf, zoals vocht.

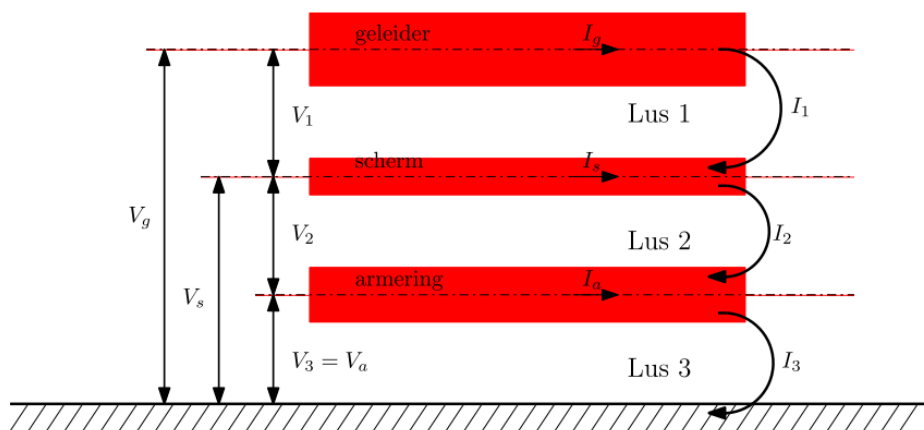
Voor de bepaling van de impedantiematrix wordt de kabel ietwat versimpelt, zo worden de halfgeleidende lagen verwaarloosd. De armering wordt gemodelleerd als een buis met een binnen- en buitenstraal afhankelijk van de draaddikte met een equivalente soortelijke geleiding. De soortelijke geleiding van de geleider wordt gecorrigeerd met de door de fabrikant opgegeven weerstand indien deze uit losse geslagen draden bestaat.

De volgende kabels/circuits worden in de komende paragrafen behandeld:

- Eenaderige hoogspanningskabel, zoals afgebeeld in Figuur 1.
- Eenaderige midden- en laagspanningskabel.
- Drie fasen + nul laagspanningscircuit bestaande uit eenaderige kabels.
- Meeraderige laagspanningskabel.

2.1 Eenaderige hoogspanningskabel

De impedantiematrix van de eenaderige ondergrondse hoogspanningskabel, zoals afgebeeld in Figuur 1, wordt afgeleid aan de hand van de hieronder in Figuur 2 getekende lussen. Voor deze eenaderige kabel zijn dit drie lussen, te noemen: geleider-scherm lus (1), scherm-armering lus (2) en armering-aarde lus (3).



Figuur 2 Schematische weergave lussen ter bepaling van de lusimpedantiematrix

Allereerst worden de lusspanningen en -stromen bepaald:

lusspanningen:

$$\mathbf{V}_L = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \mathbf{C}_v \cdot \begin{bmatrix} V_g \\ V_s \\ V_a \end{bmatrix}$$

met:

$$\mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

lusstromen:

$$\mathbf{I}_L = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \mathbf{C}_i \cdot \begin{bmatrix} I_g \\ I_s \\ I_a \end{bmatrix}$$

met:

$$\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

waar subscriptie g staat voor geleider, s voor scherm en a voor armering. De lusstromen zijn niet zomaar uit het schema te herleiden. Makkelijker is het om eerst de elementstromen in matrixvorm uit te schrijven en deze vervolgens te inverteren om de lusstromen te bepalen. De lus impedantiematrix, \mathbf{Z}_L , wordt per kilometer afgeleid uit de spanningsval, $\Delta \mathbf{V}_L$, over de lussen als functie van de stroom, \mathbf{I}_L :

$$\Delta \mathbf{V}_L = -\mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{I}_L$$

De algemene vorm van de lusimpedantiematrix van de eenaderige kabel uit Figuur 1 is hieronder gegeven:

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix}$$

De individuele componenten uit de lusimpedantiematrix zijn hieronder gegeven:

Zelfimpedantie lus 1:

$$Z_{11} = z_1 + z_2 + z_3$$

waar:

- z_1 = geleider impedantie
- z_2 = inductantie t.g.v. wisselend magneetveld in isolatie
- z_3 = impedantie van binnenste gedeelte scherm

Zelfimpedantie lus 2

$$Z_{22} = z_4 + z_5 + z_6$$

waar:

- z_4 = impedantie van buitenste gedeelte scherm
- z_5 = inductantie t.g.v. wisselend magneetveld in isolatie
- z_6 = impedantie van binnenste gedeelte armering

Zelfimpedantie lus 3

$$Z_{33} = z_7 + z_8 + z_9$$

waar:

- z_7 = impedantie van buitenste gedeelte armering
- z_8 = inductantie t.g.v. wisselend magneetveld in isolatie
- z_9 = impedantie van pad retouraarde

Mutuele koppeling lussen 1 en 2

$$Z_{12} = Z_{21} = -z_{10}$$

Mutuele koppeling lussen 2 en 3

$$Z_{23} = Z_{32} = -z_{11}$$

Mutuele koppeling lussen 1 en 3

Door het scherm tussen de geleider en de armering bestaat er geen mutuele koppeling tussen de lussen 1 en 3.

$$Z_{13} = Z_{31} = 0$$

De berekening van de impedanties z_1 t/m z_{11} zijn uitgewerkt door Wedepohl en Wilcox in [1]. De impedantie van het retourpad door aarde (z_9) bevat een oneindige integraal. Bij de bestudering van netwerken binnen het harmonische spectrum is met zekere nauwkeurigheid [2] de volgende expressie te gebruiken voor het retourpad door aarde [1]:

$$z_9 = \frac{j\omega \mu}{2\pi} \left\{ -\ln \left(\frac{Y m r_6}{2} + \frac{1}{2} - \frac{4m h}{3} \right) \right\} \quad (\Omega/m)$$

waar:

- ω = hoekfrequentie in rad/s
- μ = magnetische permeabiliteit in N/A²
- γ = exponent van Euler's constante = $e^{0,577215665}$
- $m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\rho}}$
- ρ = soortelijke bodemweerstand in Ω/m
- r_6 = buitenradius van de kabel in meter
- h = kabeldiepte in meter

Deze vergelijking wordt in Hoofdstuk 3 gebruikt als correctie op de kabelimpedantiematrix. De impedanties z_1 t/m z_{11} ingevuld in \mathbf{Z}_L geeft:

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} z_1 + z_2 + z_3 & -z_{10} & 0 \\ -z_{10} & z_4 + z_5 + z_6 & -z_{11} \\ 0 & -z_{11} & z_7 + z_8 + z_9 \end{bmatrix}$$

De lusimpedanties zijn echter nog niet geschikt voor evaluatie in Gaia waar de interesse uitgaat naar de spanningen en stromen in de geleider, scherm en armering. Voor de spanningsval over deze kabel per meter geldt de volgende vergelijking:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_s \\ \Delta V_a \end{bmatrix} = -\mathbf{Z}_N \cdot \begin{bmatrix} I_g \\ I_s \\ I_a \end{bmatrix}$$

De matrix impedantiematrix \mathbf{Z}_N is hierbij gelijk aan:

$$\mathbf{Z}_N = \mathbf{C}_v^{-1} \cdot \mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{C}_i$$

ingevuld geeft:

$$\mathbf{Z}_N = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} z_1 + z_2 + z_3 & -z_{10} & 0 \\ -z_{10} & z_4 + z_5 + z_6 & -z_{11} \\ 0 & -z_{11} & z_7 + z_8 + z_9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_N = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1 + z_2 + z_3 & -z_{10} & 0 \\ -z_{10} & z_4 + z_5 + z_6 & -z_{11} \\ 0 & -z_{11} & z_7 + z_8 + z_9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_N = \begin{bmatrix} Z_{gg} & Z_{gs} & Z_{ga} \\ Z_{sg} & Z_{ss} & Z_{sa} \\ Z_{ag} & Z_{as} & Z_{aa} \end{bmatrix}$$

Met de volgende elementen uit \mathbf{Z}_N :

Zelfimpedantie geleider:

$$Z_{gg} = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7 + z_8 + z_9 - 2 z_{10} - 2 z_{11}$$

Zelfimpedantie scherm:

$$Z_{ss} = z_4 + z_5 + z_6 + z_7 + z_8 + z_9 - 2 z_{11}$$

Zelfimpedantie armering:

$$Z_{aa} = z_7 + z_8 + z_9$$

Mutuele impedanties geleider en scherm:

$$Z_{gs} = Z_{sg} = z_4 + z_5 + z_6 + z_7 + z_8 + z_9 - 2 z_{11}$$

Mutuele impedanties geleider en armering

$$Z_{ga} = Z_{ag} = z_7 + z_8 + z_9 - z_{11}$$

Mutuele impedanties scherm en armering

$$Z_{sa} = Z_{as} = z_7 + z_8 + z_9 - z_{11}$$

Splitsing

Voor de toepassing van het bovenstaande op een meeraderige kabel wordt de impedantiematrix gesplitst:

$$\mathbf{Z}_N = \mathbf{Z}_{NG} + \mathbf{Z}_{NA}$$

$$\mathbf{Z}_N = \begin{bmatrix} Z'_{gg} & Z'_{gs} & Z'_{ga} \\ Z'_{sg} & Z'_{ss} & Z'_{sa} \\ Z'_{ag} & Z'_{as} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{aa} & Z_{aa} \\ Z_{aa} & Z_{aa} & Z_{aa} \\ Z_{aa} & Z_{aa} & Z_{aa} \end{bmatrix}$$

waar:

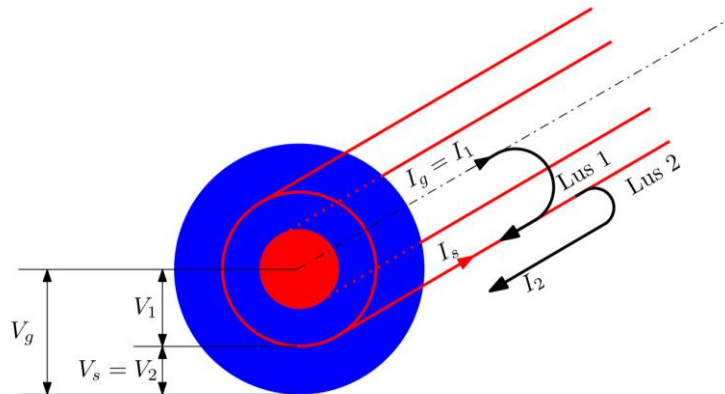
$$\mathbf{Z}_{NG} = \begin{bmatrix} z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 - 2z_{10} - 2z_{11} & z_4 + z_5 + z_6 - z_{10} - 2z_{11} & -z_{11} \\ & z_4 + z_5 + z_6 - z_{10} - 2z_{11} & z_4 + z_5 + z_6 - z_{10} - 2z_{11} & -z_{11} \\ & & -z_{11} & & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_{NA} = \begin{bmatrix} z_7 + z_8 + z_9 & z_7 + z_8 + z_9 & z_7 + z_8 + z_9 \\ z_7 + z_8 + z_9 & z_7 + z_8 + z_9 & z_7 + z_8 + z_9 \\ z_7 + z_8 + z_9 & z_7 + z_8 + z_9 & z_7 + z_8 + z_9 \end{bmatrix}$$

De matrix \mathbf{Z}_{NA} bestaat uit de componenten die samen de buitenste lus vormen zoals beschreven voor Z_{33} (zelfimpedantie lus 3). De buitenste lus is de som van de impedantie van de buitenkant van de armering, de inductantie en de impedantie van het retourpad door aarde.

2.2 Eenaderige midden- en laagspanningskabel

Laagspanningskabels zijn normaliter niet voorzien van een afscherming maar enkel van een gecombineerd aardscherm/armering, hetgeen de impedantiematrix van de eenaderige kabel versimpelt. Dit geldt ook voor de eenaderige middenspanningskabel waarbij de afscherming veelal gecombineerd is met de armering. De gehele tweede lus tezamen met de mutuele koppeling tussen afscherming en armering komen te vervallen. Hieronder in Figuur 3 een doorsnede van de kabel met de bijhorende lussen, stromen en spanningen:



Figuur 3 Dwarsdoorsnede eenaderige midden- en laagspanningskabel

Tussen de spanningen en stromen bestaan de volgende relaties:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \mathbf{C}'_v \cdot \begin{bmatrix} V_g \\ V_s \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \mathbf{C}'_i \cdot \begin{bmatrix} I_g \\ I_s \end{bmatrix}$$

met:

$$\mathbf{C}'_v = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}'_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

De lus impedantiematrix, wordt per kilometer afgeleid uit de spanningsval, ΔV_L , over de lussen als functie van de stroom, I_L :

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = -\mathbf{Z}'_L \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

waar:

$$\mathbf{Z}'_L = \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} \\ Z'_{21} & Z'_{22} \end{bmatrix}$$

De individuele componenten uit de lus impedantiematrix, \mathbf{Z}'_L , zijn hieronder gegeven:

Zelfimpedantie lus 1:

$$Z'_{11} = z'_1 + z'_2 + z'_3$$

waar:

- z'_1 = geleider impedantie
- z'_2 = inductantie t.g.v. wisselend magneetveld in isolatie
- z'_3 = impedantie van binnenste gedeelte scherm/armering

Zelfimpedantie lus 2

$$Z'_{22} = z'_4 + z'_5 + z'_6$$

waar:

- z'_4 = impedantie van buitenste gedeelte scherm/armering
- z'_5 = inductantie t.g.v. wisselend magneetveld in isolatie
- z'_6 = impedantie van pad retourarde

Mutuele koppeling lussen 1 en 2

$$Z'_{12} = Z'_{21} = -z'_7$$

Ingevuld geeft dit:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} z'_1 + z'_2 + z'_3 & -z'_7 \\ -z'_7 & z'_4 + z'_5 + z'_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Voor een kabel geldt de volgende vergelijking voor de spanningsval over deze kabel per meter:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_s \end{bmatrix} = -\mathbf{Z}'_N \cdot \begin{bmatrix} I_g \\ I_s \end{bmatrix}$$

De impedantiematrix \mathbf{Z}'_N is hierbij gelijk aan:

$$\mathbf{Z}'_N = \mathbf{C}_v^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} \\ Z'_{21} & Z'_{22} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{C}_i$$

$$\mathbf{Z}'_N = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} \\ Z'_{21} & Z'_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}'_N = \begin{bmatrix} z'_1 + z'_2 + z'_3 + z'_4 + z'_5 + z'_6 - 2 z'_7 & z'_4 + z'_5 + z'_6 - z'_7 \\ z'_4 + z'_5 + z'_6 - z'_7 & z'_4 + z'_5 + z'_6 \end{bmatrix}$$

Na splitsing geeft dit:

$$\mathbf{Z}'_N = \mathbf{Z}'_{NG} + \mathbf{Z}'_{NA}$$

$$\mathbf{Z}'_N = \begin{bmatrix} Z'_{gg} & Z'_{gs} \\ Z'_{gs} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z'_{aa} & Z'_{aa} \\ Z'_{aa} & Z'_{aa} \end{bmatrix}$$

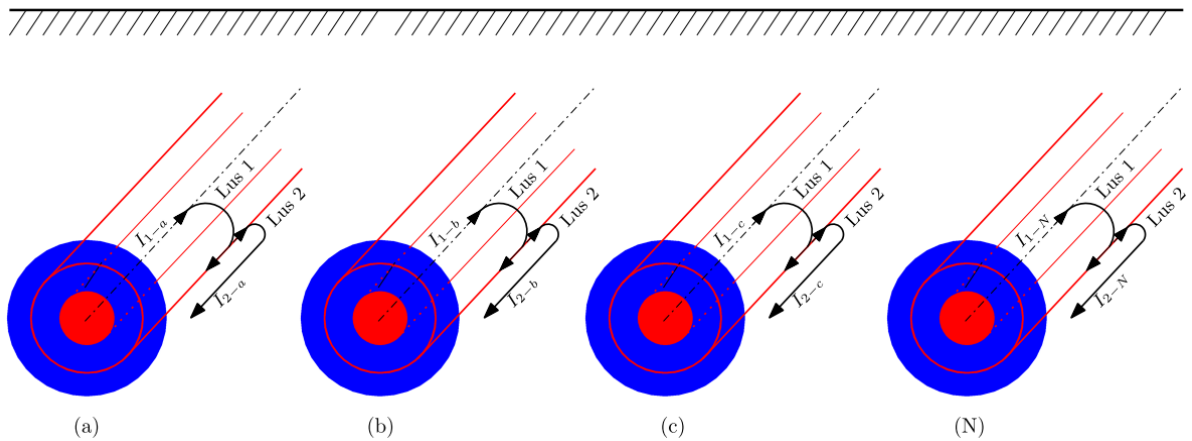
waar:

$$\mathbf{Z}'_{NG} = \begin{bmatrix} z'_1 + z'_2 + z'_3 - 2z'_7 & -z'_7 \\ -z'_7 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}'_{NA} = \begin{bmatrix} z'_4 + z'_5 + z'_6 & z'_4 + z'_5 + z'_6 \\ z'_4 + z'_5 + z'_6 & z'_4 + z'_5 + z'_6 \end{bmatrix}$$

2.3 LS-driefasensysteem uit eenaderige kabels

In deze paragraaf wordt de impedantiematrix afgeleid voor een ondergronds kabelcircuit bestaande uit vier afzonderlijke geleiders welke ieder voorzien zijn van een koperen scherm/armering. De impedantiematrix van deze kabels is reeds behandeld in voorgaande paragraaf. Een illustratie van het te bestuderen circuit is hieronder geschetst met vier Vulta kabels (gecombineerd scherm van staal- en koperdraden) in plat vlak formatie.



Figuur 4 Dwarsdoorsnede ondergronds kabelcircuit drie fasen + nul

Allereerst worden de lusvergelijkingen in matrixvorm geschreven:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{1-a} \\ \Delta V_{2-a} \\ \Delta V_{1-b} \\ \Delta V_{2-b} \\ \Delta V_{1-c} \\ \Delta V_{2-c} \\ \Delta V_{1-N} \\ \Delta V_{2-N} \end{bmatrix} = -\tilde{Z}_L \cdot \begin{bmatrix} I_{1-a} \\ I_{2-a} \\ I_{1-b} \\ I_{2-b} \\ I_{1-c} \\ I_{2-c} \\ I_{1-N} \\ I_{2-N} \end{bmatrix}$$

Met de lusimpedantiematrix \tilde{Z}_L gelijk aan:

$$\tilde{Z}_L = \begin{bmatrix} Z'_{11-a} & Z'_{12-a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z'_{21-a} & Z'_{22-a} & 0 & Z'_{ab} & 0 & Z'_{ac} & 0 & Z'_{aN} \\ 0 & 0 & Z'_{11-b} & Z'_{12-b} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{ba} & Z'_{21-b} & Z'_{22-b} & 0 & Z'_{bc} & 0 & Z'_{bN} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z'_{11-c} & Z'_{12-c} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{ca} & 0 & Z'_{cb} & Z'_{21-c} & Z'_{22-c} & 0 & Z'_{cN} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z'_{11-N} & Z'_{12-N} \\ 0 & Z'_{Na} & 0 & Z'_{Nb} & 0 & Z'_{Nc} & Z'_{21-N} & Z'_{22-N} \end{bmatrix}$$

Hier zijn de diagonaal elementen in magenta gelijk en is de matrix symmetrisch. De magenta gekleurde elementen worden gerepresenteerd door de lus impedantiematrix, Z'_L - zoals hierboven afgeleid in Paragraaf 2.2 - voor respectievelijk de kabels a, b, c en Nul. Alleen de aardschermen/armering van de kabels zijn mutueel gekoppeld. Deze mutuele koppeling is in detail beschreven door Pallaczek. De Pallaczek formule wordt voor het analytisch bepalen van de matrixelementen niet toegepast door zijn complexiteit, voor frequenties binnen het harmonische spectrum (100 kHz) is de vereenvoudiging

beschreven door [1] een goede benadering. De mutuele koppeling van de schermen kabel j naar kabel i is daarmee gelijk aan:

$$Z_{ji} = \frac{j\omega \mu}{2\pi} \left\{ -\ln \left(\frac{\gamma m s_{ji}}{2} + \frac{1}{2} - \frac{2m \ell}{3} \right) \right\} \quad (\Omega/m)$$

waar:

- ω = hoekfrequentie in rad/s
- μ = magnetische permeabiliteit in N/A²
- γ = exponent van Euler's constante = e^{0,577215665}
- $m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\rho}}$
- ρ = soortelijke bodemweerstand in Ω/m
- s_{ji} = afstand tussen de kabels i en j in meter
- ℓ = de som van de diepte van de kabels i en j in meter

De lusimpedantiematrix dient wederom geconverteerd te worden naar de impedantiematrix zoals gebruikt in Gaia. De methode is identiek aan de methodes zoals reeds in het bovenstaande behandeld. Allereerst worden de conversiematrices $\tilde{\mathbf{C}}_v$ en $\tilde{\mathbf{C}}_i$ bepaald:

voor spanning:

$$\begin{bmatrix} V_{1-a} \\ V_{2-a} \\ V_{1-b} \\ V_{2-b} \\ V_{1-c} \\ V_{2-c} \\ V_{1-N} \\ V_{2-N} \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{C}}_v \cdot \begin{bmatrix} V_{g-a} \\ V_{s-a} \\ V_{g-b} \\ V_{s-b} \\ V_{g-c} \\ V_{s-c} \\ V_{g-N} \\ V_{s-N} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{C}}_v = \begin{bmatrix} \mathbf{C}'_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{C}'_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C}'_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{C}'_v \end{bmatrix}$$

voor stroom:

$$\begin{bmatrix} I_{1-a} \\ I_{2-a} \\ I_{1-b} \\ I_{2-b} \\ I_{1-c} \\ I_{2-c} \\ I_{1-N} \\ I_{2-N} \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{C}}_i \cdot \begin{bmatrix} I_{g-a} \\ I_{s-a} \\ I_{g-b} \\ I_{s-b} \\ I_{g-c} \\ I_{s-c} \\ I_{g-N} \\ I_{s-N} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{C}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{C}'_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{C}'_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C}'_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{C}'_i \end{bmatrix}$$

waar de matrices \mathbf{C}'_v en \mathbf{C}'_i (2×2) gelijk zijn aan die afgeleid voor de eenaderige LS-kabel uit Paragraaf 2.2. De matrix impedantiematrix $\tilde{\mathbf{Z}}_N$ is hierbij gelijk aan:

$$\tilde{\mathbf{Z}}_N = \tilde{\mathbf{C}}_v^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{Z}}_L \cdot \tilde{\mathbf{C}}_i$$

$$\tilde{\mathbf{Z}}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}'_N & \tilde{\mathbf{Z}}_{ab} & \tilde{\mathbf{Z}}_{ac} & \tilde{\mathbf{Z}}_{aN} \\ & \mathbf{Z}'_N & \tilde{\mathbf{Z}}_{bc} & \tilde{\mathbf{Z}}_{bN} \\ & & \mathbf{Z}'_N & \tilde{\mathbf{Z}}_{cN} \\ & & & \mathbf{Z}'_N \end{bmatrix}$$

symmetrisch

waar \mathbf{Z}'_N afgeleid is in de voorgaande paragraaf en gelijk is aan:

$$\mathbf{Z}'_N = \begin{bmatrix} z'_1 + z'_2 + z'_3 - 2z'_7 & -z'_7 \\ -z'_7 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z'_4 + z'_5 + z'_6 & z'_4 + z'_5 + z'_6 \\ z'_4 + z'_5 + z'_6 & z'_4 + z'_5 + z'_6 \end{bmatrix}$$

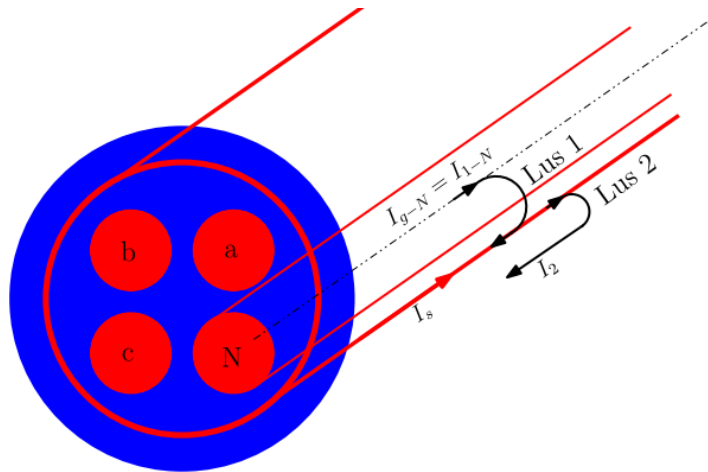
en waar de mutuele koppelingen $\tilde{\mathbf{Z}}_{ji}$ voor kabel j naar kabel i gelijk is aan:

$$\tilde{\mathbf{Z}}_{ji} = \begin{bmatrix} Z_{ji} & Z_{ji} \\ Z_{ji} & Z_{ji} \end{bmatrix}$$

De mutuele koppelingen zijn aan elkaar gelijk indien de kabels optimaal zijn getransponeerd (verwisseling van kabelpositie). De volledige impedantiematrix \mathbf{Z}'_N is gegeven in Bijlage A.

2.4 Meerdere laagspanningskabel

De meerdere LS-kabel hier behandeld is een typische kabel en opgebouwd uit vier identieke ronde geleiders geïsoleerd met kunststof en bijeengehouden door een vulling en een binnenmantel. De binnenmantel wordt omhuld door een scherm/armering van gecombineerd staal- en koperdraden. Deze armering wordt gerepresenteerd met de afmetingen van het gecombineerde maar met een equivalente soortelijke geleiding. De kabel wordt verder beschermt door een buitenmantel. Hieronder is de doorsnede van deze kabel gegeven:



Figuur 5 Dwarsdoorsnede meerraderig laagspanningskabel

Wat direct opvalt is de verschuiving van de geleiders van het hart van de armering naar de buitenzijde. Dit heeft invloed op de berekening van de inductantie en de mutuele koppeling van de lus gevormd door de geleider en de armering (Lus 1). Ook de mutuele koppeling van de geleiders zijn niet gelijk aan elkaar, hier kan onderscheid gemaakt worden tussen naastgelegen en tegenovergelegen geleiders. Wederom worden allereerst de relaties tussen lus- en geleidervariabelen bepaald. De kabel bestaat uit vijf lussen waarvan vier lussen tussen de geleiders en het scherm en één lus van het scherm retour door aarde. Alle geleiders zijn onderling mutueel gekoppeld en met het scherm. Hieronder de relatie tussen de lus- en geleidervariabelen:

Lusspanningen:

$$\begin{bmatrix} V_{1-a} \\ V_{1-b} \\ V_{1-c} \\ V_{1-N} \\ V_2 \end{bmatrix} = \check{C}_v \cdot \begin{bmatrix} V_{g-a} \\ V_{g-b} \\ V_{g-c} \\ V_{g-N} \\ V_s \end{bmatrix}$$

waar:

$$\check{C}_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\ddot{\mathbf{Z}}_{N1} = \begin{bmatrix} z_1 + z_2 + z_3 - 2z_7 & z_{ab} - 2z_7 & z_{ac} - 2z_7 & z_{aN} - 2z_7 & -z_7 \\ & z_1 + z_2 + z_3 - 2z_7 & z_{bc} - 2z_7 & z_{bN} - 2z_7 & -z_7 \\ & & z_1 + z_2 + z_3 - 2z_7 & z_{cN} - 2z_7 & -z_7 \\ & & & z_1 + z_2 + z_3 - 2z_7 & -z_7 \\ & & & & 0 \end{bmatrix}$$

symmetrisch

$$\ddot{\mathbf{Z}}_{N2} = \mathbf{E} \cdot (z_4 + z_5 + z_6)$$

en waar \mathbf{E} gelijk is aan een 5x5 matrix met alle elementen gelijk aan 1. De volledige impedantiematrix $\ddot{\mathbf{Z}}_N$ is gegeven in Bijlage B.

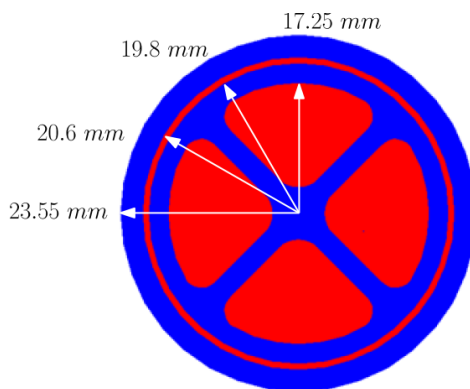
3 **KABELPARAMETERS**

Kabelparameters voor transiënte studies en voor studies in Gaia kunnen zowel analytisch (benadering) als met behulp van de oneindige- elementenmethode bepaald worden. ATP-routines zoals Cable Constants en Cable Parameters maken gebruik van de analytische methode omdat computers in die tijd onvoldoende krachtig waren om de integraalberekening uit te voeren. De impedantiematrix kan op een relatief eenvoudige manier bepaald worden met behulp van Finite Element Analysis (FEA) software.

De FEA-programma's nemen echter maar een beperkt deel (10 x 20 meter) van de retouraarde mee bij de bepaling van de impedantiematrix. Deze dient hierdoor gecorrigeerd te worden om de volledige retouraarde mee te nemen. De impedantie van de retouraarde (z_6 in \check{Z}_{N2}) komt in ieder element van de impedantiematrix voor. Deze wordt echter niet expliciet door de FEA-software berekend. Aan de hand van de impedantiematrixes zoals afgeleid in voorgaande paragrafen en met behulp van de vergelijkingen beschreven door Wedepohl in [1] kan deze echter wel berekend worden. Hieronder wordt deze methode gedetailleerd beschreven aan de hand van een voorbeeldberekening met een Vulta 4x150 mm² cusv kabel.

3.1 **Impedantiematrix FEA-simulatiesoftware**

Met behulp van een FEA-programma wordt de impedantiematrix van de kabel bepaald. Deze impedantiematrix is in Ω/km en H/km. Hieronder het model met bijhorende materiaal eigenschappen:



Figuur 6 Kabelopbouw VULTA 4x150 mm² cusv in FEA-software

Object	Materiaal	Rel. Permittivity [Eps]	Rel. Permeability [Mu]	Conductivity [S/m]
Geleider	Cu	1	0.999991	4.62E7
Isolatie	XLPE	2.5	1	0
Binnenmantel	PVC	8	1	0
Scherm	Cu_scherm	1	0.999991	42841831
Buitenmantel	PVC	8	1	0
Omgeving	Water	81	0.999991	0.01

De Vulta kabel heeft een gecombineerd scherm van staal- en koperdraden. In het model wordt deze gerepresenteerd door een scherm met de afmetingen van het gecombineerde scherm maar met een equivalente soortelijke geleiding. Het scherm wordt gemodelleerd als een buis met binnenstraal r_{s_binnen} en een buitenstraal r_{s_buiten} , bepaald door de draaddikte. De specifieke soortelijke geleiding $SG_{s_equivalent}$ (conductivity) is daarmee gelijk aan:

$$SG_{s_equivalent} = 5.8E7 \cdot \frac{A_{scherm}}{\pi \cdot (r_{s_buiten}^2 - r_{s_binnen}^2)}$$

waar A_{scherm} de effectieve scherm diameter in mm^2 representeert. Ook de geleiding van de geleider wordt gecorrigeerd, dit aan de hand van de door de leverancier gespecificeerde DC-weerstand. De complexe impedantiematrix in Ohm per kilometer zoals berekend m.b.v. FEA-software is hieronder gegeven:

$$\check{Z}_N = \begin{bmatrix} 0.163 + j0.6676 & 0.0385 + j0.6071 & 0.0352 + j0.5857 & 0.0379 + j0.6073 & 0.038 + j 0.5931 \\ 0.0385 + j0.6071 & 0.1621 + j0.668 & 0.0385 + j0.6071 & 0.0357 + j0.5854 & 0.038 + j 0.5931 \\ 0.0352 + j0.5875 & 0.0385 + j0.6071 & 0.163 + j0.6675 & 0.0379 + j0.6073 & 0.038 + j 0.5931 \\ 0.0379 + j0.6073 & 0.0357 + j0.5854 & 0.0379 + j0.6073 & 0.1621 + j0.6678 & 0.038 + j 0.5931 \\ 0.038 + j 0.5931 & 0.038 + j 0.5931 & 0.038 + j 0.5931 & 0.038 + j 0.5931 & 0.691 + j0.5927 \end{bmatrix}$$

Deze impedantiematrix bestaat voor deze kabel uit de elementen zoals hieronder gepresenteerd en in meer detail beschreven in paragraaf 2.4.

$$\check{Z}_N = \check{Z}_{N1} + \check{Z}_{N2}$$

met:

$$\check{Z}_{N1} = \begin{bmatrix} z_1 + z_2 + z_3 - 2z_7 & z_{ab} - 2z_7 & z_{ac} - 2z_7 & z_{aN} - 2z_7 & -z_7 \\ & z_1 + z_2 + z_3 - 2z_7 & z_{bc} - 2z_7 & z_{bN} - 2z_7 & -z_7 \\ & & z_1 + z_2 + z_3 - 2z_7 & z_{cN} - 2z_7 & -z_7 \\ & & & z_1 + z_2 + z_3 - 2z_7 & -z_7 \\ & & & & 0 \end{bmatrix}$$

symmetrisch

$$\check{Z}_{N2} = \mathbf{E} \cdot (z_4 + z_5 + z_6)$$

waar \mathbf{E} gelijk is aan een 5x5 matrix met alle elementen gelijk aan 1.

3.2 Correctie retourimpedantie

Zoals te zien bestaat het element $\check{Z}_N(5,5)$ uit de som van de impedanties z_4 , z_5 en z_6 waar z_6 de te corrigeren impedantie van de retouraarde is. Om deze te kunnen vervangen voor de retourimpedantie berekend volgens de methode beschreven door Wedepohl dient deze geïsoleerd te worden. Dit kan relatief eenvoudig door de impedanties z_4 en z_5 te berekenen, deze formules worden in detail beschreven in [1]. De berekende impedanties z_4 en z_5 worden vervolgens van $\check{Z}_N(5,5)$ afgetrokken om z_{6_FEA} te verkrijgen. Voor deze kabel zijn de impedanties z_4 en z_5 gelijk aan:

$$z_4 = 0.22488 + j 8.1138 \cdot 10^{-4} [\Omega/km]$$

$$z_5 = j 0.025939 [\Omega/km]$$

Daarmee is z_{6_FEA} te bepalen:

$$z_{6_FEA} = \check{Z}_N(5,5) - (z_4 + z_5) [\Omega/km]$$

ingevuld geeft:

$$z_{6_FEA} = 0.691 + j0.5927 - (0.22488 + j 8.1138 \cdot 10^{-4} + j 0.025939)$$

$$z_{6_FEA} = 0.0441995 + j0.5659107 [\Omega/km]$$

Vervolgens wordt de retourimpedantie door aarde bepaald zoals afgeleid in [1]. De retourimpedantie door aarde $z_{6_Wedepohl}$ is gelijk aan:

$$z_{6_Wedepohl} = 0.0494657 + j0.6650025 [\Omega/km]$$

De impedantiematrix wordt nu geheel gecorrigeerd door het verschil bij ieder element uit de matrix op te tellen:

$$\ddot{\mathbf{Z}}_{N_new} = \ddot{\mathbf{Z}}_N + \mathbf{E} \cdot (Z_{6_Wedepohl} - Z_{6_FEA})$$

waar \mathbf{E} een 5x5 matrix is met alle elementen gelijk aan 1, ingevuld geeft:

$$\ddot{\mathbf{Z}}_{N_new} = \ddot{\mathbf{Z}}_N + \mathbf{E} \cdot (0.0052662 + j0.0990918)$$

$$\ddot{\mathbf{Z}}_{N_new} = \begin{bmatrix} 0.1688 + j0.7672 & 0.0443 + j0.7067 & 0.041 + j0.6853 & 0.0438 + j0.7069 & 0.0438 + j0.6926 \\ 0.0443 + j0.7067 & 0.1679 + j0.7675 & 0.0443 + j0.7067 & 0.0415 + j0.685 & 0.0438 + j0.6927 \\ 0.041 + j0.6853 & 0.0443 + j0.7067 & 0.1688 + j0.7671 & 0.0438 + j0.7069 & 0.0438 + j0.6926 \\ 0.0438 + j0.7069 & 0.0415 + j0.685 & 0.0438 + j0.7069 & 0.1679 + j0.7674 & 0.0438 + j0.6926 \\ 0.0438 + j0.6926 & 0.0438 + j0.6927 & 0.0438 + j0.6926 & 0.0438 + j0.6926 & 0.2749 + j0.6922 \end{bmatrix}$$

In het Vision en Gaia typenbestand wordt door symmetrie in de kabel niet de gehele matrix gebruikt maar enkele elementen. Deze elementen zijn hieronder gegeven:

$$\ddot{\mathbf{Z}}_N = \begin{bmatrix} Z_c & Z_{ccn} & Z_{cct} & Z_{ccn} & Z_{ce} \\ Z_{ccn} & Z_c & Z_{ccn} & Z_{cct} & Z_{ce} \\ Z_{cct} & Z_{ccn} & Z_c & Z_{ccn} & Z_{ce} \\ Z_{ccn} & Z_{cct} & Z_{ccn} & Z_c & Z_{ce} \\ Z_{ce} & Z_{ce} & Z_{ce} & Z_{ce} & Z_e \end{bmatrix}$$

waar:

$$\begin{aligned} Z_c &= 0.1684 + j0.7673 \text{ } [\Omega/\text{km}] && (+ 0.006138 + j0.0514058) \\ Z_{ccn} &= 0.044 + j0.7068 \text{ } [\Omega/\text{km}] && (+ 0.005865 + j0.051505) \\ Z_{cct} &= 0.0412 + j0.6851 \text{ } [\Omega/\text{km}] && (+ 0.0053675 + j0.0516663) \\ Z_{ce} &= 0.0438 + j0.6926 \text{ } [\Omega/\text{km}] && (+ 0.0056625 + j0.0515657) \\ Z_e &= 0.2749 + j0.6922 \text{ } [\Omega/\text{km}] && (+ 0.005608 + j0.0515663) \end{aligned}$$

Deze parameters zijn iets afwijkend van de parameters zoals reeds in het typenbestand is opgenomen. Het verschil t.o.v. het typenbestand staat hierboven tussen haakjes gegeven. Deze afwijking is te wijten aan de methode gebruikt voor de correctie van de oneindige retouraarde.

SCILAB CODE

```
// Cable parameters Vulta 4x150 mm2 cusv

// Compute z4, z5 and z6 using Wedepohl equations
// constants
Mu_0 = 4*%pi*1E-7;
f = 50;
w = 2*%pi*f;

// outer sheath internal impedance
rho_sheath = 1/42841831; // rho = 1 / sigma
Mu_sheath = 0.9999914*Mu_0;
m = sqrt(%i*w*Mu_sheath/rho_sheath);
r2 = 19.8/1000; // radius over main insulation
r3 = 20.6/1000; // radius over conducting sheath
z4 = 1000 * coth(m*(r3-r2))*rho_sheath*m/(2*%pi*r3) + rho_sheath/(2*%pi*r3*(r2+r3)) // Ohms per km, eq. 6
Wedepohl

// impedance due to time-varying flux in outer insulation
r4 = 23.55/1000; // outer radius of cable
Mu_ins = 1*Mu_0; // 1*Mu_0
```

```

z5 = 1000 * %i*w*Mu_ins*log(r4/r3)/2 // Ohms per km, Wedepohl

// impedance of earth-return path
rho_earth = 100; // soil resistivity Ohms per m
m = sqrt(%i*w*Mu_0/rho_earth);
h = 1; // cable depth
Gamma = 1.7811;
z6 = 1000 * %i*w*Mu_0/(2*pi) * (-log(Gamma*m*r4/2) + .5 - 4*m*h/3); // Ohms per km, eq. 6 Wedepohl

// Impedance matrix at 50 Hz from FEA, cable buried at 1 meter
Mwater = [0.16302 0.002125 0.038508 0.0019326 0.035151 0.0018643 0.037941 0.0019331 0.038029 0.0018878;
0.038508 0.0019326 0.16207 0.0021262 0.038504 0.0019325 0.03569 0.0018635 0.038032 0.0018879; 0.035151
0.0018643 0.038504 0.0019325 0.16299 0.0021247 0.037939 0.0019332 0.038022 0.0018878; 0.037941 0.0019331
0.03569 0.0018635 0.037939 0.0019332 0.16212 0.0021258 0.038019 0.0018876; 0.0380290.0018878
0.0380320.0018879 0.0380220.0018878 0.0380190.0018876 0.26908 0.0018865];

for i=1:5,
    for j=1:10,
        if modulo(j,2) == 0 then // 2, 4, 6, 8, 10 or 12
            Mx(i,j)=Mwater(i,j)*w;
        else Mx(i,j)=Mwater(i,j);
        end,
    end,
end

// Create complex Z matrix
for i=1:5,
    n = 1;
    for j=1:5,
        Zt(i,j) = complex(Mx(i,n),Mx(i,n+1));
        n = n+2;
    end,
end

// compute earth return path FEA
z6_FEA = Zt(5,5)-z4-z5

// compute new impedance matrix with return path Wedepohl
Zt_new = Zt - z6_FEA*ones(5,5) + z6*ones(5,5)

// compute new Gaia parameters
Zc = (Zt_new(1,1)+Zt_new(2,2)+Zt_new(3,3)+Zt_new(4,4))/4;
Zcct = (Zt_new(1,3)+Zt_new(2,4)+Zt_new(3,1)+Zt_new(4,2))/4;
Zccn = (Zt_new(1,2)+Zt_new(2,3)+Zt_new(3,4)+Zt_new(4,1))/4;
Zce = sum(Zt_new(5,1:4))/4;
Ze = Zt_new(5,5);

```

4 FASE-AARDSLUITINGEN SECTORVORMIGE LS-KABEL IN GAIA EN VISION

In dit hoofdstuk wordt met behulp van enigszins simpele netwerken de fase-aarde kortsluitstroomberekening in Gaia gevalideerd. Alle configuraties worden vervolgens berekend met Vision Network Analysis. De meest interessante configuratie is een kabel met parallelle retourtakken. De volgende fase-aardfouten worden behandeld:

- 1) Fase L1 – oneindige aarde
- 2) Fase L1 – eindige aarde
- 3) Fase L1 – aarde, retour aardscherm
- 4) Fase L1 – aarde, retour aardscherm // N
- 5) Fase L2 – aarde, retour aardscherm // N
- 6) Fase L1 – aarde, retour aardscherm // N // PE-geleider
- 7) Fase L1 – aarde, retour aardscherm // N // PE-geleider (mutueel gekoppeld)

Er wordt gebruik gemaakt van een kabel met sectorvormige geleiders omdat hier de mutuele koppeling tussen de geleiders het grootst is. Daarnaast worden kabels met grotere diameters standaard sectorvormig uitgevoerd.

4.1 Kabelgegevens

De kabel is een standaard Volta 4x150 cusv uit het typenbestand, dit is een kabel met sectorvormige geleiders en een gecombineerd scherm van staal- en koperdraden. De modellering is in meer details behandeld in document ‘Parameters LS-kabels voor negengeleiderloadflow, Vulto en Volta’ o8-075 pmo. De kapelopbouw is gegeven in Figuur 6. De gehele impedantiematrix is berekend m.b.v. FEA-software en gecorrigeerd om de invloed van de ‘oneindige’ omgeving mee te nemen (FEA-programma’s nemen een beperkte omgeving mee). De gehele gecorrigeerde impedantiematrix is hieronder gegeven (parameters uit typenbestand):

$$Z_{55} = \begin{bmatrix} Z_c & Z_{ccn} & Z_{cct} & Z_{ccn} & Z_{ce} \\ Z_{ccn} & Z_c & Z_{ccn} & Z_{cct} & Z_{ce} \\ Z_{cct} & Z_{ccn} & Z_c & Z_{ccn} & Z_{ce} \\ Z_{ccn} & Z_{cct} & Z_{ccn} & Z_c & Z_{ce} \\ Z_{ce} & Z_{ce} & Z_{ce} & Z_{ce} & Z_e \end{bmatrix}$$

waar:

$$\begin{aligned} Z_c &= 0.1745 + j0.8187 \Omega \\ Z_{ccn} &= 0.0499 + j0.7583 \Omega \\ Z_{cct} &= 0.0466 + j0.7368 \Omega \\ Z_{ce} &= 0.0495 + j 0.7442 \Omega \\ Z_e &= 0.2805 + j0.7438 \Omega \end{aligned}$$

ingevuld geeft:

$$Z_{55} = \begin{bmatrix} 0.1745 + j0.8187 & 0.0499 + j0.7583 & 0.0466 + j0.736 & 0.0499 + j0.7583 & 0.0495 + j 0.7442 \\ 0.0499 + j0.7583 & 0.1745 + j0.8187 & 0.0499 + j0.7583 & 0.0466 + j0.736 & 0.0495 + j 0.7442 \\ 0.0466 + j0.736 & 0.0499 + j0.7583 & 0.1745 + j0.8187 & 0.0499 + j0.7583 & 0.0495 + j 0.7442 \\ 0.0499 + j0.7583 & 0.0466 + j0.736 & 0.0499 + j0.7583 & 0.1745 + j0.8187 & 0.0495 + j 0.7442 \\ 0.0495 + j 0.7442 & 0.0495 + j 0.7442 & 0.0495 + j 0.7442 & 0.0495 + j 0.7442 & 0.2805 + j0.7438 \end{bmatrix}$$

Later wordt deze impedantiematrix gebruikt om de kortsluitstromen te berekenen in verschillende netconfiguraties. Indien de nulgeleider en het aardscherm parallel gekoppeld worden kan de

impedantiematrix van de kabel gereduceerd worden tot een 4x4 matrix. Deze reductie wordt verder beschreven in Bijlage C, de reductie van de matrix is hieronder uitgewerkt:

$$A = \begin{bmatrix} Z_c & Z_{ccn} & Z_{cct} & Z_{ccn} \\ Z_{ccn} & Z_c & Z_{ccn} & Z_{cct} \\ Z_{cct} & Z_{ccn} & Z_c & Z_{ccn} \\ Z_{ccn} & Z_{cct} & Z_{ccn} & Z_c \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} Z_{ce} - Z_{ccn} \\ Z_{ce} - Z_{cct} \\ Z_{ce} - Z_{ccn} \\ Z_{ce} - Z_c \end{bmatrix}$$

$$C = Z_e - Z_{ce} - (Z_{ce} - Z_c) = Z_e - Z_{ce} - Z_{ce} + Z_c$$

de 4x4 matrix voor drie fasengeleiders één retourgeleider wordt nu:

$$Z_{44} = A - BC^{-1}B^T$$

ingevuld geeft:

$$Z_{44} = \begin{bmatrix} 0.175 + j0.8186 & 0.0496 + j0.7585 & 0.0471 + j0.7367 & 0.0516 + j0.7529 \\ 0.0496 + j0.7585 & 0.1746 + j0.8186 & 0.0496 + j0.7585 & 0.0467 + j0.74 \\ 0.0471 + j0.7367 & 0.0496 + j0.7585 & 0.1746 + j0.8186 & 0.0516 + j0.7529 \\ 0.0516 + j0.7529 & 0.0467 + j0.74 & 0.0516 + j0.7529 & 0.1369 + j0.7742 \end{bmatrix}$$

dit geeft:

$$\begin{aligned} Z_c &= 0.1749 + j0.8186 \Omega \\ Z_{ccn} &= 0.0496 + j0.7585 \Omega \\ Z_{cct} &= 0.047 + j0.7378 \Omega \\ Z_{ce} &= 0.0467 + j0.74 \Omega / 0.0516 + j0.7529 \Omega \quad (\text{afhankelijk van de fout, zie Paragraaf 4.5}) \\ Z_e &= 0.1369 + j0.7742 \Omega \end{aligned}$$

SCILAB CODE (Case4.1 - 4.5)

```
// Cable Volta 4x150 Cu
// Create impedance matrix
Rc = .1745; Xc = 0.8187; Rccn = .0499; Xccn = .7583; Rcct = 0.0466; Xcct = 0.7368; Re = .2805; Xe = .7438; Rce = 0.0495;
Xce = .7442;

Z55 = [Rc+%i*Xc Rccn+%i*Xccn Rcct+%i*Xcct Rccn+%i*Xccn Rce+%i*Xce; Rccn+%i*Xccn Rc+%i*Xc Rccn+%i*Xccn
Rcct+%i*Xcct Rce+%i*Xce; Rcct+%i*Xcct Rccn+%i*Xccn Re+%i*Xe Rccn+%i*Xccn Rce+%i*Xce; Rccn+%i*Xccn
Rcct+%i*Xcct Rccn+%i*Xccn Rc+%i*Xc Rce+%i*Xce; Rce+%i*Xce Rce+%i*Xce Rce+%i*Xce Rce+%i*Xce Rce+%i*Xce];

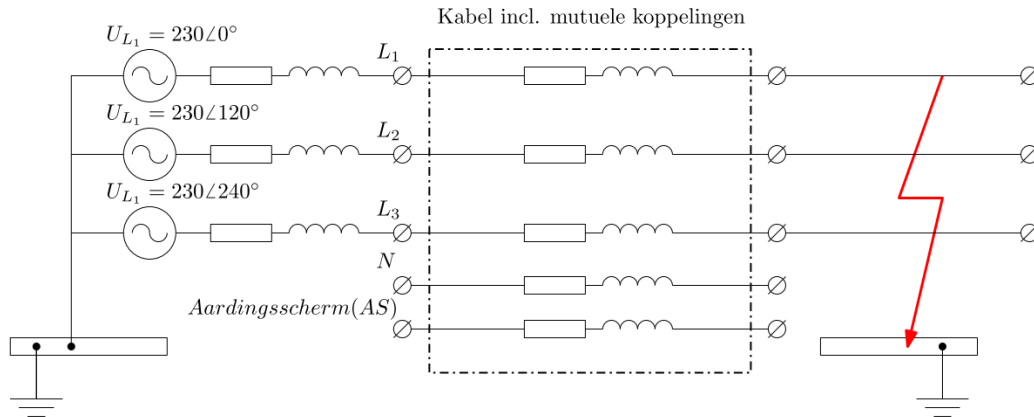
// Reduction impedance matrix to 4x4
A = Z55(1:4,1:4);
B = Z55(1:4,5)-Z55(1:4,4);
C = Z55(5,5)-Z55(5,4)-(Z55(4,5)-Z55(4,4));

Z44 = A - B*inv(C) * B.'

Zc = (Z44(1,1)+Z44(2,2)+Z44(3,3))/3
Zcct = (Z44(1,3)+Z44(2,4)+Z44(3,1))/3
Zccn = (Z44(1,2)+Z44(2,1)+Z44(2,3)+Z44(3,2))/4
Zce = sum(Z44(4,1:3))/3
Ze = Z44(4,4)
// Zce for L1 or L3 to earth
Zce_L1 = Z44(4,1)
// Zce for L2 to earth
Zce_L2 = Z44(4,2)
```

4.2 Fase-aardfout enkel retour 'oneindige' aarde

Om te beginnen een enigszins simpele casus waar een eenfase-aardfout gesimuleerd wordt waarbij de retour direct aan het sterpunt van de voeding gekoppeld is, zie onderstaand circuit:



Figuur 7 Fase-aardfout retour 'oneindige' aarde

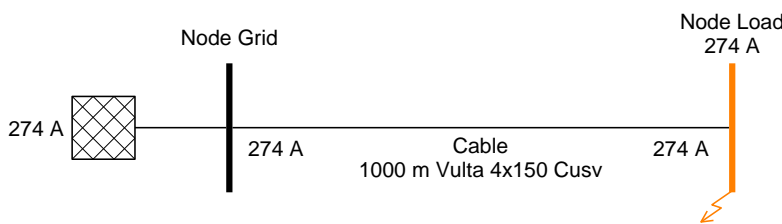
De stromen in de fasen L_2 en L_3 hebben geen pad om te lopen. Indien het net oneindig sterk wordt verondersteld heeft enkel de langsimpedantie van de fase 1 geleider invloed op de kortsluitstroom. De kortsluitstroom mag nu als volgt berekend worden:

$$I_K = \frac{U_{L1}}{Z_c} = \frac{230}{0.1745 + j0.8187} = 57.28 - j268.73 \text{ A}$$

de absolute waarde is gelijk aan:

$$|I_K| = |57.28 - j268.73| = 274.76 \text{ A}$$

Deze stroom is tevens in Gaia berekend (ValidatieGaia_4.2.gnf), hieronder is het netwerk gegeven tezamen met de resultaten van de fase-aarde kortsluitsroomberekening:



De resultaten komen op een afrondingsfout na overeen. Om deze berekening uit te voeren in Vision Network Analysis dient eerst de homopolaire impedantie bepaald te worden. In bijlage E is de methode beschreven om deze impedantie te bepalen uit de gereduceerde 4x4 matrix. Voor deze configuratie worden de elementen Z_e en Z_{ce} gelijkgesteld aan 0. De homopolaire impedantie is voor deze configuratie gelijk aan $Z_0 = 0.272 + j2.315 \Omega/km$. Ingevuld in Vision geeft dit nagenoeg dezelfde kortsluitstroom als hierboven berekend, de kortsluitstroom in Vision is: $I_K = 58 - j270 \text{ A}$.

SCILAB CODE

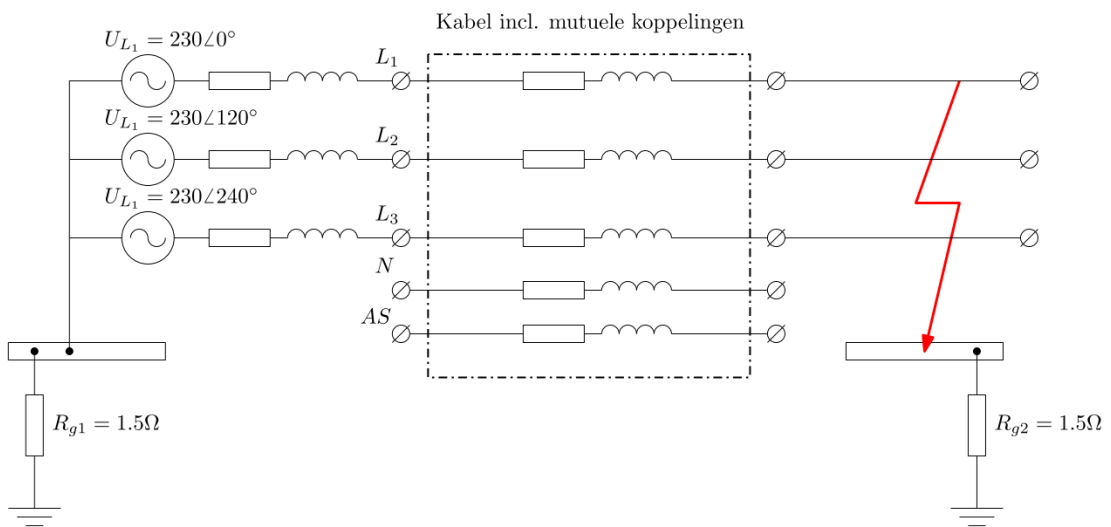
```
// Case 4.2
clc
clear
```

```
// First run 'Case4.1-4.5'
// set parameters
Zce = 0
Ze = 0

// compute zero and normal sequence impedances
Z0 = Zc+Zccn+Zcct+3*(Ze-2*Zce)
Z1 = Zc-(Zccn+Zcct)/2
```

4.3 Fase-aardfout retour 'eindige' aarde

In deze casus is een Ohmse weerstand opgenomen welke de aardverspreidingsweerstand van de aardpennen representeert. Wederom zijn de Nul en PE niet doorverbonden en is er geen belasting aan de belastingzijde van de kabel. Het kortsluitcircuit wordt in dit geval gevormd door de langsimpedantie van de kabel tezamen met twee keer de aardverspreidingsweerstand, zie onderstaand circuit:



Figuur 8 Fase-aardfout retour 'eindige' aarde

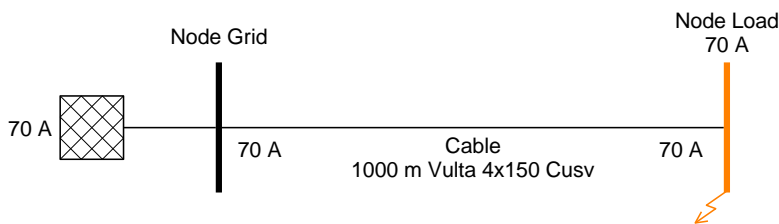
De kortsluitstroom wordt nu gelijk aan:

$$I_K = \frac{U_{L1}}{R_{g1} + R_{g2} + Z_c} = \frac{230}{3 + 0.1745 + j0.8187} = 67.93 - j17.52 A$$

de absolute waarde is gelijk aan:

$$|I_K| = |67.93 - j17.52| = 70.16 A$$

Deze casus is tevens in Gaia berekend (ValidatieGaia_4.3.gnf), de resultaten zijn hieronder gegeven:



De resultaten zijn aan elkaar gelijk. Om de homopolaire impedantie te berekenen wordt voor deze configuratie het element Z_{ce} wederom naar nul gezet en het element Z_e wordt gelijk aan $R_{g1} + R_{g2}$. De homopolaire impedantie wordt nu $Z_0 = 9.272 + j2.315 \Omega/km$. Ingevuld in Vision geeft dit nagenoeg dezelfde kortsluitstroom als hierboven berekend, de kortsluitstroom in Vision is gelijk aan: $I_K = 68 - j17 A$.

SCILAB CODE

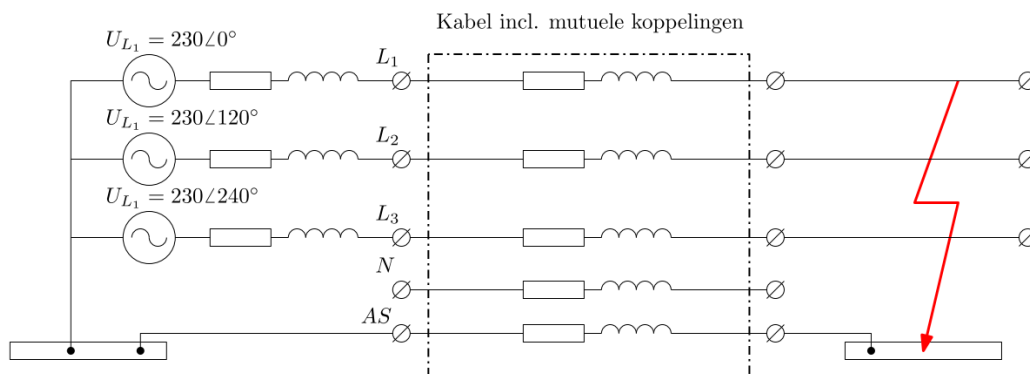
```
// Case 4.3
clc
clear

// First run 'Case4.1-4.5'
// set parameters
Zce = 0
Ze = 3

// compute zero and normal sequence impedances
Z0 = Zc+Zccn+Zcct+3*(Ze-2*Zce)
Z1 = Zc-(Zccn+Zcct)/2
```

4.4 Fase-aardfout retourpad via aardscherm

Bij deze casus is het retourcircuit enker het aadscherm van de kabel. Deze is echter mutueel gekoppeld aan het fasecircuit, dit maakt de berekening van de kortsluitstroom ietwat complexer. Hieronder is het gehele circuit gegeven:



Figuur 9 Fase-aardfout retourpad via aardscherm

De fasespanning is nu gelijk aan spanningsval over de fasegeleider plus de spanningsval over het aardscherm, oftewel: $230 = \Delta U_{L1} + \Delta U_{PE}$. De kortsluitstroom loopt zowel door de fasegeleider als door het aardscherm (retour), in het aardscherm is deze echter 180° gedraaid. In de impedantiematrix van de kabel is de spanningsval over de kabel gedefinieerd van *Node Grid* naar *Node Load*, de bovenstaande vergelijking dient dus herschreven te worden: $230 = \Delta U_{L1} - \Delta U_{PE}$. De spanningsval over de kabel uitgeschreven voor dU_{L1} en dU_{PE} geeft:

$$\begin{aligned} \Delta U_{L1} &= Zc * I_{L1} + Zce * I_{PE} \\ \Delta U_{PE} &= Zce * I_{L1} + Ze * I_{PE} \end{aligned}$$

met I_{PE} gelijk aan $-I_{L1}$:

$$\begin{aligned} 230 &= Zc * I_{L1} - Zce * I_{L1} - Zce * I_{L1} + Ze * I_{L1} \\ 230 &= I_{L1}(Zc + Ze - 2Zce) \end{aligned}$$

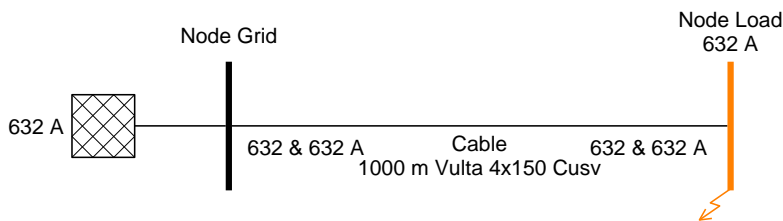
De kortsluitstroom, I_K , is gelijk aan I_{L1} . Opgelost voor I_K geeft:

$$I_K = I_{L1} = \frac{230}{Z_c + Z_e - 2Z_{ce}} = \frac{230}{0.356 + j0.0741} = 619.24 + j128.9 \text{ A}$$

de absolute waarde van de kortsluitstroom is:

$$|I_K| = |619.24 + j128.9| = 632.51 \text{ A.}$$

Deze casus berekend in Gaia (ValidatieGaia_4.4.gnf) geeft de volgende resultaten:



Concluderend dat de berekende kortsluitstromen overeenkomen en dat de mutuele koppeling een zeer grote invloed heeft op de grootte van de kortsluitstroom. De langsimpedantie is immers groter geworden dan in het voorbeeld van Paragraaf 4.2, echter door de mutuele koppeling is de stroom twee keer zo groot geworden! De homopolaire impedantie voor deze casus is gelijk aan $Z_0 = 0.816 + j0.081 \Omega/km$. Dit is berekend zoals beschreven in Bijlage E met de elementen Z_{ce} en Z_e gelijk aan die van de 5x5 matrix. Ingevuld in Vision geeft dit exact dezelfde kortsluitstroom als hierboven berekend.

SCILAB CODE

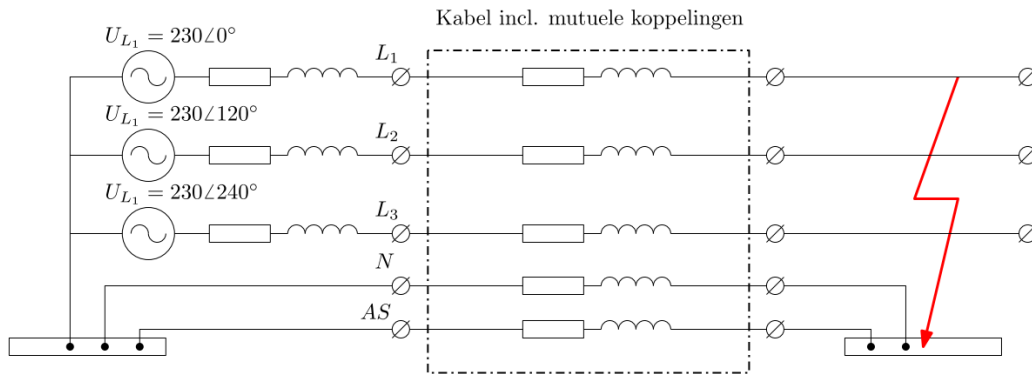
```
// Case 4.4
clc
clear

// First run 'Case4.1-4.5'
// set parameters
Zce = Rce + %i*Xce;
Ze = Re + %i*Xe;

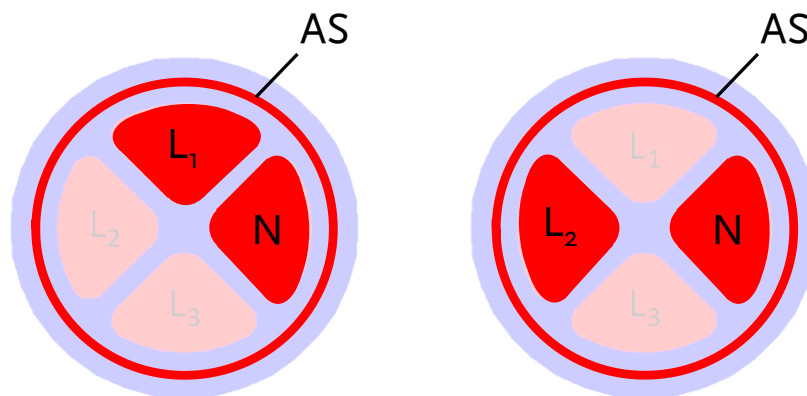
// compute zero and normal sequence impedances
Z0 = Zc+Zccn+Zcct+3*(Ze-2*Zce)
Z1 = Zc-(Zccn+Zcct)/2
```

4.5 Fase-aardfout retour via aardscherm en nulgeleider

Bij deze casus bestaat het retourcircuit uit zowel het aardscherm als de nulgeleider. Deze zijn aan beide zijden van de kabel via de aardrail gekoppeld. Wederom hebben de mutuele koppelingen effect op de kortsluitstroom. De mutuele koppeling tussen de fase- en de nulgeleider is niet voor alle fasen gelijk, fasen L_1 en L_3 liggen naast de nulgeleider en fase L_2 ligt tegenover de nulgeleider. Deze asymmetrie is terug te zien in de verschillende kortsluitstromen, hieronder worden twee verschillende fase-aarde kortsluitstromen berekend.



Deze casus is identiek aan de casus behandeld in voorgaande paragraaf alleen wordt hier de gereduceerde impedantiematrix gebruikt. In deze berekening speelt de mutuele koppeling tussen de geleiders een rol, door de asymmetrie in de kabel zijn de fase-aarde kortsluitstromen voor L_1 en L_2 niet gelijk. Zoals te zien in onderstaand figuur en impedantiematrix Z_{44} is de mutuele koppeling tussen L_1 en Nul niet gelijk aan de mutuele koppeling tussen L_2 en Nul.



Figuur 10 Vulta 4x150 mm² cusv, links: fase-aardfout L_1 retour aardscherm // N
rechts: fase-aardfout L_2 retour aardscherm // N

4.5.1 FASE-AARDFOUT, FASE L_1

In dit geval liggen de geleiders L_1 en Nul naast elkaar waardoor de mutuele koppeling relatief groot is, dit is ook terug te zien in de impedantiematrix waar $Z_{44}(1,4) > Z_{44}(2,4)$. De spanningsval over de kabel uitgeschreven voor ΔU_{L_1} en ΔU_{Retour} geeft:

$$\Delta U_{L_1} = Z_{44}(1,1) * I_{L_1} + Z(1,4) * I_{Retour}$$

$$\Delta U_{Retour} = Z_{44}(4,1) * I_{L_1} + Z_{44}(4,4) * I_{Retour}$$

waar I_{Retour} gelijk is aan $-I_{L1}$, uitgeschreven voor 230 = $\Delta U_{L1} - \Delta U_{Retour}$ geeft:

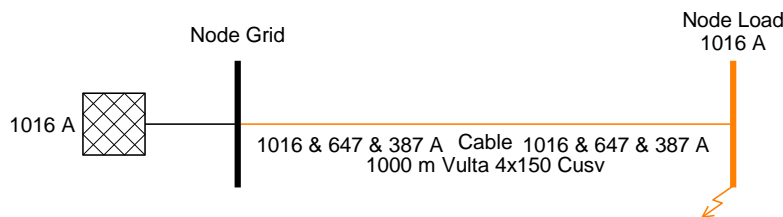
$$230 = Z_{44}(1,1) * I_{L1} - Z_{44}(1,4) * I_{L1} - Z_{44}(4,1) * I_{L1} + Z_{44}(4,4) * I_{L1}$$

De kortsluitstroom, I_K , is gelijk aan I_{L1} . Opgelost voor I_K geeft:

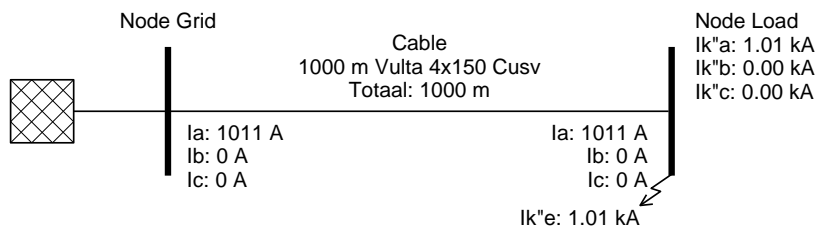
$$I_K = I_{L1} = \frac{230}{Z_{44}(1,1) + Z_{44}(4,4) - 2Z_{44}(1,4)} = \frac{230}{0.209 + j0.087} = 938.84 - j390.9 \text{ A}$$

$$|I_K| = |938.84 - j390.9| = 1017 \text{ A}$$

Deze stroom is nagenoeg gelijk aan die berekend met Gaia:



De met Vision Network Analysis berekende kortsluitstroom – met parameters uit het typenbestand – wijkt niet veel af van die berekend met Gaia, zie onderstaand resultaat:



De complexe kortsluitstroom is gelijk aan $937 - j381 \text{ A}$. Concluderend dat de homopolaire impedantie zoals opgenomen in het typenbestand de interne homopolaire impedantie betreft berekend voor een fout met een geleider liggende naast de nulgeleider. In Vision wordt deze kortsluitstroom berekend met de homopolaire- en de bedrijfsimpedantie van de kabel. Bij benadering mag de homopolaire impedantie bepaald worden middels de volgende vergelijking:

$$Z_0 \approx Z_c + Z_{ccn} + Z_{cct} + 3(Z_e - 2Z_{ce})$$

voor deze verbinding en fout is de homopolaire impedantie gelijk aan ($Z_{ce} = 0.0516 + j0.7529 \text{ } \Omega$):

$$Z_0 \approx 0.373 + j0.12 \text{ } \Omega/\text{km}$$

De bedrijfsimpedantie volgt uit:

$$Z_1 \approx Z_c - \frac{Z_{ccn} + Z_{cct}}{2} \approx 0.127 + j0.0704 \text{ } \Omega/\text{km}$$

De berekende homopolaire- en bedrijfsimpedantie wijkt iets af van die uit het typenbestand. De kortsluitstroom berekend met Vision Network Analysis met de nieuw berekende parameters is gelijk aan $937 - j391 \text{ A}$. Deze is met een te verwaarlozen afwijking gelijk aan de handberekende kortsluitstroom.

4.5.2 FASE-AARDFOUT, FASE L₂

De geleiders L₂ en Nul liggen tegenover elkaar, zie

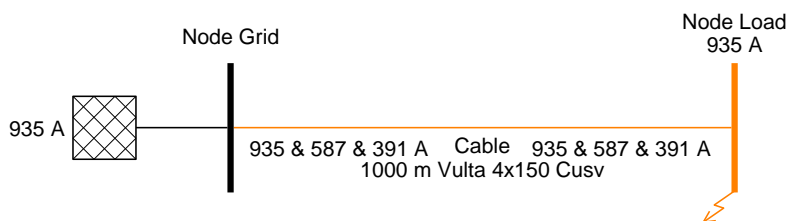
Figuur 10, waardoor de mutuele koppeling kleiner is, dit is terug te zien in de kortsluitstroom zoals hieronder berekend:

$$230 = Z_{44}(2,2) * I_{L_1} - Z_{44}(2,4) * I_{L_1} - Z_{44}(4,2) * I_{L_1} + Z_{44}(4,4) * I_{L_1}$$

$$I_K = I_{L_1} = \frac{230}{Z_{44}(2,2) + Z_{44}(4,4) - 2Z_{44}(2,4)} = \frac{230}{0.218 + j0.113} = 832.05 - j430.39 \text{ A}$$

$$|I_K| = |832.05 - j430.39| = 936.77 \text{ A}$$

De stroom is, zoals verwacht, kleiner dan de stroom berekend in de voorgaande paragraaf. Hieronder het resultaat van de berekening in Gaia:



De resultaten zijn nagenoeg gelijk. Om deze kortsluitstroom in Vision te berekenen dient de homopolaire impedantie herberekend te worden met een afwijkende Z_{ce} . Deze is namelijk afhankelijk van de positie van de geleiders in de kabel, in dit geval tegenovergelegen aan de nulgeleider. De homopolaire impedantie voor deze fout is gelijk aan:

$$Z_0 \approx Z_c + Z_{ccn} + Z_{cct} + 3(Z_e - 2Z_{ce})$$

met:

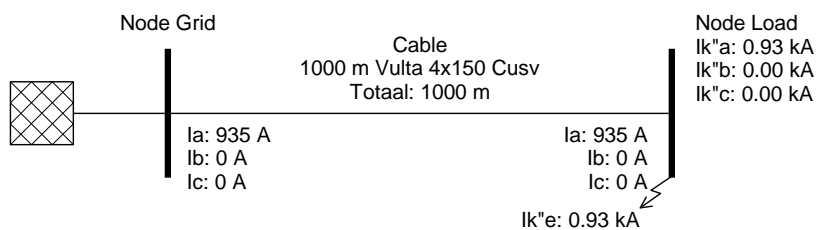
$$Z_{ce} = 0.0467 + j 0.74 \Omega$$

ingevuld geeft:

$$Z_0 \approx 0.402 + j0.198 \Omega/\text{km}$$

Met de aangepaste homopolaire- en bedrijfsimpedantie zijn de berekeningsresultaten van Vision gelijk aan de handberekening en Gaia. De berekende complexe kortsluitstroom in Vision is $831 - j429 \text{ A}$. Zie de onderstaande berekeningsresultaten (absolute kortsluitstromen):

Aangepaste homopolaire- en bedrijfsimpedantie



SCILAB CODE

```
// Case 4.4
clc
clear

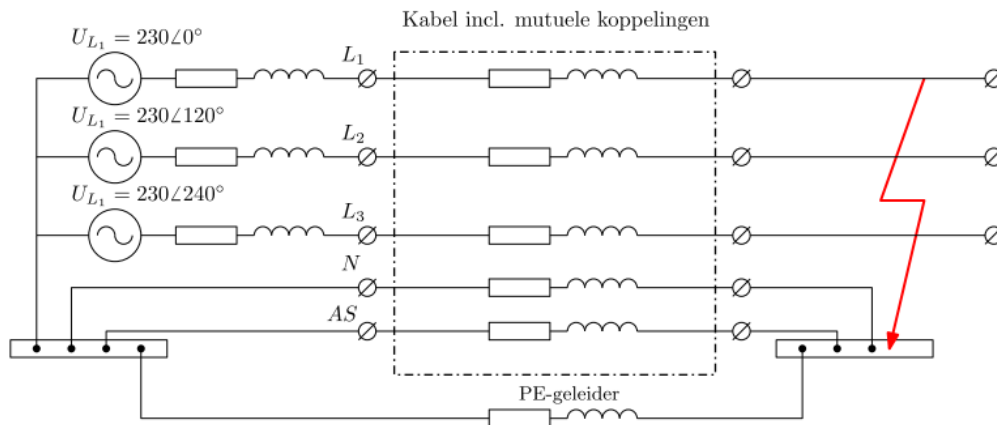
// First run 'Case4.1-4.5'

// Case 4.5.1 zero-sequence impedance, fault L1 or L3 to earth
Z0 = Zc+Zccn+Zcct+3*(Ze-2*Zce_L1)
// Case 4.5.2 zero-sequence impedance, fault, L2 to earth
Z0 = Zc+Zccn+Zcct+3*(Ze-2*Zce_L2)

// normal impedance
Z1 = Zc-(Zccn+Zcct)/2
```

4.6 Fase-aardfout retour aardscherm // nulgeleider // PE-geleider

De casus zoals behandeld in Paragraaf 4.5.1 wordt hier uitgebreid met een parallelle retourtak. Deze retourtak bestaat uit een 150 mm² koperen PE-geleider. De PE-geleider is mutueel niet gekoppeld met de 4x150 mm² kabel, de fysieke afstand wordt groot genoeg geacht om deze beïnvloeding te verwaarlozen. Het retourpad wordt nu gevormd door de nulgeleider parallel aan zowel het aardingsscherm als aan de PE-geleider. De kabels liggen beide onder de grond op een diepte van 1 meter. Hieronder is het te bestuderen circuit gegeven:



Om meer inzicht te krijgen in de verdeling van de stromen is gekozen om met de volledige impedantiematrix te werken en deze niet te reduceren. Voor de spanningsval over alle geleiders geldt:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{L_1} \\ \Delta U_{L_2} \\ \Delta U_{L_3} \\ \Delta U_N \\ \Delta U_{AS} \\ \Delta U_{PE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c & Z_{ccn} & Z_{cct} & Z_{ccn} & Z_{ce} & 0 \\ Z_{ccn} & Z_c & Z_{ccn} & Z_{cct} & Z_{ce} & 0 \\ Z_{cct} & Z_{ccn} & Z_c & Z_{ccn} & Z_{ce} & 0 \\ Z_{ccn} & Z_{cct} & Z_{ccn} & Z_c & Z_{ce} & 0 \\ Z_{ce} & Z_{ce} & Z_{ce} & Z_{ce} & Z_e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{PE} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{L_1} \\ I_{L_2} \\ I_{L_3} \\ I_N \\ I_{AS} \\ I_{PE} \end{bmatrix}$$

Uit bovenstaand schema zijn de volgende conclusies te trekken:

$$\begin{aligned} I_{L_1} &= -(I_N + I_{AS} + I_{PE}) \\ I_{L_2} &= I_{L_3} = 0 \\ \Delta U_{L_1} - \Delta U_N &= 230 \text{ V} \\ \Delta U_N &= \Delta U_{AS} = \Delta U_{PE} \end{aligned}$$

dus:

$$\begin{aligned} 230 &= I_{L_1} Z_c + I_N Z_{ccn} + I_{PE} Z_{ce} - (I_{L_1} Z_{ccn} + I_N Z_c + I_{AS} Z_{ce}) \\ &= I_{L_1} (Z_c - Z_{ccn}) + I_N (Z_{ccn} - Z_c) \\ 0 &= I_{L_1} + I_N + I_{AS} + I_{PE} \\ 0 &= I_{L_1} Z_{ccn} + I_N Z_c + I_{AS} Z_{ce} - I_{L_1} Z_{ce} - I_N Z_{ce} - I_{AS} Z_e \\ &= I_{L_1} (Z_{ccn} - Z_{ce}) + I_N (Z_c - Z_{ce}) + I_{AS} (Z_c - Z_e) \\ 0 &= I_{L_1} Z_{ccn} + I_N Z_c + I_{AS} Z_{ce} - I_{PE} Z_{PE} \end{aligned}$$

bovenstaande vergelijkingen in matrixvorm:

$$\begin{bmatrix} 230 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Zc - Zccn & Zccn - Zc & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ Zccn - Zce & Zc - Zce & Zce - Ze & 0 \\ Zccn & Zc & Zce & -Z_{PE} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{L_1} \\ I_N \\ I_{AS} \\ I_{PE} \end{bmatrix}$$

opgelost voor de stroomvector I geeft:

$$\begin{bmatrix} I_{L_1} \\ I_N \\ I_{AS} \\ I_{PE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Zc - Zccn & Zccn - Zc & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ Zccn - Zce & Zc - Zce & Zce - Ze & 0 \\ Zccn & Zc & Zce & -Z_{PE} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 230 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

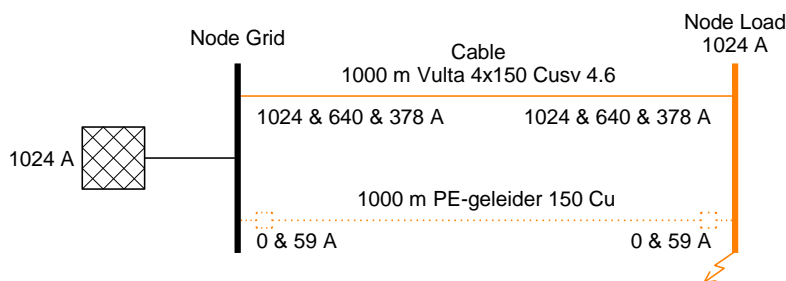
$$\begin{bmatrix} I_{L_1} \\ I_N \\ I_{AS} \\ I_{PE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 936.52 - j415.6 \\ -558.25 + j312.26 \\ -376.12 + j43.97 \\ -1.17 + j59.38 \end{bmatrix} A$$

De kortsluitsroom is gelijk aan de stroom door fase L_1 , de absolute waarde van de kortsluistroom is:

$$|I_K| = |I_{L_1}| = |936.52 - j415.6| = 1024.6 A$$

Wat direct opvalt is dat de stroom door de PE-geleider relatief klein is, dit alles is te wijten aan de mutuele koppelingen in de kabel waardoor de retour- de heenstroom volgt. Het verschil in kortsluitstroom met en zonder PE-geleider is slechts 8.6 A.

De PE-geleider wordt in Gaia gerepresenteerd door een kabel waarbij enkel de langsimpedantie van het aardscherm ingevuld is in het typenbestand, alle overige geleiders en mutuele koppelingen zijn verwijderd. Enkel het aardscherm is doorverbonden. Hieronder het resultaat van de kortsluitstroomberekening in Gaia:



De kortsluitstroom is nagenoeg gelijk, de stroom door de PE-geleider is in Gaia gelijk aan de hierboven berekende stroom, 59 A.

Om deze fase-aardsluitstroom in Vision Network Analysis te berekenen dient de homopolaire impedantie berekend te worden. Dit is gedaan door de gehele impedantiematrix te reduceren naar een 4x4 matrix zoals beschreven in de Bijlages C en D, vervolgens wordt de homopolaire impedantie berekend zoals beschreven in Bijlage E. De homopolaire impedantie voor deze configuratie is gelijk aan: $0.365 + j0.137 \Omega/km$. De berekende kortsluitstroom in Vision is gelijk aan de handberekening en aan Gaia.

SCILAB CODE

```
// Case 4.6
clc
clear

// first run 'CableParameters_Vulta4x150cusv.sce'
// impedance matrix
```

```

Zpe = 0.158542 + %i*0.7666581; // 150 mm2 PE-conductor
Z66 = [Zc Zccn Zcct Zccn Zce 0; Zccn Zc Zccn Zcct Zce 0; Zcct Zccn Zc Zccn Zce 0; Zccn Zcct Zccn Zc Zce 0; Zce Zce Zce Zce
Ze 0; 0 0 0 0 0 Zpe];

Z = [Zc-Zccn Zccn-Zc 0 0; 1 1 1 1; Zccn-Zce Zc-Zce Zce-Ze 0; Zccn Zc Zce -Zpe]
U = [230 0 0 0];
I = inv(Z)*U' // I1; IN; Ias; Ipe
Ik = abs(I(1))

// compute zero sequence impedance, first reduce to 5x5 then to 4x4
A = Z66(1:5,1:5);
B = Z66(1:5,6)-Z66(1:5,5);
C = Z66(6,6)-Z66(6,5)-(Z66(5,6)-Z66(5,5));
Z55 = A - B*inv(C) * B.';

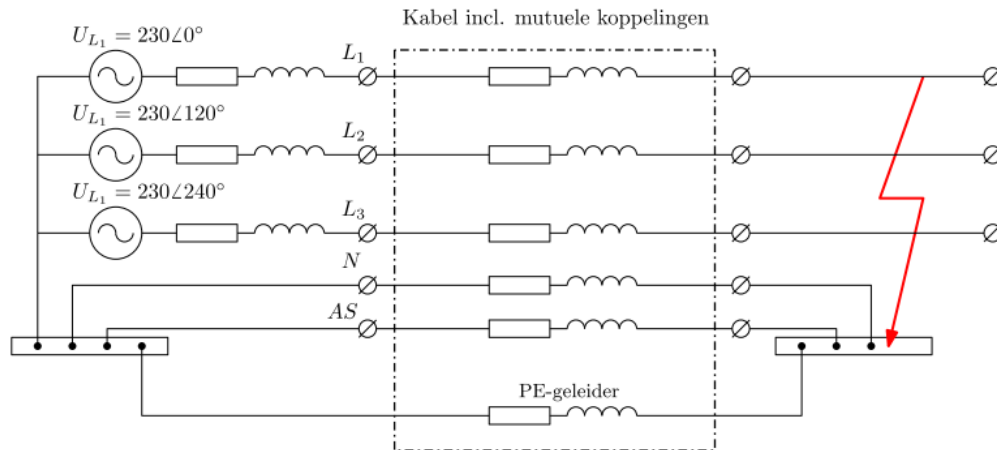
A = Z55(1:4,1:4);
B = Z55(1:4,5)-Z55(1:4,4);
C = Z55(5,5)-Z55(5,4)-Z55(4,5)+Z55(4,4);
Z44 = A - B*inv(C) * B.';

// compute zero sequence impedance
Z0 = Z44(1,1)+Z44(1,2)+Z44(1,3) + 3*(Z44(4,4)-2*Z44(4,1))
// compute normal impedance
Z1 = Z44(1,1)-(Z44(1,2)+Z44(1,3))/2

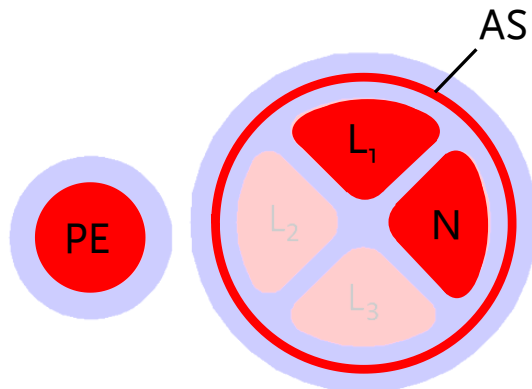
```

4.7 Fase-aardfout aardscherm // nulgeleider // mutueelgekoppelde PE-geleider

Bij deze casus is de PE-geleider – in tegenstelling tot de voorgaande casus – wel mutueel gekoppeld met de 4x150 mm² kabel. De fysieke afstand tussen de kabels is slechts 2.6 mm. Het retourpad wordt nu gevormd door de nulgeleider parallel aan zowel het aardingsscherm als aan de PE-geleider, welke allen mutueel gekoppeld zijn. De kabels liggen beide onder de grond op een diepte van 1 meter. Hieronder is het te bestuderen circuit gegeven:



De kabels liggen op 1 meter diepte direct naast elkaar, zie onderstaand figuur:



Figuur 11 Volta 4x150 mm² cusv met mutueelgekoppelde PE-geleider, fase-aardfout L1 retour aardscherm // N // PE-geleider

Met behulp van FEA-software is de 6x6 impedantiematrix bepaald:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{L_1} \\ \Delta U_{L_2} \\ \Delta U_{L_3} \\ \Delta U_N \\ \Delta U_{SA} \\ \Delta U_{PE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c & Z_{cn} & Z_{ct} & Z_{ccn} & Z_{ce} & Z_{c1pe} \\ Z_{cn} & Z_c & Z_{cn} & Z_{cct} & Z_{ce} & Z_{c2pe} \\ Z_{ct} & Z_{cn} & Z_c & Z_{ccn} & Z_{ce} & Z_{c3pe} \\ Z_{ccn} & Z_{cct} & Z_{ccn} & Z_c & Z_{ce} & Z_{c4pe} \\ Z_{ce} & Z_{ce} & Z_{ce} & Z_{ce} & Z_e & Z_{epe} \\ Z_{c1pe} & Z_{c2pe} & Z_{c3pe} & Z_{c4pe} & Z_{epe} & Z_{pe} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{L_1} \\ I_{L_2} \\ I_{L_3} \\ I_N \\ I_{SA} \\ I_{PE} \end{bmatrix}$$

Uit bovenstaand schema zijn de volgende conclusies te trekken voor de kortsluitstroom fase 1-aarde:

$$\begin{aligned} 230 &= I_{L_1}(Z_c - Z_{cn}) + I_N(Z_{cn} - Z_c) + I_{PE}(Z_{c1pe} - Z_{c4pe}) \\ 0 &= I_{L_1} + I_N + I_{SA} + I_{PE} \\ 0 &= I_{L_1}(Z_{cn} - Z_{ce}) + I_N(Z_c - Z_{ce}) + I_{SA}(Z_{ce} - Z_e) + I_{PE}(Z_{c4pe} - Z_{epe}) \\ 0 &= I_{L_1}Z_{cn} + I_N(Z_c - Z_{c4pe}) + I_{SA}(Z_{ce} - Z_e) + I_{PE}(Z_{c4pe} - Z_{pe}) \end{aligned}$$

bovenstaande vergelijkingen in matrixvorm:

$$\begin{bmatrix} 230 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Zc - Zccn & Zccn - Zc & 0 & Zc1pe - Zc4pe \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ Zccn - Zce & Zc - Zce & Zce - Ze & Zc4pe - Zepe \\ Zccn - Zc1pe & Zc - Zc4pe & Zce - Zepe & Zc4pe - Zpe \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{L_1} \\ I_N \\ I_{SA} \\ I_{PE} \end{bmatrix}$$

opgelost voor de stroomvector I geeft:

$$\begin{bmatrix} I_{L_1} \\ I_N \\ I_{SA} \\ I_{PE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Zc - Zccn & Zccn - Zc & 0 & Zc1pe - Zc4pe \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ Zccn - Zce & Zc - Zce & Zce - Ze & Zc4pe - Zepe \\ Zccn - Zc1pe & Zc - Zc4pe & Zce - Zepe & Zc4pe - Zpe \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 230 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{L_1} \\ I_N \\ I_{SA} \\ I_{PE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1019.41 - j518.91 \\ -511.81 + j208.08 \\ -288.19 + j20.62 \\ -219.41 + j290.22 \end{bmatrix} A$$

De kortsluitsroom is gelijk aan de stroom door fase L_1 , de absolute waarde van de kortsluistroom is:

$$|I_K| = |I_{L_1}| = |1019.41 - j518.91| = 1144 A$$

Concluderend dat de mutuele koppeling tussen de fasegeleider en de PE-geleider een grote invloed heeft op de kortsluitstroom, in dit specifieke geval ongeveer 10%. Daarnaast is het waarneembaar dat de stroom door de PE-geleider toegenomen is van 59 A naar 364 A.

Door de gehele impedantiematrix te reduceren naar een 4x4 matrix is de homopolaire impedantie te berekenen, de homopolaire impedantie voor deze configuratie is gelijk aan: $0.2819 + j0.1369 \Omega/\text{km}$. Dit is in absolute waarde een reductie van 20 % t.o.v. de voorgaande casus waar de PE-geleider mutueel niet gekoppeld was.

SCILAB CODE

```
// Case 4.7
clc
clear

// impedance matrix FEA in Ohm and Henry
Mwater = [
0.16335 0.0021247 0.038966 0.001932 0.035428 0.001864 0.038194 0.0019329 0.038359 0.0018875 0.03814
0.0017527; 0.038966 0.001932 0.16277 0.0021254 0.038974 0.0019321 0.036075 0.0018631 0.038533 0.0018874
0.041008 0.0018282; 0.035428 0.001864 0.038974 0.0019321 0.16334 0.0021245 0.038199 0.0019329 0.038361
0.0018875 0.03815 0.0017529; 0.038194 0.0019329 0.036075 0.0018631 0.038199 0.0019329 0.16236 0.002126
0.038305 0.0018875 0.035744 0.0017097; 0.038359 0.0018875 0.038533 0.0018874 0.038361 0.0018875 0.038305
0.0018875 0.26945 0.0018861 0.038027 0.001761; 0.03814 0.0017527 0.041008 0.0018282 0.03815 0.0017529
0.035744 0.0017097 0.038027 0.001761 0.1531 0.002123];

// create RX matrix
f = 50; // HZ
w = 2*pi*f; // rad/s
for i=1:6,
    for j=1:12,
        if modulo(j,2) == 0 then // 2, 4, 6, 8, 10 or 12
            Rx(i,j)=Mwater(i,j)*w;
        else Rx(i,j)=Mwater(i,j);
        end,
    end,
end

// create complex Z matrix
for i=1:6,
    n = 1;
    for j=1:6,
```

```

Zt(i,j) = complex(Rx(i,n),Rx(i,n+1));
n = n+2;
end,
end

// correction earth return path
Mu_0 = 4*pi*1E-7;
f = 50;
w = 2*pi*f;

// 4x150 mm^2
// outer sheath internal impedance
rho_sheath = 1/42841831; // rho = 1 / sigma
Mu_sheath = 0.9999914*Mu_0;
m = sqrt(w*Mu_sheath/rho_sheath);
r2 = 19.8/1000; // radius over main insulation
r3 = 20.6/1000; // radius over conducting sheath
z4 = 1000 * coth(m*(r3-r2))*rho_sheath*m/(2*pi*r3) + rho_sheath/(2*pi*r3*(r2+r3)) // Ohms per km, eq. 6
Wedepohl

// impedance due to time-varying flux in outer insulation
r4 = 23.55/1000; // outer radius of cable
Mu_ins = 1*Mu_0; // 1* Mu_0
z5 = 1000 * w*Mu_ins*log(r4/r3)/2 // Ohms per km, Wedepohl

// impedance of the earth-return path
rho_earth = 100; // soil resistivity Ohms per m
m = sqrt(w*Mu_0/rho_earth);
h = 1; // cable depth
Gamma = 1.7811;
z6 = 1000 * w*Mu_0/(2*pi) * (-log(Gamma*m*r4/2) + .5 - 4*m*h/3); // Ohms per km, eq. 6 Wedepohl

// compute new matrix
z6_FEA_4x150 = Zt(5,5)-(z4+z5);
Zt_new = Zt+ones(6,6)*(z6-z6_FEA_4x150); // small error due to the assumption that the earth return paths of the 4x150
and the PE conductor are equal.

// determin new parameters
Zc = (Zt_new(1,1)+Zt_new(2,2)+Zt_new(3,3)+Zt_new(4,4))/4;
Zcct = (Zt_new(1,3)+Zt_new(2,4)+Zt_new(3,1)+Zt_new(4,2))/4;
Zccn = (Zt_new(1,2)+Zt_new(2,3)+Zt_new(3,4)+Zt_new(4,1))/4;
Zce = sum(Zt_new(5,1:4))/4; // geleider naar scherm
Ze = Zt_new(5,5); // scherm
Zpe = Zt_new(6,6); // PE-conductor
Zc1pe = (Zt_new(1,6)+Zt_new(6,1))/2;
Zc2pe = (Zt_new(2,6)+Zt_new(6,2))/2;
Zc3pe = (Zt_new(3,6)+Zt_new(6,3))/2;
Zc4pe = (Zt_new(4,6)+Zt_new(6,4))/2;
Zepe = (Zt_new(5,6)+Zt_new(6,5))/2;

Z66_new = [Zc Zccn Zcct Zccn Zce Zc1pe; Zccn Zc Zccn Zcct Zce Zc2pe; Zcct Zccn Zc Zccn Zce Zc3pe; Zccn Zcct Zccn Zc Zce
Zc4pe; Zce Zce Zce Zce Ze Zepe; Zc1pe Zc2pe Zc3pe Zc4pe Zepe Zpe];

// compute short circuit currents
Zfault = [Zc-Zccn Zccn-Zc 0 Zc1pe-Zc4pe; 1 1 1 1; Zccn-Zce Zc-Zce Zce-Ze Zc4pe-Zepe; Zccn-Zc1pe Zc-Zc4pe Zce-Zepe
Zc4pe-Zpe];
U = [230 0 0 0];
I = inv(Zfault)*U' // IL1; IN; Isa; Ipe
Ik = abs(I(1))

// sequence impedances
// reduction 6x6 impedance matrix to 5x5
A = Z66_new(1:5,1:5);
B = Z66_new(1:5,6)-Z66_new(1:5,5);
C = Z66_new(6,6)-Z66_new(6,5)-(Z66_new(5,6)-Z66_new(5,5));
Z55 = A - B*inv(C) * B.';

// reduction 5x5 impedance matrix to 4x4
A = Z55(1:4,1:4);
B = Z55(1:4,5)-Z55(1:4,4);
C = Z55(5,5)-Z55(5,4)-Z55(4,5)+Z55(4,4);
Z44 = A - B*inv(C) * B.';

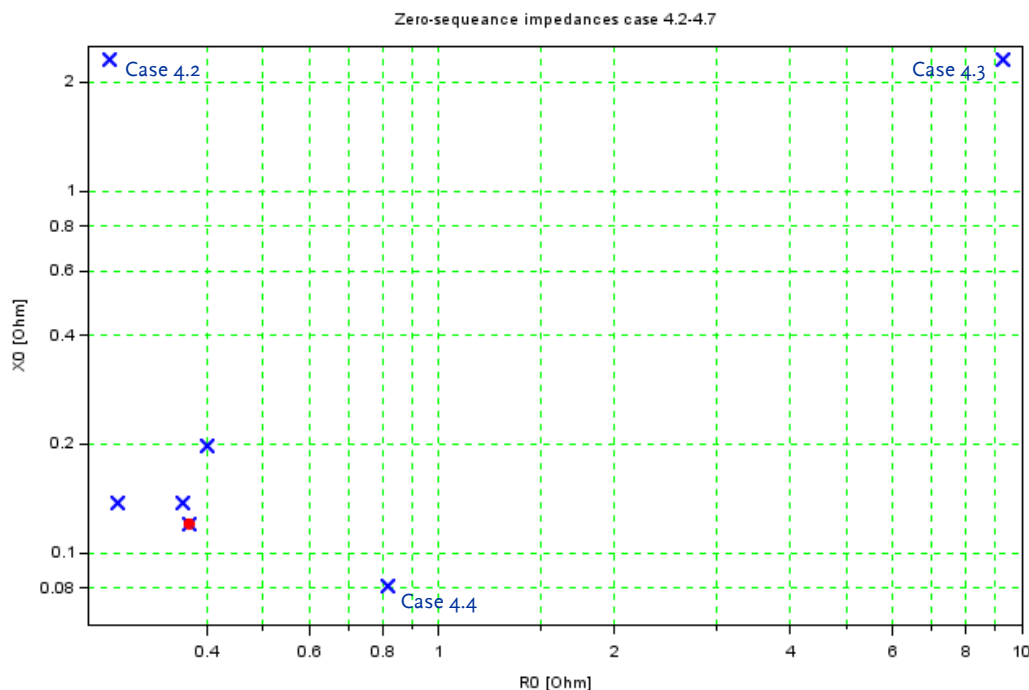
```

```
// compute zero-sequence impedance  
Z0 = Z44(1,1)+Z44(1,2)+Z44(1,3) + 3*(Z44(4,4)-2*Z44(4,1))  
// compute normal impedance  
Z1 = Z44(1,1)-(Z44(1,2)+Z44(1,3))/2
```


5 CONCLUSIE

In dit document is een methode gedefinieerd en beschreven om van laagspanningskabels de benodigde Gaia invoerparameters te berekenen; dit voor het uitvoeren van kortsluitstroomberekeningen en het vaststellen van de aanraakveiligheid in LS-netten. De Gaia invoergegevens hebben betrekking op de impedantiematrix van de kabel. Naast het definiëren en beschrijven van de totstandkoming van de impedantiematrix is ook het belang van berekeningen met deze volledige impedantiematrix behandeld. Er zijn verschillende casussen zowel met de hand als met behulp van Gaia LV Network Design doorgerekend waarbij deze vergeleken zijn met berekeningen uitgevoerd middels de symmetrische componentenmethode.

Zoals aangetoond in dit document is de toepassing van de symmetrische componentenmethode bij de berekening van fase-aardfouten alleen mogelijk als de homopolaire impedantie van het systeem bekend is. Deze homopolaire impedantie is voor iedere kabel geheel afhankelijk van de ligging en montagewijze. Hieronder een grafiek met de homopolaire impedanties in het complexe vlak van de verschillende casussen zoals behandeld in dit document. De rode punt markeert de homopolaire impedantie van de kabel zoals opgenomen in het Vision en Gaia Typenbestand.



Figuur 12 Homopolaire impedanties casus 4.2 t/m 4.7 in het complexe vlak

Zoals hierboven te zien kunnen de homopolaire impedanties van dezelfde kabel nogal uiteenlopen. Het berekenen of meten van de homopolaire impedantie van een kabel is hierdoor cruciaal voor het berekenen van asymmetrische foutstromen.

Voor planningsdoeleinden kan gebruikgemaakt worden van de homopolaire kabelimpedanties zoals gespecificeerd in de IEC 60909-2 "Data of electrical equipment for short-circuit current calculations". De gegevens zoals gepresenteerd in de standaard zijn gebaseerd op het werk van Oeding in [6]. Op de Phase to Phase website is een document te downloaden welke specifiek ingaat op homopolaire impedantie van kabels voor planningsdoeleinden. Dit document genaamd "Homopolaire impedanties van kabels, revisie 2" is te downloaden via onderstaande link:

<https://www.phasetophase.nl/pdf/homopolaireimpedantieskabels.pdf>

Aanbevelingen voor verder onderzoek

De armering van een kabel wordt gemodelleerd zijnde een buis/pijp met eigenschappen equivalent aan die van de armering. Deze armering bestaat in het algemeen uit meerdere koper- en metaaldraden. De magnetische permeabiliteit van de equivalente buis is in dit document gelijkgesteld aan die van de koperdraden. De invloed van een afwijkende magnetische permeabiliteit van de armering op de kabelparameters is relatief eenvoudig te onderzoeken door de formules van Wedepohl uit [1] toe te passen voor een reeks afwijkende waarden.

Een kabeltracé bestaat veelal uit meerdere parallelle kabelverbindingen. De mutuele koppeling van deze kabels, en daarmee de invloed op kortsluitstromen, wordt tot op heden in veel softwarepakketten voor netanalyse niet meegenomen. Onderzoek kan uitsluitsel geven of deze mutuele koppeling dusdanig is dat deze meegenomen dient te worden in netanalyses.

De kabelsystemen behandeld in dit document zijn allen ondergronds. In industriële installaties liggen kabels veelal in kunststof blokken, in een metalen kabelgoot of op een metalen ladderbaan. Deze goten en ladderbanen zijn veelal aan beide zijden geaard. Het voorbeeld zoals behandeld in Paragraaf 4.7 laat zien dat er door een parallelle mutueelgekoppelde geleider grote stromen kunnen lopen in geval van fase-aardfouten. Een onderzoek naar zowel de stromen door deze kabeldraagsystemen als de aanraakspanning kan interessante resultaten geven. Daarnaast is het voor het bepalen van de kabelparameters een belangrijk gegeven.

Mocht uit onderzoek blijken dat bovengenoemde punten een significante invloed hebben op de resultaten van analyses in Vision en/of Gaia dan dient dit meegenomen te worden in de betreffende analyses. Dit op een manier dat het voor de gebruiker begrijpelijk blijft zonder de noodzaak van vele, vaak niet, beschikbare parameters.

6 **BIBLIOGRAFIE**

- [1] L. M. Wedepohl en D. Wilcox, „Transient analysis of underground power-transmission systems. System-model and wave-propagation characteristics,” *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, pp. 253-260, February 1973.
- [2] T. Nguyen, „Earth-return path impedances of underground cables. Part 1: Numerical integration of infinite integrals,” *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, nr. 6, pp. 621-626, 1998.
- [3] A. Ametani, T. Ohno en N. Nagaoka, *Cable System Transients: Theory, Modeling and Simulation*, Singapore: John Wiley & Sons, 2015.
- [4] H. Dommel, *EMTP Theory Book*, Portland: Bonneville Power Administration, 1996.
- [5] A. Ametani en I. Fuse, „Approximate Method for Calculating the Impedances of Multiconductors with Cross Sections of Arbitrary Shapes,” *Electrical Engineering in Japan*, vol. 111, nr. 2, pp. 117-123, 1992.
- [6] D. Oeding en B. R. Oswald, *Elektrische Kraftwerke und Netze*, Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2016.



BIJLAGE B

Impedantiematrix meeraderige LS-kabel

$$\vec{Z}_N = \begin{bmatrix} -2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 + z_3 + z_2 + z_1 & z_{ab} - 2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & z_{ac} - 2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & z_{aN} - 2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & -z_7 + z_6 + z_5 + z_4 \\ z_{ab} - 2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & -2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 + z_3 + z_2 + z_1 & z_{bc} - 2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & z_{bN} - 2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & -z_7 + z_6 + z_5 + z_4 \\ z_{ac} - 2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & -2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 + z_3 + z_2 + z_1 & -2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & z_{cN} - 2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & -z_7 + z_6 + z_5 + z_4 \\ z_{aN} - 2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & -z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & -z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & -2z_7 + z_6 + z_5 + z_4 + z_3 + z_2 + z_1 & -z_7 + z_6 + z_5 + z_4 \\ -z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & -z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & -z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & -z_7 + z_6 + z_5 + z_4 & z_6 + z_5 + z_4 \end{bmatrix}$$

BIJLAGE C

Reductie van een 5x5 matrix naar een 4x4 matrix in geval van parallelle koppeling nulleider en scherm

Bron: document 09-148 pmo.

Het basis stelsel vergelijkingen voor vier geleiders (1 t/m 4) en het scherm (5):

$$\begin{bmatrix} dU_1 \\ dU_2 \\ dU_3 \\ dU_4 \\ dU_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix}$$

De geleiders van de stromen I_4 en I_5 zijn parallel geschakeld, zodat de retourstroom I_R gelijk is aan $I_4 + I_5$. Rij n kan dan geschreven worden als:

$$\begin{aligned} dU_n &= Z_{n1}I_1 + \dots + Z_{n4}I_4 + Z_{n5}I_5 \\ &= Z_{n1}I_1 + \dots + Z_{n4}(I_4 + I_5) - Z_{n4}I_5 + Z_{n5}I_5 \\ &= Z_{n1}I_1 + \dots + Z_{n4}I_R + (Z_{n5} - Z_{n4})I_5 \end{aligned}$$

Dit houdt in dat I_R ingevuld wordt op de plaats van I_4 en dat de vierde kolom afgetrokken wordt van kolom 5.

$$\begin{bmatrix} dU_1 \\ dU_2 \\ dU_3 \\ dU_4 \\ dU_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} - Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} - Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} - Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} - Z_{44} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} - Z_{54} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_R \\ I_5 \end{bmatrix}$$

Omdat dU_4 gelijk is aan dU_5 , kan de vierde rij van de vijfde rij afgetrokken worden.

$$\begin{bmatrix} dU_1 \\ dU_2 \\ dU_3 \\ dU_4 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} - Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} - Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} - Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} - Z_{44} \\ Z_{51} - Z_{41} & Z_{52} - Z_{42} & Z_{53} - Z_{43} & Z_{54} - Z_{44} & Z_{55} - Z_{54} - (Z_{45} - Z_{44}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_R \\ I_5 \end{bmatrix}$$

Deze vergelijking kan ook verkort worden opgeschreven als:

$$\begin{bmatrix} dU \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B^T & C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ I_5 \end{bmatrix}$$

Door I_5 te elimineren volgt:

$$du = (A - BC^{-1}B^T) \cdot I$$

De nieuwe 4x4 matrix voor drie fasengeleiders en één retour is dan:

$$Z = A - BC^{-1}B^T$$

BIJLAGE D

Reductie van een 6x6 matrix naar een 5x5 matrix in geval van parallelle schermen

Bron: document o8-075 pmo

Het basis stelsel vergelijkingen voor vier geleiders (1 t/m 4) en twee schermen (5 en 6):

$$\begin{bmatrix} dU_1 \\ dU_2 \\ dU_3 \\ dU_4 \\ dU_5 \\ dU_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}$$

De geleiders van de stromen I_5 en I_6 zijn parallel geschakeld, zodat de retourstroom I_R gelijk is aan $I_5 + I_6$. Rij n kan dan geschreven worden als:

$$\begin{aligned} dU_n &= Z_{n1}I_1 + \dots + Z_{n5}I_5 + Z_{n6}I_6 \\ &= Z_{n1}I_1 + \dots + Z_{n5}(I_5 + I_6) - Z_{n5}I_6 + Z_{n6}I_6 \\ &= Z_{n1}I_1 + \dots + Z_{n5}I_R + (Z_{n6} - Z_{n5})I_6 \end{aligned}$$

Dit houdt in dat I_R ingevuld wordt op de plaats van I_5 en dat de vijfde kolom afgetrokken wordt van kolom 6.

$$\begin{bmatrix} dU_1 \\ dU_2 \\ dU_3 \\ dU_4 \\ dU_5 \\ dU_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} - Z_{15} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} - Z_{25} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} - Z_{35} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} - Z_{45} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} - Z_{55} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} - Z_{65} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_R \\ I_6 \end{bmatrix}$$

Omdat dU_5 gelijk is aan dU_6 , kan de vijfde rij van de zesde rij afgetrokken worden.

$$\begin{bmatrix} dU_1 \\ dU_2 \\ dU_3 \\ dU_4 \\ dU_5 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} - Z_{15} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} - Z_{25} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} - Z_{35} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} - Z_{45} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} - Z_{55} \\ Z_{61} - Z_{51} & Z_{62} - Z_{52} & Z_{63} - Z_{53} & Z_{64} - Z_{54} & Z_{65} - Z_{55} & Z_{66} - Z_{65} - (Z_{56} - Z_{55}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_R \\ I_6 \end{bmatrix}$$

Deze vergelijking kan ook verkort worden opgeschreven als:

$$\begin{bmatrix} dU \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B^T & C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ I_6 \end{bmatrix}$$

Door I_6 te elimineren volgt:



$$du = (A - BC^{-1}B^T) \cdot I$$

De nieuwe 5x5 matrix voor vier geleiders en één scherm is dan:

$$Z = A - BC^{-1}B^T$$

BIJLAGE E

Afleiding benaderingsformule voor berekenen bedrijfsimpedantie en interne homopolaire impedantie uit kabelparameters

Bron: document 09-148 pmo:

De kabelparameters voor een kabel zonder hulpaders zijn opgenomen in een 5x5 systeemmatrix. Voor de spanningsval over alle geleiders (en het scherm) geldt:

$$dU = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{1n} & Z_{1s} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{2n} & Z_{2s} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{3n} & Z_{3s} \\ Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{n3} & Z_{nn} & Z_{ns} \\ Z_{s1} & Z_{s2} & Z_{s3} & Z_{sn} & Z_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_n \\ I_s \end{bmatrix}$$

De bedrijfsimpedantie is gedefinieerd voor een symmetrisch belaste kabel. Dat houdt in:

$$I_2 = a^2 \cdot I_1$$

$$I_3 = a \cdot I_1$$

$$I_n = 0$$

$$I_s = 0$$

Hierdoor levert de eerste rij van bovenstaande matrixvergelijking op:

$$dU_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}a^2I_1 + Z_{13}aI_1 + 0 + 0$$

De bedrijfsimpedantie volgt uit:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{dU_1}{I_1} = Z_{11} + Z_{12}a^2 + Z_{13}a = \\ &= Z_{11} + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)Z_{12} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)Z_{13} = \\ &= Z_{11} - \frac{1}{2}Z_{12} - \frac{1}{2}Z_{13} - j\frac{1}{2}\sqrt{3}Z_{12} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}Z_{13} = \\ &= Z_{11} - (Z_{12} + Z_{13})/2 + j\frac{1}{2}\sqrt{3}(Z_{13} - Z_{12}) \end{aligned}$$

Indien de imaginaire term verwaarloosd wordt, gaat de formule bij benadering over in:

$$Z_1 = Z_{11} - (Z_{12} + Z_{13})/2 = Z_{fase,langs} - (Z_{fase-fase,naastliggend} + Z_{fase-fase,tegenoverliggend})/2$$

De interne homopolaire impedantie is gedefinieerd voor drie gelijkgerichte stromen door de fasen, waarbij de retourstroom alleen door de nulgeleider vloeit. Dit houdt in:

$$I_2 = I_1$$

$$I_3 = I_1$$

$$I_n = -3I_1$$

$$I_s = 0$$

Hierdoor levert de eerste rij van bovenstaande matrixvergelijking op:

$$dU_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_1 + Z_{13}I_1 - 3Z_{1n}I_1 + 0$$

$$dU_n = Z_{n1}I_1 + Z_{n2}I_1 + Z_{n3}I_1 - 3Z_{nn}I_1 + 0$$

De interne homopolaire impedantie volgt uit:

$$\begin{aligned} Z_{0,\text{int}} &= \frac{dU}{I_1} = \frac{dU_1 - dU_n}{I_1} \\ &= (Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} - 3Z_{1n}) - (Z_{n1} + Z_{n2} + Z_{n3} - 3Z_{nn}) \\ &\approx Z_{11} - Z_{n1} + 3(Z_{nn} - Z_{1n}) \end{aligned}$$

Indien de retourstroom door de nulgeleider en het scherm zou lopen, is de verdeling niet bekend en kan de vereenvoudigde matrixvergelijking niet worden opgeschreven. Dit kan opgepakt worden door eerst de parameters van het scherm te elimineren door de 5x5 matrix te reduceren naar een 4x4 matrix met één retourgeleider. De procedure staat beschreven in bijlage C. Nadat deze reductie is uitgevoerd, is de homopolaire impedantie die van de kabel met doorverbonden nul en scherm.