

# PHASE TO PHASE

## De netimpedantie nader bekeken

04-124 pmo

22 november 2004

Phase to Phase BV  
Utrechtseweg 310  
Postbus 100  
6800 AC Arnhem  
T: 026 356 38 00  
F: 026 356 36 36  
[www.phasetophase.nl](http://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**

1	Inleiding .....	4
2	Definitie netimpedantie.....	5
3	Relatie met de kortsluitstroom.....	8
4	Rekenvoorbeeld met Gaia.....	17
5	Conclusie.....	20

## 1 INLEIDING

Regelmatig wordt Phase to Phase gevraagd of sommige uitkomsten kloppen. In die gevallen wordt een handberekening gemaakt om iets dat vreemd lijkt te controleren. In de meeste gevallen kloppen de berekeningen wel en leiden de handberekeningen tot een groter inzicht. Zo ook in het geval van de netimpedantie. Dit rapport geeft nader inzicht in de definitie en de berekening ervan.

# Is de circuitimpedantie altijd groter dan de fase-impedantie?

- Wat is de netimpedantie?
- Waardoor wordt de impedantie bepaald?
- Wat heeft de netimpedantie met spanningen en kortsluitingen te maken?
- Wat doet de netimpedantie
  - bij één- en driefasenkortsluitingen
  - in extreme situaties?
- Voorbeelden met Gaia

Een van de gestelde vragen betrof de relatie tussen de fase-impedantie en de circuitimpedantie. Om die vraag goed te kunnen beantwoorden wordt eerst de definitie van de netimpedantie in het algemeen nader belicht en waardoor die bepaald wordt.

Vervolgens wordt de relatie van de netimpedantie met de spanningen en stromen in het net nader toegelicht, in het bijzonder ten aanzien van de spanningskwaliteit en de kortsluitsituaties. Een en ander wordt veel duidelijker na bestuderen van het gedrag bij éénfase- en driefasenkortsluitingen.

Tenslotte worden de berekeningen toegelicht met behulp van de nieuwe Gaia vijfgeleiderloadflow en spanningsvastheidsmodule.

## Wat is de netimpedantie?

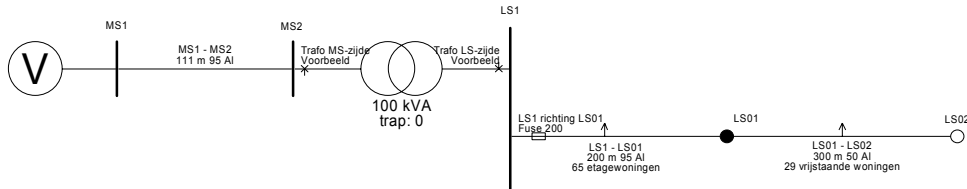
- Te meten impedantie van het net:
  - Van bron naar belasting
  - Van belasting retour naar de bron
- Invloed op de spanningskwaliteit:
  - Bedrijfsspanning nominale situatie
  - Spanningsvastheid (dips)
- Invloed op het kortsluitgedrag:
  - Kortsluitstroom
  - Aanraakveiligheid

De netimpedantie is misschien wel de belangrijkste factor voor het goed functioneren van het distributienet. Deze impedantie wordt “in het veld” gemeten met behulp van een Maxtest, Panensa of Profitest impedantie meetkoffer. De netimpedantie is de optelsom van alle in het net aanwezige impedanties van bron tot meetpunt en weer terug.

De netimpedantie heeft grote invloed op het gedrag van het net. De kwaliteit van de spanning wordt er rechtstreeks door bepaald. Zo zijn de bedrijfsspanning in de normale belastingssituaties en de grootte van de spanningsdip bij het inschakelen van een belasting direct van de waarde van de netimpedantie afhankelijk. Beide kunnen met Gaia berekend worden. Hoe kleiner de netimpedantie, des te sterker het net is.

Ook het kortsluitgedrag wordt rechtstreeks bepaald door de netimpedantie. De grootte van de kortsluitstroom, zowel éénfasig als driefasig, is direct afhankelijk van de netimpedantie. De aanraakveiligheid wordt bepaald door de combinatie van aanraakspanning en tijdsduur. Ook hier is sprake van een belangrijke afhankelijkheid, maar in dit geval is het wat complexer bepaald.

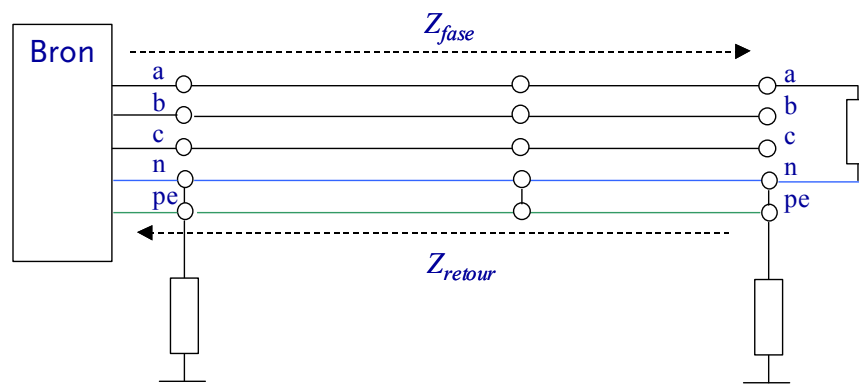
# Waardoor wordt de netimpedantie bepaald?



- Voeding
- MS-net
- MS/LS-transformator
- Laagspanningsnet

De netimpedantie is geen eigenschap van een specifieke component, maar een optelsom van alle aaneengeschakelde componenten tussen bron en meetpunt. Zo tellen naast het LS-net ook de MS/LS-transformator, het MS-net en de voedingsbron mee.

## Eenvoudige voorstelling netimpedantie



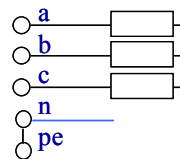
$$Z_{circuit} = Z_{fase} + Z_{retour} \quad ?$$

De netimpedantie is opgebouwd uit de fase-impedantie van de bron naar het meetpunt en de retourimpedantie, van het meetpunt via de nul, afscherming en aarde, terug naar de bron. Met name het retourpad is lastig te berekenen.

Indien we ons concentreren op het LS-net achter de MS/LS-transformator, volstaat een eenvoudige benadering en kan zonder meer gesteld worden dat de circuitimpedantie gelijk is aan de som van de fase-impedantie en de retourimpedantie. Maar indien we de transformator en het MS-net met de bron in het model meenemen, wordt het ingewikkelder. In dat geval krijgt de retourimpedantie een andere betekenis.

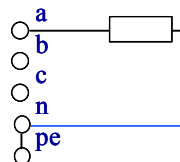
## Definitie netimpedanties zoals gemeten met een meetkoffer

- Meting fase-impedantie
  - Kortstondige symmetrische belasting
  - Fase-impedantie volgt uit spanningsdip en belastingstroom:



$$Z_{\text{fase}} = \frac{\Delta U_{\text{fase-nul, gemeten}}}{I_{\text{fase, gemeten}}}$$

- Meting circuitimpedantie
  - Kortstondige éénfasebelasting
  - Circuitimpedantie volgt uit spanningsdip en belastingstroom:



$$Z_{\text{circuit}} = \frac{\Delta U_{\text{fase-nul, gemeten}}}{I_{\text{fase, gemeten}}}$$

De netimpedantie wordt “in het veld” gemeten met behulp van een meetkoffer. Voor het meten van de fase-impedantie wordt kortstondig een symmetrische belasting aangebracht en worden de spanningsdip en de belastingstroom gemeten. In deze situatie loopt de stroom alleen door de fasegeleiders en spelen de nul en de aarde geen rol. De fase-impedantie wordt bepaald uit de gemeten spanningsdip en de belastingstroom.

Voor het meten van de circuitimpedantie wordt kortstondig een belasting tussen fase en nul aangebracht. In die situatie loopt de stroom door de fasegeleider, de nul en aarde en meten we het gedrag van het gehele circuit.

Het is logisch te veronderstellen dat de circuitimpedantie groter is dan de fase-impedantie en dat de circuitimpedantie gelijk is aan de som van de fase-impedantie en de retourimpedantie.

## Gevolg voor de kortsluitstroom

- De driefasenkortsluitstroom wordt bepaald door  $Z_{\text{fase}}$
- De éénfasekortsluitstroom wordt bepaald door  $Z_{\text{circuit}}$
- Als  $Z_{\text{circuit}} > Z_{\text{fase}}$
- Dan is de driefasenkortsluitstroom groter dan de éénfasekortsluitstroom

De driefasenkortsluitstroom is in wezen het zelfde als de stroom die loopt als gevolg van een oneindig grote symmetrische belasting. Analoog aan het mechanisme bij meting van de fase-impedantie met een meetkoffer, wordt de driefasenkortsluitstroom voornamelijk door de fase-impedantie bepaald.

Zo ook wordt de éénfasekortsluitstroom voornamelijk door de circuitimpedantie bepaald. Als we ervan uitgaan dat de circuitimpedantie groter is dan de fase-impedantie, zal dus ook de driefasenkortsluitstroom groter zijn dan de éénfasekortsluitstroom.

## Maar de driefasenkortsluitstroom is niet altijd groter dan de éénfasekortsluitstroom!

Maar er zijn gevallen waarin de éénfasekortsluitstroom groter is dan de driefasenkortsluitstroom. Als gevolg zou dus in die gevallen de circuitimpedantie kleiner zijn dan de fase-impedantie. En door de formule dat de circuitimpedantie gelijk is aan de som van de fase- en retourimpedantie zou de retourimpedantie in die gevallen negatief moeten zijn. De retourimpedantie zou dan zijn fysieke betekenis verliezen.



## De norm IEC 909 bevestigt dit

909 (1) © IEC

– 31 –

As a rule, the three-phase short-circuit current is the largest. In the event of a short circuit near to a transformer with neutral earthing or a neutral-earthing transformer, the line-to-earth short-circuit current may be greater than the three-phase short-circuit current. This applies in particular to transformers of vector group Yz, Dy and Dz when earthing the y- or z-winding on the low voltage side of the transformer.

- Meestal is de driefasenkortsluitstroom de grootste
- Soms is de éénfasekortsluitstroom groter dan de driefasenkortsluitstroom, namelijk indien:
  - Kortsluiting vlakbij transformator
  - Type Yz, Dy of Dz
  - Met sterpuntsaarding

In de norm IEC 909 voor kortsluitstroomberekeningen wordt kort hierop ingegaan. Volgens de norm is de driefasenkortsluitstroom meestal de grootste. Echter, in het geval van een kortsluiting dichtbij de transformator kan de éénfasekortsluitstroom groter zijn dan de driefasenkortsluitstroom. Dat is bijvoorbeeld het geval bij een Dy-transformator met geaard sterpunt aan LS-zijde. Kortom, dit komt in bijna alle LS-netten in Nederland voor.

## Gevolg voor de netimpedanties

- Normaliter is  $Z_{\text{circuit}} > Z_{\text{fase}}$
- Maar soms is de éénfasekortsluitstroom groter dan de driefasenkortsluitstroom
  - Dan moet wel  $Z_{\text{circuit}} < Z_{\text{fase}}$
  - Als gevolg zou  $Z_{\text{retour}}$  negatief moeten zijn
- Hoe zit dat?

Normaliter is in de LS-netten de circuitimpedantie groter dan de fase-impedantie. Maar soms is de éénfasekortsluitstroom groter dan de driefasenkortsluitstroom. Dan moet in die gevallen de

circuitimpedantie kleiner zijn dan de fase-impedantie. Als gevolg zou dan de retourimpedantie negatief moeten zijn.

Dat wordt toegelicht in het vervolg.

## Aantonen met behulp van kortsluitstroomberekeningen

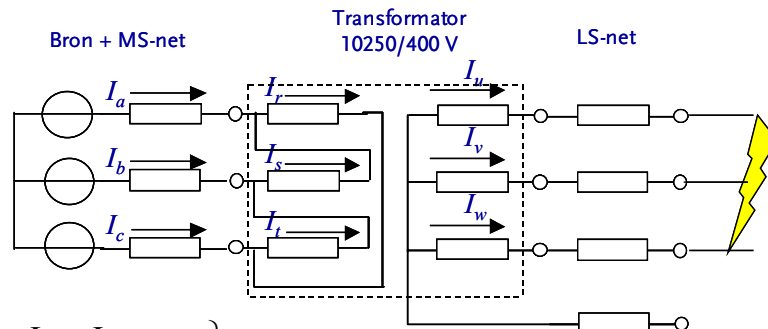
- Netimpedanties bepalen de grootte van de kortsluitstroom
- Berekening volgens de norm IEC 909
- Bekijken wat er gebeurt:
  - Dichtbij de MS/LS-transformator en
  - Verderop in het LS-net
- Vervolgens aantonen met Gaia

Aangezien de netimpedanties een directe relatie hebben met de kortsluitstromen, ligt het voor de hand eerst toe te lichten waardoor de éénfase- en driefasenkortsluitstromen bepaald worden. Voor die afleiding wordt de methode van IEC 909 toegepast. Hierbij concentreren we ons op twee extreme gevallen, namelijk:

- een kortsluiting dichtbij de transformator in een net met een zwakke voedingsbron en
- een kortsluiting verderop in het net met een sterke voedingsbron.

Tenslotte worden de berekeningen met behulp van de nieuwe modules in Gaia voor loadflow en spanningsvastheid uitgevoerd.

## De stromen bij een driefasenfout



$$\left. \begin{aligned}
 I_{a,3f} &= I_r - I_s \\
 |I_r| &= |I_s| = |I_t| = I_{prim} \\
 I_{prim} &= I_{sec} / n_{spoel} \\
 n_{spoel} &= \frac{10250}{400 / \sqrt{3}}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow |I_{a,3f}| = \sqrt{3} \cdot I_{prim} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{sec}}{n_{spoel}} = \frac{I_{sec}}{n} = \frac{|I_u|}{n}$$

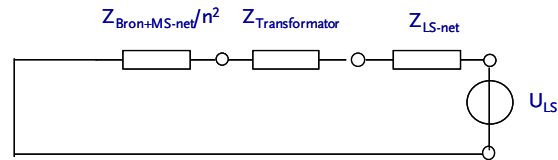
*met :*  
 $I_{sec} = |I_u|$   
 $n = \frac{10250}{400}$

Eerst wordt het gedrag tijdens de symmetrische driefasenkortsluiting toegelicht. Het net bestaat uit een voeding met een MS-net, een MS/LS-transformator en een LS-net.

Door de symmetrische kortsluiting gaan symmetrische stromen lopen door de secundaire en primaire wikkelingen van de transformator. Zo ook lopen symmetrische stromen door het MS-net en de voeding. Vanwege de driehoekschakeling van de primaire wikkelingen in de transformator, vertakt zich de fasestroom van het MS-net in twee primaire transformatorwikkelingen. Zo is de stroom door fase a van het MS-net gelijk aan de verschilvector van de stromen door de primaire transformatorwikkelingen r en s. De stromen door de drie primaire transformatorwikkelingen zijn in grootte gelijk aan elkaar en noemen we  $I_{prim}$ . De grootte van de fasestroom in het MS-net is dan door het vectoriele verschil van  $I_r$  en  $I_s$  gelijk aan  $\sqrt{3}$  maal  $I_{prim}$ . De overzetverhouding van de transformatorwikkelingstromen is  $n_{spoel}$ . Deze is niet gelijk aan de normale overzetverhouding  $n$  van de transformator, maar dat wordt goed gemaakt door de  $\sqrt{3}$  in de relatie van de fasestroom in het MS-net ( $I_a$ ) en de stroom door een transformatorwikkeling ( $I_{prim}$ ).

De overzetverhouding van de MS-fasestroom tot de LS-fasestroom is dus gewoon gelijk aan de transformatoroverzetverhouding  $n$ .

## Berekening driefasenfout volgens IEC 909



$$I_{3f} = \frac{U_{LS}}{Z_{Bron+MS-net} / n^2 + Z_{Transformator} + Z_{LS-net}}$$

Sterke bron, fout verderop in het net:  $I_{3f} \approx \frac{U_{LS}}{Z_{Transformator} + Z_{LS-net}}$

Zwakke bron, fout dichtbij sterke transformator:  $I_{3f} \approx \frac{U_{LS}}{Z_{Bron+MS-net} / n^2}$

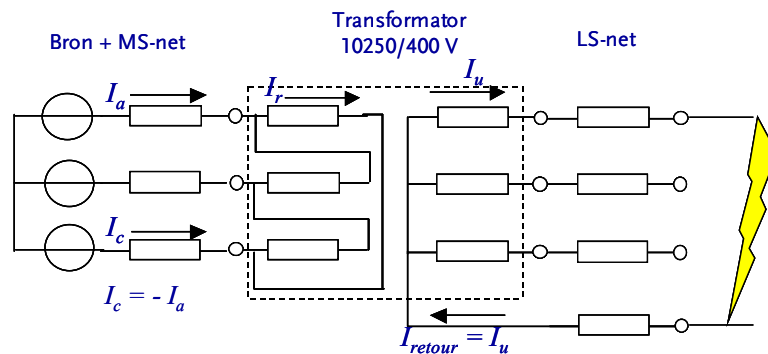
Met de kennis over het gedrag van de symmetrische kortsluiting in het net kunnen we het model opstellen voor de berekening van de kortsluitstroom. Volgens de methode van IEC 909 moet in het passieve net een spanningsbron worden aangebracht op de plaats van de kortsluiting. De berekende stroom is dan gelijk aan de kortsluitstroom.

De impedanties aan de MS-zijde worden gedeeld door het kwadraat van de overzetverhouding. Aldus ontstaat de formule voor de driefasenkortsluitstroom.

In het geval van een driefasenkortsluiting verderop in een net dat gevoed wordt door een sterke bron, kunnen we de impedanties van de bron en het MS-net verwaarlozen. De kortsluitstroom is dan voornamelijk afhankelijk van de transformatorimpedantie en de LS-netimpedantie.

In het extreme geval van een driefasenkortsluiting op de LS-klemmen van een sterke transformator in een net dat gevoed wordt door een zwakke bron, kunnen we de impedanties van de transformator en het LS-net verwaarlozen. De kortsluitstroom is dan voornamelijk afhankelijk van de voedingsimpedantie en de impedantie van het MS-net.

## De stromen bij een éénfasefout



$$\left. \begin{aligned} I_{a,1f} &= I_r \\ |I_r| &= I_{prim} \\ I_{prim} &= I_{sec} / n_{spoel} \\ n_{spoel} &= \frac{10250}{400 / \sqrt{3}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow |I_{a,1f}| = I_{prim} = \frac{I_{sec}}{n_{spoel}} = \frac{I_{sec}}{\sqrt{3} \cdot n} = \frac{|I_u|}{\sqrt{3} \cdot n}$$

met:

$$I_{sec} = |I_u|$$

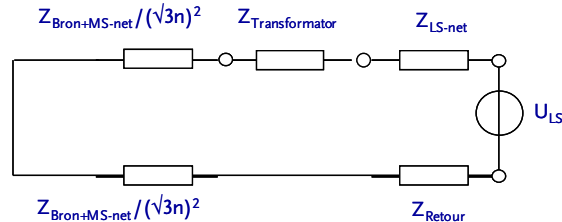
$$n = \frac{10250}{400}$$

Vervolgens wordt het gedrag bij een éénfasekortsluiting toegelicht. Door de kortsluiting loopt een stroom door één van de secundaire transformatorwikkelingen. Als gevolg loopt er alleen een stroom door de gekoppelde primaire transformatorwikkeling. Deze stroom loopt door 2 fasen van het MS-net en de voeding. Er zijn aan MS-zijde dus 2 impedanties betrokken.

De stroom in een fase van het MS-net vertakt zich niet over twee primaire transformatorwikkelingen, waardoor de factor  $\sqrt{3}$  in de relatie tussen stromen in de primaire fase en de primaire transformatorwikkeling wegvalt. De fasestroom is gelijk aan de stroom door de primaire wikkeling.

Als gevolg is de overzetverhouding van een fasestroom aan MS-zijde tot de fasestroom aan LS-zijde gelijk aan  $\sqrt{3}$  maal  $n$ .

## Berekening éénfasefout volgens IEC 909



$$I_{1f} = \frac{U_{LS}}{2 \cdot Z_{Bron+MS-net} / (\sqrt{3}n)^2 + Z_{Transformator} + Z_{LS-net} + Z_{Retour}}$$

Sterke bron, fout verderop in het net:  $I_{1f} \approx \frac{U_{LS}}{Z_{Transformator} + Z_{LS-net} + Z_{Retour}}$

Zwakke bron, fout dichtbij sterke transformator:  $I_{1f} \approx \frac{3 \cdot U_{LS}}{2 \cdot Z_{Bron+MS-net} / n^2}$

Met de kennis over het gedrag van de éénfasekortsluiting in het net kan het model opgesteld worden voor de berekening van de kortsluitstroom. Opvallend is dat nu, ten opzichte van het symmetrische geval, de impedanties van het MS-net tweemaal voorkomen. Bovendien is de overzetverhouding  $\sqrt{3}$  maal  $n$ . Ook moet de retourimpedantie in het LS-net nu worden gemodelleerd.

Na aanbrengen van de spanningsbron op de foutplaats kan de formule voor de éénfasekortsluitstroom worden opgesteld.

In het geval van een éénfasekortsluiting verderop in een net dat gevoed wordt door een sterke bron, kunnen de impedanties van de bron en het MS-net weer verwaarloosd worden. De kortsluitstroom is dan voornamelijk afhankelijk van de transformatorimpedantie, de LS-netimpedantie en de retourimpedantie.

In het extreme geval van een éénfasekortsluiting op de LS-klemmen van een sterke transformator in een net dat gevoed wordt door een zwakke bron, kunnen de impedanties van de transformator, van het LS-net en de retourimpedantie verwaarloosd worden. De kortsluitstroom is dan voornamelijk afhankelijk van de voedingsimpedantie en de impedantie van het MS-net. In het resultaat zijn nu een factor 3 in de teller en 2 in de noemer opgenomen.

## Samenvatting éénfasefout en driefasenfout

### Kortsluitstroom LS

Driefasenkortsluiting 
$$I_{3f} = \frac{U_{LS}}{Z_{Bron+MS-net} / n^2 + Z_{Transformator} + Z_{LS-net}}$$

Éénfase kortsluiting 
$$I_{1f} = \frac{U_{LS}}{2 \cdot Z_{Bron+MS-net} / (\sqrt{3}n)^2 + Z_{Transformator} + Z_{LS-net} + Z_{Retour}}$$

Samenvattend zijn de verschillen bij een driefasenkortsluiting en een éénfasekortsluiting toe te schrijven aan de retourimpedantie en de verdeling van de stromen aan de primaire zijde van de transformator in het MS-net.

## Samenvatting éénfasefout en driefasenfout in extreme gevallen

Sterke bron, fout verderop in het net

Zwakke bron, fout dichtbij sterke transformator

Driefasenkortsluiting 
$$I_{3f} \approx \frac{U_{LS}}{Z_{Transformator} + Z_{LS-net}}$$

$$I_{3f} \approx \frac{U_{LS}}{Z_{Bron+MS-net} / n^2}$$

Éénfasekortsluiting 
$$I_{1f} \approx \frac{U_{LS}}{Z_{Transformator} + Z_{LS-net} + Z_{Retour}}$$

$$I_{1f} \approx \frac{3 \cdot U_{LS}}{2 \cdot Z_{Bron+MS-net} / n^2}$$

Verwaarlozen  $Z_{Bron+MS-net}$

Verwaarlozen  $Z_{transformator}$ ,  $Z_{LS-net}$  en  $Z_{Retour}$

Samenvattend worden onder verwaarlozing van de minder relevante impedanties de verschillen in de extreme situaties goed zichtbaar.

Bij een storing verderop in een LS-net is de circuitimpedantie gelijk aan de som van de fase-impedantie en de retourimpedantie. Maar bij een storing dichtbij de LS-klemmen van de transformator gaat dit niet altijd goed op.

## Dus in het extreme geval van:

- Zwakke netvoeding
- Sterke transformator
- Transformator sterpuntgeaard
- Kortsluiting dicht bij de transformator
- Verhouding kortsluitstromen:  $I_{1f} \approx \frac{3}{2} \cdot I_{3f}$
- Verhouding netimpedanties:  $Z_{fase} \approx \frac{3}{2} \cdot Z_{circuit}$

Bij een storing dichtbij de LS-klemmen van de transformator kan in een extreme situatie de éénfasekortsluitstroom maximaal 1,5 maal groter dan de driefasenkortsluitstroom zijn.

Als gevolg is dan de fase-impedantie maximaal 1,5 maal groter dan de circuitimpedantie. In die gevallen wordt de berekende retourimpedantie negatief en verliest hij zijn fysieke betekenis.

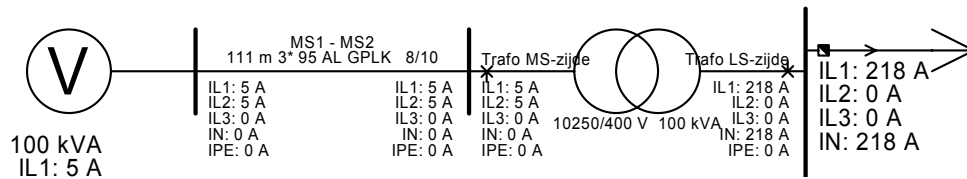


4 REKENVOORBEELD MET GAIA

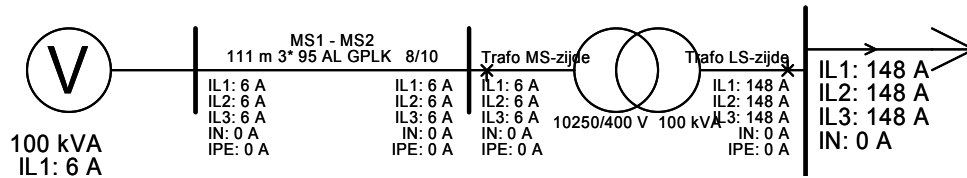
In het nu volgende worden de resultaten van de kortsluitstromen, berekend met de vijfgeleiderload-flowmodule, en de resultaten van de netimpedanties, berekend met de spanningsvastheidsmodule, nader toegelicht.

## Voorbeeld met Gaia: kortsluitstromen

### Éénfasesluiting:



### Driefasensluiting:



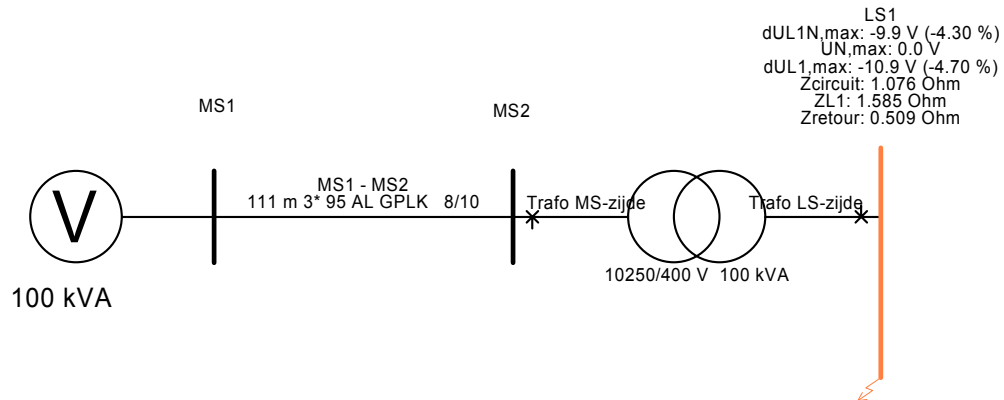
$$\frac{I_{1f}}{I_{3f}} = \frac{218}{148} = 1,47$$

Met Gaia is een netmodel opgesteld met met een zwakke voeding (Sk''=100 kVA).

De éénfasekortsluiting is in de vijfgeleiderloadflow gesimuleerd met een oneindig grote éénfasebelasting; de driefasenkortsluiting met een grote symmetrische belasting.

De éénfasekortsluitstroom is groter dan de driefasenkortsluitstroom. De verhouding is gelijk aan 1,47.

## Voorbeeld met Gaia: netimpedanties

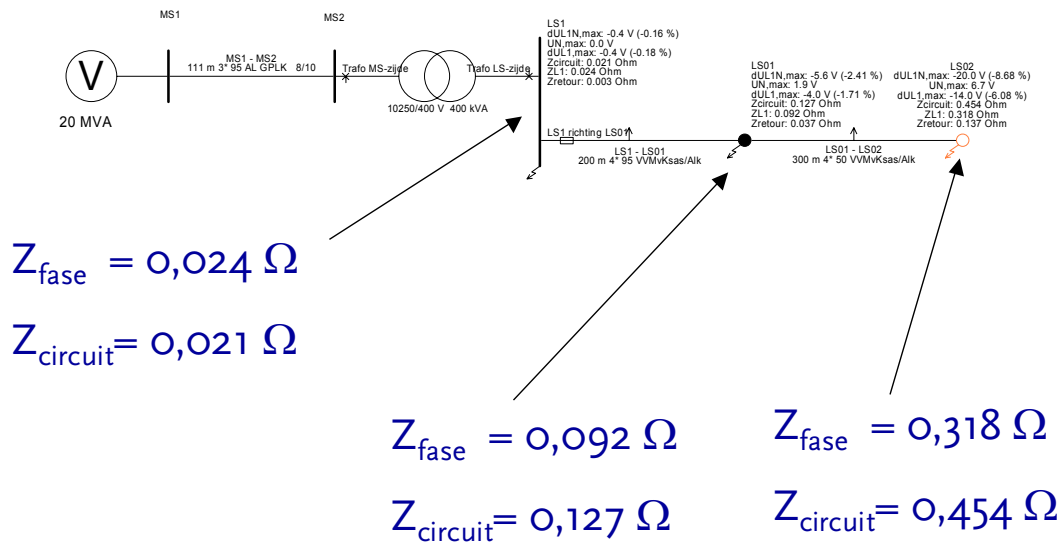


$$\frac{Z_{fase}}{Z_{circuit}} = \frac{1.585}{1.079} = 1,47$$

Met behulp van de nieuwe spanningsvastheidsmodule worden de netimpedanties automatisch berekend.

De verhouding van de fase- en circuitimpedanties is, zoals verwacht, gelijk aan die van de kortsluitstromen.

## Voorbeeld met Gaia: normale situatie



Bij simulatie van een net met een normale voeding ( $Sk''=20$  MVA) berekent de spanningsvastheids-module de netimpedanties. Aan de LS-klemmen van de transformator is de fase-impedantie nog wel groter dan de circuitimpedantie, maar na de eerste kabel is de circuitimpedantie groter dan de fase-impedantie en heeft de retourimpedantie weer een fysieke betekenis.

## Conclusie

- De netimpedantie is opgebouwd uit impedanties van LS-net, MS/LS-transformator, MS-net en Netvoeding
- Driehoek/sterschakeling beïnvloedt  $I_{k,1f}/I_{k,3f}$  en dus ook  $Z_{\text{circuit}}/Z_{\text{fase}}$
- Dichtbij transformator is  $I_{k,1f} > I_{k,3f}$
- $Z_{\text{retour}} = Z_{\text{circuit}} - Z_{\text{fase}}$  heeft dichtbij de transformator alleen theoretische betekenis

De netimpedantie wordt bepaald door het totale net, dus inclusief LS-net, transformator, MS-net en voedingsbron.

De verhouding van de éénfase- en driefasenkortsluitstroom wordt beïnvloed door de driehoek/sterschakeling van de transformator. Dat is vooral merkbaar bij kortsluitingen dichtbij de LS-klemmen van de transformator.

Het gevolg van de gehanteerde definities is dat de vergelijking  $Z_{\text{retour}} = Z_{\text{circuit}} - Z_{\text{fase}}$  zijn praktische fysische betekenis verliest.

Bekijk daarom, alvorens conclusies over de retourimpedantie te trekken, altijd eerst de relatie tussen de fase- en de circuitimpedantie.