

Inhoudsopgave Transformatoren

1. INLEIDING	1
2. EENFASIGE TRANSFORMATOREN	2
2.1 transformator bij nullast	3
2.2 transformator bij belasting	7
2.3 rendement van een transformator	11
2.4 equivalente keten voor een transformator	14
2.5 uitwendige karakteristiek van een transfo	24
3. DRIEFASIGE TRANSFORMATOREN	26
3.1 Inleiding	26
3.2 Schakelingen van driefasige transformatoren	26
4. SPECIALE TRANSFORMATOREN	30
4.1 De spaartransfo of autotransfo	30
4.2 Lastransfo	32
4.3 Meettransformatoren	33
4.4 Inductieregelaars	37
4.5 De veiligheidstransfo	37
4.6 Speelgoedtransfo	37
4.7 De Spaarlektransformator	38
4.8 De Scott-transformator	38
5. CONSTRUCTIE VAN TRANSFORMATOREN	39
5.1 de magnetische keten	39
5.2 wikkelingen	40
5.3 isolatie en afkoeling	40
6. BEVEILIGING VAN TRANSFORMATOREN	41
6.1 Beveiliging tegen kortsluiting en overbelasting	41
6.2 Voorbeeld	45
7. PARALLEL SCHAKELEN VAN TRANSFORMATOREN	47
7.1 voorwaarden voor parallel schakelen	47
7.2 voorbeeld	49
8. OEFENINGEN	50
9. BIBLIOGRAFIE	54

Transformatoren

1. Inleiding

Een transformator is een statisch toestel dat dient om elektrische wisselstroomenergie met een gegeven spanningswaarde (stroomwaarde) om te zetten in een elektrische wisselstroomenergie met een andere spanningswaarde (stroomwaarde) met gelijk blijvende frequentie.

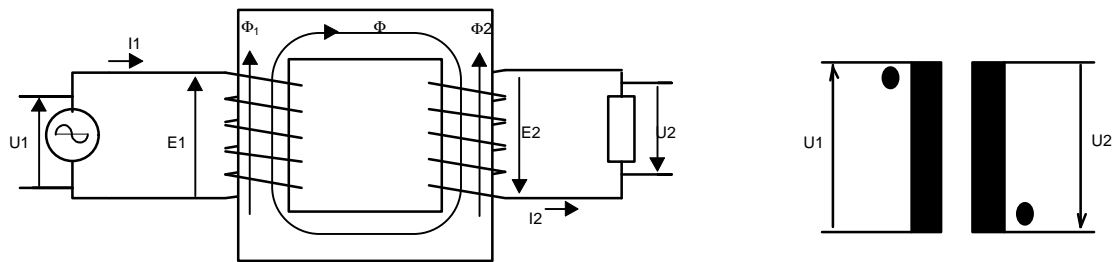
Het nut van deze transformatoren blijkt vooral bij energietransport via elektrische leidingen : wil men grote elektrische vermogens transporteren, dan moet dit omwille van minimalisering van spannings- en vermogenverliezen gebeuren bij zeer hoge spanningen (tot 380kV). In de generatoren van elektrische centrales kan men rechtstreeks geen willekeurig hoge spanningen genereren. Via transformatoren kan men deze spanningen opdrijven voor optimaal energietransport, terwijl aan de verbruikerszijde deze spanningen weer omlaaggetransformeerd moeten worden.

2. Eenfasige transformatoren

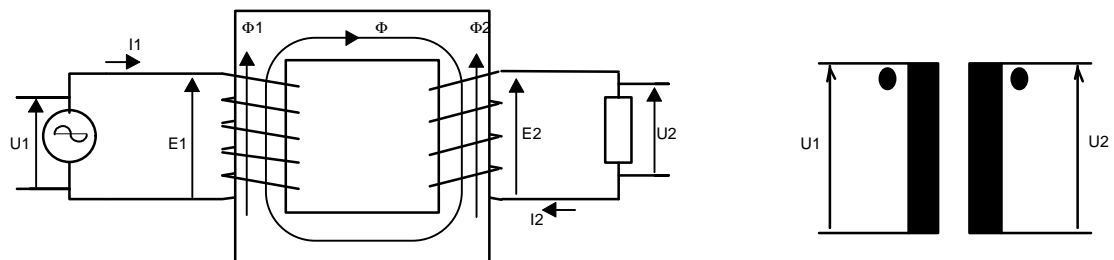
In zijn eenvoudigste vorm omvat de transformator een magnetische keten uit blikplaten zonder noemenswaardige luchtspleet.

De wikkeling waar elektrische energie wordt toegevoegd noemt men de primaire wikkeling. Op deze wikkeling sluiten we een spanning U_1 aan, het aantal windingen van deze spoel noemen we N_1 .

Door de spanning U_1 ontstaat er een wisselflux in de magnetische keten, en ontstaat er aan de secundaire wikkeling (met aantal windingen N_2) een spanning U_2 , met dezelfde frequentie als de aangelegde. Op deze spanning U_2 wordt een gebruiker aangesloten.



Figuur A eenfasige transformator -gelijke wikkelzin-

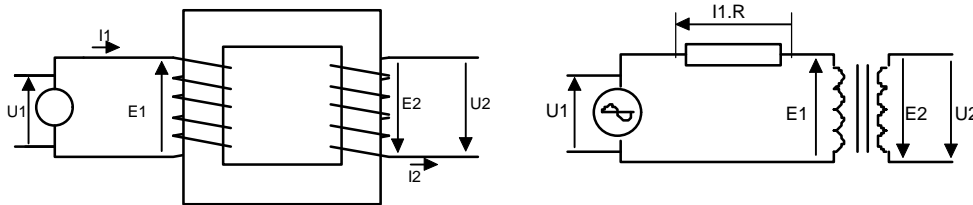


Figuur B Eenfasige transformator -ongelijke wikkelzin-

2.1 transformator bij nullast

2.1.1 nullastspanning en flux

Bij nullast herleidt de transformator zich tot een smoorspoel op wisselspanning aangesloten.



Figuur C transformator bij nullast

$$\vec{u}_1 = \vec{e}_1 + R_1 \cdot \vec{i}_1$$
$$\vec{u}_1 \approx \vec{e}_1 = N_1 \frac{d\vec{\Phi}}{dt}$$
$$U_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$E_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

De spanningsvergelijking wordt dan :

indien R_1 zeer klein is

In de open secundaire winding wordt een spanning geïnduceerd :

Uit de twee voorgaande formules kunnen we berekenen dat :

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 \frac{d\Phi}{dt}}{N_2 \frac{d\Phi}{dt}}$$

waarin :

U_1 = de aangelegde primaire spanning

E_1 = in de primaire spoel opgewekte zelfinductiespanning (tegen-emk)

E_2 = in de secundaire spoel opgewekte inductiespanning

en waarbij de ohmse weerstand in de primaire spoel verwaarloosd wordt.

zodat men algemeen kan stellen :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

In deze formule mag indien we de ohmse weerstand van de primaire spoel verwaarlozen E door U vervangen worden.

De factor k wordt de transformatieverhouding genoemd.

Door integratie van $U_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ kunnen we berekenen dat we uitgaande van een sinusoidale ingangsspanning ook een sinusoidale flux bekomen (naijlend op de spanning U_1). Tevens vinden we een verband tussen e.m.k. E_1 en de grootte van de flux in de magnetische keten.

$$\Phi = \frac{1}{N_1} \int E_{1\max} \sin \omega t \, dt$$

$$\Phi = -\frac{E_{1\max}}{N_1 \omega} \cdot \cos \omega t = \frac{E_{1\max}}{N_1 \omega} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

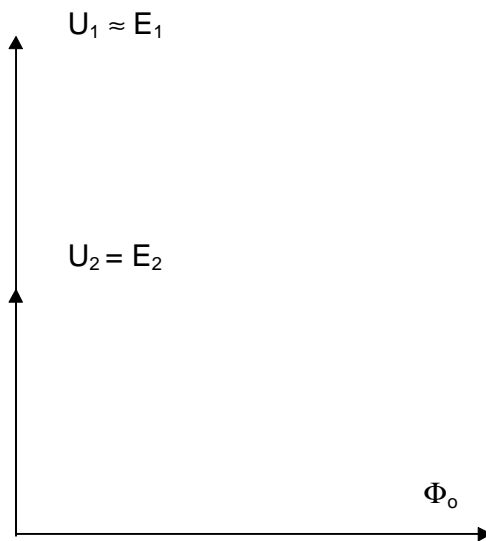
$$\Phi = \Phi_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$E_{1\max} = N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_{\max}$$

$$E_{1\text{eff}} = \frac{2pf}{\sqrt{2}} \cdot N_1 \cdot \Phi_{\max} = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi_{\max}$$

Uit het verband tussen E en ϕ volgt dat zo lang de aangelegde spanning (en dus in principe ook de e.m.k E_1) constant is, de hoofdflux niet kan variëren.

Uit het voorgaande kunnen we het volgende vectordiagram opbouwen :



Figuur D Vectordiagram flux en spanningen ideale transformator

Voorbeeld : een transformator met een kern van 3x3cm (zie toestel in labo)

$B=1,2T$ (de kern is vrijwel in verzadiging)

$N_1 = 1000$; 50Hz wisselspanning

$U=4,44.N_1.f.\Phi = 4,44.N_1.f.B.A = 4,44.50Hz.1,2T.9.10^{-4}m^2$

$U=200V$

2.1.2 nullaststroom

Om de flux, die de emk E tot gevolg heeft, op te wekken moet een magnetiserende stroom I_m vloeien. Deze stroom kunnen we bepalen uit :

$$\Phi_{eff} = \frac{N_1 \cdot I_m}{R_m}$$

$$I_m = \frac{\Phi_{eff} \cdot R_m}{N_1}$$

Hierin is R_m de magnetische weerstand van de spoelkern, I_m is de effectieve magnetiseringsstroom. Indien er geen luchtspleet aanwezig is, kunnen we stellen dat R_m klein is, zodat ook I_m klein is.

Deze magnetiseringsstroom is 90° na-ijlend op de aangelegde spanning (U_1). Het opgenomen actief vermogen voor een transformator waarin alleen I_m vloeit is dus nul. Immers : $P=U \cdot I \cdot \cos\phi$ met $\cos 90^\circ=0$.

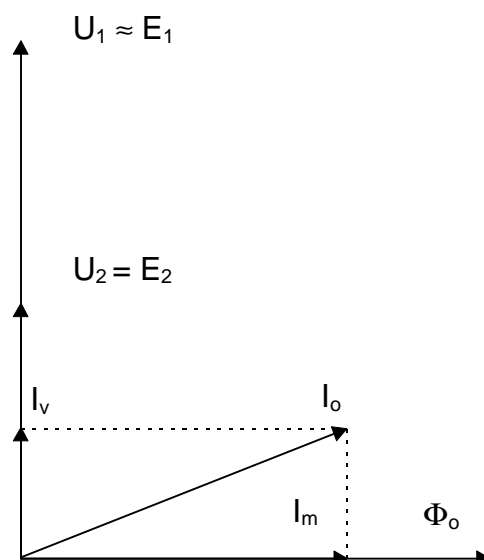
Bij reële transformatoren zal er toch een verliesstroom (in fase met U_1) vloeien ten gevolge van hysteresis- en wervelstroomverliezen en ohmse weerstand van de spoel.

Deze verliesstroom kunnen we bepalen uit :

$$I_v = \frac{P}{E_1}$$

De totale stroom bij nullast is dus zoals ook blijkt in het vectordiagram :

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_m + \vec{I}_v$$



Figuur E vectordiagram transformator bij nullast

2.1.3 voorbeeld

De kern van een transformator voor 6000V/220V 50Hz heeft een doorsnede van 160cm^2 met een vulfactor van 92%. De maximale inductie bij nullast is $1,4\text{ Wb/m}^2$.

Bepaal het aantal windingen van primaire en secundaire, alsook de transformatieverhouding.

oplossing :

$$\Phi_{\max} = B_{\max} \cdot A = 1,4 \cdot 0,92 \cdot 160 \cdot 10^{-4} = 0,02061\text{Wb}$$

$$E_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi_{\max} \quad E_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi_{\max}$$

$$N_1 = \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{\max}} = \frac{6000}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,02061} = 1312 \text{ windingen}$$

$$N_2 = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{\max}} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,02061} = 48 \text{ windingen}$$

$$\text{transformatieverhouding } k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{6000}{220} = \frac{1312}{48} = 27,33$$

2.2 transformator bij belasting

2.2.1 Vectordiagram van de ideale transformator bij belasting

Indien op de secundaire spoel een belasting aangesloten wordt, dan vloeit een stroom I_2 in deze kring. Deze stroom zal de bestaande (primaire) flux (zijn ontstaansoorzaak) tegenwerken. De grootte van de secundaire flux ϕ_2 kunnen we berekenen uit : $\phi_2 = N_2 \cdot I_2 / R_m$.

Nochtans hebben we eerder berekend dat de totale flux in de magnetische kring onveranderd blijft zolang de aangelegde spanning en de frequentie niet verandert.

$$\text{(omdat } E_{1\text{eff}} = \frac{2pf}{\sqrt{2}} \cdot N_1 \cdot \Phi_{\max} = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi_{\max} \text{)}$$

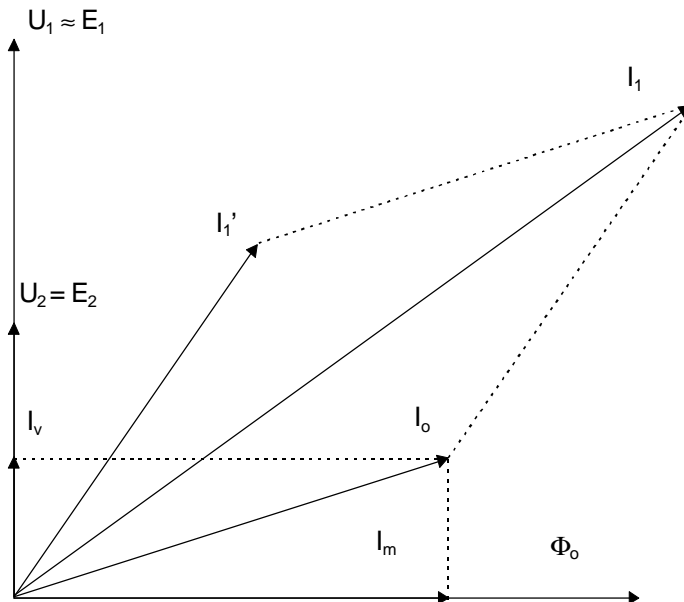
Er moet dus in de primaire kring een extra stroom I_1' ontstaan die de flux ϕ_2 compenseert.

$$N_1 \cdot I_1' = N_2 \cdot I_2$$

$$I_1' = I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1}$$

$$I_1' = \frac{I_2}{k}$$

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_1' + \vec{I}_m + \vec{I}_v$$



Figuur F vectordiagram transformator bij nullast

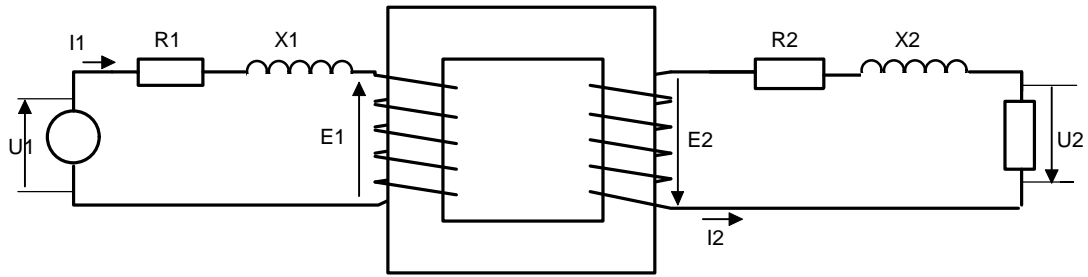
2.2.2 vectordiagram van de niet-ideale transformator bij belasting

In de voorgaande berekeningen hebben we de ohmse weerstand van de primaire en secundaire windingen steeds verwaarloosd. Ook de in de magnetische keten optredende lekfluxen en ijzerverliezen werden tot nu toe niet in rekening gebracht.

De ohmse spanningsvallen $R_1 \cdot I_1$ en $R_2 \cdot I_2$ zijn in fase met de resp. stromen I_1 en I_2 .

De lekfluxen veroorzaken inductieve spanningsvallen die 90° voorijlen op I_1 of I_2 .

De ohmse spanningsvallen kunnen we in een equivalent schema voorstellen als weerstanden, de invloed van de lekfluxen als spoelen. Zo bekomen we het equivalente schema :

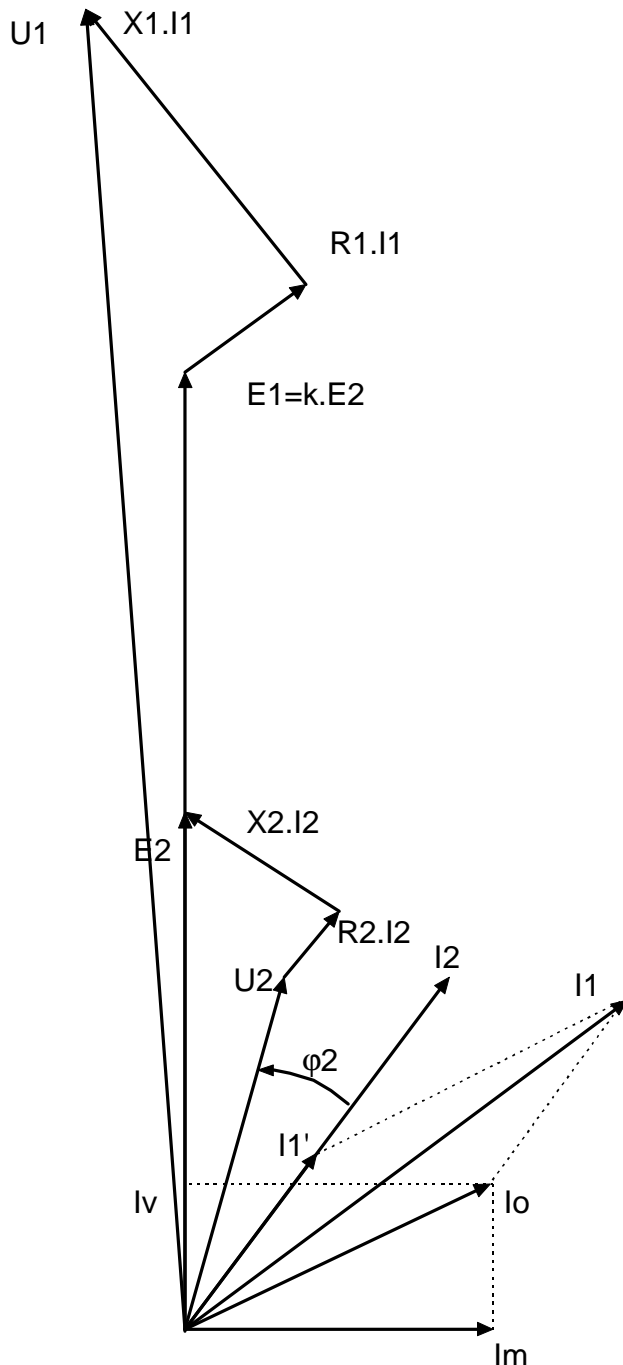


Figuur G basis-equivalent schema transformator

Uitgaande van dit vervolledigd schema kunnen we een bijhorend vectordiagram uitzetten. Omdat de primaire stroom afhangt van de secundaire belasting en de secundaire spanning, zullen we bij het opstellen van het vectordiagram steeds beginnen met de secundaire grootheden.

Hierbij veronderstellen we een bepaalde grootte voor de secundaire spanning, en zoeken van hieruit alle primaire grootheden. Nadien passen we de schaal van het vectordiagram aan aan de grootte van de primaire spanning.

De volledige werkwijze wordt doorlopen a.d.h.v. het volgende voorbeeld, waarin we te maken hebben met een transfo met transformatieverhouding $k=2$. I_2 en U_2 zijn gegeven (inductieve belasting). De wikkelzin van de windingen is zoals aangegeven in figuur a **eenfasige transformator -gelijke wikkelzin-**.



Figuur H vectordiagram niet-ideale transfo

werkwijze :

- teken U_2 en I_2 met bijbehorende faseverschuiving φ_2 .
- bereken en teken $R_2 \cdot I_2$ (in fase met I_2) en $X_2 \cdot I_2$ (90° voorrijlend op I_2)
- teken E_2 uitgaande van : $\vec{E}_2 = \vec{U}_2 + R_2 \cdot \vec{I}_2 + X_2 \cdot \vec{I}_2 A$
- teken $E_1 = k \cdot E_2$. Houd rekening met de wikkelzin (E_1 in fase of in tegenfase met E_2)
- teken de nullaststroom $\vec{I}_0 = \vec{I}_m + \vec{I}_v A$ uitgaande van de berekende waarde voor I_v en I_m (zie 2.1.2)
- teken de primaire belastingsstroom $\vec{I}_1' = \frac{\vec{I}_2}{k} A$
- teken $\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + \vec{I}_1' A$ en bereken van hieruit $R_1 \cdot I_1$ (in fase) en $X_1 \cdot I_1$ (90° voorrijlend)
- teken $\vec{U}_1 = \vec{E}_1 + R_1 \cdot \vec{I}_1 + X_1 \cdot \vec{I}_1 A$

De gevonden waarde van U_1 zal niet overeenkomen met de aangelegde primaire spanning.

De schaal van de figuur kan echter aangepast worden, waarna de grootte van U_2 kan afgelezen worden.

Op analoge manier kunnen spanningen en stromen in de transformator berekend worden met een ohmse of een capacatieve belasting.

besluit :

Vanwege de ohmse weerstanden, maar vooral door lekfluxen daalt de secundaire spanning van de transformator naarmate de secundaire stroom toeneemt. Immers : I_2 veroorzaakt een spanningsval over R_2 en over X_2 , maar heeft tegelijk ook invloed ($I_1' = I_2/k$) op de spanningsvallen over R_1 en X_1 .

Voor een gewone transfo, en zeker voor een distributietransfo, is deze spanningsdaling niet gewenst. Er moet dus naar gestreefd worden de lekflux te minimaliseren. Dit kan constructief bijvoorbeeld door primaire en secundaire windingen als coaxiale spoelen uit te voeren in een manteltransfo.

In sommige gevallen (o.a. bij lastransfo's en bij gasontladings-verlichtingsbuizen) is het echter zeer nuttig een grote lekreactantie te hebben. Voor een goede werking en voor het beperken van kortsluitstromen is de optredende sterke spanningsdaling noodzakelijk.

2.3 rendement van een transformator

2.3.1 rendement

Het rendement van een transfo kan berekend worden uit :

$$h = \frac{P_n}{P_t} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \mathbf{j}_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \mathbf{j}_2 + U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \mathbf{j}_0 + I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2}$$

Het rendement van grote transformatoren bij vollast is zeer groot (98 á 99 %). Het gemiddelde rendement is echter kleiner omdat de transfo niet steeds bij vollast werkt. Bij kleinere belastingen blijven de nullastverliezen immers aanwezig, terwijl het nuttig vermogen verkleint.

Het is dit gemiddeld rendement dat belangrijk is, omdat de transfo (zelfs bij nullast) vrijwel continu ingeschakeld blijft.

Er kan bewezen worden dat het rendement maximaal is als de ijzerverliezen even groot zijn als de jouleverliezen.

$$h = \textit{maximaal} \quad \Leftrightarrow \quad P_{FE} = P_J$$

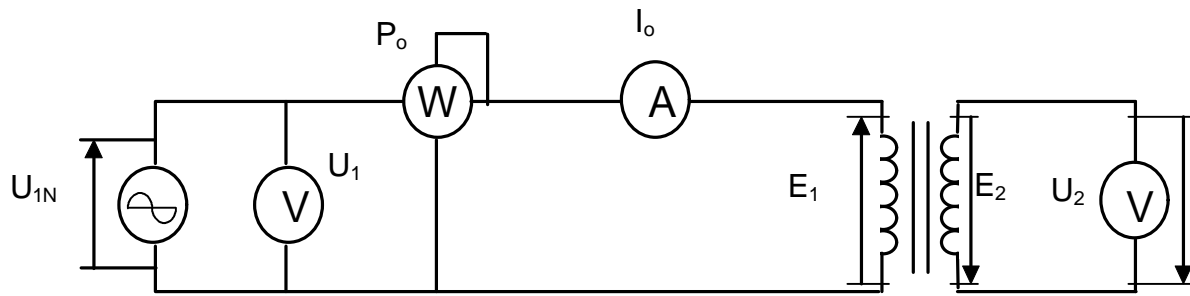
Uitgaande van de volgende metingen zullen we de ijzerverliezen en de jouleverliezen van de transfo bepalen. Hieruit kunnen we dan bij de belaste transfo het rendement bepalen.

2.3.2 gemiddeld rendement

Vermits distributietransfo's niet altijd bij vollast werken, zal het rendement mee veranderen. Daar deze transfo's nooit van het net afgeschakeld worden bepaalt men het gemiddeld rendement over 24 uur m.b.v. de opgenomen en afgeleverde **energie**.

$$h_{gem} = \frac{W_n}{W_t} = \frac{W_n}{W_n + W_{verlies}} = \frac{U_2 I_2 \cos \mathbf{j}_2 \cdot t}{U_2 I_2 \cos \mathbf{j}_2 \cdot t + P_J \cdot t + P_{FE} \cdot 24h}$$

2.3.3 bepalen van de ijzerverliezen -nullastproef-



Figuur I nullastproef : bepalen van ijzerverliezen

Bij de nullastproef wordt de secundaire van de transfo niet belast. De primaire wordt op de nominale spanning aangesloten.

Deze nullastverliezen kunnen we vertrekkend van bovenstaand meetschema berekenen : De Watt-meter duidt het volgende vermogen aan :

$$P_o = P_{FE} + I_o^2 \cdot R_l + I_o^2 \cdot R_a + \frac{U_1^2}{R_w}$$

Door de ampèremeter tijdelijk kort te sluiten kan de term $I_o^2 \cdot R_a$ G geëlimineerd worden, terwijl $R_l \cdot I_o^2 + \frac{U_1^2}{R_w}$ H kan berekend worden. De ijzerverliezen kunnen dus uit de metingen berekend worden.

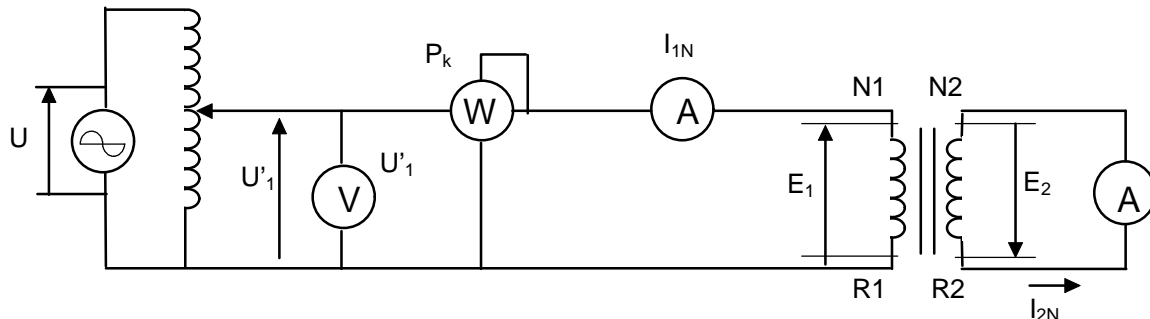
We weten vanuit het hoofdstuk magnetisme dat deze ijzerverliezen afhankelijk zijn van de flux in de keten en van de aangelegde frequentie. We constateerden eerder ook dat als de frequentie en de aangelegde primaire spanning constant blijven, ook de flux in de keten constant blijft, zelfs bij wisselende secundaire belasting. Hieruit volgt dat de bij nullast gemeten ijzerverliezen ook gelden bij elke andere belasting van de transfo.

opmerkingen :

- door de proef met verschillende spanningen uit te voeren krijgt men een idee van de verzadigingsgraad van de transfo.
- De nullastproef wordt best uitgevoerd met als primaire de laagspanningszijde. Aan de hoogspanningszijde kan de spanning zeer groot zijn bij een zeer lage stroom. Dit heeft een nadelig gevolg op nauwkeurigheid v.d. metingen.

2.3.4 bepalen van de jouleverliezen -kortsluitproef-

Bij de kortsluitproef sluit men de primaire aan op een regelbare wisselspanning terwijl men de secundaire spoel kortsluit. De primaire spanning wordt nu (met een rheotor) geregeld tot in de spoelen van de transfo de **nominale stroom** vloeit.



Figuur J kortsluitproef : bepalen van jouleverliezen

$$P_k = P_{FE} + I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_1^2 \cdot R_a + \frac{U_1'^2}{R_w}$$

De ijzerverliezen zijn hierin te verwaarlozen, omdat ze evenredig zijn met het kwadraat van de aangelegde spanning (zie hoofdstuk magnetisme), die hier zeer klein zal zijn t.o.v. de nominale spanning.

De Jouleverliezen in Ampère- en Watt-meter kunnen berekend worden, zodat de Jouleverliezen in de transfo bepaald zijn uit bovenstaande metingen.

De kortsluitspanning U_k wordt gedefinieerd als de verhouding van de in de kortsluitproef aangelegde primaire spanning en de nominale primaire spanning.

$$U_k = \frac{U_1'}{U_{IN}} \cdot 100\%$$

De kortsluitspanning is dus een percentage van de nominale spanning.

Voor een voedingstransformator moet deze waarde zo laag mogelijk zijn. Een kleine kortsluitspanning duidt immers op weinig jouleverliezen en een kleine inwendige weerstand (kleine spanningsval bij belasting)

Speciale transfo's, zoals lastransfo's, moeten een grote kortsluitspanning hebben omdat een stroomtoename een grote spanningsdaling tot gevolg moet hebben.

opmerkingen:

- De kortsluitproef wordt best uitgevoerd met kortgesloten laagspanningszijde. Andersom zou bij een kleine spanningsvariatie de stroom in de kortgesloten hoogspanningszijde sterk variëren.

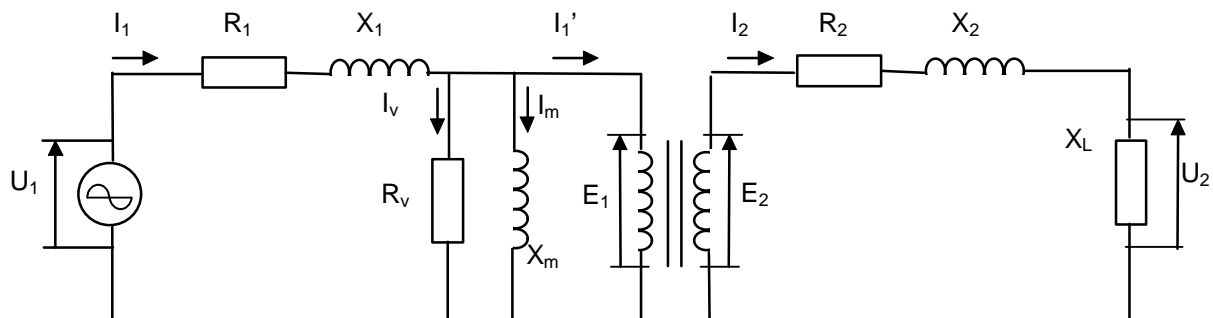
2.4 equivalente keten voor een transformator

2.4.1 equivalente keten

Het equivalente schema is een handig hulp (reken) middel bij het oplossen van vraagstukken i.v.m. transfo-belastingen en om het gedrag van een transformator te voorspellen bij een bepaalde belasting.

Het laat toe het spanningsverlies van de transfo te bepalen zonder de transfo werkelijk te belasten.

Uit de eerder besproken afleidingen en eigenschappen van de transformator komen we tot het volgende equivalente schema :



Figuur K basis-equivalent schema transformator

We verklaren de onderdelen in dit schema nader :

2.4.1.1 De Jouleverliezen : ohmse weerstanden R_1 en R_2

De ohmse weerstand van de primaire en secundaire spoel geeft aanleiding tot de jouleverliezen of een inwendig spanningsverlies in de primaire en secundaire winding. Dit wordt voorgesteld door R_1 en R_2 in serie met de hoofdwikkelingen N_1 en N_2 van de ideale transfo te plaatsen.

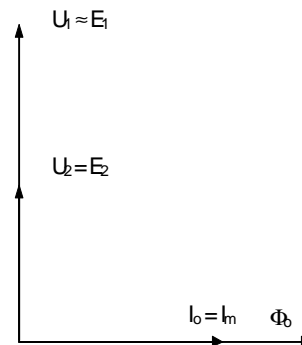
2.4.1.2 De magnetiseringsstroom I_m

Als men een wisselspanning U_1 aan de primaire spoel legt, zal er ten gevolge van de magnetiserende stroom I_m een wisselflux ϕ ontstaan.

Deze flux en de magnetiserende stroom ijlen zoals eerder bepaald werd 90° na op de aangelegde spanning U_1 . We kunnen in de primaire kring dus een spoel X_m veronderstellen waardoor de stroom I_m vloeit.

De wisselflux zal in de primaire een tegen-emk van zelfinductie $E_1 = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$ A induceren.

In de secundaire spoel zal deze wisselflux een inductiespanning E_2 opwekken, en dat in de verhouding :



Figuur L

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

(indien we veronderstellen dat er geen lekflux is, dus als de beide spoelen de fluxwisselingen volledig omvatten.)

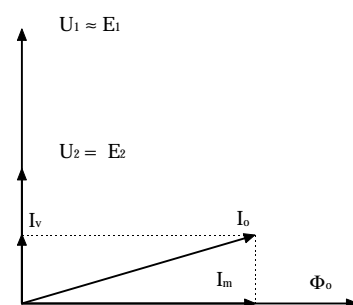
2.4.1.3 De ijzerverliezen : weerstand R_v

Een gedeelte van het toegevoerde vermogen gaat door de gevolgen van wervelstromen en hysteresisverliezen naar de opwarming van het kernmateriaal.

Dit warmteverlies kunnen we laten overeenstemmen met het jouleverlies in een fictieve weerstand R_v , die parallel over U_1 staat.

Door deze weerstand gaat een stroom I_v , die enkel afhangt van de aangelegde spanning en de frequentie. De ijzerverliezen zijn immers enkel afhankelijk van kernmateriaal en dimensionering, spanning en frequentie, dus niet van de belastingsgraad.

De vectoriële som van $\vec{I}_m + \vec{I}_v = \vec{I}_o$ vormt de nullaststroom van de transfo.



Figuur M

2.4.1.4 De lekfluxen : spoelen X_1 en X_2

De flux ϕ in de primaire windingen sluit zich nooit volledig over de transformator kern. Een gedeelte "lekt" d.w.z. omsluit de spoel N_1 door de lucht. Deze lekflux gaat dus niet door N_2 .

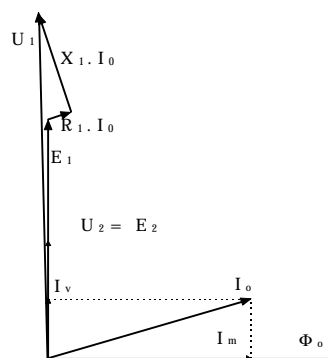
Daardoor is $d\phi_1 > d\phi_2$.

Aangezien de secundaire spanning evenredig is met de fluxverandering zien we dus een zeker spanningsverlies, dat we kunnen voorstellen door een "lekspoel" X_1 in de primaire kring, die een lekflux veroorzaakt.

Slechts een gedeelte van de spanning U_1 wordt omgezet (namelijk het gedeelte E_1) in een secundaire emk E_2 . Ook in de secundaire kring krijgen we een lekflux, zodat we hier een reaktantie X_2 in serie met de ideale secundaire spoel moeten tekenen.

De primaire reaktantie X_1 wordt doorlopen door een stroom I_0 . We kunnen dan ook de spanningsval over deze reaktantie tekenen, 90° voorrijlend op de stroom I_0 .

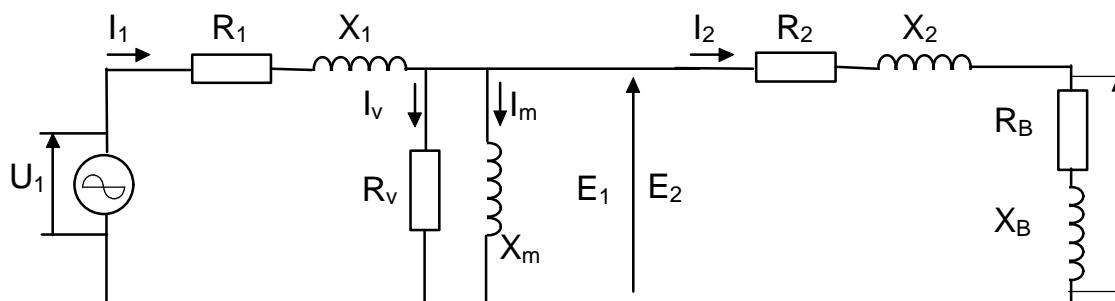
De emk E_2 kunnen we vinden uit de transformatieverhouding $k = N_1/N_2$ en de tegen-EMK E_1 .



Figuur N vectordiagram bij nullast

De equivalente keten die we zoals hierboven opgesteld hebben bevat nog altijd twee gescheiden kringen. Om een zo eenvoudig mogelijke schakeling te bekomen trachten we het bovenstaande schema om te vormen tot één geheel.

Indien de transformatieverhouding in de bovenstaande transfo $k=1$ wordt, zal E_1 gelijk zijn aan E_2 . We komen dan tot het volgende schema :



Figuur O equivalent schema voor $k=1$

Indien de transformatieverhouding k verschilt van 1 kunnen we een gelijkaardige operatie doorvoeren indien we de secundaire grootheden in het schema aanpassen zodat :

- de transfo dezelfde verliezen en spanningsvallen behoudt.
- in de secundaire keten alle actieve en reactieve vermogens gelijk blijven.
- in de primaire keten alle stromen constant blijven.

Om tot een fictieve transformatieverhouding $k_f = 1$ te komen moeten we de spanning $E_2 = E_1/k$ met een factor k vermenigvuldigen.

De in het nieuwe schema aangebrachte spanning $E_2' = E_1 = k \cdot E_2$

De secundaire stroom schijnt door deze spanningsaanpassing de waarde $I_2' = I_2/k$ te krijgen.

Willen we dus de actieve en reactieve vermogens in de secundaire kring identiek houden, dan zullen de secundaire impedanties in het equivalente schema moeten aangepast worden :

$$R_2' \cdot I_2'^2 = R_2 \cdot I_2^2 \Rightarrow R_2' = k^2 \cdot R_2$$

$$X_2' \cdot I_2'^2 = X_2 \cdot I_2^2 \Rightarrow X_2' = k^2 \cdot X_2$$

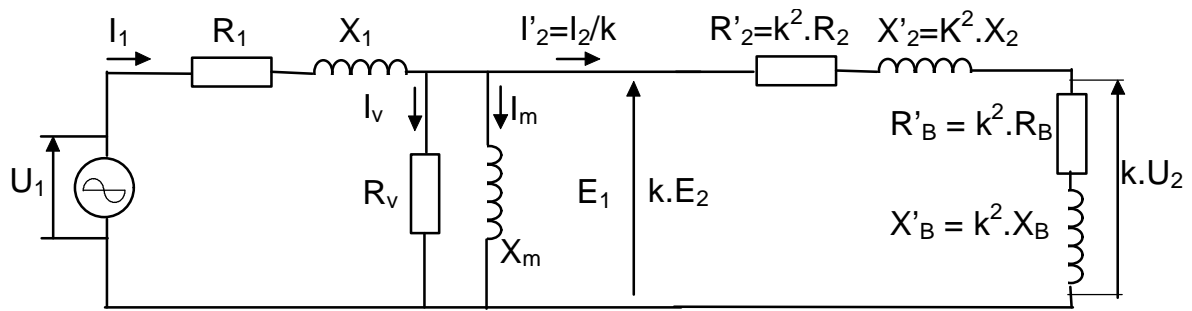
R_2' (X_2') noemt men de op de primaire betrokken secundaire ohmse weerstand (lekspoel) of de equivalente resistentie (reaktantie) van de secundaire wikkeling.

Een belasting in de secundaire kring kan op een analoge manier omgerekend worden :

$$R_b' \cdot I_2'^2 = R_b \cdot I_2^2 \Rightarrow R_b' = k^2 \cdot R_b$$

$$X_b' \cdot I_2'^2 = X_b \cdot I_2^2 \Rightarrow X_b' = k^2 \cdot X_b$$

Met deze gegevens bekommen we het T-equivalente schema voor een transformator :



Figuur P T-equivalent schema transformator

voorbeeld :

Een eenfasige transformator heeft $N_1 = 480$ en $N_2 = 90$ windingen. De gemiddelde lengte van de veldlijnen in de magnetische keten is 180 cm. $B_{\max} = 1,1$ T en $\mu_r = 2000$.

Het verliescijfer $V_1 = 1,5$ W/kg, de soortelijke massa van het ijzer is $7,8$ kg/dm³. De primaire spanning is 2200V 50Hz.

Bereken :

- de kerndoorsnede
- U_2
- de magnetiseringsstroom I_m
- Arbeidsfaktor bij nullast $\cos \phi_0$

oplossing :

$$a) U_1 \approx E_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi_{\max}$$

$$\Phi_{\max} = \frac{E_1}{4,44 \cdot N_1 \cdot f} = \frac{2200}{4,44 \cdot 480 \cdot 50} = 20,65 \text{ mWb}$$

$$A = \frac{\Phi_{\max}}{B_{\max}} = \frac{0,02065}{1,1} = 0,01877 \text{ m}^2$$

$$b) \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow U_2 = \frac{U_1 \cdot N_2}{N_1} = \frac{2200 \cdot 90}{480} = 412,5 \text{ V}$$

$$c) \text{ magnetische weerstand } R_m = \frac{l}{\mathbf{m}_0 \cdot \mathbf{m}_r \cdot A} = \frac{1,8}{4 \cdot \mathbf{p} \cdot 10^{-7} \cdot 2000 \cdot 0,01877} = 3,815 \cdot 10^4 \frac{\text{A}}{\text{Wb}}$$

$$\Phi_{\max} = \frac{N_1 \cdot I_{m \max}}{R_m} \Rightarrow I_{m \max} = \frac{\Phi_{\max} \cdot R_m}{N_1} = \frac{0,02065 \cdot 3,815 \cdot 10^4}{480} = 1,641 \text{ A}$$

$$\text{effectieve waarde } I_m = \frac{I_{m \max}}{\sqrt{2}} = 1,16 \text{ A}$$

d) $\cos \mathbf{j}_0$ berekenen we uit I_v en I_0 ($\vec{I}_0 = \vec{I}_v + \vec{I}_m$)

$$I_v = \frac{P_{FE}}{U_1}$$

$$P_{FE} = m \cdot \left(\frac{B_m}{B_{ref}} \right)^2 \cdot V_l$$

$$m = \mathbf{g}_{FE} \cdot V_{FE} = \mathbf{g}_{FE} \cdot l_{gem} \cdot A = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,8 \text{ m} \cdot 0,01877 \text{ m}^2 = 263,53 \text{ kg}$$

$$P_{FE} = 263,53 \cdot \left(\frac{1,1}{1} \right)^2 \cdot 1,5 = 478,3 \text{ W}$$

$$I_v = \frac{478,3}{2200} = 0,217 \text{ A}$$

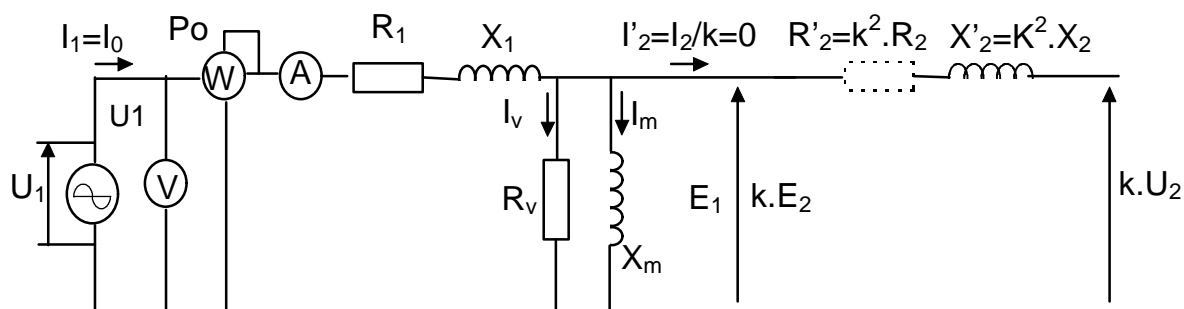
$$|I_0| = \sqrt{I_v^2 + I_m^2} = 1,18 \text{ A}$$

$$\cos \mathbf{j}_0 = \frac{I_v}{I_0} = 0,1839$$

2.4.2 nullastproef (bepalen van k, R_v en X_m)

Eerder hebben we gezien dat uit de nullastproef en de kortsluitproef de verliezen in een transfo kunnen bepaald worden. Hier bewijzen we dat deze proeven tevens toelaten de elementen van de equivalente kring van de transfo te bepalen.

Bij nullast herleidt het equivalente schema zich tot de kring.



Figuur Q Equivalente keten bij nullastproef

Hierin zien we :

$$U_1 = U_{\text{nom}}$$

$$I_o = I_1 = \text{primaire nullaststroom}$$

$$P_{1,0} = P_o = \text{primair nullastvermogen}$$

we kunnen $\cos \mathbf{j}_o$ berekenen uit de gemeten waarden :

$$\cos \mathbf{j}_o = \frac{P_o}{U_1 \cdot I_o}$$

$$\text{en met } \sin \mathbf{j}_o \text{ berekend uit : } \sin \mathbf{j}_o = \sqrt{1 - \cos^2 \mathbf{j}_o}$$

berekenen we deelstromen door R_v en X_m vanuit de gemeten stroom I_o

$$I_v = I_o \cdot \cos \mathbf{j}_o$$

$$I_m = I_o \cdot \sin \mathbf{j}_o$$

Aangezien de koperverliezen bij nullast klein zijn, zal de spanning over R_v en X_m vrijwel gelijk zijn aan de aangelegde spanning U_1 . Hieruit berekenen we :

$$R_v = \frac{U_1}{I_v} \quad \text{en} \quad X_m = \frac{U_1}{I_m}$$

opmerkingen :

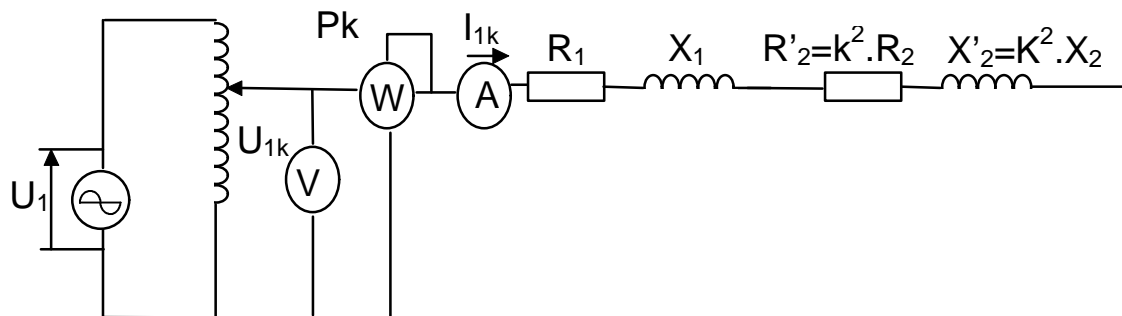
- als de secundaire spanning E_2 is, kunnen we de transformatieverhouding uit de nullastproef bepalen met :

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{E_2}$$

- we hebben reeds eerder gezien dat we met de nullastproef de ijzerverliezen kunnen bepalen.

2.4.3 kortsluitproef (bepalen van R_1 , R_2 , X_1 en X_2)

Bij kortsluiting kunnen we het equivalente schema van een transformator vereenvoudigen tot :



Figuur R equivalent schema bij kortsluitproef

Omdat R_v en X_m hoge waarden hebben t.o.v. $k^2 R_2$ en $k^2 X_2$ kunnen we de invloed van deze factoren immers verwaarlozen.

We zien dat het gemeten vermogen P_k gelijk is aan :

$$P_k = I_k^2 \cdot (R_1 + k^2 \cdot R_2) = I_k^2 \cdot R_e$$

waarin R_e de equivalente kortsluitweerstand van de transfo genoemd wordt.

anderzijds meten we de spanning U_k die gelijk is aan :

$$U_k = I_k \sqrt{(R_1 + k^2 R_2)^2 + (X_1 + k^2 X_2)^2}$$

$$= I_k \sqrt{R_e^2 + X_e^2} = I_k \cdot Z_e$$

met $X_e = \text{equivalente kortsluitreactantie}$

en $Z_e = \text{equivalente kortsluitimpedantie van de transfo}$

samengevat berekenen we de gezochte transfo-eigenschappen uit :

$$R_e = \frac{P_k}{I_k^2}$$

$$Z_e = \frac{U_k}{I_k}$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2}$$

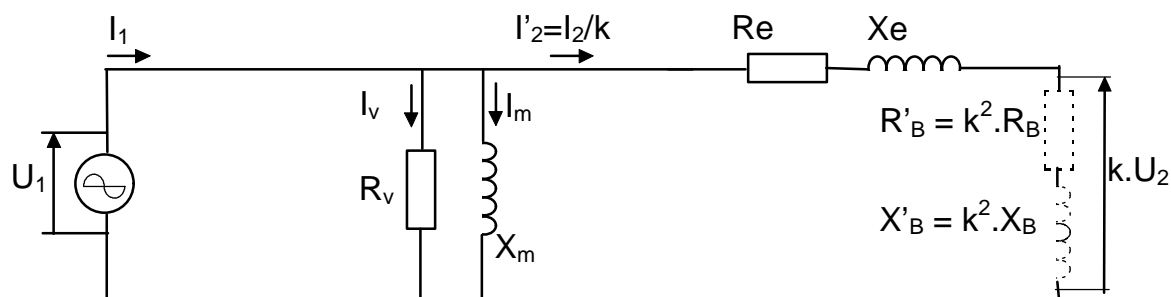
terwijl bij een transfo bij benadering :

$$R_1 = k^2 R_2 \text{ en } X_1 = k^2 X_2 = X'_2$$

zodat $X_1 = X'_2 = \frac{X_e}{2}$

en $R_1 = R_2 = \frac{R_e}{2}$

we kunnen dan eventueel ook het volgende vereenvoudigde equivalente schema tekenen.



Figuur S vereenvoudigd equivalent schema transformator

voorbeeld :

Een eenfasige transfo S=25kVA 13000/220V 50 Hz levert een nuttig actief vermogen van 25kW bij een $\cos\phi_2=1$

$P_{FE} = 246 \text{ W}$, $R_1 = 54 \Omega$, $R_2 = 0,0148\Omega$ en U_k is 4% van de nominale belasting.

Bereken :

- R_e en X_e ,
- η bij vollast,
- P_2 als η =maximaal,
- η_{\max} .

oplossing :

$$\text{secundair actief vermogen } P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\phi_2$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2 \cdot \cos\phi_2} = \frac{25000}{220 \cdot 1} = 113,6354 \text{ A}$$

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow I_1 = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1} = \frac{220 \cdot 113,6364}{13000} = 1,9231 \text{ A}$$

$$\text{totaal jouleverlies bij vollast : } P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 = 391 \text{ W}$$

$$R_e = \frac{P_{kl}}{I_{kl}^2} = \frac{P_J}{I_1^2} = \frac{391}{1,9231^2} = 105,72 \Omega$$

$$Z_e = \frac{U_{kl}}{I_{kl}} = \frac{0,04 \cdot U_1}{I_1} = \frac{0,04 \cdot 13000}{1,9231} = 270,4 \Omega$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = \sqrt{270,4^2 - 105,72^2} = 248,87 \Omega$$

$$\text{vollast rendement : } h = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_J + P_{FE}} = \frac{25000}{25000 + 391 + 246} = 0,9752 (= 97,52\%)$$

$$h = \text{maximaal indien : } P_J = P_{FE}$$

$$\Rightarrow P_J = 246 \text{ W}$$

$$\text{met } P_J = R_e \cdot I_1^2$$

$$\Rightarrow I_1 = \sqrt{\frac{P_J}{R_e}} = \sqrt{\frac{246}{105,72}} = 1,5254 \text{ A}$$

$$k = \frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow I_2 = \frac{U_1 \cdot I_1}{U_2} = \frac{13000 \cdot 1,5254}{220} = 90,1373 \text{ A}$$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\phi_2 = 220 \cdot 90,1373 \cdot 1 = 19830 \text{ W}$$

$$h_{\max} = \frac{P_2}{P_2 + P_J + P_{FE}} = \frac{19830}{19830 + 246 + 246} = 0,9758 (= 97,58\%)$$

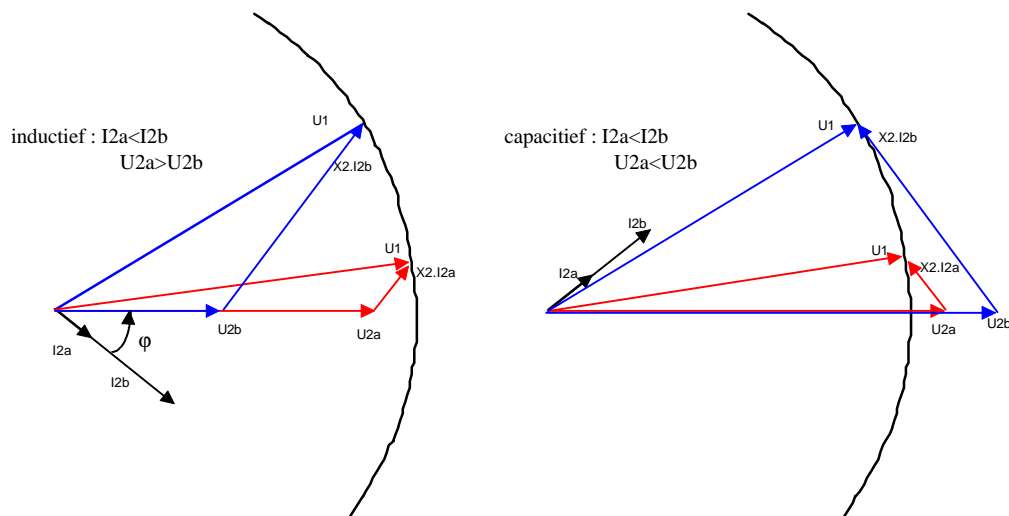
2.5 uitwendige karakteristiek van een transfo

Indien we een transformator (met een konstante primaire spanning) belasten, zal er een spanningsverandering zijn op de secundaire klemmen. Dit verschil tussen de secundaire klemspanning en de nominale secundaire klemspanning wordt meestal uitgedrukt in % van de nominale waarde.

Bij deze belasting zal de arbeidsfaktor bepalend zijn voor de vorm van het verloop van $U_2 = f(I_2)$.

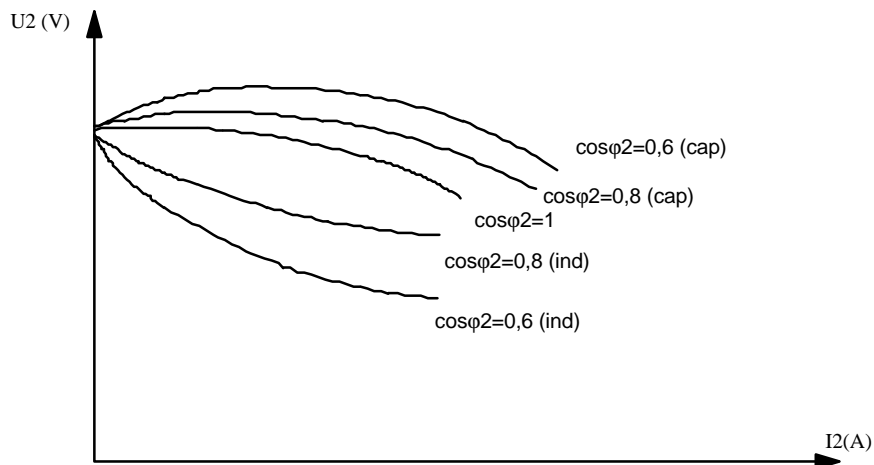
Uit het vereenvoudigd vervangingschema (waarbij ook R_v en X_m weggelaten werden) kunnen we voor verschillende waarden van $\cos\varphi_2$ en I_2 het spanningsverloop voor U_2 bepalen.

immers : $U_1 = \text{cte} = U_2 + I_2 \cdot X_2$



Figuur T vectordiagram (inductief - capacitief) spanningsverandering transfo bij belasting

we komen dan tot een volgende uitwendige karakteristiek :



Figuur U uitwendige karakteristiek transformator

In de praktijk zijn distributietransformatoren voorzien van aftakkingen, zodat door het bij- of afschakelen van een bepaald aantal windingen de spanning iets kan veranderen. (+10%, +5%, -5%, -10%)

Bij hoogspanningstransformatoren gebeurt deze spanningsregeling vrijwel altijd aan de hoogspanningsspoel, omdat hier de kleinste stromen vloeien, en de regelaar dus meestal het goedkoopst uitvalt.

3. Driefasige transformatoren

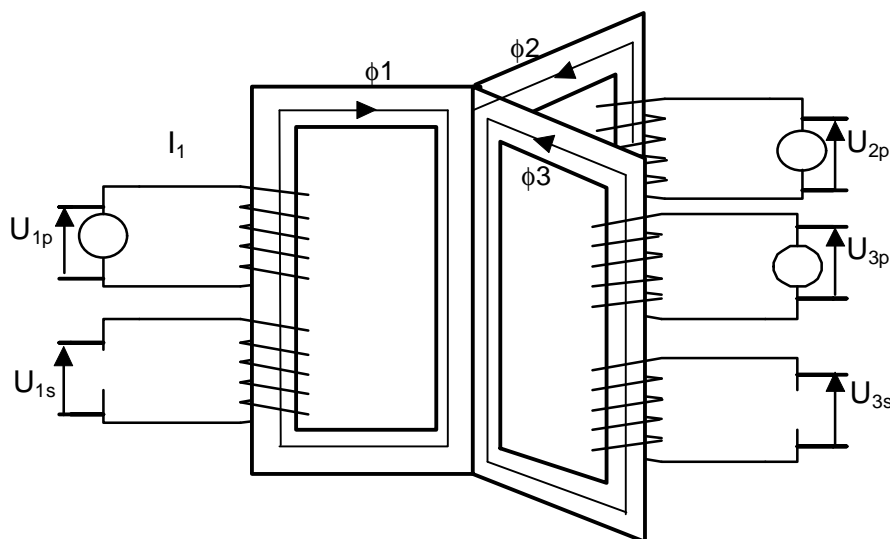
3.1 Inleiding

Driefasige transformatoren kunnen bekomen worden door het samenvoegen van drie eenfasige transformatoren. In het algemeen gebruikt men echter een enkele transformator met drie kernen. Immers : in figuur v mogen de drie middelste kernen vervangen worden door één kern. In deze kern vloeit dan de som van de drie fluxen : $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3$.

Als de drie transformatoren identiek zijn en door een evenwichtige driefasige spanning gevoed worden zal $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0$.

De gemeenschappelijke kern mag dus weggelaten worden aangezien er geen flux in vloeit. Door de drie andere kernen in een vlak te brengen bekomt men een klassieke driefasige transformator.

Het niet symmetrisch zijn van de magnetische keten heeft een kleine invloed op de spanningen : de drie secundaire spanningen zullen niet precies even groot zijn.



Figuur V Samenstelling driefasige transfo

3.2 Schakelingen van driefasige transformatoren

De drie primaire en de drie secundaire windingen kunnen in ster of in driehoek geschakeld worden. Soms is de laagspanningszijde uitgevoerd als zigzag schakeling. De secundaire bevat dan 6 gelijke windingen in plaats van drie. Elke fase is over 2 kernen gewikkeld en blijft toch in evenwicht.

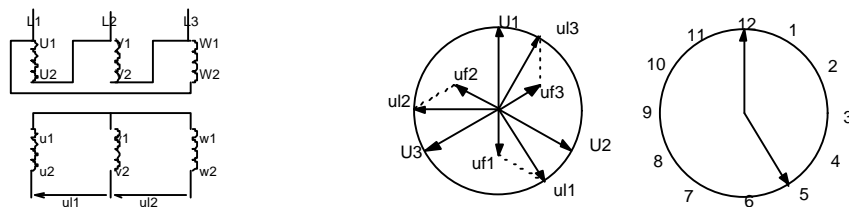
3.2.1 klokgetal

De schakelingen die in praktijk gebruikt worden zijn verdeeld in vier schakelgroepen. Deze indeling is zoals later zal blijken belangrijk voor de parallelschakeling van transformatoren.

Een schakelgroep kenmerkt de schakelingen van primaire en secundaire en de faseverschuiving tussen de primaire en de secundaire spanning.

De faseverschuiving wordt aangegeven door het klokcijfer, dat met 30 vermenigvuldigd de faseverschuiving aangeeft. Om dit cijfer af te leiden laten we de spanningsvector van de eerste primaire lijnspanning samenvallen met de grote wijzer van het uurwerk, de eerste lijnspanning van de secundaire met de korte wijzer. Het uur dat de klok aanduidt is dan het klokgetal.

figuur w geeft een voorbeeld van een D-Y schakeling (Driehoek-Ster)



Figuur W klokgetal bij D-Y schakeling

3.2.2 Transformatieverhouding van de 3-fasige transformator

Bij de eenfasige transformator was $k = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \text{A}$.

Bij de ster-ster en Driehoek-driehoek blijft dit hetzelfde.

Bij de ster-driehoek schakeling wordt dit $k \cdot \sqrt{3} \text{A}$ en bij driehoek-ster $\frac{k}{\sqrt{3}} \text{A}$. Dit volgt uit het feit dat de flux in de kern op al de rond de kern aangelegde windingen hetzelfde aantal volt per winding zal induceren.

Bij de zigzag schakeling ziet men dat de spanning tussen elke klem en het nulpunt evenredig is met $\sqrt{3} \cdot \frac{N_2}{2} \text{A}$. De secundaire lijnspanningen zijn dan evenredig met $\sqrt{3} \cdot (\sqrt{3} \cdot \frac{N_2}{2}) = 1,5 N_2 \text{A}$. Indien de wikkelingen op dezelfde kern gewikkeld waren zou de secundaire lijnspanning evenredig zijn met $1,73 N_2$.

De volledige transformatieverhouding kan nu berekend worden in combinatie met de primaire schakeling.

In figuur x wordt een samenvatting gegeven van de verschillende mogelijkheden i.v.m. driefasige transformatoren.

0	D d 0				$\frac{w_1}{w_2}$
	Y y 0				$\frac{w_1}{w_2}$
	D z 0				$\frac{2 w_1}{3 w_2}$
5	D y 5				$\frac{w_1}{\sqrt{3} w_2}$
	Y d 5				$\frac{\sqrt{3} w_1}{w_2}$
	Y z 5				$\frac{2 w_1}{\sqrt{3} w_2}$
6	D d 6				$\frac{w_1}{w_2}$
	Y y 6				$\frac{w_1}{w_2}$
	D z 6				$\frac{2 w_1}{3 w_2}$
11	D y 11				$\frac{w_1}{\sqrt{3} w_2}$
	Y d 11				$\frac{\sqrt{3} w_1}{w_2}$
	Y z 11				$\frac{2 w_1}{\sqrt{3} w_2}$

Figuur X schakelingen van driefasige transformatoren

voorbeeld :

De primaire zijde van een driefasige transfo staat in ster op 10kV met $N_1 = 5250$ windingen per fase, terwijl de secundaire twee spoelen van elk 100 windingen per fase bevat.

- Bereken : U_{l2} bij
- secundaire spanning in zigzag
 - secundaire spanning in ster

oplossing a (vectordiagram a) :

$$U_{f1} = \frac{U_{ll}}{\sqrt{3}} = \frac{10000}{\sqrt{3}} V = 5774 V$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{f1}}{E_2} \text{ (bij nullast)}$$

$$E_2 = \frac{U_{f1} \cdot N_2}{N_1} = \frac{5774 \cdot 100}{5250} = 110 V$$

$$U_{f2} = \sqrt{3} \cdot E_2 = \sqrt{3} \cdot 110 = 190 V$$

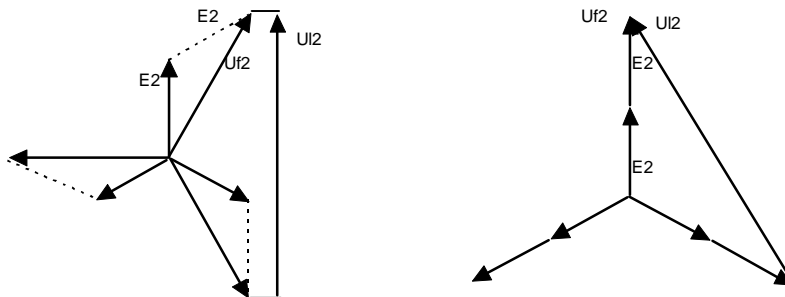
$$U_{l2} = \sqrt{3} \cdot U_{f2} = \sqrt{3} \cdot 190 = 330 V$$

$$\text{ofwel : } U_{l2} = 3 \cdot E_2 = 3 \cdot 110 V = 330 V$$

oplossing b (vectordiagram b) :

$$U_{f2} = 2 \cdot E_2 = 2 \cdot 110 = 220 V$$

$$U_{l2} = \sqrt{3} \cdot U_{f2} = \sqrt{3} \cdot 220 = 380 V$$



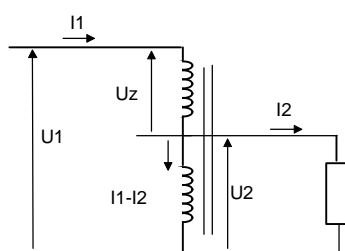
figuur 3.A vectordiagram voorbeeld

4. Speciale transformatoren

4.1 De spaartransfo of autotransfo

Een spaartransformator bevat slechts één wikkeling, waarvan een gedeelte gemeenschappelijk is aan de primaire en de secundaire. (eenfasige transfo)

4.1.1 voor $U_2 < U_1$



Men kan de autotransformator beschouwen als een transfo met een primaire spanning U_1 , waarbij de uitgangsspanning bekomen wordt door een deel af te takken van U_1 . Het verschil tussen U_2 en U_1 is U_z . Het schijnbaar getransformeerd vermogen wordt gedefinieerd als het vermogen in het niet-gemeenschappelijke gedeelte : $P'_s = U_z \cdot I_1$.

Figuur Y spaartransfo

$U_2 < U_1$

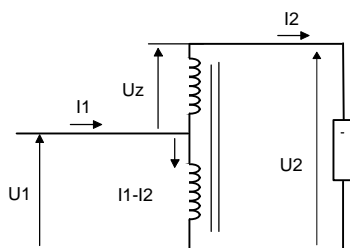
$$\text{uit } \frac{P'_s}{P_s} = \frac{U_z \cdot I_1}{U_1 \cdot I_1} = \frac{(U_1 - U_2) \cdot I_1}{U_1 \cdot I_1} = 1 - \frac{U_2}{U_1}$$

$$\text{berekenen we } P'_s = \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right) \cdot P_s$$

uit $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$ volgt dat :

$$I_1 = I_2 \cdot \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right)$$

4.1.2 voor $U_2 > U_1$



Figuur Z spaartransfo

$U_2 > U_1$

Men kan de autotransformator in deze situatie beschouwen als een transfo met een primaire spanning U_1 en een secundaire spanning U_z , waarbij de uitgangsspanning bekomen wordt door een serieschakeling van U_1 en U_z .

Het schijnbaar getransformeerd vermogen $P'_s = U_z \cdot I_2$.

$$\text{uit } \frac{P'_s}{P_s} = \frac{U_z \cdot I_2}{U_2 \cdot I_2} = \frac{(U_2 - U_1) \cdot I_2}{U_2 \cdot I_2} = 1 - \frac{U_1}{U_2}$$

$$\text{berekenen we } P'_s = \left(1 - \frac{U_1}{U_2}\right) \cdot P_s$$

uit $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$ volgt dat :

$$I_1 = I_2 \cdot \left(1 - \frac{U_1}{U_2}\right)$$

4.1.3 voordelen autotransfo

- Vermits er minder windingen zijn t.o.v. een gewone transfo, is het kopervolume kleiner.
- De nodige kerndoorsnede kan berekend worden uit :

$$A = k \sqrt{\frac{P_s'}{f}}$$

waarin :

P_s' in kVA

f in Hz

$k = 200...250$ voor droge toestellen

$= 150...200$ in olie

$= 125...175$ oliegekoeld

Hoe meer U_2 en U_1 elkaar benaderen, hoe kleiner P_s' en hoe kleiner de kerndoorsnede.

De kerndoorsnede kan kleiner zijn dan bij een gewone transfo.

- Zowel de ijzer- als de koper verliezen zijn kleiner t.o.v. de gewone transfo.

4.1.4 nadelen autotransfo

- De hoog- en laagspanningszijde zijn niet elektrisch gescheiden. De absolute potentiaal kan dus bij een kleine secundaire spanning toch groot zijn. Daarom mogen autotransfo's niet overal toegepast worden. (niet als beltransfo, speelgoedtransfo,...)

4.1.5 voorbeeld :

Een autotransformator heeft $N_1 = 1600$ windingen en is primair aangesloten op $U_1 = 500$ V.

- Hoeveel bedraagt N_2 voor het bekomen van $U_2 = 220$ V ?
Indien de secundaire aangesloten wordt op een inductiemotor
 $P_n = 3,7$ kW $\eta = 76\%$ $\cos\varphi = 0,7$ bereken dan :
- I_2 en I_1
- S_2
- S' (getransformeerd schijnbaar vermogen)

oplossing :

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow N_2 = \frac{U_2 \cdot N_1}{U_1} = \frac{220 \cdot 1600}{500} = 704 \text{ windingen}$$

$$\text{motorvermogen: } P_{1Motor} = \frac{P_N}{\mathbf{h}} = \frac{3700}{0,76} = 4868 \text{ W}$$

$$P_{2transfo} = P_{1Motor} = 4868 \text{ W}$$

$$S_{2transfo} = S_{motor} = \frac{P_{1Motor}}{\cos \mathbf{j}} = \frac{4868}{0,7} = 6955 \text{ VA}$$

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{6955}{220} = 31,61 \text{ A}$$

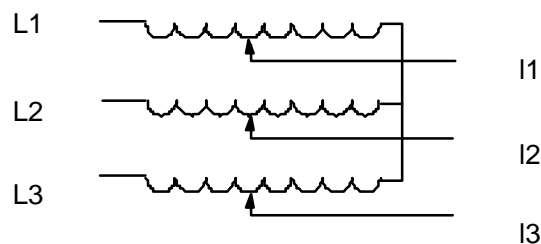
$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} = \frac{6955}{500} = 13,91 \text{ A}$$

getransformeerd schijnbaar vermogen :

$$S' = (U_1 - U_2) \cdot I_1 = (500 - 220) \cdot 13,91 = 3895 \text{ A}$$

hieruit kan evt de kerndoorsnede bereken worden

4.1.6 driefasige spaartransfo



Figuur AA driefasige spaartransfo

4.1.7 rheotor

Soms worden spaartransfo's uitgevoerd met een schuifkontakt, zodat het aantal windingen kan gewijzigd worden. Hierdoor bekommt men een regelbare spanning. Zo een transformator noemt men een **rheotor**.

4.2 Lastransfo

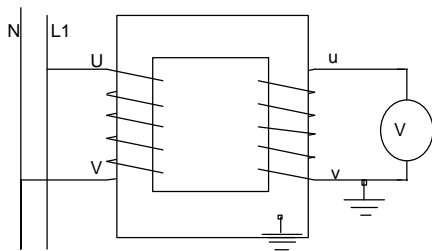
Door de lekflux groot te laten worden (gemakkelijke weg te voorzien) zal de spanning fel dalen met de stijging van de belastingsstroom. Dit is vereist bij het lassen.

4.3 Meettransformatoren

De meest gebruikte meettransformatoren zijn spannings- of stroomverlagende transformatoren.

Het meetbereik van Ampère- en Voltmeters is beperkt tot veilige waarden. Om ook hoge spanningen en stromen met gewone meters te kunnen meten en toch veilige meetketens te bekomen gebruiken we meettransformatoren die beperkt zijn tot een klein vermogen en een hoge nauwkeurigheid.

4.3.1 De spanningsmeettransfo



Figuur BB spanningsmeettransfo

Spanningsmeettransformatoren worden toegepast voor de aansluiting van Voltmeters, frequentiemeters, spanningskringen, $\cos\phi$ -meters, W-meters, kWh-meters, relais,...

De transformatieverhouding is zodanig dat voor de nominale primaire spanning de secundaire spanning 110V is.

De secundaire spanning is in tegenfase met de primaire. Hiermee moet rekening gehouden worden bij de aansluiting van $\cos\phi$, W- en kWh-meters.

Door de kleine inwendige spanningsvallen ontstaan er fouten in de spanningstransformatie (aangegeven van 0,1 tot 3%) en in de faseformatie (hoekfout aangegeven van 5 tot 40 minuten).

Figuur CC nauwkeurigheidsklassen spanningsmeettransfo's

Klasse	Primaire spanning	Procentuele fout	fasefout (in minuten)
0,1	0,8 U_N ; 1,0 U_N ; 1,2 U_N	0,1	5
0,2		0,2	10
0,5		0,5	20
1		1	40
0,1	0,05 U_N	1,0	40
0,2		1,0	40
0,5		1,0	40
1		2,0	80
0,1	Gegeven spanningsfactor x U_N	2,0	80
0,2		2,0	80
0,5		2,0	80
1		3,0	120

Smeltveiligheden van 1A beveiligen de secundaire tegen kortsluiting. Vooral het bij gebruik van universele meters kan een instelling op A-bereik i.p.v. Volt een te grote secundaire stroom veroorzaken.

Om veiligheidsredenen zijn de kern en de secundaire geaard.

De in praktijk voorkomende klem-aanduidingen bij spannings-meet-transformatoren zijn aangegeven in figuur dd.

Transformator opbouw	Klemaanduidingen volgens VDE norm	Klemaanduidingen volgens IEC norm	voorbeeld spanningsaanduiding
tweefasig 1 primaire winding 1 secundaire winding			$V \frac{15000}{100}$
tweefasig 1 primaire winding 1 secundaire winding met aftakking			$V \frac{5000 - 10000}{100}$ Grootste aangeduide spanning op klemmen u1/a1
eenfasig (geaard) 1 primaire winding 2 gescheiden meet-windingen			$V \frac{10000 / \sqrt{3}}{100 / \sqrt{3} \quad 100 / \sqrt{3}}$
eenfasig (geaard) 1 primaire winding 1 meetwikkeling en een wikkeling voor aardfout controle			$V \frac{10000 / \sqrt{3}}{100 / \sqrt{3} \quad 100 / 3}$

Figuur DD klem-aanduidingen spanningsmeettransfo's

4.3.2 Stroommeettransfo

Stroommeettransfo's worden toegepast voor de aansluiting van A-meters, W-meters, ... , zowel in LS- als HS-kringen. De primaire wordt in serie met de belasting geplaatst, zodat de primaire stroom bepaald wordt door de belasting. De impedantie en het verbruik van de transfo worden verwaarloosd.

De (door de A-meter) kortgesloten transfo heeft immers een constante lage impedantie Z_i .

We weten dat $N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$, zodat $I_2 = k \cdot I_1$.

De transformatieverhouding k wordt zo gekozen dat bij nominale waarde van I_1 de stroom $I_2 = 5A$ (of $1A$).

Omdat $N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$ zal ook $\phi_1 - \phi_2$ zeer klein zijn. De totale flux in de ijzeren kern is dus zeer klein, waardoor de doorsnede van de kern klein mag zijn.

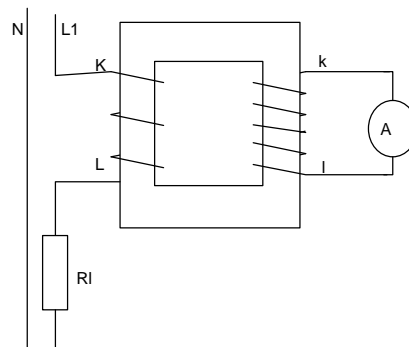
Wordt de secundaire keten van de transfo echter geopend, dan zal de primaire flux niet meer tegengewerkt worden. Daardoor zal de flux in de kern zeer groot worden.

Dit geeft de volgende problemen:

- Er ontstaan grote wervelstroom- en hysteresisverliezen die de kern sterk verhitten. Hierdoor kan de isolatie verbranden.
- In de secundaire wordt een levensgevaarlijk grote EMK opgewekt.
- De primaire spanningsval U_{KL} is niet meer verwaarloosbaar.
- Door de plotse toename van de flux kan een remanent magnetisme in één zin optreden, waardoor achteraf fouten optreden.

Besluit : De secundaire van een stroommeettransfo mag nooit onderbroken worden als een primaire stroom vloeit.

Ook stroomtransformatoren veroorzaken afwijkingen in grootte en fase van meetwaarden. (zie afwijkingen bij spanningsmeettransfo's)



Figuur EE stroommeettransfo

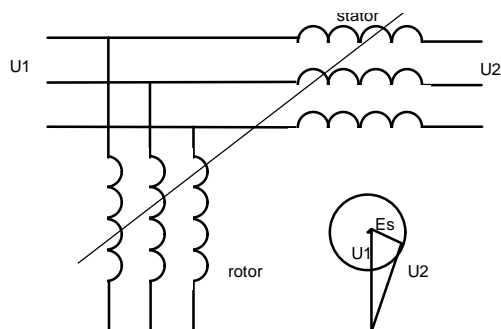
De in praktijk voorkomende klem-aanduidingen bij stroomtransformatoren zijn aangegeven in figuur ff.

Transformator opbouw	Klemaanduidingen volgens VDE norm	Klemaanduidingen volgens IEC norm	voorbeeld spanningsaanduiding
tweefasig 1 primaire winding 1 secundaire winding			$A \frac{100}{1}$
tweefasig 1 primaire winding 1 secundaire winding met aftakking			$A \frac{1000 - 800 \dots 200}{1}$ Grootste aangeduide stroom op klemmen L1/S6
eenfasig 2 of meer gelijke primaire windingen 1 meet-windin			$A \frac{2 \cdot 100}{1}$
eenfasig (geaard) 1 primaire winding 2 gescheiden meetwikkelingen			$A \frac{100}{1 \quad 1}$

Figuur FF klem-aanduidingen stroommeettransfo's

4.4 Inductieregelaars

Een inductieregelaar is een transformator waarvan men de primaire en secundaire windingen ten opzichte van elkaar in positie kan verdraaien. De constructie ervan komt ongeveer overeen met die van een inductiemotor met bewikkelde rotor.



Figuur GG inductieregelaar

Het draaiveld opgewekt in de rotor wekt een spanning E_s op in de stator. Met de verdraaiing van de rotor zal E_s in fase verschuiven t.o.v. de spanning U_1 . E_s blijft constant in grootte.

De spanning U_2 is de vectoriële som van U_1 en E_s .

Als U_1 constant gehouden wordt kan U_2 in grootte veranderen van $U_1 + E_s$ tot $U_1 - E_s$.

Dikwijls neemt men voor E_s slechts 10% van U_1 .

4.5 De veiligheidstransfo

De veiligheidstransfo is een transfo met gescheiden primaire en secundaire windingen. De veiligheidstransfo voedt toestellen (bijvoorbeeld in vochtige ruimten) met een intrinsiek veilige spanning (AREI) van max. 35V. In praktijk is de geleverde spanning meestal 24V.

4.6 Speelgoedtransfo

Ook deze transfo heeft om veiligheidsredenen gescheiden windingen. Bovendien is zijn deze transfo uitgevoerd met grote lekreactanties, zodat ze bestand zijn tegen kortsluiting.

De geleverde spanning is meestal 12V.

4.7 De Spaarlektransformator

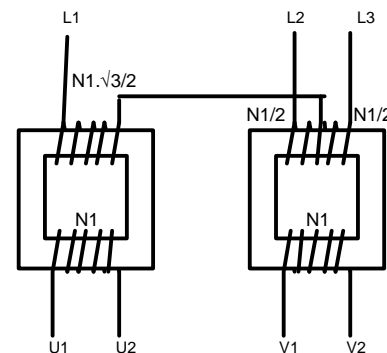
Deze transformator wordt toegepast als voorschakelapparaat in gasontladingsbuizen. De kern is voorzien van een shunt waardoor de lekflux vergroot. De spaarlektransfo zorgt hierdoor voor :

- een hoge ontsteekspanning
- het noodzakelijke spanningsverlies door de lekflux met een beperking van de stroom door de lamp.

4.8 De Scott-transformator

Het doel van een Scott-transformator is een driefasenspanning omzetten in een tweefasenspanning of omgekeerd. Deze transformator wordt gebruikt voor de voeding van een tweefaseninductiemotor met poolomschakeling.

Bij de in 1 aangegeven wikkelverhoudingen zal het driefasige systeem twee spanningen U_1U_2 en V_1V_2 op die 90° t.o.v. elkaar verschoven en in amplitude gelijk zijn.



Figuur HH Scott-transformator

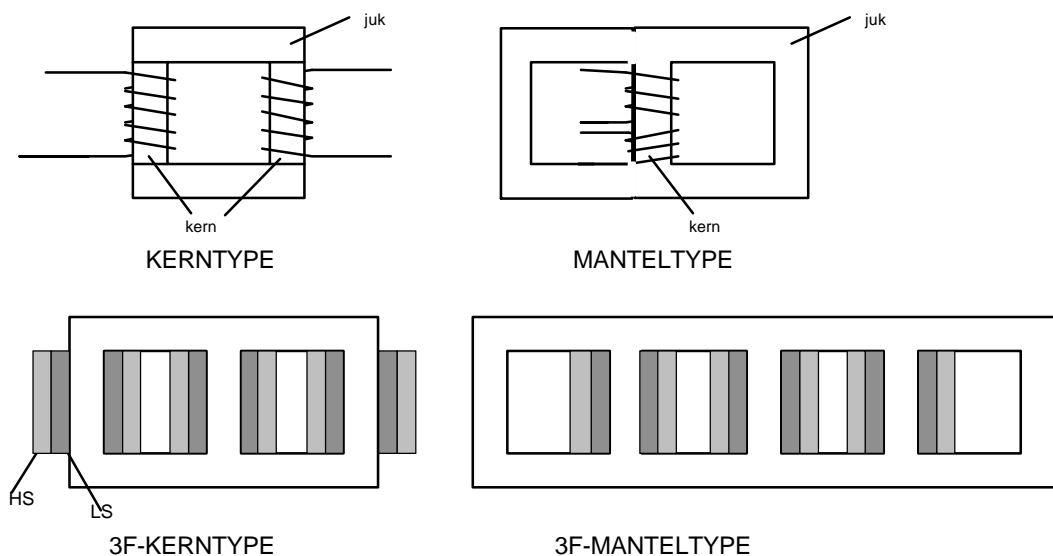
5. Constructie van transformatoren

5.1 de magnetische keten

De magnetische keten bestaat uit kernen waarop de wikkelingen zijn aangebracht en uit jukken die deze kernen verbinden. Het geheel is gemaakt uit gelamelleerd dynamoblik met een plaatdikte van 0,3 tot 0,5 mm.

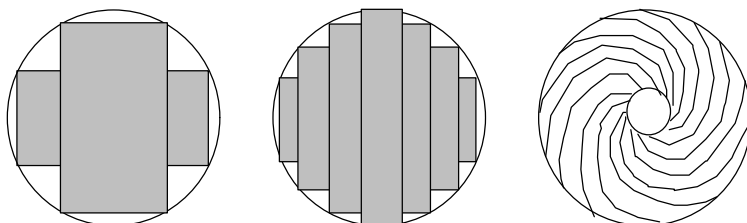
Er zijn transformatoren van het kerntype en van het manteltype. Bij het manteltype zijn de lekfluxen kleiner, en de wikkelingen zijn mechanisch beschermd door het juk.

Voor kleine transformatoren vinden we ook regelmatig de ringkerntransformator.



Figuur II constructievormen van transformatoren

Aangezien de spoel meestal een cirkelvormige doorsnede heeft (minimum wikkeling-lengte voor maximum kerndoorsnede en beste weerstand aan elektromagnetische krachten.), zou ideaal gezien de kern ook een ronde doorsnede moeten hebben. Om technische redenen wordt bij kleine transfo's toch een vierkante doorsnede genomen, bij grotere transfo's is de kern opgebouwd uit meerdere plaatbreedten, zodat de doorsnede een trappenveelhoek wordt. Door de platen in evolvente krommen te plooiën kan eventueel een doorsnede bekomen worden die bijna volledig cirkelvormig is.



Figuur JJ kerndoorsnede

5.2 wikkelingen

Bij eenfasige transfo's van het manteltype of bij driefasige transfo's worden primaire en secundaire wikkeling meestal concentrisch geplaatst.

De laagspannings-wikkeling wordt dan altijd tegen de kern geplaatst. Door haar grotere koperdoorsnede (l =groter) is ze sterker en dus minder onderhevig aan vervorming. Tussen primaire en secundaire windingen dient een bakelieten cilinder als isolatie.

5.3 isolatie en afkoeling

Transformatoren voor grote vermogens worden altijd in olie geplaatst. Deze is dan zowel isoleermiddel als koelmiddel. De olie verbetert de isolatie van het papier rond de geleiders en van de bakeliet tussen de cilinders. Om tegelijkertijd afkoeling te bekomen, moet de olie kunnen circuleren tussen windingen en kern. Voor grote transformatoren zijn er bovendien nog verticale kanalen in de kern zelf.

De opgewarmde olie moet dan verder gekoeld worden. Dit kan op verschillende manieren :

- voor transfo's tot 500kVA met afkoelribben op de ketel.
- voor grotere vermogens met buiten de ketel geplaatste radiatoren, al dan niet met gedwongen luchtcirculatie.
- voor zeer grote vermogens met afzonderlijke koeler en oliepomp.

Om de olie bij verwarming te kunnen laten uitzetten is een uitzettingsvat voorzien.

6. Beveiliging van transformatoren

Transformatoren moeten beschermd worden tegen kortsluiting, overbelasting en aardsluitingen. Daarnaast kan expliciet een bescherming tegen te hoge temperaturen voorzien worden (thermische beveiliging).

Beveiliging tegen aardsluiting kan door middel van een differentieelbeveiliging. Bij een aardsluiting zijn de stromen in de transfo immers niet meer in evenwicht, waardoor de differentieelbeveiliging de transfo afschakelt.

6.1 Beveiliging tegen kortsluiting en overbelasting

6.1.1 beveiligingen aan de primaire zijde

Hier is de beveiliging van de kabel die de transfo moet voeden van belang.

Tijdens het inschakelen van de transformator, ontstaat er kortstondig een zeer hoge piekstroom (tot $25 \cdot I_n$) gedurende minimaal 10 ms. De beveiliging moet deze piekstroom doorstaan zonder te functioneren.

De gekozen beveiliging moet dus enerzijds voldoende klein gekozen worden om de voedingskabel te beschermen (-> maximum kaliber), anderzijds niet te klein gekozen worden (-> minimum kaliber) om bij inschakelen niet onmiddellijk te onderbreken.

Aan deze voorwaarden kan voldaan worden met de volgende beveiligingen :

- een smeltpatroon type aM ('traag')
- een smalautomaat type C (met magnetische beveiliging op $5 \text{ á } 10 \cdot I_n$)
- een smalautomaat type D (met magnetische beveiliging op $10 \text{ á } 20 \cdot I_n$)

Onderstaande tabel geeft een indicatie over de te gebruiken beveiliging is in de primaire kring van de transformator. (voor een gegeven transformator-vermogen) Bij berekening van deze waarden werd uitgegaan van transformatoren met een piekstroom van ongeveer $25 \cdot I_n$

vermogen (VA)	220V Mono			380V Mono			380V Driefasig		
	smeltpatr aM	automaat C	automaat D	smeltpatr aM	automaat C	automaat D	smeltpatr aM	automaat C	automaat D
40	1	1			1		1		
63	1	2			1		1		
100	1	3			2		1		
160	1	6			2		1		
250	2	6			3		1		
400	4	10			6		2		
630	6	16	10		10		2	6	
1000	10	20	10		16	6	4	10	6
1600	10	32	16		20	10	6	16	6
2500	16		20		32	16	6	20	10
4000	20		32			20	10	25	16
6300	25		38			32	16		20
10.000	50		60			38	20		32
16.000							32		38
25.000							40		60
40.000							63		75

Figuur KK minimum kalibers beveiliging primaire zijde transformator

De gekozen beveiliging (overeenkomstig het transformatorvermogen) bepaalt dan natuurlijk welke de minimale doorsnede van de te gebruiken voedingskabel is.

doorsnede geleider (mm ²)	Nominale stroom smeltveiligheid (A)	Nominale stroom automatische schakelaar (A)
1,5	10	16
2,5	16	20
4	20	20
6	32	32-42
10	50	42-63
16	63	82
25	80	104
35	100	130

Figuur LL minimum doorsnede voedingskabel t.o.v. beveiliging tegen overbelasting

6.1.2 beveiligingen aan de secundaire zijde

Hier moet de transfo zelf beschermd worden.

6.1.2.1 bescherming tegen overbelasting

Om dit risico te beperken moet het kaliber van de beveiliging kleiner of gelijk zijn aan de maximale secundaire stroom van de transfo. Er kan gekozen worden uit smeltzekeringen (eventueel te vervangen door een 'multifuse' beveiliging) of smalautomaten type C (zie tabel).

Vermogen (VA)	Primaire nominale spanning			secundaire maximum kaliber smeltpatroon gl of automaat type C				
	127 V	220 V	380 V	24 V	48 V	110 V	220 V	380 V
40		0,18	0,11	2	2	1	1	
63	1	0,29	0,17	4	2	1	1	1
100	1	0,45	0,26	4	2	2	1	1
160	2	0,73	0,42	8	4	2	2	1
250	4	1,14	0,66	10	6	4	2	1
400	4	1,82	1,05	16	8	4	2	2
630	6	2,86	1,66	25	16	6	4	2
1000	8	4,55	2,63	40	20	10	6	4
1600	12	7,27	4,21	63	32	16	8	4
2500	20	11,40	6,58			25	12	8

Figuur MM maximum kalibers voor beveiliging secundaire wikkeling van een transfo tegen overbelasting

6.1.2.2 bescherming tegen kortsluiting

Men moet ervoor zorgen dat zelfs bij een kortsluiting op het verst gelegen verbruikspunt de beveiliging binnen de 5 seconden uitschakelt. Ook hiervoor kan gekozen worden tussen smeltzekeringen (type gl, ('snel')) of universele automaten (type C). (in bepaalde gevallen is eveneens een automaat type B bruikbaar)

Voor de bepaling van het kaliber van deze beveiliging past men de volgende berekeningswijze toe :

- bereken de minimum kortsluitstroom (kortsluiting op het verste punt van de installatie) met de volgende (benaderende) formule :

$$I_{k \min} = \frac{u_s}{\left(\frac{u_s^2}{P \cdot 100} \cdot U_{k\%}\right) + \frac{2 \cdot r \cdot l}{S}}$$

met :

U_s = secundaire spanning van de transformator

P = vermogen van de transformator

$U_{k\%}$ = kortsluitspanning van de transformator

l = lengte van de verbinding in meter

s = doorsnede van de verbinding in mm

r koper = $0.027 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ (bij 150K overeenkomstig NFC15100)

- kies het kaliber zo dat de onderbrekingstijd maximaal 5s is voor een stroomsterkte $I_{k \min}$

smeltveiligheid type gl : $I_n \leq \frac{I_{k \min}}{4}$

automaat type C : $I_n \leq \frac{I_{k \min}}{8}$

automaat type B : $I_n \leq \frac{I_{k \min}}{4}$

- controleer of het kortsluitvermogen van de gekozen beveiliging voldoende is om de maximaal optredende kortsluitstroom (van de transfo) te onderbreken.

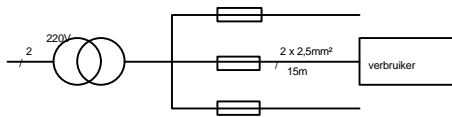
$$I_{k \max \text{ transfo}} \leq I_{k \max \text{ zekering}}$$

$$\text{of: } \frac{I_{\text{sec}}}{U_{k\%}} \cdot 100 \leq I_{k \max \text{ zekering}}$$

Voor smeltzekeringen kan het kortsluitvermogen variëren van 1000A (glaszekering 5x20mm met zand gevuld) tot 100kA (industriële patronen); voor automaten van 3000A tot 25kA.

6.1.2.2.1 voorbeeld :

bescherming tegen kortsluiting voor transfo TSN 630VA -220/24V



$$I_{k \min} = \frac{24V}{\left(\frac{24^2}{630} \cdot 3,6\%\right) + \frac{2.0,027.15}{1,5}} = 42A$$

$$\text{smeltzekering type gl : } I_n \leq \frac{42A}{4} = 10,5A$$

– 10A maximaal

$$\text{automaat type C : } I_n \leq \frac{42A}{8} = 5,25A \text{ – 5A maximaal}$$

Figuur NN Beveiliging tegen kortsluiting

$$I_{k \max} = \frac{26}{3,6} \cdot 100 = 729A < 1000A$$

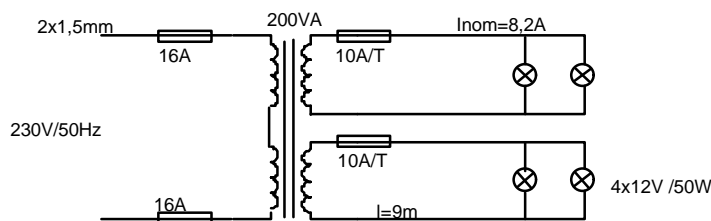
6.2 Voorbeeld

gegeven :

Een transformator 200VA 240/12V die een set van 2x2 halogeenlampen 12V/50W voedt op een afstand van 9m. De kortsluitspanning van deze transfo $U_{k\%} = 11\%$, de nominale secundaire spanning is 11,6V.

gevraagd :

- Beveilig de schakeling tegen kortsluiting en overbelasting
- Bereken de benodigde installatiedraad-doorsnedes



Figuur OO voorbeeld beveiliging transfo

We kunnen berekenen dat in elk van de twee secundaire kringen een nominale stroom vloeit van 8,2A.

Bij deze stroom ontstaat in een leiding met doorsnede $1,5 \text{ mm}^2$ tussen transfo en verbruiker een spanningsval van 2,6V. Bij een nominale secundaire spanning van 11,6V rest bij de verbruiker slechts 9V. (= te laag). Geopteerd wordt voor een doorsnede van $2,5 \text{ mm}^2$, waardoor de spanningsval beperkt wordt tot 1,6V, zodat de verbruiker 10V spanning krijgt. Voor deze doorsnede van $2,5 \text{ mm}^2$ mag maximaal een smeltzekering van 16A of een automaat van 20A gebruikt worden.

$$I_{k \min} = \frac{U_s}{\left(\frac{U_s^2}{P} \cdot \frac{U_{k\%}}{100}\right) + \frac{2 \cdot r \cdot l}{S}}$$

$$I_{k \min} = \frac{11,6V}{\left(\frac{11,6V}{16,4A} \cdot \frac{11\%}{100}\right) + \frac{2 \cdot 0,027 \cdot 9}{2,5}} = 43A$$

Hieraan toetsen we de volgende beveiligingen :

$$\text{smeltveiligheid type gl : } I_n \leq \frac{I_{k \min}}{4} = \frac{43A}{4} - I_{n \max} = 10A$$

$$\text{automaat type C : } I_n \leq \frac{I_{k \min}}{8} = \frac{43A}{8} - I_{n \max} = 5A$$

Aangezien $I_{\text{Nom}} = 8,2 \text{ A}$ voldoet de automaat niet ($I_{n \max} = 5A$)

We moeten ons dus beperken tot de smeltzekering van 10A.

Tot slot moeten we nog controleren of de zekering de maximale kortsluitstroom van de transfo nog kan onderbreken.

$$I_{k \max \text{ transfo}} \leq I_{k \max \text{ zekering}}$$

$$\frac{16,4}{11\%} \cdot 100 = 149A \leq I_{k \max \text{ zekering}} (1000A)$$

7. Parallel schakelen van transformatoren

7.1 voorwaarden voor parallel schakelen

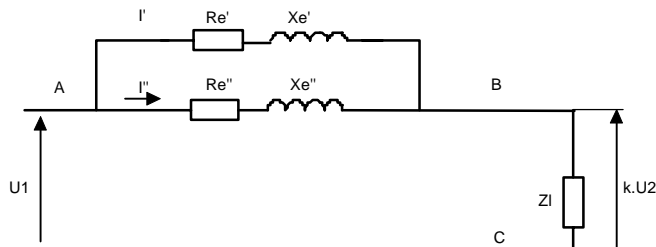
Men zegt dat twee of meer transformatoren parallel werken als ze door hetzelfde net gevoed worden en de secundairen op dezelfde belasting aangesloten zijn. De parallelschakeling moet dus bestaan voor beide wikkelingen.

Bij goede parallelwerking wordt verondersteld dat er geen circulatiestromen vloeien in de onderlinge kring van de secundaire en dat de vermogensstroom zich evenredig met de nominale vermogens verdeelt.

Hiervoor zijn de volgende voorwaarden vereist :

1. Opdat geen circulatiestromen zouden vloeien moeten beide transformatoren dezelfde uitwendige karakteristiek hebben. Dit is praktisch het geval indien de nullast- en de vollastspanningen van de twee transfo's gelijk zijn. De transfo's moeten dus dezelfde nominale spanningen en nauwkeurig dezelfde transformatieverhouding hebben.
2. Opdat de belasting zich evenredig met de nominale vermogens zou verdelen, moeten we dezelfde kortsluitspanning hebben.

Verwaarlozen we in het vereenvoudigd schema X_m en R_v , dan krijgen we voor de parallelschakeling het onderstaande vervangingschema.



Figuur PP vereenvoudigd vervangingschema parallelschakeling

$$U_{AB} = (R_e' + X_e') \cdot I' = (R_e'' + X_e'') \cdot I''$$

$$\text{of: } \frac{I'}{I''} = \frac{Z_e''}{Z_e'}$$

men wenst :

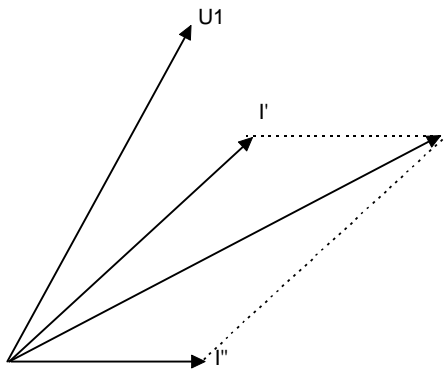
$$\frac{I'}{I''} = \frac{P_s'}{P_s''} = \frac{U_1 \cdot I_{IN}'}{U_1 \cdot I_{IN}''} = \frac{I_{IN}'}{I_{IN}''}$$

dus is :

$$\frac{I_{IN}'}{I_{IN}''} = \frac{Z_e''}{Z_e'} - Z_e' \cdot I_{IN}'' = Z_e'' \cdot I_{IN}''$$

$$- U_{1korts} = U_{1korts}''$$

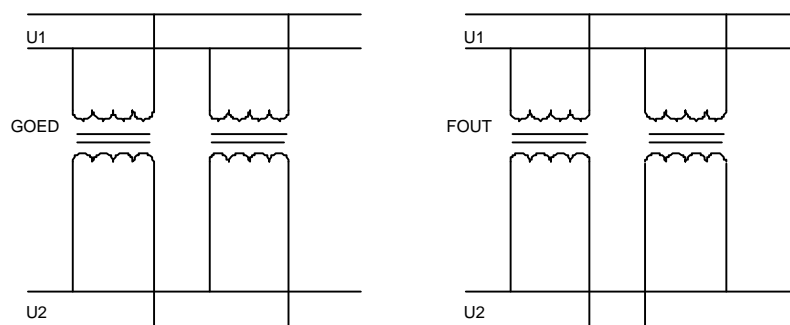
3. Uiteindelijk is ook wenselijk dat de verschillende equivalente impedanties hetzelfde argument hebben. Hierdoor zullen de verliezen door joule-effekt tot een minimum herleid worden.



De stromen I' en I'' geven samen de belastingsstroom I . Uit het vectordiagram is duidelijk dat voor een bepaalde stroom I de deelstromen elk minimaal zijn als ze in elkaars verlegde liggen. Aangezien over de impedanties Z_e' en Z_e'' dezelfde spanning staat kunnen de stromen slechts eenzelfde argument hebben als ook de impedanties datzelfde argument hebben. In die situatie zijn dus de stromen, en bijgevolg ook de ohmse verliezen minimaal.

Figuur QQ som van stromen bij parallelschakeling

4. Er moet een juiste onderlinge verbinding zijn tussen de secundairen, zodat de secundaire spanningen



Figuur RR verbindingen parallelle transfo's

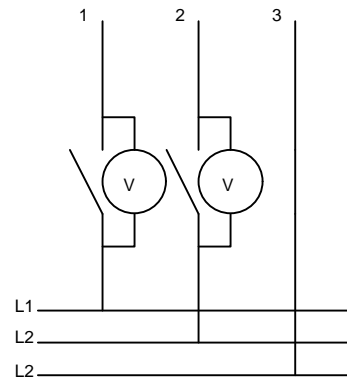
aan elkaar tegengesteld zijn in hun gesloten kring.

voor driefasige transformatoren komen daar nog twee voorwaarden bij, namelijk :

5. De transformatoren moeten tot eenzelfde groep behoren, zoniet zou men na het verbinden van hun primaire op hetzelfde net aan de secundaire zijden voortdurend spanningen krijgen met eenzelfde absolute waarde, maar vectorieel verschillend, waardoor grote circulatiestromen ontstaan.

6. De fasevolgorde van de verschillende transformatoren moet dezelfde zijn. Een foute verbinding zou immers tussen 2 fasen een kortsluiting ontstaan zoals in punt 4.

Om deze juiste fasevolgorde te controleren kan men bij de te schakelen transfo reeds één fase doorverbinden. Als men met een Voltmeter geen spanning meet aan de andere fasen is de fasevolgorde in orde. Anders moet men twee draden verwisselen.



7.2 voorbeeld

Figuur SS controle fasevolgorde

Twee transformatoren $S_{1N} = 100\text{kVA}$ en $S_{2N} = 200\text{ kVA}$ worden parallel geschakeld op $U_1 = 10\text{ kV}$. De transformatieverhouding is dezelfde voor beide transfo's. De procentuele kortsluitspanningen zijn respectievelijk $U_{k1} = 4\%$ en $U_{k2} = 5\%$.

- Bereken het door de tweede transfo geleverde schijnbaar vermogen als de eerste transfo nominaal belast wordt. Hoe groot is dan het totaal geleverde schijnbaar vermogen ?
- Bereken het totaal geleverde schijnbaar vermogen als de tweede transfo nominaal belast is.

oplossing :

a.

$$\text{Tranfo1 volbelast } S_1 = 100\text{kVA} = S_{1N}$$

$$\frac{S_1}{S_{1N}} \cdot U_{k1} (\%) = \frac{S_2}{S_{2N}} \cdot U_{k2} (\%)$$

$$S_2 = \frac{S_1}{S_{1N}} \cdot U_{k1} \cdot \frac{S_{2N}}{U_{k2}}$$

$$= \frac{100}{100} \cdot 4 \cdot \frac{200}{5}$$

$$= 160\text{ kVA}$$

$$S_{tot} = S_1 + S_2 = 100 + 160 = 260\text{kVA}$$

besluit : bij nominaal belaste transfo 1 is transfo 2 onderbelast

b.

$$\text{Tranfo2 volbelast } S_2 = 200\text{kVA} = S_{2N}$$

$$S_1 = \frac{S_2}{S_{2N}} \cdot U_{k2} \cdot \frac{S_{1N}}{U_{k1}}$$

$$= \frac{200}{200} \cdot 5 \cdot \frac{100}{4}$$

$$= 125\text{ kVA}$$

$$S_{tot} = S_1 + S_2 = 200 + 125 = 325\text{kVA}$$

besluit : bij nominaal belaste transfo 2 is transfo 1 overbelast

8. Oefeningen

1. De primaire wikkeling van een 1-f-transfo voor 10kV/220V 50Hz bevat 2000 windingen. Bereken N_2 , k , ϕ_{Max} .
($N_2 = 44$ windingen, $k = 45,45$, $\phi_{Max} = 22,5$ mWb.)
2. De doorsnede van de ijzeren kern van een 1-f-transfo is 40 cm^2 bij een vulfactor van 90%. Indien $B_{Max} = 1,2 \text{ Wb/m}^2$, bereken dan N_1 en N_2 voor een spanningsverhouding 660/380V 50 Hz.
($N_1 = 688$ en $N_2 = 396$ windingen)
3. De globale doorsnede van de kern van een 1-f-transfo is 35 cm^2 bij een vulfactor van 90%. De maximale inductie bedraagt $1,46 \text{ Wb/m}^2$.
Bereken het aantal windingen van primaire en secundaire voor de volgende drie gevallen :
 - 1) $U_1 = 380\text{V}$, $U_2 = 220 \text{ V}$, 50 Hz
 - 2) $U_1 = 380\text{V}$, $U_2 = 220 \text{ V}$, 60 Hz
 - 3) $U_1 = 380\text{V}$, $U_2 = 220 \text{ V}$, 50 Hz met $A=70\text{cm}^2$ bij vulfactor 90%.
(opl. 1) $N_1=372$, $N_2 = 215$ windingen)
2) $N_1=310$, $N_2 = 180$ windingen)
3) $N_1=186$, $N_2 = 108$ windingen)
4. Een 1-f-transfo van 2 MVA levert volgende meetgegevens :
 $U_1 = 24\text{kV}$, $U_2 = 3,2\text{kV}$, $P_{o1} = 6,25\text{kW}$, $R_1 = 1033\Omega$, $I_o = 2,25\%$ van I_{1N} .
Bereken : I_o , I_v , I_m en P_{FE} .
($I_o = 1,88 \text{ A}$, $I_v = 0,26 \text{ A}$, $I_m = 1,86 \text{ A}$ en $P_{FE} = 2618 \text{ W}$.)
5. Een eenfasige transfo van 100 kVA heeft een spanningsverhouding van 6000V naar 240V. De kortsluitproef geeft $U_{k1} = 200\text{V}$, $I_{k1} = 16\text{A}$, $P_{k1} = 1500\text{W}$.
De nullastproef geeft $U_{2o} = 240\text{V}$, $I_{2o} = 12,5\text{A}$, $P_{2o} = 400\text{W}$.
Bereken de nominale stromen I_1 en I_2 . Stel een volledig equivalent schema op.
($I_{1N} = 16,67\text{A}$, $I_{2N} = 410\text{A}$, $R_1 = 2,93\Omega$, $R_2 = 4,7\text{m}\Omega$, $X_1 = 5,5\Omega$, $X_2 = 8,8\text{m}\Omega$, $R_v = 144\Omega$, $X_m = 19,37\Omega$.)
6. Een transfo van 2kVA is primair gewikkeld voor 220V, secundair voor 440V.
De nullastproef geeft : $U_{1o} = 220\text{V}$, $I_{1o} = 0,28\text{A}$, $P_{1o} = 32\text{W}$.
De kortsluitproef geeft $U_{k1} = 22\text{V}$, $I_{k1} = 9,09\text{A}$, $I_{k2} = 4,545\text{A}$, $P_{k1} = 48\text{W}$.
Bepaal R_v , X_m , R_e , X_e en P_{FE} .
($R_v = 1512,5\Omega$, $X_m = 432,43\Omega$, $R_e = 0,58\Omega$, $X_e = 2,35\Omega$ en $P_{FE} = 31,96\text{W}$.)

7. Volgende gegevens zijn bekend van een eenfasige transfo :
 De kern bevat $N_1 = 2080$ en $N_2 = 89$ windingen. De kerndoorsnede $A = 169 \text{ cm}^2$ en $R_m = 89422 \text{ A/Wb}$.
 De nullaststroom $I_0 = 0,4 \text{ A}$ bij $\cos\varphi_0 = 0,31$.
 Bereken de magnetische inductie B_{Max} en de spanningen E_1 en E_2 .
 ($B_{\text{Max}} = 0,74 \text{ Wb/m}^2$, $E_1 = 5773\text{V}$, $E_2 = 247\text{V}$)
8. De nullaststroom van een eenfasige transfo is 1A bij $\cos\varphi_0 = 0,3$. Het aantal windingen secundair is de helft van het aantal windingen primair. Hoe groot is de primaire stroom als de secundaire inductief belast wordt met $I_2 = 20\text{A}$ en ($I_1 = 10,83\text{A}$)
9. Een eenfasige transfo heeft een nominaal schijnbaar vermogen van 5 kVA . De primaire spanning $U_1 = 200\text{V}$, en $U_2 = 40\text{V}$. De nullaststroom $I_0 = 2\text{A}$ bij $\cos\varphi_0 = 0,25$.
 Indien $P_J = P_{\text{FE}}$ bereken dan :
 1) rendement bij vollast en $\cos\varphi_2 = 0,8$.
 2) rendement bij halfast en $\cos\varphi_2 = 1$.
 ($\eta_{100\%} = 95,2\%$ en $\eta_{50\%} = 92,5\%$)
10. Een 10 kVA eenfasige transformator heeft primair een spanning van 2000 V en secundair 400V .
 De procentuele kortsluitspanning bedraagt 4% .
 Bereken de kortsluitspanning, kortsluitstroom en kortsluitvermogen. ($U_k = 80\text{V}$, $I_{k1N} = 125\text{A}$, $I_{k2N} = 625 \text{ A}$, $P_{kN} = 250 \text{ kVA}$ (nominaal !))
11. Een 80 kVA eenfasige transfo heeft $N_1 = 400$ en $N_2 = 80$ windingen. De ohmse weerstanden bedragen $R_1 = 0,38\Omega$ en $R_2 = 0,01\Omega$. De lekreactantie $X_{L1} = 1,1\Omega$
 De primaire spanning bedraagt 2000 V , De ijzerverliezen mogen verwaarloosd worden.
 Bereken :
 1) de kortsluitimpedantie Z_k .
 2) de koper verliezen
 3) de procentuele kortsluitspanning U_k (%)
 4) de nominale kortsluitstromen I_{k1N} en I_{k2N}
 ($Z_k = 2\Omega$, $P_J = 1008 \text{ W}$, $U_k = 4\%$, $I_{k1N} = 1000\text{A}$, $I_{k2N} = 5000\text{A}$)
12. Een driefasen transfo van 60 kVA $10 \text{ kV}/380\text{V}$ (Ster-ster) heeft $R_1 = 1,5\Omega$ per fase en $R_2 = 0,02\Omega$ per fase. De ijzerverliezen bedragen 900 W .
 Bereken :
 η als $P_2 = 60\text{kW}$ bij $\cos\varphi_2 = 1$
 η als $P_2 = 6\text{kW}$ bij $\cos\varphi_2 = 1$
 η als $S_2 = 60\text{kVA}$ bij $\cos\varphi_2 = 0,8$
 η_{dag} als $S_2 = 60\text{kW}$ bij $\cos\varphi_2 = 0,8$ gedurende 5 u per dag, terwijl de transfo $24\text{u}/24\text{u}$ aangesloten blijft op het hoogspanningsnet.
 ($\eta_1 = 97,6\%$, $\eta_2 = 87\%$, $\eta_3 = 97,06\%$, $\eta_{\text{dag}} = 90,78\%$)

13. Een driefasentransfo van 80 kVA is in ster-ster geschakeld op spanningen 10kV/380V.
De faseweerstanden bedragen respectievelijk $R_1 = 1,3\Omega$ en $R_2 = 0,015\Omega$.
De nullastproef wordt uitgevoerd met $U_{o2} = 220V$, $I_{o2} = 10A$ en $P_{o2} = 510 W$ (bij een kortgesloten A-meter)
De spanningsspoel van de Wattmeter heeft een weerstand van 12600Ω .
Bereken : η als $P_2 = 80kW$ bij $\cos\phi_2 = 1$
 η als $S_2 = 35kVA$ bij $\cos\phi_2 = 0,8$
 η_{dag} als $S_2 = 70kW$ bij $\cos\phi_2 = 0,8$ gedurende 8 u per dag, terwijl de transfo 24u/24u aangesloten blijft op het hoogspanningsnet.
($\eta_1 = 97,2\%$, $\eta_2 = 94,4\%$, $\eta_{dag} = 91\%$)
14. Een driefasentransfo met $\eta=98,3\%$ is in driehoek-ster geschakeld op spanningen 10kV/380V 50Hz.
De transfo levert vermogen aan een driefasige motor 380V, 50 Hz,
 $P_n = 18,5kW$, $\cos\phi = 0,85$, $\eta=88\%$.
Bereken de primaire en secundaire lijnstromen van deze transfo.
($I_{l1} = 1,45A$ en $I_{l2} = 37,58A$)
15. Een driehoek-zigzag transformator moet voorzien zijn voor 10kV/380V. Het aantal primaire wikkelingen is 2000. Bereken het aantal wikkelingen per secundaire deelwikkeling of spoel.
($N_2' = 26$ windingen)
16. Een driefasentransfo heeft op iedere kern drie dezelfde wikkelingen liggen. Een eerste doet dienst als primaire, in ster op 380V aangesloten. De twee andere wikkelingen worden in zigzag geschakeld. Bereken de secundaire lijnspanning.
($U_{l2} = 660V$)
17. Een driefasen transformator Driehoek-Ster levert 50kVA bij $U_{l2} = 380V$. De wikkerverhouding $(N_1/N_2) = 15$.
Bepaal : - Het aantal windingen van een primaire spoel.
- de primaire en secundaire vollaststromen.
- de primaire lijnspanning.
indien $N_2 = 57$ windingen.
($N_1 = 855$ windingen, $I_1 = 8,75A$, $I_2 = 75,97A$, $U_{l1} = 3300V$)
18. De primaire van een autotransfo wordt aangesloten op een spanning van 380V. Er vloeit een primaire stroom van 27A bij een secundaire spanning van 220V. Bereken : de secundaire stroom I_2 , het schijnbaar vermogen S_1 en S_2 , het getransformeerd schijnbaar vermogen S' van de transfo.
($I_2 = 46,64A$, $S_1 = S_2 = 10,26kVA$, $S' = 4,32kVA$)

19. Een autotransformator met 1980 windingen is aangesloten op een spanning van 600V. De secundaire spanning wordt afgetakt over 726 windingen. Het rendement van deze transfo is 96% bij een secundaire ohmse belasting van 110Ω .

Bereken :
de primaire stroom I_1
de secundaire stroom I_2
het primair schijnbaar vermogen S_1
het secundair schijnbaar vermogen S_2
($I_1 = 0,764A$, $I_2 = 2A$, $S_1 = 440VA$, $S_2 = 458VA$)

20. Een autotransformator heeft een effectief schijnbaar vermogen van 2kVA. De primaire spanning is 450V, het aantal primaire windingen bedraagt 900. De secundaire spanning is 220V, en het rendement bedraagt 97%.

Bereken :
het aantal secundaire windingen N_2
de primaire stroom I_1
de secundaire stroom I_2
het totaal schijnbaar vermogen S_1
($N_2 = 440$, $I_1 = 8,96A$, $I_2 = 17,78A$, $S_1 = 4,034 kVA$)

9.BIBLIOGRAFIE

Elektrische Maschinen : Einführung in die Grundlagen; SEQUENZ, Heinrich; Springer-Verlag 1971

Electrotechnik Fachstufe 1 und 2 Energietechnik, Fachzeichnen; HORNEMANN E., Hubscher H., Klaue J., Schierack K.; Westermann Braunschweig 1984

Electrotechnik; ZASTROW,

Electrical Installations handbook part 1 : power supply and distribution systems; SEIP, Gunter G.; Siemens (Munche) & Wiley (Chichester) 1987

Kursus Transformatoren; PEETERS René; KIJL

Gedifferentieerd leerpakket Elektriciteit 4; STANDAERT K., VAN DER BORGT F.; Standaard Educatieve uitgeverij Antwerpen 1987

Katalogus Elektrisch Installatiematerieel; LEGRAND Belgie NV, Diegem 1991

met speciale dank aan EREA NV, Wijnegem voor diverse informatie.

Jan Elsen, 1993-1995-1996