

Mutuele koppelingen in Vision

07-178 pmo

14 december 2007

© 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

1	Inleiding	4
2	Modelvorming	4
3	Modellering	7
3.1	Modellering in het homopolaire systeem van twee circuits zonder koppeling	7
3.2	Knooppunt-tak-incidentiematrix.....	8
3.3	Modellering in het homopolaire systeem van twee circuits zonder koppeling	8
3.4	Twee verbindingen met mutuele koppelingen.....	9
4	Invoer in Vision.....	11
5	Demonstratie	13
6	Conclusie.....	16

1 INLEIDING

De mutuele koppeling is een maat voor de elektromagnetische koppeling van parallel lopende bovengrondse lijnen. Door deze koppeling treedt een onderlinge beïnvloeding op. Deze beïnvloeding is met name merkbaar indien beide circuits ongelijke asymmetrische stromen voeren, zoals bij fase-aardfouten in één van de parallelle circuits.

De mutuele koppeling heeft invloed op de grootte van de asymmetrische kortsluitstroom met aardcontact en op de spanningen in het ongestoorde circuit. Bij het instellen van stroom- en distantiebeveiligingen moet hiermee rekening gehouden worden.

De mutuele koppeling is gemodelleerd als impedantie in het homopolaire circuit.

2 MODELVORMING

Het model voor de mutuele koppeling kan worden toegelicht aan de hand van de parameters van een bestaande bovengrondse dubbelcircuit-verbinding.

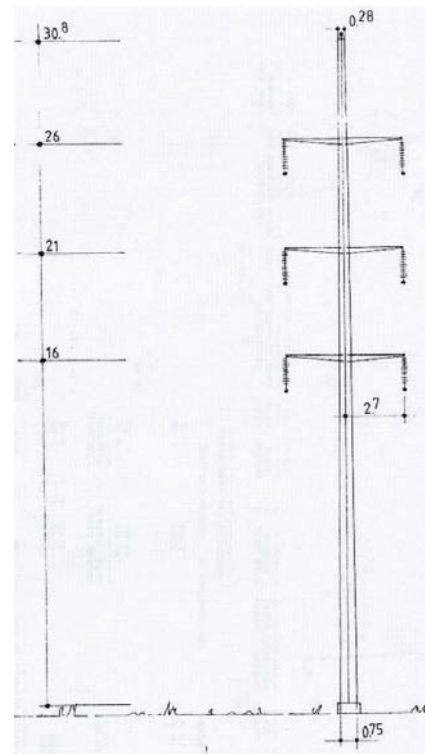
Lijngegevens:

- 110 kV bovengrondse lijn
- Lengte: 15,859 km
- Mast: tonmodel
- 2 circuits
 - 3 x 1 x 400 mm² Al
- 1 aarddraad
 - 30/52 St/Alm

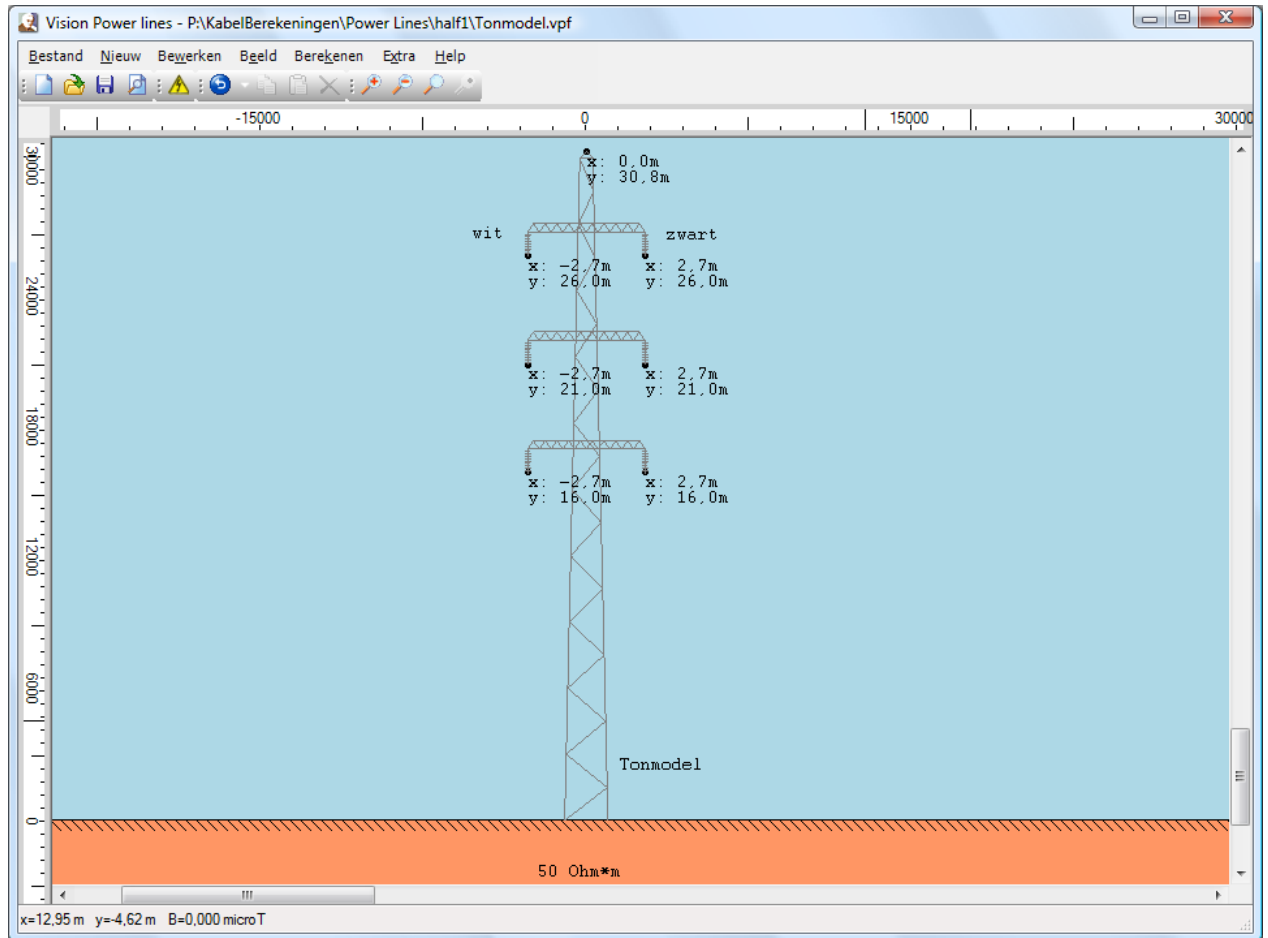
De parameters worden meestal gemeten. Men meet dan de normale impedantie en diverse homopolaire impedanties:

- homopolaire impedantie indien het parallelle circuit enkelzijdig geaard is
- homopolaire impedantie indien het parallelle circuit dubbelzijdig geaard is
- homopolaire impedantie indien het parallelle circuit in bedrijf staat

Uit deze metingen kunnen de homopolaire langsimpedantie en de mutuele koppeling afgeleid worden.



De parameters kunnen ook worden berekend met behulp van een speciaal ontwikkeld computerprogramma voor berekening van impedanties en veldsterktes van bovengrondse lijnen. Hieronder is de invoer van het mastbeeld weergegeven.



Voor de bovengenoemde 110 kV-verbinding zijn hieronder de gemeten en berekende parameters afgebeeld. De waarden zijn berekend voor een soortelijke grondweerstand van 50 Ohm·m. De berekende waarden komen redelijk overeen met de gemeten waarden.

impedantie	gemeten	berekend	
Z1	1.28 + j 6.42	1.34 + j 6.40	Ohm
Z0	4.13 + j 17.23	4.40 + j 17.21	Ohm
Zo,m	3.34 + j 11.16	3.07 + j 10.37	Ohm

In een driefasensysteem zijn er in het geval van twee circuits in principe koppelingen tussen alle geleiders onderling. De resultaten van de berekening aan de dubbelcircuitverbinding zijn hieronder weergegeven in een matrix met homopolaire, normale en inverse componenten.

4.396 +17.217i	-0.045 -0.263i	0.203 -0.328i	3.066 +10.365i	0.028 -0.220i	0.130 -0.284i
0.204 -0.328i	1.338 +6.398i	0.338 +0.215i	0.129 -0.286i	0.009 +0.442i	0.248 +0.130i
-0.045 -0.263i	-0.384 +0.220i	1.338 +6.398i	0.029 -0.221i	-0.235 +0.142i	0.008 +0.442i
3.066 +10.365i	0.029 -0.221i	0.129 -0.286i	4.396 +17.217i	-0.045 -0.263i	0.203 -0.328i
0.130 -0.284i	0.008 +0.442i	0.248 +0.130i	0.204 -0.328i	1.338 +6.398i	0.338 +0.215i
0.028 -0.219i	-0.235 +0.142i	0.010 +0.442i	-0.045 -0.263i	-0.384 +0.220i	1.338 +6.398i

In deze matrix zijn:

- diagonaal in het kwadrant linksboven: Z₀, Z₁ en Z₂ van circuit “wit”
- diagonaal in het kwadrant rechtsonder: Z₀, Z₁ en Z₂ van circuit “zwart”
- diagonaal in de kwadranten rechtsboven en linksonder: mutuele impedanties in het homopolaire, normale en inverse systeem
- overige waarden: koppelingen tussen de systemen onderling

In de matrix is het zichtbaar dat de mutuele impedanties in het normale en inverse systeem en ook de overige koppelingen tussen de systemen onderling klein zijn ten opzichte van de gewone impedanties en de mutuele koppeling in het homopolaire systeem. Daarom is het gebruikelijk om de volgende verwaarlozingen toe te passen:

- Mutuele koppeling normaal systeem
- Mutuele koppeling invers systeem
- Koppelingen tussen de systemen

De spanningsvergelijking voor een dubbelcircuit-verbinding gaat dan over in:

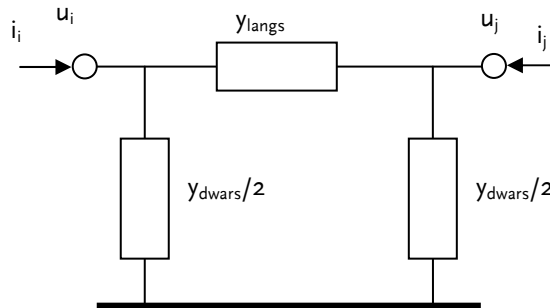
$$\begin{bmatrix} U_{0,i} - U_{0,j} \\ U_{1,i} - U_{1,j} \\ U_{2,i} - U_{2,j} \\ U_{0,k} - U_{0,l} \\ U_{1,k} - U_{1,l} \\ U_{2,k} - U_{2,l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{0,I} & & & & & \\ & Z_{1,I} & & & & \\ & & Z_{2,I} & & & \\ Z_{0,M} & & & Z_{0,II} & & \\ & & & & Z_{1,II} & \\ & & & & & Z_{2,II} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{0,I} \\ I_{1,I} \\ I_{2,I} \\ I_{0,II} \\ I_{1,II} \\ I_{2,II} \end{bmatrix}$$

In het volgende zullen we ons concentreren op het homopolaire systeem.

3 MODELLERING

3.1 Modelling in het homopolaire systeem van twee circuits zonder koppeling

Een verbinding wordt traditioneel gemodelleerd met een pi-schema.



Hierbij zijn u_i en u_j de knooppuntspanningen en zijn i_i en i_j de injectiestromen op de knooppunten i en j .

De admittanties worden berekend vanuit de impedanties:

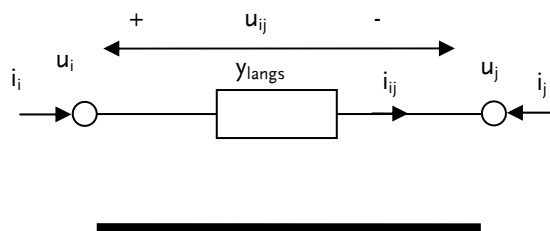
$$y_{langs} = \frac{1}{z_{langs}}$$

$$y_{dwars} = g + jb$$

In de systeemmatrix wordt dit als volgt opgeslagen:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{langs} + y_{dwars}/2 & -y_{langs} \\ -y_{langs} & y_{langs} + y_{dwars}/2 \end{bmatrix}$$

Aan de hand van het vereenvoudigde schema van de verbinding volgt, onder weglaten van de dwarsadmittanties:



De spanningsvergelijkingen zijn:

$$i_{ij} = y_{langs} \cdot u_{ij}$$

en in de knooppuntvergelijkingen:

$$\begin{bmatrix} i_i \\ i_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{langs} & -y_{langs} \\ -y_{langs} & y_{langs} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix}$$

3.2 **Knooppunt-tak-incidentiematrix**

De knooppuntsvergelijkingen ontstaan door een transformatie van de matrix van takadmittanties naar de knooppunt-admittantiematrix. Bij deze transformatie wordt gebruik gemaakt van de knooppunt-tak-incidentiematrix A_{kt} , die aangeeft hoe de takken met de knooppunten zijn verbonden.

De matrix A_{kt} is de getransponeerde van de tak-knooppuntincidentiematrix A_{tk} , die eenvoudig kan worden opgeschreven. Uit de relatie tussen de takspanning en de knooppuntspanningen volgt de tak-knooppuntincidentiematrix A_{tk} :

$$u_{ij} = u_i - u_j$$

of in het algemeen in vectornotatie en eventueel voor meerdere takken en knooppunten:

$$\underline{u}_{tak} = A_{tk} \cdot \underline{u}_{knooppunt}$$

waarin de tak-knooppuntincidentiematrix A_{tk} :

$$A_{tk} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix}$$

De knooppunt-takincidentiematrix A_{kt} is de getransponeerde van A_{tk} :

$$A_{kt} = A_{tk}^T$$

De knooppuntadmittantiematrix volgt dan uit onderstaande transformatie:

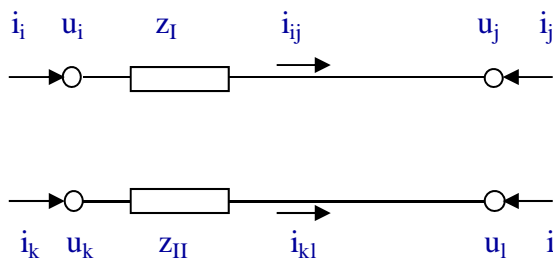
$$Y_k = A_{kt} \cdot Y_t \cdot A_{kt}^T$$

In het bovenstaande voorbeeld van een enkele verbinding volgt de knooppuntsadmittantiematrix inderdaad uit de transformatie:

$$Y_k = A_{kt} \cdot Y_t \cdot A_{kt}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot y_{langs} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{langs} & -y_{langs} \\ -y_{langs} & y_{langs} \end{bmatrix}$$

3.3 **Modellering in het homopolaire systeem van twee circuits zonder koppeling**

Hieronder zijn twee parallelle circuits afgebeeld, respectievelijk lopend van knooppunt i naar j en van k naar l . Afgebeeld zijn de knooppuntspanningen, de injectiestromen, de stromen door de circuits en de homopolaire impedanties.



De spanningsvergelijkingen voor de spanningen ΔU_{ij} en ΔU_{kl} volgen direct uit de wet van Ohm. Indien de spanningsvergelijkingen in matrixvorm worden genoteerd en geïnverteerd, volgen de vergelijkingen met de tak-admittantiematrix.

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_{ij} &= z_I \cdot i_{ij} \\ \Delta u_{kl} &= z_{II} \cdot i_{kl} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta u_{ij} \\ \Delta u_{kl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_I & 0 \\ 0 & z_{II} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ij} \\ i_{kl} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} i_{ij} \\ i_{kl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & 0 \\ 0 & y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta u_{ij} \\ \Delta u_{kl} \end{bmatrix}$$

Voor deze twee verbindingen is de knooppunt-takincidentiematrix A_{kt} :

$$A_{kt} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

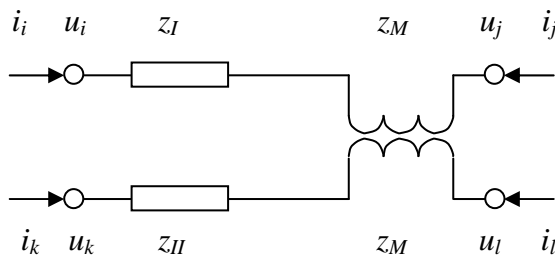
Hieruit volgt voor de knooppuntsadmittantiematrix:

$$Y_k = A_{kt} \cdot Y_t \cdot A_{kt}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_{11} & 0 \\ 0 & y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & -y_{11} & 0 & 0 \\ -y_{11} & y_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_{22} & -y_{22} \\ 0 & 0 & -y_{22} & y_{22} \end{bmatrix}$$

Hierin is zichtbaar dat de admittanties in de twee groepjes van vier voorkomen en dat de matrix verder is gevuld met nullen.

3-4 Twee verbindingen met mutuele koppelingen

Het schema van twee parallelle verbindingen, die onderling gekoppeld zijn via een impedantie z_M is hieronder afgebeeld:



Onderstaande vergelijkingen hebben betrekking op twee verbindingen tussen respectievelijk knooppunten i en j en k en l met impedanties z_I en z_{II} en mutuele koppeling z_M :

$$u_{ij} = z_I \cdot i_{ij} + z_M \cdot i_{kl}$$

$$u_{kl} = z_{II} \cdot i_{kl} + z_M \cdot i_{ij}$$

In het geval van twee verbindingen met een mutuele koppeling komt er een impedantie in de takimpedantiematrix bij. In matrixnotatie:

$$\underline{\Delta u}_{tak} = \begin{bmatrix} z_I & z_M \\ z_M & z_{II} \end{bmatrix} \cdot \underline{i}_{tak} = Z_t \cdot \underline{i}_{tak}$$

Door invertieren van de gehele takimpedantiematrix Z_t ontstaat de 2x2 takadmittantiematrix Y_t :

$$Y_t = Z_t^{-1} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{z_I z_{II} - z_M^2} \begin{bmatrix} z_{II} & -z_M \\ -z_M & z_I \end{bmatrix}$$

Voor deze twee verbindingen is de knooppunt-takincidentiematrix A_{kt} :

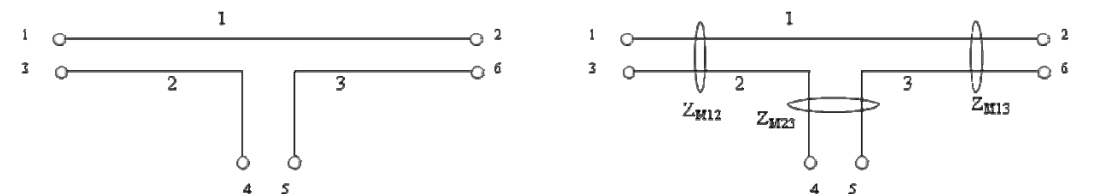
$$A_{kt} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Hierdoor volgt voor de knooppuntsadmittantiematrix:

$$Y_k = A_{kt} \cdot Y_t \cdot A_{kt}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & -y_{11} & y_{12} & -y_{12} \\ -y_{11} & y_{11} & -y_{12} & y_{12} \\ y_{21} & -y_{21} & y_{22} & -y_{22} \\ -y_{21} & y_{21} & -y_{22} & y_{22} \end{bmatrix}$$

Hierin is zichtbaar dat de matrix door de koppeling nu geheel is gevuld met admittanties.

Het gevolg van de mutuele koppelingen op de complexiteit van de admittantiematrix is extra goed zichtbaar bij meer koppelingen, zoals bij het insluiten in een dubbelcircuit.



$$Y_k = \begin{bmatrix} y_{11} & -y_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -y_{11} & y_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_{22} & -y_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -y_{22} & y_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y_{33} & -y_{33} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -y_{33} & y_{33} \end{bmatrix} \quad Y_k = \begin{bmatrix} y_{11} & -y_{11} & y_{12} & -y_{12} & y_{13} & -y_{13} \\ -y_{11} & y_{11} & -y_{12} & y_{12} & -y_{13} & y_{13} \\ y_{21} & -y_{21} & y_{22} & -y_{22} & y_{23} & -y_{23} \\ -y_{21} & y_{21} & -y_{22} & y_{22} & -y_{23} & y_{23} \\ y_{31} & -y_{31} & y_{32} & -y_{32} & y_{33} & -y_{33} \\ -y_{31} & y_{31} & -y_{32} & y_{32} & -y_{33} & y_{33} \end{bmatrix}$$

Zonder mutuele koppeling

Met mutuele koppeling

Omwille van het beperken van de complexiteit zijn de volgende uitgangspunten gedefinieerd:

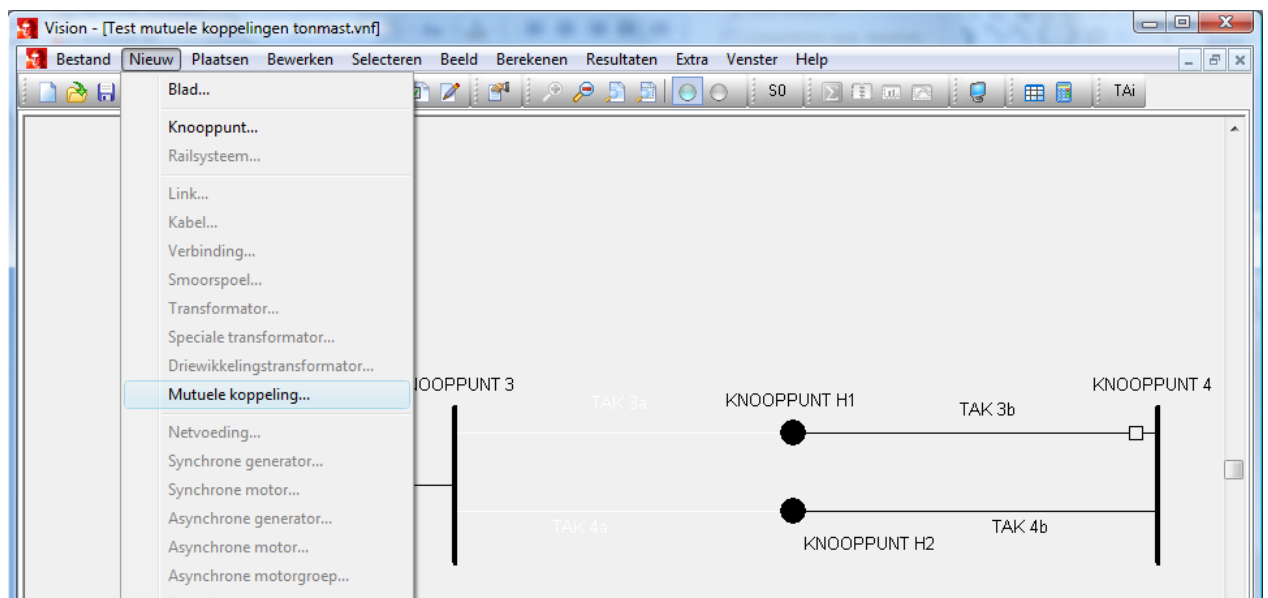
- Mutuele koppeling over de gehele lengte van de parallelle lijnen
- Bij gedeeltelijke koppeling hulpknooppunten introduceren
- Maximaal 10 koppelingen per mutuele groep

4 INVOER IN VISION

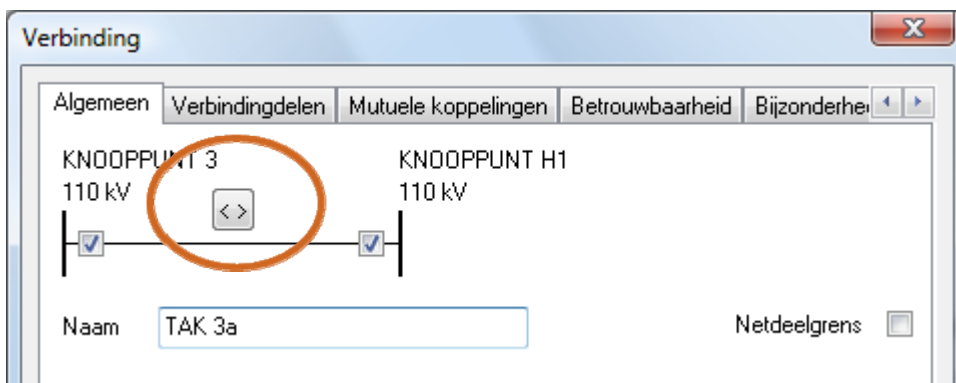
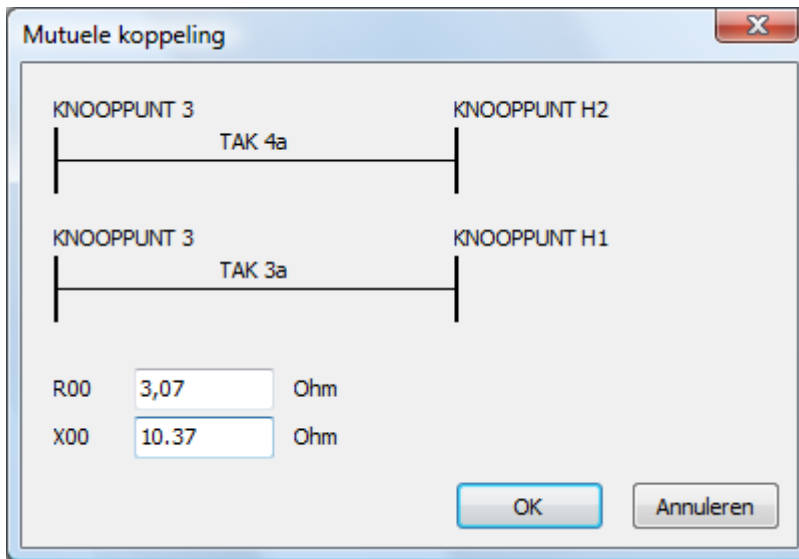
Het invoeren van een mutuele koppeling in Vision is vergelijkbaar met het maken van een nieuwe selectie. Mutuele koppelingen kunnen alleen gedefinieerd worden voor verbindingen, dus niet voor links, kabels, transformatoren en andere takken.

- Selecteer twee gekoppelde parallelle circuits
- Aandacht voor 'anti-parallelle' koppeling en negatieve impedantie
 - Let op de oriëntatie van beide circuits
 - "Van-knooppunt" – "Naar-knooppunt"
- Definiëren mutuele koppeling voor R00 en X00

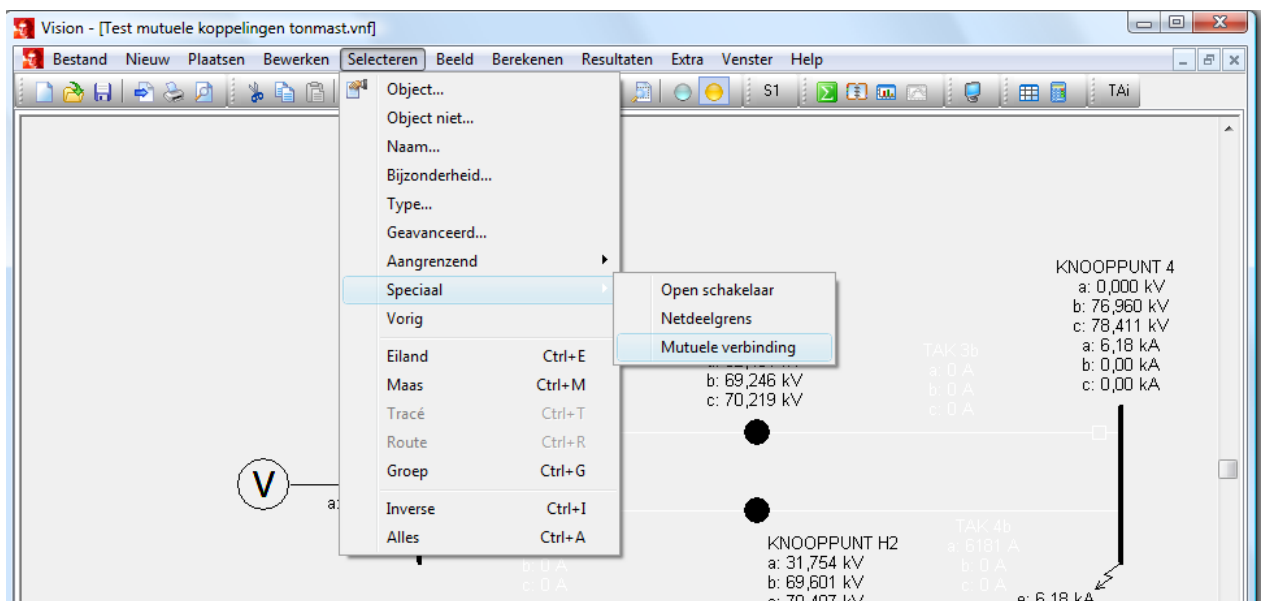
De richting/oriëntatie van de parallelle verbindingen is mede bepalend voor de koppeling. Zo kunnen twee takken "parallel" of "anti-parallel" staan. Bij de implementatie zijn de specificatie van de "van"- en "naar"-knooppunten bepalend voor de oriëntatie. Meestal lopen mutueel gekoppelde takken ook echt parallel, zodat de koppeling positief is. Indien het effect van de koppeling omgekeerd moet zijn, moet ofwel de richting worden omgekeerd door "van" en "naar" van de verbinding om te keren, ofwel de mutuele impedantie negatief worden.



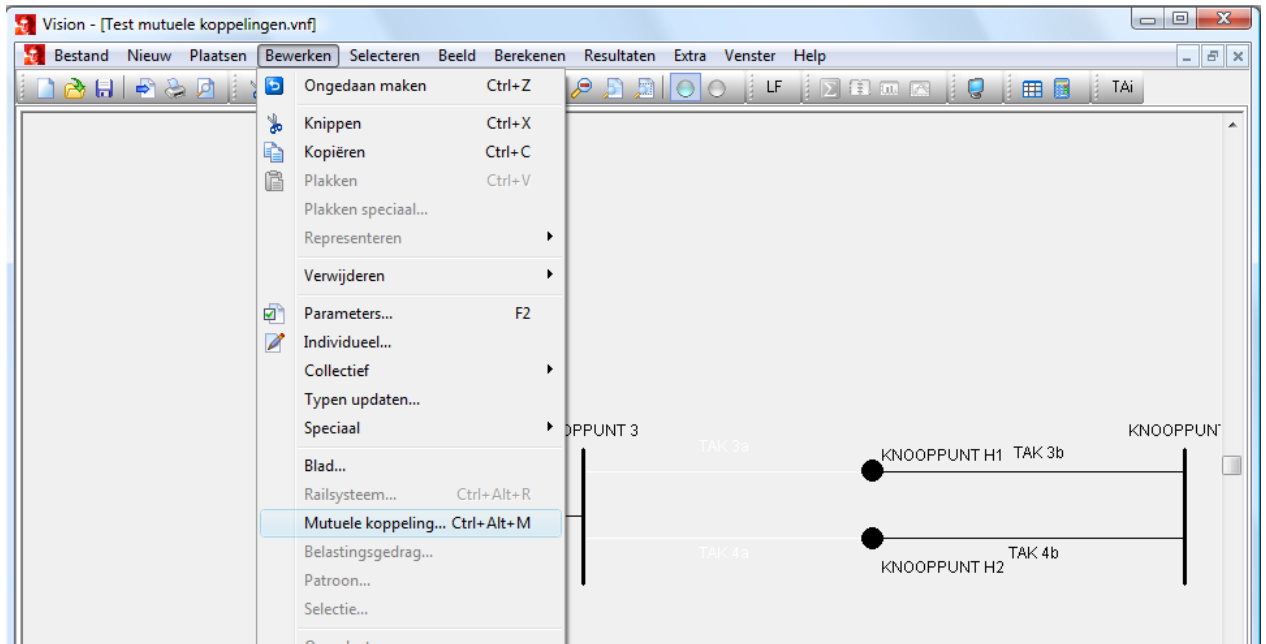
Invoeren van een nieuwe mutuele koppeling



Controle van de oriëntatie en specificatie van R00 en X00



Selecteren van alle mutuele koppelingen



Bewerken van een mutuele koppeling

5 DEMONSTRATIE

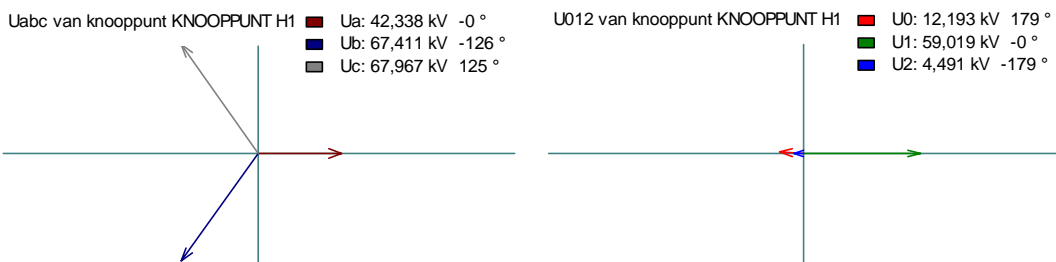
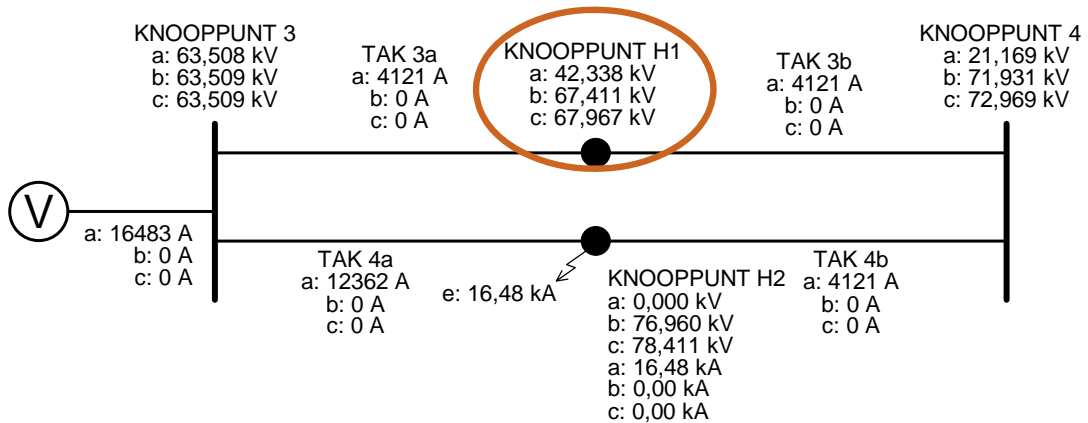
De invloed van de mutuele koppeling wordt gedemonstreerd aan de hand van twee berekeningen aan een testsysteem. Het testsysteem is een dubbelcircuit met de eerder geschetste tonmast. In het midden zijn twee hulpknooppunten aangebracht. De gegevens van het circuit:

- 110 kV bovengrondse lijn
- Lengte: 15,859 km
- Mastbeeld: tonmodel
- 2 circuits, 1 aarddraad

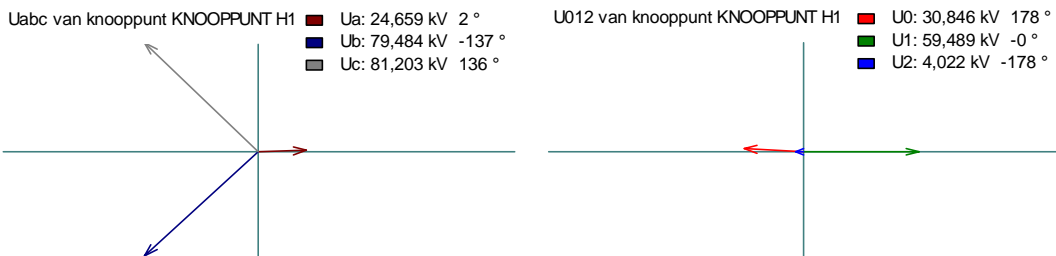
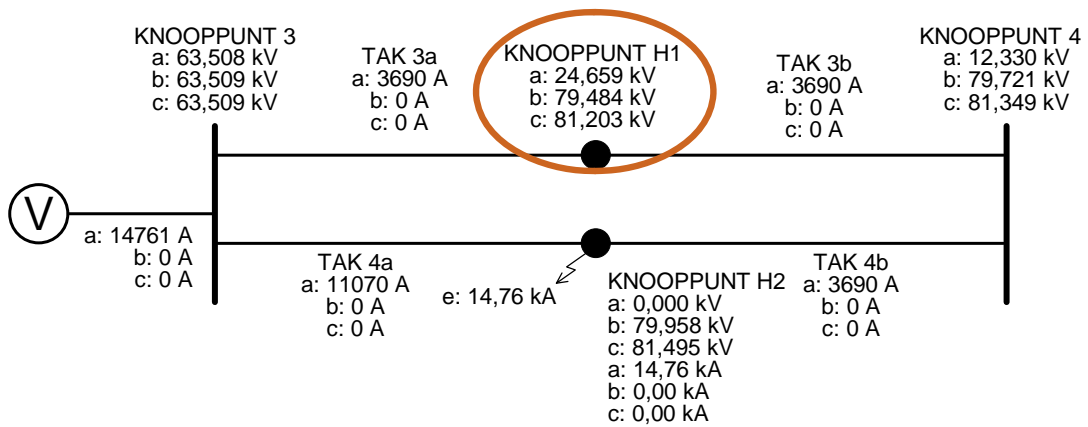
Eerst wordt een berekening gemaakt van een fase-aardsluiting halverwege één van de twee parallelle circuits. Deze berekening illustreert de invloed van de mutuele koppeling op de grootte van de kortsluitstroom.

In de tweede berekening wordt een fase-aardsluiting gemaakt aan het eind van één van de parallelle circuits, waarbij van het andere circuit de vermogenschakelaar aan het einde is geopend. Deze berekening illustreert de invloed van de mutuele koppeling op de geïnduceerde spanningen.

Fase-aardfout op een hulpknooppunt in het dubbelcircuit zonder mutuele koppeling

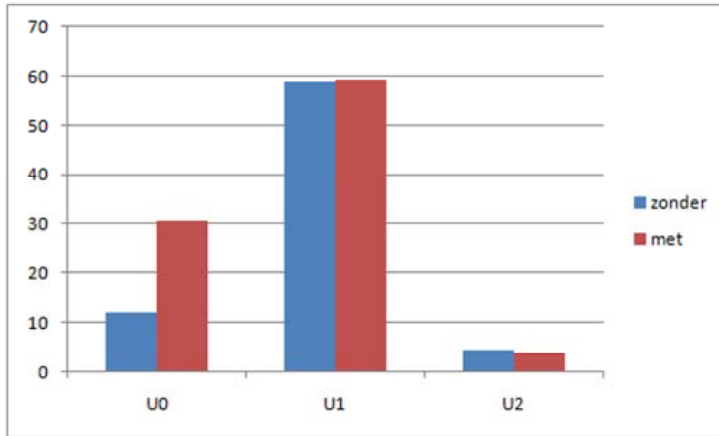


Fase-aardfout op een hulpknooppunt in het dubbelcircuit met mutuele koppeling



Door beide situaties met elkaar te vergelijken is de invloed van de mutuele koppeling goed zichtbaar:

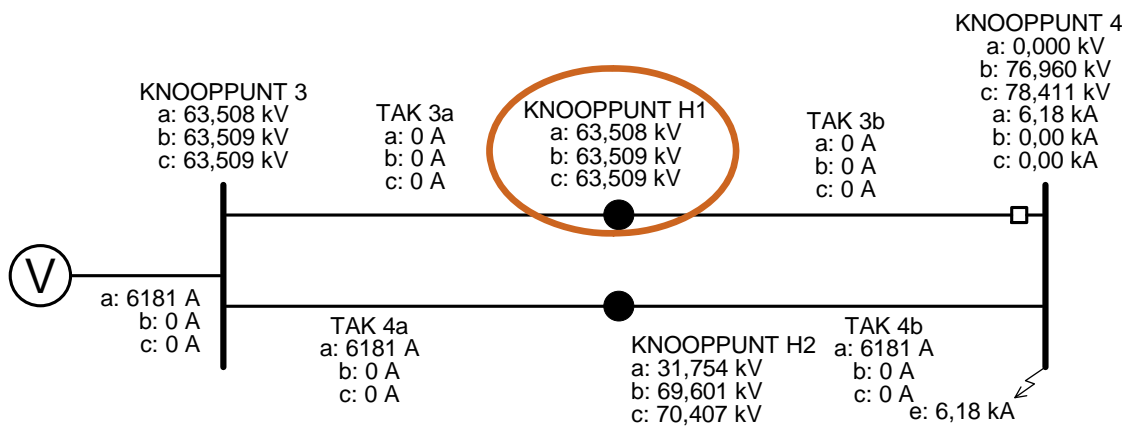
- Kortsluitstroom 1,7 kA kleiner (10%)
- Spanning halverwege ongestoorde parallelle verbinding bijna 20 kV verhoogd



Vergelijking homopolaire, normale en inverse spanningen op knooppunt H1, zonder en met mutuele koppeling

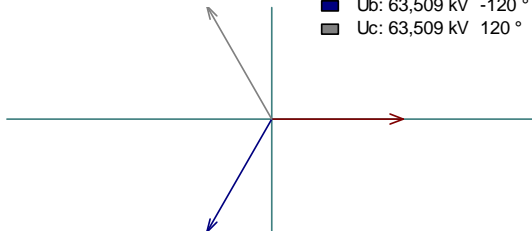
In de volgende tests is van een van de circuits de schakelaar aan het uiteinde geopend en wordt een fase-aardsluiting berekend aan het eind van het andere circuit.

Fase-aardfout op een knooppunt aan het eind van het dubbelcircuit zonder mutuele koppeling



Uabc van knooppunt KNOOPPUNT H1

- Ua: 63,508 kV -0°
- Ub: 63,509 kV -120°
- Uc: 63,509 kV 120°

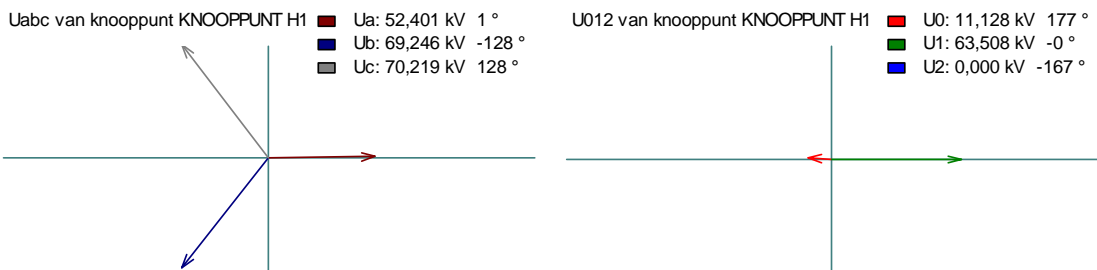
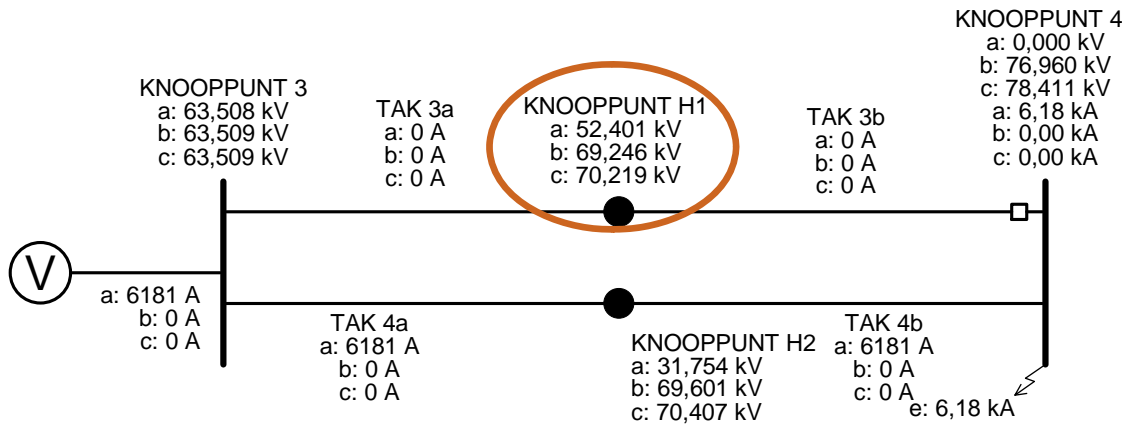


U012 van knooppunt KNOOPPUNT H1

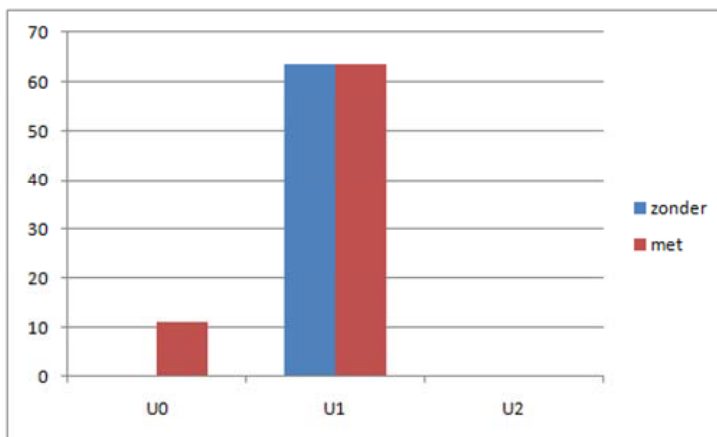
- U0: 0,000 kV -167°
- U1: 63,508 kV -0°
- U2: 0,000 kV -167°



Fase-aardfout op een knooppunt aan het eind van het dubbelcircuit zonder mutuele koppeling



Door beide situaties met elkaar te vergelijken is de invloed van de mutuele koppeling op de geïnduceerde spanning zichtbaar in de homopolaire spanning halverwege de ongestoorde parallelle verbinding: 11 kV.



Vergelijking homopolaire, normale en inverse spanningen op knooppunt H1, zonder en met mutuele koppeling

6 CONCLUSIE

De mutuele koppeling heeft invloed

- via het homopolaire systeem
- op asymmetrische kortsluitstroom
- op werking beveiligingen

De mutuele koppeling is beschikbaar in versie 6.1