

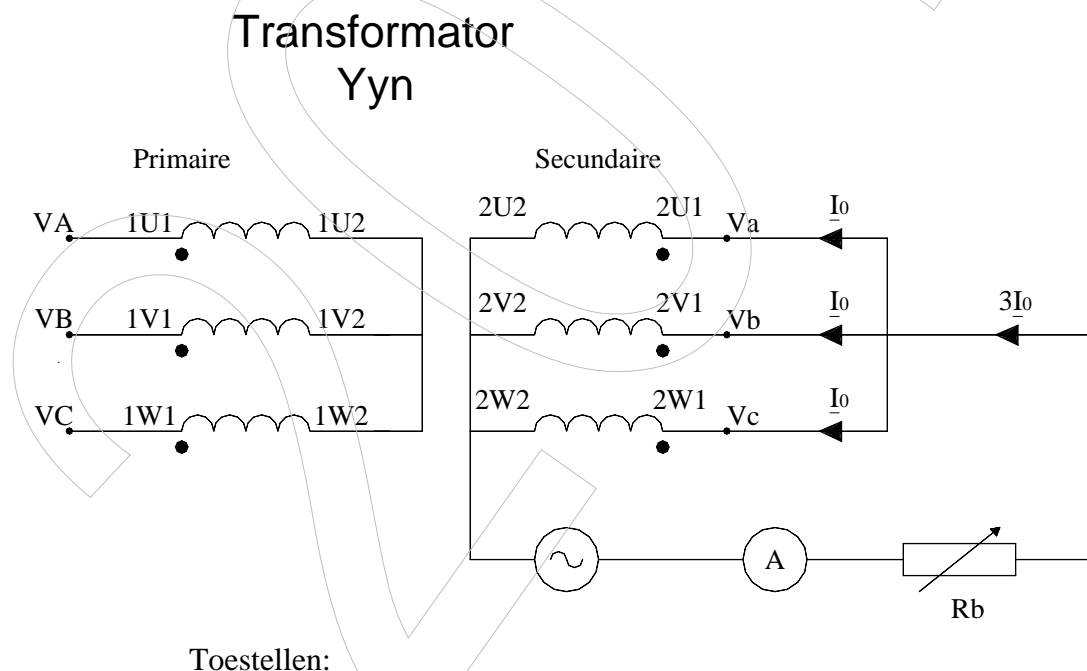
OPGAVE 1 Distributietransformatoren

Distributietransformatoren, die de schakel vormen tussen het middenspanningsnet en het laagspanningsnet vinden we veelal in de configuratie DynXX terug. Het is de bedoeling van deze opgave om inzicht te verschaffen uit berekeningen en controlemetingen waarom meestal voor deze configuratie wordt gekozen.

De verschillende configuraties: Yyn, Dyn en Yzn worden met elkaar geconfronteerd.

1 In een eerste meting gaan we na of de homopolaire component van de stroom al dan niet buiten de beschouwde distributietransformator kan bestaan.

1.1 Bij een Yyn transformator met niet geaarde primaire wordt, indien er homopolaire stromen aanwezig zijn in de secundaire, de homopolaire component niet doorgegeven aan de primaire. Aan de hand van onderstaande opstelling kan die bewering worden bevestigd of weerlegd.



TRAFO ECX 3kVA (Yyn)

Weerstand $R_b = 68 \text{ ohm}/5\text{A}$ (**metalen bescherming van de labotafel voorzien**)

Ampèremeter

Regelbare spaartransformator 0-250V ac

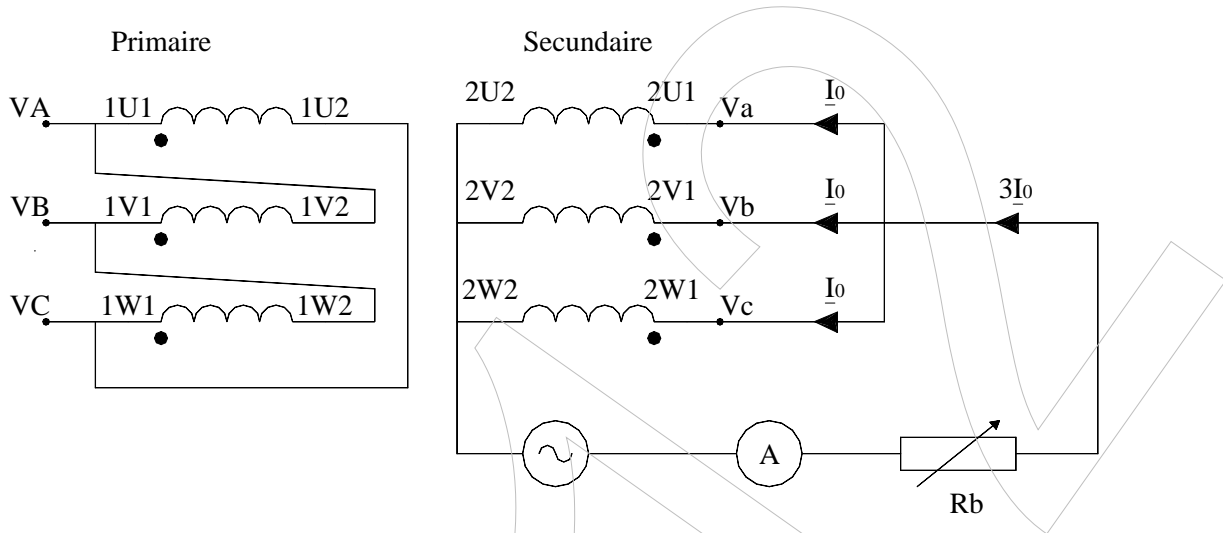
Werkwijze:

- Schakel de regelbare spanning in (te beginnen vanaf 0V !!!) en stel de regelbare spaartransformator en de weerstand zo in dat de $3 \cdot I_0 = I_{nom}$ van de secundaire van de transformator. De primaire van de transformator zeker NIET aan het net verbinden.
- Meet de drie lijnspanningen U_{L12} , U_{L23} en U_{L31} aan respectievelijk de primaire en de secundaire van de transfo.
- Meet de fasespanningen $1U_1-1U_2$, $1V_1-1V_2$, $1W_1-1W_2$ en $2U_1-2U_2$, $2V_1-2V_2$, $2W_1-2W_2$ aan respectievelijk de primaire en de secundaire van de transfo. Daartoe kan het verdeelbord waarin de transformator is ingebouwd worden geopend zodat de wikkelingen van de transformator bereikbaar worden. Opgelet voor onder spanning staande delen. Bij twijfel steeds de labobegeleider raadplegen.
- Hoe kan je aantonen dat de homopolaire stroom die in de secundaire wordt geïnjecteerd niet aan de primaire terug is te vinden.

De bepaling van de homopolaire impedantie van een transformator gebeurt door een homopolaire spanning aan te leggen (in dit geval) aan de secundaire en de primaire kort te sluiten. De stroom I_0 wordt gemeten. Verklaar of argumenteer waarom de primaire al dan niet mag kortgesloten worden. Ga met behulp van een ampèretang de grootte van de kortsluitstroom na in de kortsluitdraden van de primaire.

- 1.2 Bij een Dyn transformator wordt, indien er homopolaire stromen aanwezig zijn in de secundaire, de homopolaire component niet doorgegeven aan de primaire. Aan de hand van onderstaande opstelling kan die bewering worden bevestigd of weerlegd.

Transformator Dyn



De bovenstaande meting kan worden herhaald voor de Dyn-opstelling.

Toestellen:

TRAFO ECX 3kVA (Dyn)

Weerstand $R_b = 68 \text{ ohm}/5\text{A}$ (**metalen bescherming van de labotafel voorzien**)

Ampèremeter

Regelbare spaartransformator 0-250V ac

1.3 Problemen en taken

Yyn:

Verklaar waarom de primaire lijnspanningen $Y_{yn} 0 \text{ Volt}$ bedragen

Wat zijn de gevolgen (i.v.m. de homopolaire component van de stroom) indien het primaire sterpunt van de transfo geaard wordt?

Bereken de homopolaire impedantie van de transformator (en vergelijk met de directe of inverse impedantie).

Dyn:

Vergelijk de grootte van de primaire fasestromen (met behulp van een ampèretang in de primaire wikkelingen te meten) met de grootte van de secundaire fasestromen en bespreek. (vergeet de transformatieverhouding niet in rekening te brengen).

Is de homopolaire secundaire componenten terug te vinden in de primaire lijngrootheden?

Bedenk een strategie om dit na te gaan, bespreek ze bij twijfel met de labobegeleider en voer

ze indien mogelijk uit.

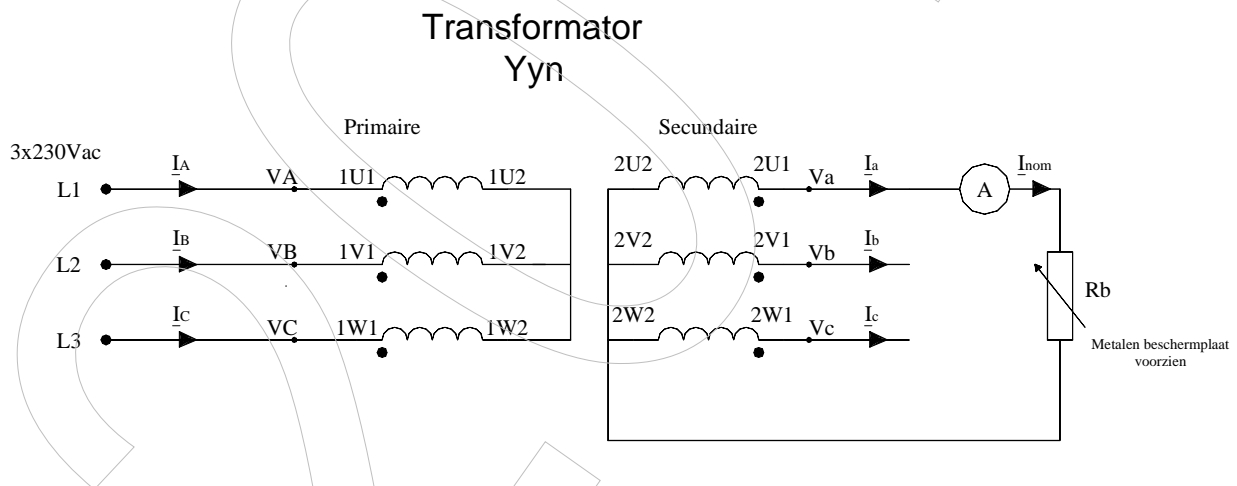
2 Maximale asymmetrische belasting van transformatoren.

Als de belasting evenwichtig is verdeeld over de drie fasen, of als de belasting is aangesloten tussen twee fasen, dan gedragen de beschouwde transformatoren zich gelijkaardig. Wordt de belasting daarentegen tussen de neutrale (distributietransformatoren) en een fase aangesloten (onevenwichtige belasting) dan heeft dit verschillende gevolgen naargelang het schakeltype: Dyn – Yyn – Yzn.). Meet in de volgende proefopstellingen de primaire grootheden steeds met behulp van een energiemonitor (PML3710 of PML3720).

2.1 Yyn – opstelling.

In de praktijk wenst men de primaire wikkeling in ster te schakelen (isolatiespanning), omdat dit de goedkoopste oplossing biedt (waarom?). In wat volgt wordt nagegaan hoe de Yyn-transfo zich gedraagt bij onevenwichtige belasting.

2.1.1 Spanningsvariatie bij onevenwichtige belasting



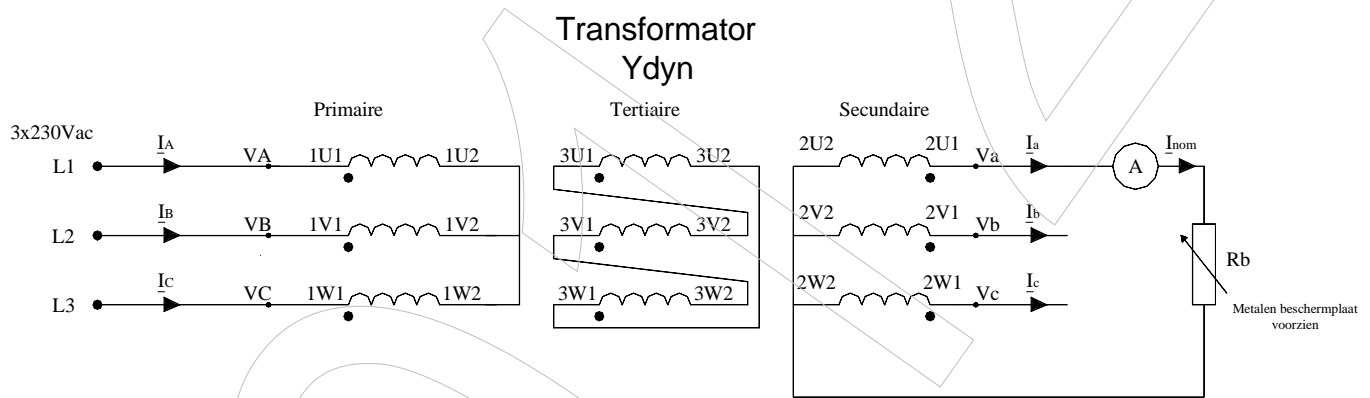
De transfo wordt eerst in nullast en vervolgens nominaal belast tussen een fase (bvb L1) en het sterpunt (zie figuur). Let erop dat de tertiaire wikkeling ($3U_1-3U_2$, $3V_1-3V_2$ en $3W_1-3W_2$) van de transformator NIET wordt opgenomen (wikkelingen open laten). Meet **alle** primaire en secundaire fase- en lijnspanningen. Met behulp van de energiemonitor worden de primaire lijnstromen in grootte en hoek gemeten (indien mogelijk het fasordiagramma afdrukken). Plaats alle meetwaarden in een tabel.

De secundaire fasespanningen zullen bij onevenwichtige belasting zeker niet meer gelijk zijn

in grootte. Bereken het spanningsverschil in percent voor elke fasespanning. De nominale spanning U_{nom} wordt bepaald bij de nullastmeting.

$$X = \frac{U_{nom} - U}{U_{nom}} \cdot 100\%$$

Schakel vervolgens een tertiaire wikkeling in driehoek zoals weergegeven in onderstaande figuur. Meet bij dezelfde belasting de verschillende spanningen en stromen in de primaire en de secundaire en vergelijk ze met de meting zonder tertiaire wikkeling. Ga na hoe groot de stroom in de tertiaire wikkelingen is er vergelijk met de homopolaire stroomcomponent aan secundaire zijde. Bespreek het resultaat.



Voor welk vermogen (t.o.v. het nominaal vermogen van de transformator) moet de tertiaire wikkeling worden gedimensioneerd? Argumenteer.

2.1.2 Berekening van de primaire lijnstromen bij maximale asymmetrische belasting.

Voor de beschouwde opstellingen kan volgens de theorie van de symmetrische componenten de stromen in de primaire worden berekend. Onderstaand wordt dit voor de eerste opstelling als voorbeeld uitgewerkt. Alle andere berekeningen worden in het verslag opgenomen.

Het verband tussen de fasecomponenten kan als volgt worden weergegeven:

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \end{pmatrix} = \frac{1}{n_w} \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{pmatrix} \tag{11}$$

De overgang van fasecomponenten naar symmetrische componenten is altijd mogelijk met

behulp van de transformatie van Fortescue. Deze overgang is slechts een vereenvoudiging als de matrix “circulant symmetrisch” is, wat hier dus het geval is.

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \end{pmatrix} = T_s \cdot \begin{pmatrix} \bar{I}_{OP} \\ \bar{I}_{1P} \\ \bar{I}_{2P} \end{pmatrix} \quad \text{en} \quad \begin{pmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{pmatrix} = T_s \cdot \begin{pmatrix} \bar{I}_{OS} \\ \bar{I}_{1S} \\ \bar{I}_{2S} \end{pmatrix}$$

Waaruit volgt dat:

$$T_s^{-1} \cdot T_s \cdot \begin{pmatrix} \bar{I}_{OP} \\ \bar{I}_{1P} \\ \bar{I}_{2P} \end{pmatrix} = T_s^{-1} \cdot \frac{1}{n_w} \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot T_s \cdot \begin{pmatrix} \bar{I}_{OS} \\ \bar{I}_{1S} \\ \bar{I}_{2S} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_{OP} \\ \bar{I}_{1P} \\ \bar{I}_{2P} \end{pmatrix} = T_s^{-1} \cdot \frac{1}{n_w} \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot T_s \cdot \begin{pmatrix} \bar{I}_{OS} \\ \bar{I}_{1S} \\ \bar{I}_{2S} \end{pmatrix}$$

$$T_s^{-1} \cdot \frac{1}{n_w} \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot T_s \quad \text{kunnen we voorstellen als 1 matrix:}$$

$$\frac{1}{n_w} \cdot \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3 \cdot n_w} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

Daaruit volgt dat:

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_{OP} \\ \bar{I}_{1P} \\ \bar{I}_{2P} \end{pmatrix} = \frac{1}{3 \cdot n_w} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{I}_{OS} \\ \bar{I}_{1S} \\ \bar{I}_{2S} \end{pmatrix}$$

Daaruit volgt dat:

$$\bar{I}_{OP} = \frac{1}{3 \cdot n_w} \cdot 0 \cdot \bar{I}_{OS} = 0 \quad \bar{I}_{1P} = \frac{1}{3 \cdot n_w} \cdot 3 \cdot \bar{I}_{1S} \quad \bar{I}_{2P} = \frac{1}{3 \cdot n_w} \cdot 3 \cdot \bar{I}_{2S}$$

Bij een enkelfasige belasting weten we ook dat : $\bar{I}_{OS} = \bar{I}_{1S} = \bar{I}_{2S} = \frac{\bar{I}_a}{3}$

En dus:

$$\bar{I}_{OP} = 0 \quad \bar{I}_{1P} = \frac{1}{3 \cdot n_w} \cdot \bar{I}_a \quad \bar{I}_{2P} = \frac{1}{3 \cdot n_w} \bar{I}_a$$

Zo bekomen we: x_w

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{OP} + \bar{I}_{1P} + \bar{I}_{2P} = \frac{2}{3 \cdot n_w} \bar{I}_a$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_{OP} + a^2 \cdot \bar{I}_{1P} + a \cdot \bar{I}_{2P} = (a + a^2) \cdot \frac{1}{3 \cdot n_w} \bar{I}_a = \frac{-1}{3 \cdot n_w} \bar{I}_a \quad \text{met } (a + a^2) = -1$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_{OP} + a \cdot \bar{I}_{1P} + a^2 \cdot \bar{I}_{2P} = (a + a^2) \cdot \frac{1}{3 \cdot n_w} \bar{I}_a = \frac{-1}{3 \cdot n_w} \bar{I}_a \quad \text{met } (a + a^2) = -1$$

Hoe bepaal je door meting n_w ?

Vergelijk de berekende en de gemeten waarden in grootte en in onderlinge hoekverschuiving. Toon dit aan met behulp van het opgenomen fasordiagramma. Verklaar waarom de grootte en de onderlinge hoekverschuiving niet exact gelijk zijn (wat werd bij de berekening verwaarloosd?)

Bij een enkelfasige belasting is : $\bar{I}_{OS} = \bar{I}_{1S} = \bar{I}_{2S} = \frac{\bar{I}_a}{3}$. Daaruit volgt dat de secundaire

homopolaire stroom een flux veroorzaakt die niet gecompenseerd wordt in de primaire wikkeling. Bij een transfo met gedwongen flux (3 benige kern) sluit die homopolaire flux zich door de wand van transformatorhuis (in dit concreet geval is dit het metalen verdeelbord waarin de transformator is ingebouwd). Dit leidt tot een toename van de lekflux, verplaatsing van het nulpunt en dus een onevenwichtige secundaire spanning.

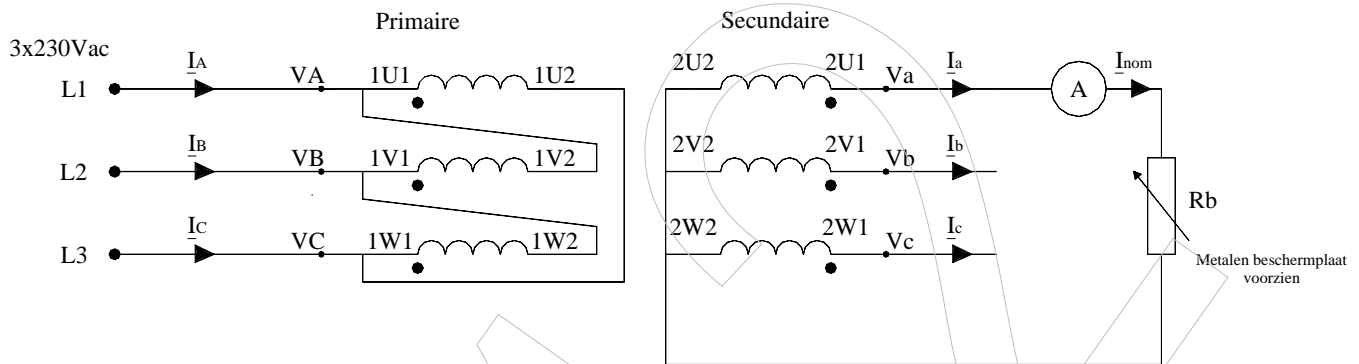
Hoe kan dit onevenwicht worden gereduceerd? (Zie uitgevoerde metingen)

2.2 Dyn – opstelling.

2.2.1 Spanningsvariatie bij onevenwichtige belasting

De transfo wordt eerst in nullast en vervolgens nominaal belast tussen een fase (bvb L1) en het sterpunt (zie onderstaande figuur). Let erop dat de tertiaire wikkeling ($3U_1-3U_2$, $3V_1-3V_2$ en $3W_1-3W_2$) van de transformator NIET wordt opgenomen (wikkelingen open laten). Meet **alle** primaire en secundaire fase- en lijnspanningen. Met behulp van de energiemonitor worden de primaire lijnstromen in grootte en hoek gemeten (indien mogelijk het fasordiagramma afdrukken). Plaats alle meetwaarden in een tabel.

Transformator Dyn

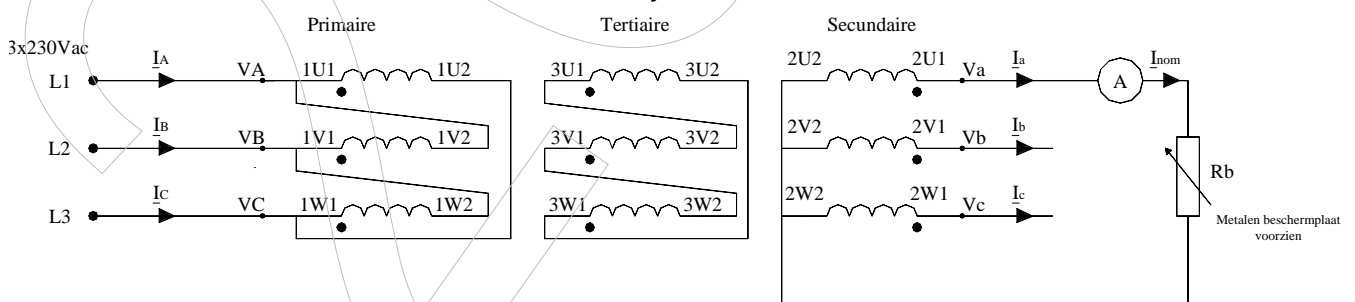


De secundaire fasespanningen zullen bij onevenwichtige belasting niet meer gelijk zijn in grootte. Bereken het spanningsverschil in percent voor elke fasespanning. De nominale spanning U_{nom} wordt bepaald bij de nullastmeting.

$$X = \frac{U_{nom} - U}{U_{nom}} \cdot 100\%$$

Schakel vervolgens een tertiaire wikkeling in driehoek zoals weergegeven in onderstaande figuur. Meet bij dezelfde belasting de verschillende spanningen en stromen in de primaire en de secundaire en vergelijk ze met de meting zonder tertiaire wikkeling. Ga na hoe groot de stroom in de tertiaire wikkelingen is er vergelijk met de homopolaire stroomcomponent aan secundaire zijde. Bespreek het resultaat.

Transformator Ddyn



Berekening van de primaire lijnstromen bij maximale asymmetrische belasting.

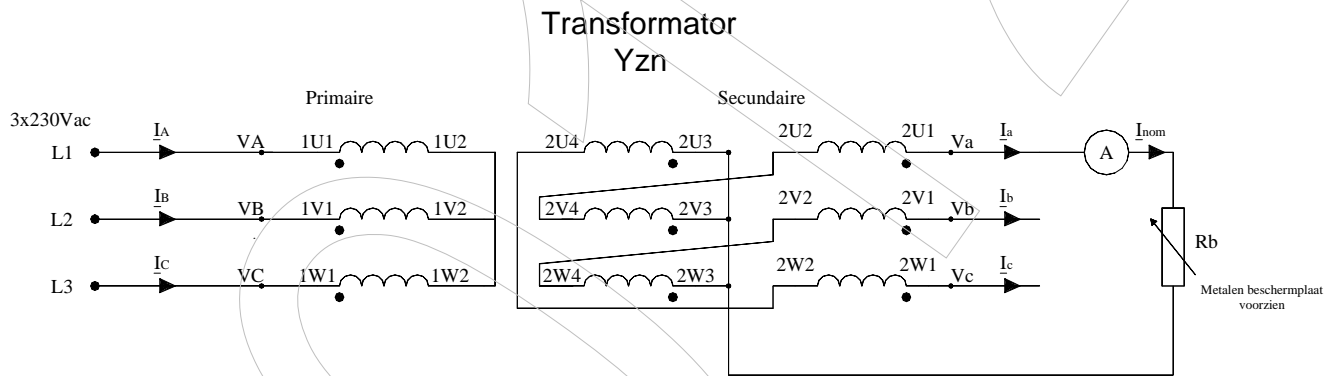
Bepaal op analoge wijze de grootte en onderlinge faseverschuiving van de primaire lijnstromen volgens de theorie van de symmetrische componenten. De berekeningen worden in het verslag opgenomen. Vergelijk de berekende en de gemeten waarden in grootte en in

onderlinge hoekverschuiving. Toon dit aan met behulp van het opgenomen fasordiagramma. Bespreek en interpreteer de resultaten.

2.3 Yzn – opstelling.

2.3.1 Spanningsvariatie bij onevenwichtige belasting

De transfo wordt eerst in nullast en vervolgens nominaal belast tussen een fase (bvb L1) en het sterpunt (zie onderstaande figuur). Meet **alle** primaire en secundaire fase- en lijnspanningen. Met behulp van de energiemonitor worden de primaire lijnstromen in grootte en hoek gemeten (indien mogelijk het fasordiagramma afdrukken). Plaats alle meetwaarden in een tabel.



De secundaire fasespanningen zullen bij onevenwichtige belasting niet meer gelijk zijn in grootte. Bereken het spanningsverschil in percent voor elke fasespanning. De nominale spanning U_{nom} wordt bepaald bij de nullastmeting.

$$X = \frac{U_{nom} - U}{U_{nom}} \cdot 100 \%$$

Bespreek de zin of onzin van een bijkomende gesloten driehoek wikkeling bij de Yzn opstelling.

2.3.2 Berekening van de primaire lijnstromen bij maximale asymmetrische belasting.

Bepaal op analoge wijze de grootte en onderlinge faseverschuiving van de primaire lijnstromen volgens de theorie van de symmetrische componenten. De berekeningen worden in het verslag opgenomen. Vergelijk de berekende en de gemeten waarden in grootte en in onderlinge hoekverschuiving. Toon dit aan met behulp van het opgenomen fasordiagramma. Bespreek en interpreteer de resultaten.

3 Onderlinge vergelijking van de drie transfo-configuraties.

Vergelijk voor de drie opstellingen de procentuele spanningsvariatie van de fasespanningen bij maximaal asymmetrische belasting. Welke transformator (Yyn, Dyn of Yzn) wordt veelal als schakel tussen de midden- en laagspanningszijde van een distributienet opgenomen? Argumenteer zo volledig mogelijk. Wat zouden de beïnvloedende parameters kunnen zijn?

4 Onevenwichtige belasting van een distributietransformator.

Wat volgt is geldig voor de Dyn11 distributietransformator.

Het document in bijlage opgenomen beschrijft hoe algemeen de primaire lijnstromen van een distributietransformator kunnen berekend worden bij evenwichtige of onevenwichtige belasting. Eveneens wordt een maple-file (LABO ptd 2010-1) ter beschikking gesteld die de berekeningen moeten helpen ondersteunen.

Belast de transformator nominaal tussen de lijnen L1 en L2 (4,5A, weerstand Ω) en meet de primaire lijnstromen (in grootte en hoek) van de transformator met behulp van de energiemonitor. Vergelijk de gemeten waarden met de berekende waarden.

- Waarom is een afwijking vast te stellen? Stel een hypothese op en controleer. Overleg met de labobegeleider.
- Vergelijk op basis van genormaliseerde waarden.
- Leg een belasting aan waarvoor de waarden van ZA,ZB,ZC en ZN zelf worden bepaald. Let erop dat de transformator niet wordt overbelast. Vergelijk de berekende en gemeten waarden.

Kan op basis van de voorgestelde berekeningsmanier de spanningen aan de secundaire van de transformator bij symmetrische of asymmetrische belasting worden bepaald? Argumenteer en controleer eventueel de metingen opgenomen in deel 2 van deze opgave.

Wat zijn de gevolgen indien de homopolaire impedantie van de transformator wordt gewijzigd. Kan dit men dit praktisch realiseren?

Bedenk een strategie en voer indien mogelijk uit. Vergelijk berekende en gemeten waarden.

5 BIJLAGE - Distributietransformatoren

5.1 Berekening van foutstromen

5.1.1 Inleiding

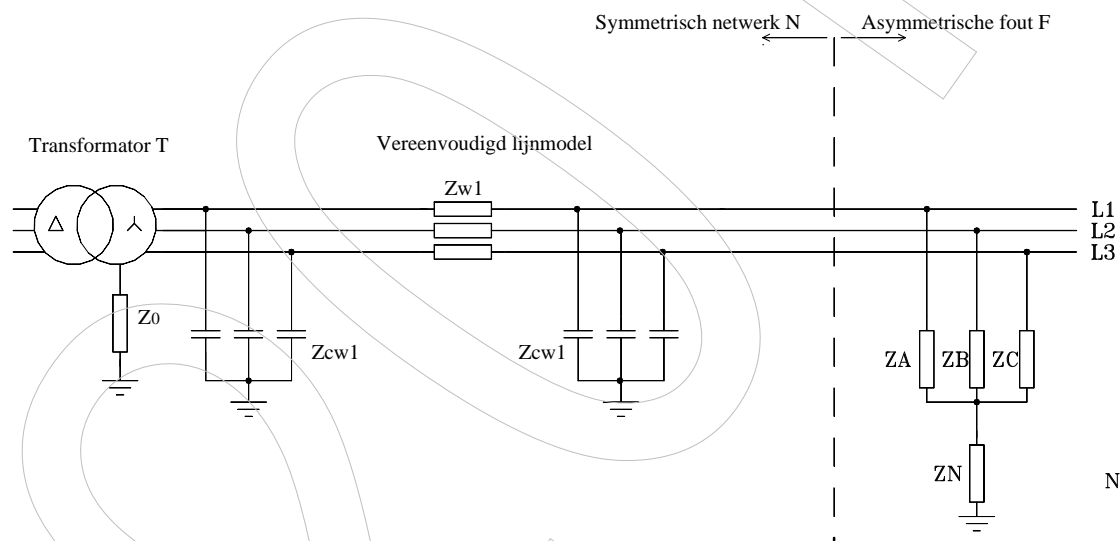
Elk onevenwichtig systeem (een onevenwichtig stel spanningen, stromen, ladingen of fluxen) kan ontbonden worden in een combinatie van symmetrische componenten. Omdat het gedrag van sommige netelementen (machines, trafo's, netten,...) ernstig kan afwijken naargelang de symmetrie van de spanning die men er aanlegt (direct, invers of homopolair), levert de beschrijving van die netelementen in symmetrische componenten een aantal voordelen ten opzichte van de voorstelling in fasecomponenten. Om dit te verduidelijken worden de driefasige netelementen die voorkomen bij lokale energieverdeling op middenspanning ontbonden in symmetrische componenten. Elektrische fouten die voorkomen in het te dimensioneren lokale netwerk kunnen beschouwd worden als een "lokale asymmetrie". De netwerkelementen die geen fouten vertonen, beschouwen we symmetrisch. Eenvoudigheidshalve brengen we de symmetrische driefasige kortsluitfouten ook onder bij de "lokale asymmetrieën" door, zoals later zal blijken, de foutimpedanties gelijk te stellen aan nul. Het is ook mogelijk om de gevolgen van een asymmetrische belasting te onderzoeken. Daarom trachten we het netwerk te splitsen in een symmetrisch deel en een asymmetrische fout. Daarbij beperken we ons tot fouten in kabels, op vertrekken of aankomsten van kabels of op barenstellen. Interne fouten in bijvoorbeeld transformatoren maken geen deel uit van deze beschouwingen.

De studie van de foutsituaties die optreden bij kortsluitingen en kabelbreuken is heel belangrijk voor de constructie van de netelementen. Op basis van de kortsluitberekeningen wordt de thermische en dynamische kortsluitvastheid van de postapparatuur en de kabels bepaald en worden de beveiligingen gedimensioneerd en geparametriseerd wat het uiteindelijke doel is van de oefening tijdens het tweede semester.

5.1.2 Voorstelling van een symmetrisch en een asymmetrisch netwerk met behulp van symmetrische componenten

Indien een netwerk één gelocaliseerde asymmetrie bevat, trachten we het netwerk te splitsen in het symmetrische deel N en de asymmetrische fout F zoals weergegeven in Figuur 1. In deze praktische opgave bestaat het symmetrisch netwerk in zijn eenvoudigste vorm uit een voedingstransformator T waarvan de directe, inverse en homopolaire impedantie aan secundaire zijde zijn gegeven en uit een feeder of middenspanningskabel W1 voorgesteld volgens het π -model. De nulpuntsimpedantie Z_0 van de transformator kan vrij bepaald worden. De asymmetrische fout kan worden gedefinieerd door middel van de impedanties Z_A, Z_B, Z_C en Z_N .

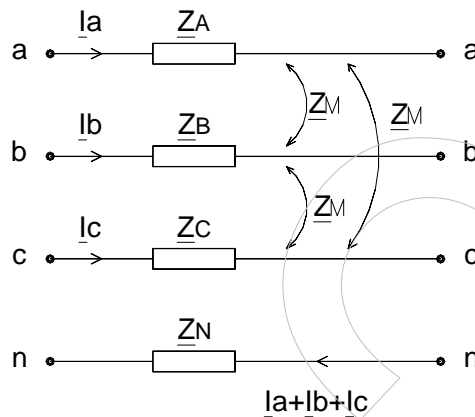
De voorstelling in symmetrische componenten van het vereenvoudigd lijnmodel en van de asymmetrische fout worden verder meer in detail behandeld zodat uiteindelijk het symmetrisch deel N kan vervangen worden door het Thévenin-equivalent.



Figuur 1: Voorstelling van een symmetrisch en asymmetrisch netwerk.

5.1.3 Vereenvoudigd lijnmodel

Het vereenvoudigd lijnmodel wordt weergegeven in Figuur 2 .



Figuur 2: Voorstelling van een vereenvoudigd lijnmodel.

Er worden een aantal realistische veronderstellingen gemaakt. De mutuele impedanties \underline{Z}_{ij} en \underline{Z}_{ji} zijn aan elkaar gelijk en worden verder aangeduid als de mutuele impedantie \underline{Z}_M . De impedanties \underline{Z}_A , \underline{Z}_B en \underline{Z}_C zijn gelijk aan elkaar en worden verder voorgesteld als \underline{Z} . Van de voorgestelde neutrale geleider, die in HS-netten de aarde of het aardscherm voorstelt, worden de koppelingen Z_{iN} en Z_{Ni} verwaarloosd.

De spanningsval over de fasen kan voorgesteld worden als:

$$\Delta \bar{V}_A = \bar{Z} \bar{I}_a + \bar{Z}_M \bar{I}_b + \bar{Z}_M \bar{I}_c + Z_N \bar{I}_n \tag{1}$$

$$\Delta \bar{V}_B = \bar{Z}_M \bar{I}_a + \bar{Z} \bar{I}_b + \bar{Z}_M \bar{I}_c + \bar{Z}_N \bar{I}_n \tag{2}$$

$$\Delta \bar{V}_C = \bar{Z}_M \bar{I}_a + \bar{Z}_M \bar{I}_b + \bar{Z} \bar{I}_c + \bar{Z}_N \bar{I}_n \tag{3}$$

Met behulp van de wet van Kirchoff in het knooppunt van de voeding (niet voorgesteld) kunnen we de stroom \bar{I}_N elimineren.

$$\bar{I}_n = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c \tag{4}$$

Zo wordt:

$$\Delta \bar{V}_A = (\bar{Z} + \bar{Z}_N) \bar{I}_a + (\bar{Z}_M + \bar{Z}_N) \bar{I}_b + (\bar{Z}_M + \bar{Z}_N) \bar{I}_c \tag{5}$$

$$\Delta \bar{V}_B = (\bar{Z}_M + \bar{Z}_N) \bar{I}_a + (\bar{Z} + \bar{Z}_N) \bar{I}_b + (\bar{Z}_M + \bar{Z}_N) \bar{I}_c \tag{6}$$

$$\Delta \bar{V}_C = (\bar{Z}_M + \bar{Z}_N) \bar{I}_a + (\bar{Z}_M + \bar{Z}_N) \bar{I}_b + (\bar{Z} + \bar{Z}_N) \bar{I}_c \tag{7}$$

In matrixnotatie kan men schrijven dat :

$$\begin{pmatrix} \Delta \bar{V}_A \\ \Delta \bar{V}_B \\ \Delta \bar{V}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Z} + \bar{Z}_N & \bar{Z}_M + \bar{Z}_N & \bar{Z}_M + \bar{Z}_N \\ \bar{Z}_M + \bar{Z}_N & \bar{Z} + \bar{Z}_N & \bar{Z}_M + \bar{Z}_N \\ \bar{Z}_M + \bar{Z}_N & \bar{Z}_M + \bar{Z}_N & \bar{Z} + \bar{Z}_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \end{pmatrix} \quad (8)$$

Als matrixvergelijking wordt dit:

$$\Delta \mathbf{V}_{ABC} = \mathbf{Z}_{ABCN} \cdot \mathbf{I}_{ABC} \quad (9)$$

De overgang van fasecomponenten naar symmetrische componenten is steeds mogelijk met behulp van de transformatie van Fortescue. Meestal is deze overgang slechts een vereenvoudiging als de impedantiematrix \mathbf{Z}_{ABCN} "circulant symmetrisch" is (d.w.z. dat de rijen door cyclische permutatie uit elkaar kunnen worden afgeleid). Er kan aangetoond worden dat in dit geval de matrix \mathbf{Z}_{012} een diagonaalmatrix wordt. De impedantiematrix is circulant symmetrisch en dus zijn de drie netwerken ontkoppeld. Via de transformatie van Fortescue bekomen we de volgende uitdrukkingen:

$$\mathbf{T}_s \cdot \Delta \mathbf{V}_{ABC} = \Delta \mathbf{V}_{012} \quad (10)$$

$$\mathbf{T}_s \cdot \mathbf{I}_{ABC} = \mathbf{I}_{012} \quad (11)$$

$$\mathbf{T}_s \cdot \Delta \mathbf{V}_{012} = \mathbf{Z}_{ABCN} \cdot \mathbf{T}_s \cdot \mathbf{I}_{012} \quad (12)$$

Beide leden van de vergelijking worden vermenigvuldigd met \mathbf{T}_s^{-1} waaruit het verband volgt tussen de directe, inverse en homopolaire spanningen en stromen.

$$\mathbf{T}_s^{-1} \cdot \mathbf{T}_s \cdot \Delta \mathbf{V}_{012} = \mathbf{T}_s^{-1} \cdot \mathbf{Z}_{ABCN} \cdot \mathbf{T}_s \cdot \mathbf{I}_{012} \quad (13)$$

$$\Delta \mathbf{V}_{012} = \mathbf{T}_s^{-1} \cdot \mathbf{Z}_{ABCN} \cdot \mathbf{T}_s \cdot \mathbf{I}_{012} \quad (14)$$

$\mathbf{T}_s^{-1} \cdot \mathbf{Z}_{ABCN} \cdot \mathbf{T}_s$ kan als één impedantiematrix worden voorgesteld:

$$\mathbf{T}_s^{-1} \cdot \mathbf{Z}_{ABCN} \cdot \mathbf{T}_s = \mathbf{Z}_{012} \quad (15)$$

Zo bekomen we:

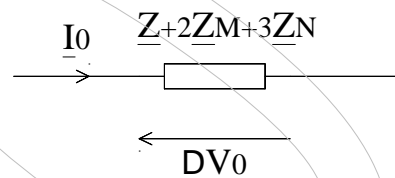
$$\Delta \mathbf{V}_{012} = \mathbf{Z}_{012} \cdot \mathbf{I}_{012} \quad (16)$$

Of:

$$\begin{pmatrix} \Delta \bar{V}_0 \\ \Delta \bar{V}_1 \\ \Delta \bar{V}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Z} + 2\bar{Z}_M + 3\bar{Z}_N & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z} - \bar{Z}_M & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z} - \bar{Z}_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{pmatrix} \quad (17)$$

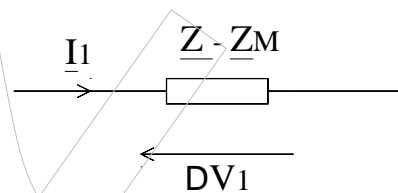
Zo blijkt dat:

Het homopolair vervangingschema van het vereenvoudigd lijnmodel uit Figuur 2 kan worden voorgesteld als:



Figuur 3: homopolair vervangingschema van een vereenvoudigd lijnmodel.

Het direct- en invers vervangingschema van het vereenvoudigde lijnmodel wordt voorgesteld als:



Figuur 4: Direct en invers vervangingschema van een vereenvoudigd lijnmodel.

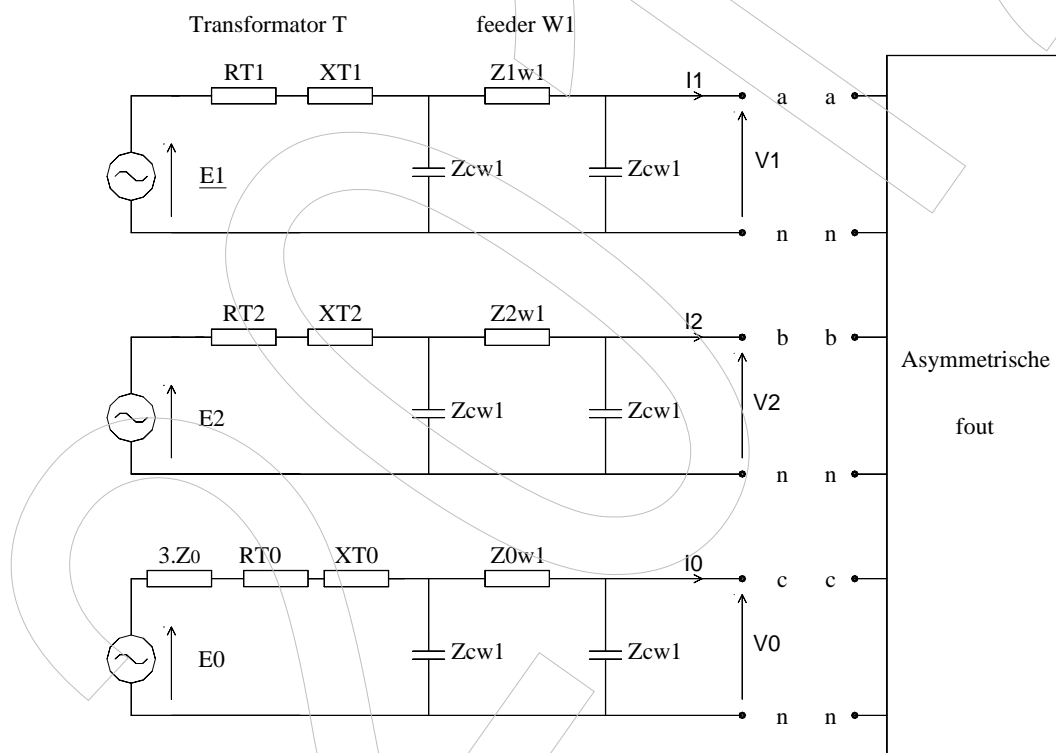
In het vervolg stellen we de koppeling tussen de homopolaire component van de spanning en de homopolaire component van de stroom voor als $Z_{0wx} = Z + 2Z_M + 3Z_N$ en de koppeling

tussen de directe en inverse component van de spanning en de directe en inverse component van de stroom voor als $Z_{1wx} = Z-ZM$.

5.1.4 Voorstelling van symmetrisch netwerk met symmetrische componenten

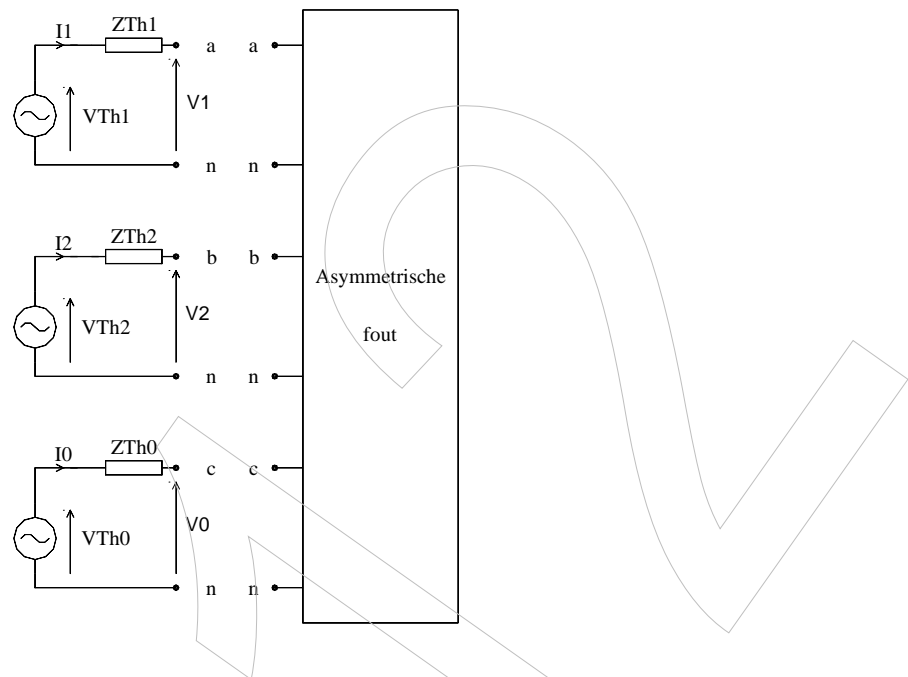
Het symmetrisch netwerk N kan met behulp van de transformatie van Fortescue ontbonden worden in drie ontkoppelde deelnetwerken: een homopolaire N0, direct N1 en invers N2 deelnetwerk. De asymmetrische last kan ook ontbonden worden, maar hier zullen in het algemeen geval wel koppelingen bestaan tussen de deelnetwerken. Deze koppelingen kunnen afgeleid worden uit de impedantiematrix $Z_{012} = T_s^{-1} Z_{ABCN} T_s$. De voorstelling van de asymmetrische fout wordt verder in detail behandeld.

Zo komt men tot de voorstelling in Figuur 5.



Figuur 5: Voorstelling van symmetrisch netwerk met symmetrische componenten.

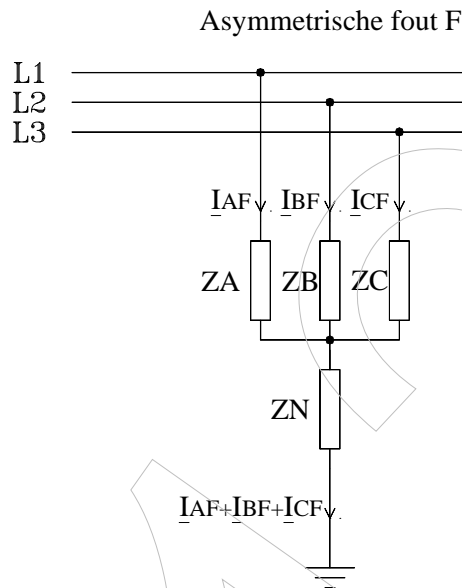
De homopolaire, directe en inverse ontkoppelde deelnetwerken kunnen vervangen worden door hun Thévenin equivalent schema zoals voorgesteld op Figuur 6.



Figuur 6: Thévenin equivalent van ontkoppelde netwerken.

5.1.5 Voorstelling van een asymmetrisch netwerk met symmetrische componenten

We passen het bovenstaande ook toe op de asymmetrische fout van een voor de rest symmetrisch netwerk. Een algemene fout met foutimpedanties wordt weergegeven in Figuur 7. De index F geeft aan dat de vergelijkingen gelden op de plaats van de fout.



Figuur 7: Asymmetrische fout.

De spanningsval in de fasen kan voorgesteld worden als:

$$\bar{V}_{AF} = \bar{Z}_A \cdot \bar{I}_{AF} + \bar{Z}_N \cdot (\bar{I}_{AF} + \bar{I}_{BF} + \bar{I}_{CF}) \tag{18}$$

$$\bar{V}_{BF} = \bar{Z}_B \cdot \bar{I}_{BF} + \bar{Z}_N \cdot (\bar{I}_{AF} + \bar{I}_{BF} + \bar{I}_{CF}) \tag{19}$$

$$\bar{V}_{CF} = \bar{Z}_C \cdot \bar{I}_{CF} + \bar{Z}_N \cdot (\bar{I}_{AF} + \bar{I}_{BF} + \bar{I}_{CF}) \tag{20}$$

In matrixnotatie kan men schrijven dat :

$$\begin{pmatrix} \bar{V}_{AF} \\ \bar{V}_{BF} \\ \bar{V}_{CF} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Z}_A + \bar{Z}_N & \bar{Z}_N & \bar{Z}_N \\ \bar{Z}_N & \bar{Z}_B + \bar{Z}_N & \bar{Z}_N \\ \bar{Z}_N & \bar{Z}_N & \bar{Z}_C + \bar{Z}_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_{AF} \\ \bar{I}_{BF} \\ \bar{I}_{CF} \end{pmatrix} \tag{21}$$

Als matrixvergelijking wordt dit:

$$\mathbf{V}_{ABCF} = \mathbf{Z}_{ABCN} \cdot \mathbf{I}_{ABCF} \tag{22}$$

De overgang van fasecomponenten naar symmetrische componenten is steeds mogelijk met behulp van de transformatie van Fortescue. De matrix is evenwel niet circulant symmetrisch. De getransformeerde matrix wordt dan een “volle” 3x3 matrix.

$$\mathbf{V}_{ABCF} = \mathbf{T}_s \mathbf{V}_{01} \tag{23}$$

$$\mathbf{I}_{ABCF} = \mathbf{T}_s \mathbf{I}_{012} \quad (24)$$

Zo bekomen we:

$$\mathbf{V}_{012} = \mathbf{Z}_{012} \cdot \mathbf{I}_{012} \quad (25)$$

$$\text{met: } \mathbf{Z}_{012} = \mathbf{T}_s^{-1} \cdot \mathbf{Z}_{ABCN} \cdot \mathbf{T}_s \quad (26)$$

5.1.6 Bepaling van de foutstromen en de fasespanningen

Op basis van Figuur 6 kunnen we de volgende matrixvergelijkingen noteren:

$$\mathbf{V}_{Th012} = (\mathbf{Z}_{Th012} + \mathbf{Z}_{012}) \cdot \mathbf{I}_{012} \quad (27)$$

$$\mathbf{I}_{012} = (\mathbf{Z}_{Th012} + \mathbf{Z}_{012})^{-1} \cdot \mathbf{V}_{Th012} \quad (28)$$

Waaruit volgt dat de foutstromen kunnen bepaald worden uit:

$$\mathbf{I}_{ABC} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{I}_{012} \quad (29)$$

Analoog geldt voor de fasespanningen tijdens de fout:

$$\mathbf{V}_{012} = \mathbf{V}_{Th012} - (\mathbf{Z}_{Th012} \cdot \mathbf{I}_{012}) \quad (30)$$

$$\mathbf{V}_{ABC} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{V}_{012} \quad (31)$$

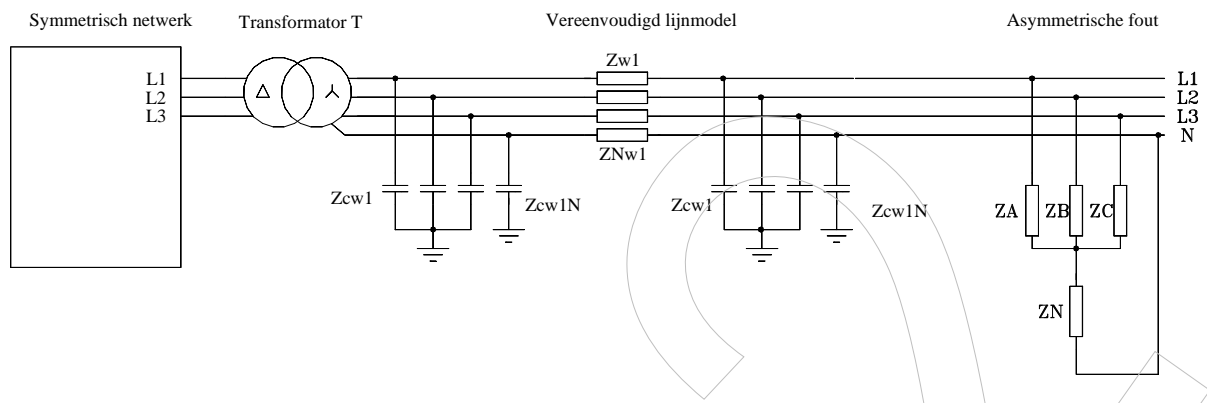
6 Afleiding van de primaire lijnstromen bij elektrische fouten aan de secundaire van een distributietransformator

6.1 Probleemstelling

Overstroombeveiligingen op laagspanningsniveau bezitten zelden een stoorschrijver en schakelen bij overstroom, afhankelijk van de grootte van de overstroom, onmiddellijk of tijdvertraagd de te beveiligen zone uit zonder enige bijkomende informatie. Daardoor wordt het voor de gebruiker of beheerder van de elektrische laagspanningsinstallatie vaak zeer moeilijk om de foutoorzaak op te sporen. Nochtans is een snelle foutidentificatie van het grootste belang bij het herconfigureren van de spanningsvoorziening van de niet getroffen energiezones of het bepalen van de te ondernemen acties om de foutoorzaak weg te nemen of te remediëren. Zo kan de onderbrekingsduur van de productieactiviteiten of de dienstverlening tot een minimum worden beperkt zodat de economische directe en indirecte gevolgen van een fout kunnen gereduceerd worden. Omdat de foutregistratie wel op het middenspanningsniveau beschikbaar is, gaan we na in welke mate het mogelijk is om op basis van de lijnstromen aan de primaire zijde van een distributietransformator te achterhalen welke fout aan secundaire zijde is opgetreden of hoe een aantal fouthypothesen kunnen ondersteund of weerlegd worden.

6.2 Ontbinding in symmetrische componenten

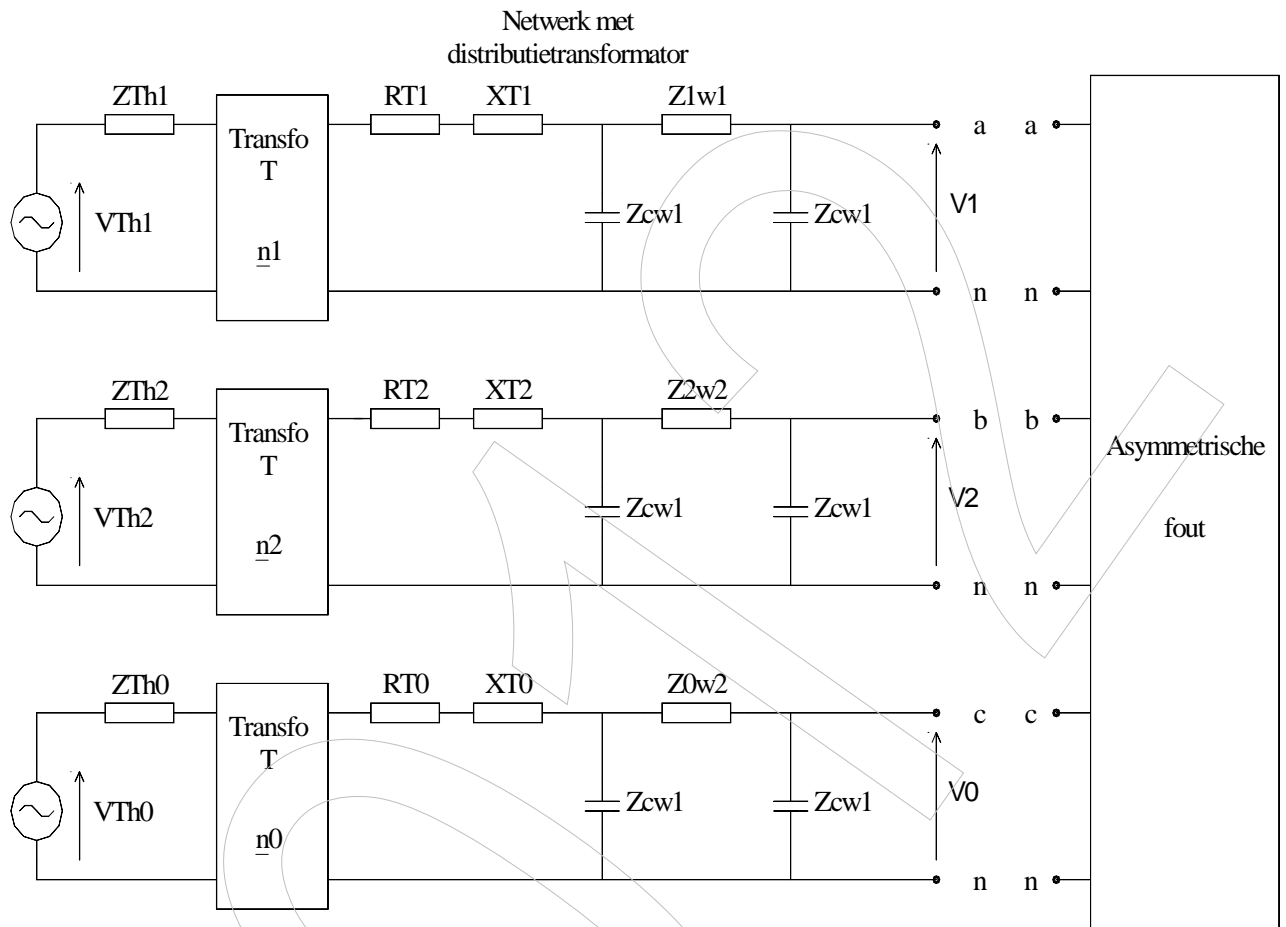
Op basis van het netwerk weergegeven in Figuur 8 wordt aangegeven hoe de primaire lijnstromen van de transformator T kunnen bepaald worden op basis van de aangelegde al dan niet symmetrische belasting of fout. Het netwerk wordt in een symmetrische deel en een asymmetrische fout opgesplitst. Het symmetrisch deel bestaat uit het bovenliggend midden- of hoogspanningsnet aan de primaire zijde, de Dyn11 distributietransformator en het laagspanningnet (vereenvoudigd lijnmodel) tot de fout of belasting. De impedanties Z_A , Z_B , Z_C en Z_N van de asymmetrische fout kunnen zo worden ingesteld dat ze een symmetrische of asymmetrische belasting of fout voorstellen.



Figuur 8: Voorstelling netwerk.

Net zoals in het vorige hoofdstuk kan overgegaan worden van fasegrootheden naar de voorstelling door symmetrische componenten.

Zo komt men tot de voorstelling in Figuur 9.



Figuur 9: Ontbinding in symmetrische componenten.

De ontbinding van de feeder W1 (vereenvoudigd lijnmodel) in drie ontkoppelde deelnetwerken werd in een vorig hoofdstuk afgeleid. Aangezien in het schema een distributietransformator voorkomt wensen we netwerkelementen (V_{Th} en Z_{Th}) aan de primaire zijde van de transformator over te brengen naar de secundaire zijde. De relatie tussen de primaire en secundaire spanning en stroom moet complex worden voorgesteld. Daarom worden die eerst afgeleid voor een Dyn11 distributietransformator.

6.3 De relatie tussen primaire en secundaire spanning

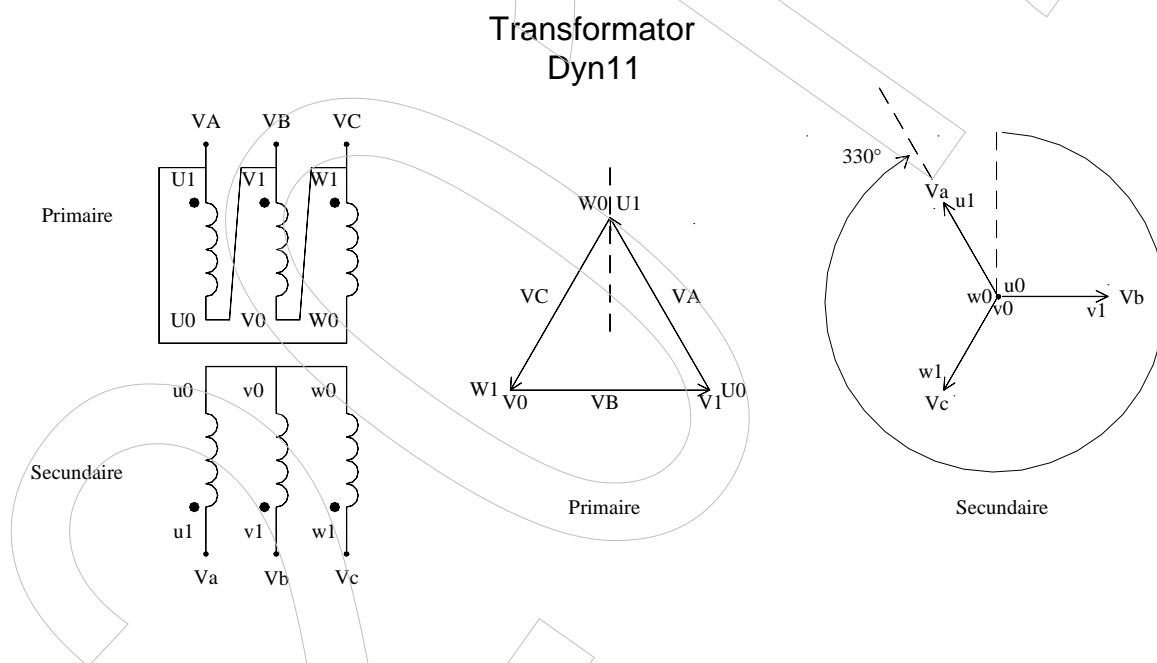
6.3.1 De windingsverhouding n_w

De windings- of wikkerverhouding wordt gedefinieerd als de verhouding van het aantal primaire windingen (n_p) tot het aantal secundaire windingen (n_s).

$$n_w = \frac{n_p}{n_s} \tag{1}$$

6.3.2 De complexe spanningstransformatie voor een Dyn11-transformator

In Figuur 10 wordt het elektrische schakelschema van de transformator opgenomen. De subscripts in hoofdletters staan voor primaire grootheden, de kleine voor secundaire waarden.



Figuur 10: Elektrisch schakelschema van een Dyn11 transformator.

De complexe transformatieverhouding is verschillend voor de directe, inverse en homopolaire spanningen. De verhouding tussen de primaire en secundaire spanningen kan weergegeven worden in matrixvorm:

$$\begin{pmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{pmatrix} = \frac{n_s}{n_p} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{pmatrix} \quad (2)$$

De matrix is circulant symmetrisch en wordt na toepassen van de transformatie van Fortescue de onderstaande diagonaalmatrix:

$$\begin{pmatrix} \bar{V}_{s0} \\ \bar{V}_{s1} \\ \bar{V}_{s2} \end{pmatrix} = \frac{n_s}{n_p} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1-a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{V}_{p0} \\ \bar{V}_{p1} \\ \bar{V}_{p2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Met $1-a^2 = \sqrt{3}e^{-j11\frac{\pi}{6}}$ en $1-a = \sqrt{3}e^{j11\frac{\pi}{6}}$ wordt dit:

$$\begin{pmatrix} \bar{V}_{s0} \\ \bar{V}_{s1} \\ \bar{V}_{s2} \end{pmatrix} = \frac{n_s \cdot \sqrt{3}}{n_p} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-j11\frac{\pi}{6}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{j11\frac{\pi}{6}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{V}_{p0} \\ \bar{V}_{p1} \\ \bar{V}_{p2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

De complexe spanningstransformatieverhoudingen zijn dus:

$$\bar{n}_{r0} = \frac{\bar{V}_{p0}}{\bar{V}_{s0}} = \infty \quad (5)$$

$$\bar{n}_{r1} = \frac{\bar{V}_{p1}}{\bar{V}_{s1}} = \frac{n_p}{n_s \sqrt{3}} e^{j11\frac{\pi}{6}} = \frac{n_w}{\sqrt{3}} e^{j11\frac{\pi}{6}} \quad (6)$$

$$\bar{n}_{r2} = \frac{\bar{V}_{p2}}{\bar{V}_{s2}} = \frac{n_p}{n_s \sqrt{3}} e^{-j11\frac{\pi}{6}} = \frac{n_w}{\sqrt{3}} e^{-j11\frac{\pi}{6}} \quad (7)$$

6.4 De complexe stroomtransformatie

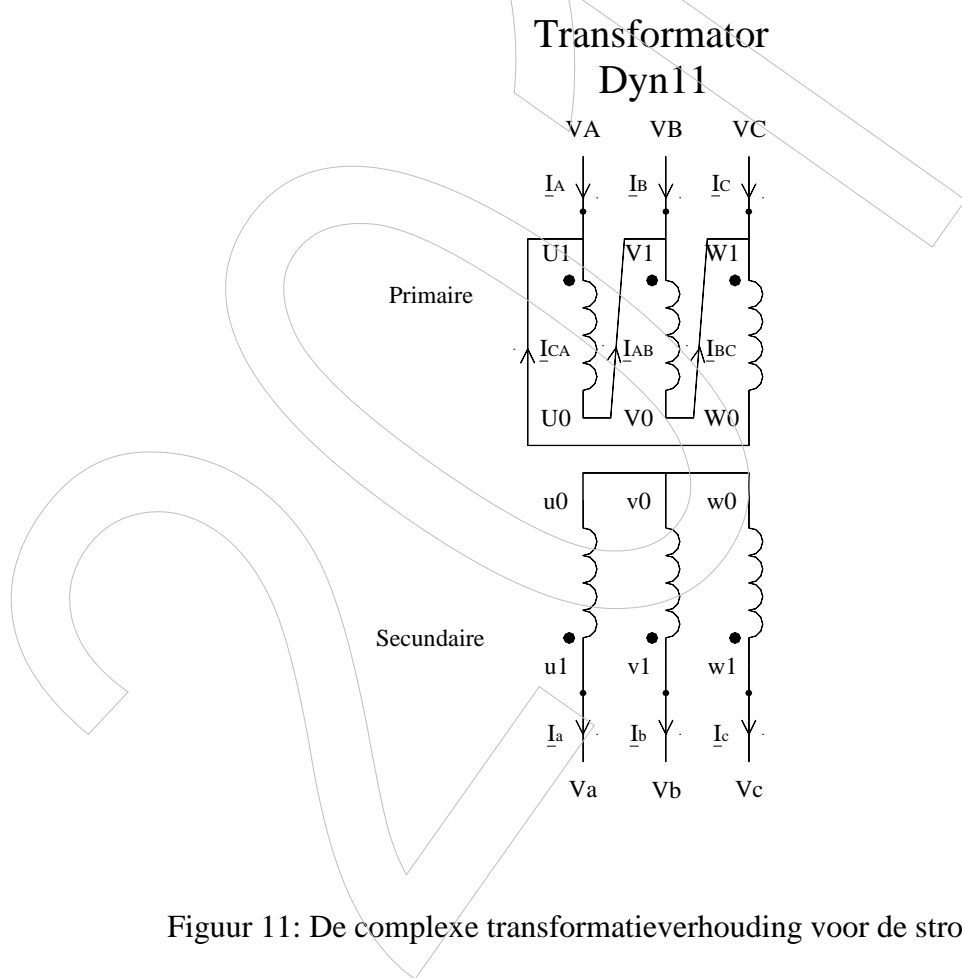
Het verband tussen de primaire en secundaire stromen kan bepaald worden aan de hand van Figuur 11.

Het verband tussen de primaire en secundaire stromen wordt weergegeven als:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{AC} = \frac{\bar{I}_a - \bar{I}_c}{n_w} \tag{8}$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB} = \frac{\bar{I}_b - \bar{I}_a}{n_w} \tag{9}$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC} = \frac{\bar{I}_c - \bar{I}_b}{n_w} \tag{10}$$



Figuur 11: De complexe transformatieverhouding voor de stromen.

In matrixvorm wordt dit:

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \end{pmatrix} = \frac{1}{n_w} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{pmatrix} \quad (11)$$

De matrix is circulant symmetrisch en levert na de transformatie van Fortescue de onderstaande diagonaalmatrix op:

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_{p0} \\ \bar{I}_{p1} \\ \bar{I}_{p2} \end{pmatrix} = \frac{1}{n_w} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-a & 0 \\ 0 & 0 & 1-a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_{s0} \\ \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{s2} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Dit kan herleid worden tot:

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_{p0} \\ \bar{I}_{p1} \\ \bar{I}_{p2} \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{n_w} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j11\frac{\pi}{6}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\frac{\pi}{6}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_{s0} \\ \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{s2} \end{pmatrix} \quad (13)$$

Zo worden de complexe transformatieverhoudingen voor de stroom van een Dyn11 transformator gelijk aan:

$$\frac{\bar{I}_{p0}}{\bar{I}_{s0}} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\bar{I}_{p1}}{\bar{I}_{s1}} = \frac{\sqrt{3}}{n_w} e^{j11\frac{\pi}{6}} \quad (15)$$

$$\frac{\bar{I}_{p2}}{\bar{I}_{s2}} = \frac{\sqrt{3}}{n_w} e^{-j11\frac{\pi}{6}} \quad (16)$$

6.5 Omzetten van de primaire grootheden naar de secundaire van de transformator

Nu kunnen de primaire netwerkelementen VTh en ZTh naar de secundaire van de transformator worden overgebracht.

Algemeen kunnen we voor een Dyn11 transformator stellen dat:

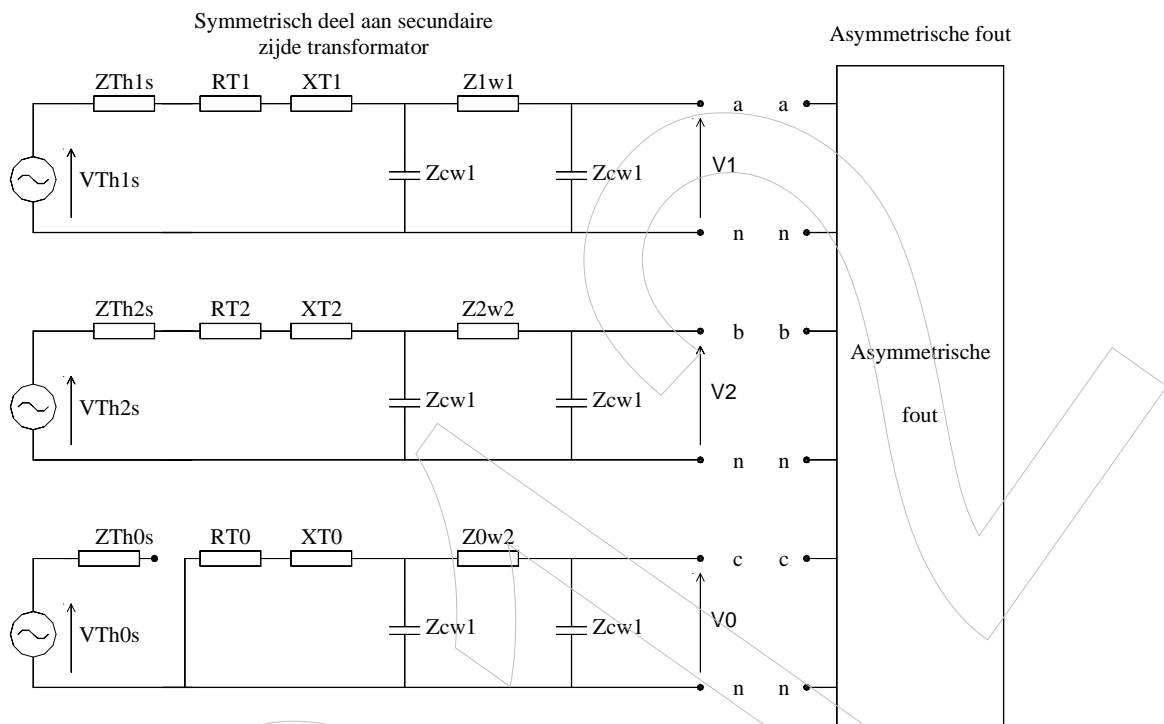
$$\bar{Z}_{p0} = \frac{\bar{V}_{p0}}{\bar{I}_{p0}} = \bar{Z}_{s0} \cdot \infty \quad (17)$$

$$\bar{Z}_{p1} = \frac{\bar{V}_{p1}}{\bar{I}_{p1}} = \frac{\bar{V}_{s1} \frac{n_p}{n_s \sqrt{3}} e^{j11\frac{\pi}{6}}}{\bar{I}_{s1} \frac{n_s \sqrt{3}}{n_p} e^{j11\frac{\pi}{6}}} = \frac{\bar{V}_{s1}}{\bar{I}_{s1}} \left(\frac{n_p}{n_s \sqrt{3}} \right)^2 e^{j0\frac{\pi}{6}} = \bar{Z}_{s1} \left(\frac{n_p}{n_s \sqrt{3}} \right)^2 = \bar{Z}_{s1} |\bar{n}_{t1}|^2 \quad (18)$$

$$\bar{Z}_{p2} = \frac{\bar{V}_{p2}}{\bar{I}_{p2}} = \frac{\bar{V}_{s2} \frac{n_p}{n_s \sqrt{3}} e^{-j11\frac{\pi}{6}}}{\bar{I}_{s2} \frac{n_s \sqrt{3}}{n_p} e^{-j11\frac{\pi}{6}}} = \frac{\bar{V}_{s2}}{\bar{I}_{s2}} \left(\frac{n_p}{n_s \sqrt{3}} \right)^2 e^{j0\frac{\pi}{6}} = \bar{Z}_{s2} \left(\frac{n_p}{n_s \sqrt{3}} \right)^2 = \bar{Z}_{s2} |\bar{n}_{t2}|^2 \quad (19)$$

waarbij de subscriptie p wijst op de primaire van de transformator en de subscriptie s op de secundaire. Na overbrenging van ZTh012 naar de secundaire kunnen ook de spanningsbronnen VTh012 naar de secundaire worden overgebracht volgens de vergelijkingen (5), (6) en (7).

Zo komen we tot Figuur 12.



Figuur 12: Omzetten van de primaire grootheden naar de secundaire van de transformator.

Van het symmetrische deel kan nu terug een Thévenin-equivalent worden bepaald. Zo komen we tot het schema uit het vorig hoofdstuk en is de verdere verwerking analoog.

6.6 Afleiding van de primaire stromen bij fouten aan de secundaire van een distributietransformator

Uit de stromen I_{s1} , I_{s2} en I_{s0} die aan secundaire van de transformator werden bepaald, kunnen de primaire lijnstromen I_{p1} , I_{p2} en I_{p0} worden afgeleid.

$$\bar{I}_{p1} = \bar{I}_{s1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{n_w} e^{j11\frac{\pi}{6}} \tag{20}$$

$$\bar{I}_{p2} = \bar{I}_{s2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{n_w} e^{-j11\frac{\pi}{6}} \tag{21}$$

$$\bar{I}_{p0} = \bar{I}_{s0} \cdot 0 \tag{22}$$

In matrixvorm kunnen we noteren dat:

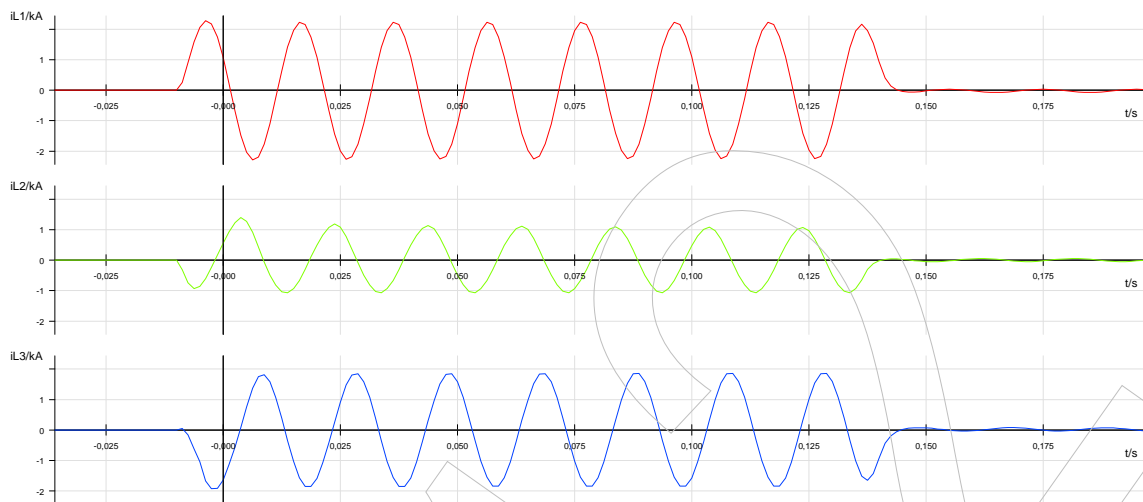
$$\bar{I}_{p012} = \begin{pmatrix} \bar{I}_{p0} \\ \bar{I}_{p1} \\ \bar{I}_{p2} \end{pmatrix} \quad (23)$$

Uiteindelijk kunnen de primaire lijnstromen IABC bij fout of asymmetrische belasting aan de secundaire worden bepaald uit:

$$\bar{I}_{ABC} = T_s \cdot \bar{I}_{012} \quad (24)$$

6.7 Toepassingsvoorbeeld met behulp van het geschaald middenspanningsnet

De oorzaak van een enkelvoudige impedantieloze fout aan de secundaire zijde van een distributietransformator kan veelal onmiddellijk afgeleid worden uit de ogenblikkelijke waarde van de primaire lijnstromen. Onder een enkelvoudige fout verstaan we bijvoorbeeld een enkelvoudige aardfout of een elektrische fout tussen twee actieve geleiders. Impedante elektrische fouten of een combinatie van al dan niet impedante fouten daarentegen zijn veel moeilijker te typeren. Als voorbeeld wordt aan de secundaire van een distributietransformator een asymmetrische fout gecreëerd met $Z_A=3\Omega$, $Z_B=1\Omega$, $Z_N=0\Omega$ en $Z_C=\infty$ (Figuur 8). De stoorschrijver aan de primaire van de distributietransformator registreert het stroombeeld uit Figuur 13. De elektrische fout wordt uitgeschakeld door de laagspanningsbeveiliging aan de secundaire van de transformator die geen stoorschrijver bezit. Het beeld uit Figuur 13 werd met behulp van de software DIGSI 4.82 gegenereerd.



Figuur 13: Foutstromen bij $Z_A=3\Omega$, $Z_B=1\Omega$ en $Z_N=0\Omega$.

Uit de ogenblikkelijke waarden van de primaire lijnstromen is het niet meer mogelijk om de foutoorzaak te achterhalen. Wel kunnen er een aantal fouthypothesen door middel van berekening worden bevestigd of weerlegd. In dit voorbeeld gaan we na in welke mate de gemeten foutstromen ook door berekening kunnen worden bepaald.

De drie lijnstromen worden in Tabel 1 als numerieke waarden weergegeven en vergeleken met de waarden berekend zoals hierboven beschreven.

Tabel 1: Vergelijking gemeten en berekende lijnstromen.

	$R_A=3\Omega$ $R_B=1\Omega$ $R_C=\infty$ $R_N=0\Omega$			
	Measuring Signal Q4		Maple Signal Q4	
	Value(A)	Phase	Value(A)	Phase
IL1	1590	0	1669	-29
IL2	760	-124	789	-155
IL3	1320	152	1372	123

De berekende waarden via Maple (Maple Signal Q4) blijken tot 5% groter te zijn dan de gemeten waarden. We kunnen opmerken dat in de berekeningen de impedanties van alle aansluitingen, kabelovergangen, vermogenschakelaars, lastscheiders, barenstellen en stroomtransformatoren werden verwaarloosd. Dit kan het verschil tussen de gemeten en berekende waarden verklaren.

Daarom voeren we de vergelijking beter door via genormaliseerde waarden en drukken we de faseverschuiving tussen de lijnstromen uit in absolute waarden.

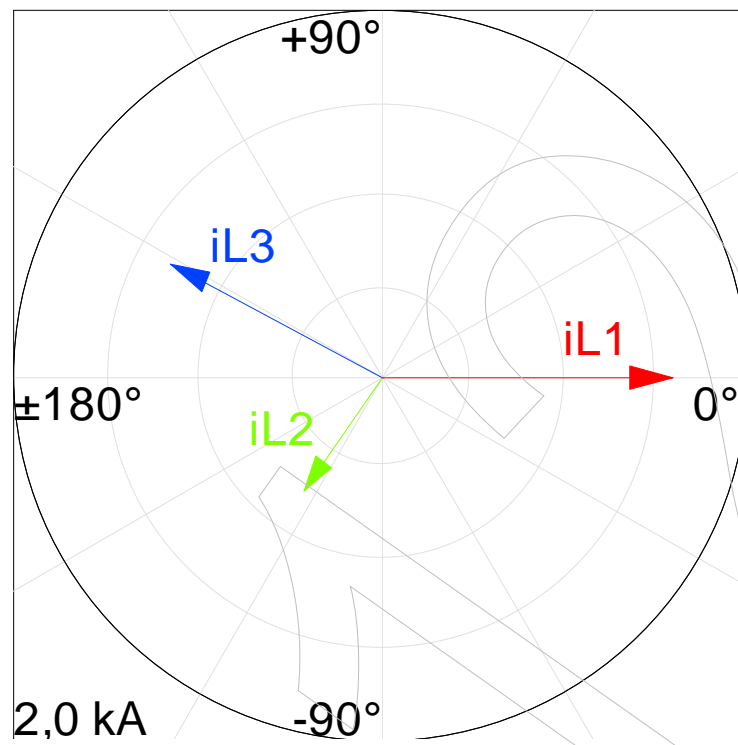
$$I_{Lnorm} = \frac{I_{L1}}{\sqrt{(I_{L1})^2 + (I_{L2})^2 + (I_{L3})^2}} \tag{25}$$

Onder H_{ij} verstaan we de absolute waarde van de hoek tussen de fasor i en j. Zo bekomen we Tabel 2.

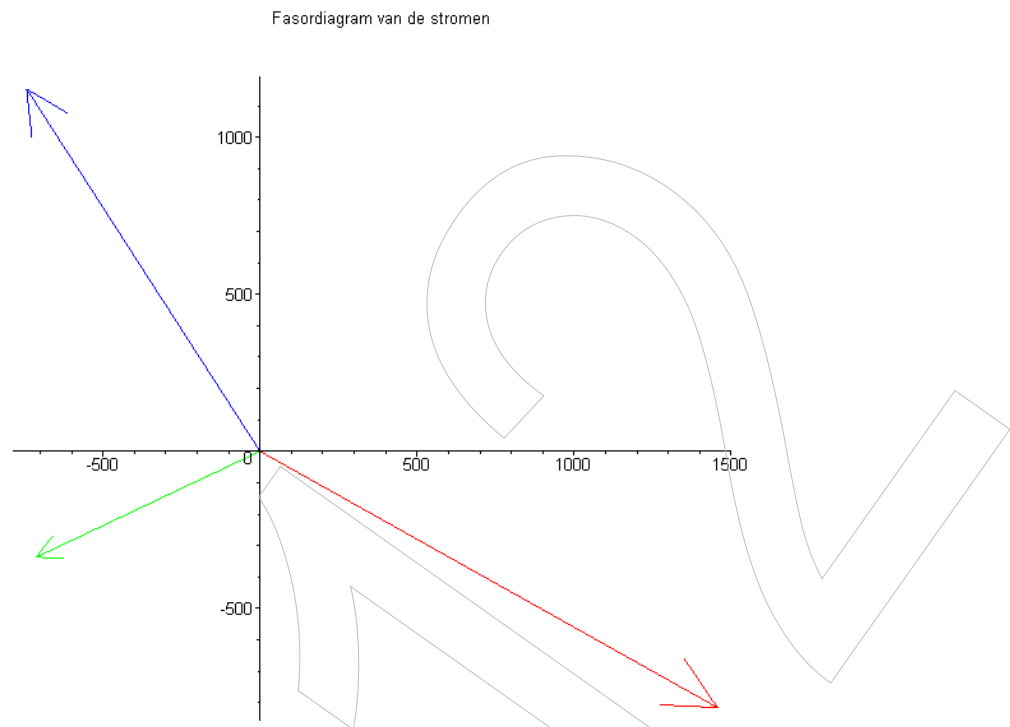
Tabel 2: Genormaliseerde waarden van de berekende en gemeten lijnstromen.

	I_{L1norm}	I_{L2norm}	I_{L3norm}	H12	H23	H31
Gemeten	0,722	0,345	0,599	124	152	84
Berekend	0,726	0,343	0,596	126	152	82

De niet genormaliseerde waarden worden ter ondersteuning ook in een fasordiagramma voorgesteld in de figuren 14 en 15. Figuur 14 geeft de voorstelling van de gemeten waarden en Figuur 15 van de berekende lijnstromen.



Figuur 14: Voorstelling van de gemeten lijnstromen d.m.v. DIGSI 4.82.



Figuur 15: Fasordiagramma van de berekende lijnstromen d.m.v. MAPLE.

Hieruit mogen we besluiten dat het mogelijk is om een fourthypothese geformuleerd op basis van de gemeten lijnstromen aan de primaire van een distributietransformator bij fouten aan de secundaire door berekening te bevestigen of te weerleggen.

7 Inhoudsopgave.

1	In een eerste meting gaan we na of de homopolaire component van de stroom al dan niet buiten de beschouwde distributietransformator kan bestaan.....	1
1.1	Bij een Yyn transformator met niet gearde primaire wordt, indien er homopolaire stromen aanwezig zijn in de secundaire, de homopolaire component niet doorgegeven aan de primaire. Aan de hand van onderstaande opstelling kan die bewering worden bevestigd of weerlegd.	1
1.2	Bij een Dyn transformator wordt, indien er homopolaire stromen aanwezig zijn in de secundaire, de homopolaire component niet doorgegeven aan de primaire. Aan de hand van onderstaande opstelling kan die bewering worden bevestigd of weerlegd.	2
1.3	Problemen en taken	3
2	Maximale asymmetrische belasting van transformatoren.	4
2.1	Yyn – opstelling.....	4
2.1.1	Spanningsvariatie bij onevenwichtige belasting	4
2.1.2	Berekening van de primaire lijnstromen bij maximale asymmetrische belasting.	5
2.2	Dyn – opstelling.....	7
2.2.1	Spanningsvariatie bij onevenwichtige belasting	7
2.3	Yzn – opstelling.....	9
2.3.1	Spanningsvariatie bij onevenwichtige belasting	9
2.3.2	Berekening van de primaire lijnstromen bij maximale asymmetrische belasting.	9
3	Onderlinge vergelijking van de drie transfo-configuraties.....	10
4	Onevenwichtige belasting van een distributietransformator.....	10
5	BIJLAGE Distributietransformatoren.....	11
5.1	Berekening van foutstromen.....	11
5.1.1	Inleiding	11
5.1.2	Voorstelling van een symmetrisch en een asymmetrisch netwerk met behulp van symmetrische componenten	12
5.1.3	Vereenvoudigd lijnmodel	12
5.1.4	Voorstelling van symmetrisch netwerk met symmetrische componenten	16

5.1.5	Voorstelling van een asymmetrisch netwerk met symmetrische componenten	17
5.1.6	Bepaling van de foutstromen en de fasespanningen	19
6	Afleiding van de primaire lijnstromen bij elektrische fouten aan de secundaire van een distributietransformator	20
6.1	Probleemstelling.....	20
6.2	Ontbinding in symmetrische componenten.....	20
6.3	De relatie tussen primaire en secundaire spanning	23
6.3.1	De windingsverhouding n_w	23
6.3.2	De complexe spanningstransformatie voor een Dyn11-transformator	23
6.4	De complexe stroomtransformatie	24
6.5	Omzetten van de primaire grootheden naar de secundaire van de transformator	26
6.6	Afleiding van de primaire stromen bij fouten aan de secundaire van een distributietransformator.....	28
6.7	Toepassingsvoorbeeld met behulp van het geschaald middenspanningsnet.....	29
7	Inhoudsopgave.	34