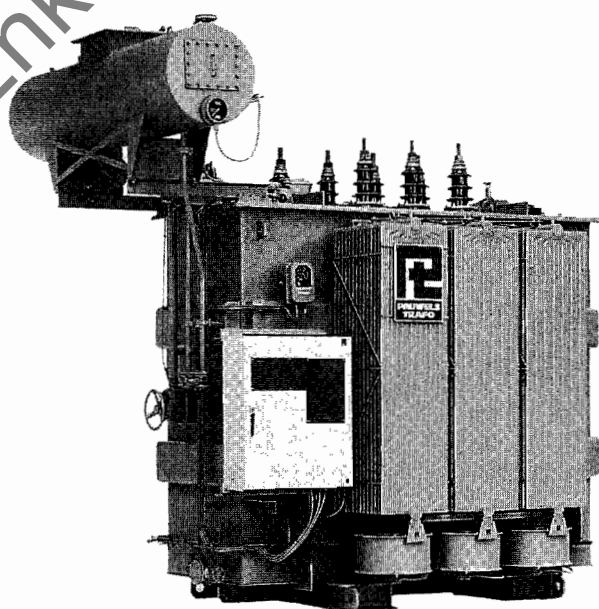


Transformatoren

Wegwijzer

Bij het genereren van spanningen in de ankerwikkelingen van de synchrone generatoren in elektrische energiecentrales kan men rechtstreeks geen willekeurig hoge spanningen (tot 25 000 V) genereren. Voor het transport van energie moet men de stroomsterkte in de transportleidingen zo laag mogelijk houden, om het spannings- en vermogenverlies in de leidingen te beperken. Men moet de gegenereerde spanning van de synchrone generator via transformatoren opdrijven tot zeer hoge spanningen (70 kV – 380 kV – 550 kV). De elektrische energie wordt dan onder zeer hoge spanningen, via luchtleidingen, over grote afstanden naar transformatoronderstations getransporteerd. In de transformatoronderstations worden deze hoge spanningen naar lagere waarden getransformeerd (bv. van 70 kV naar 10 kV). Vanuit de transformatoronderstations wordt de energie naar belangrijke verbruikspunten gevoerd waar de spanning in onderstations door nettransformatoren getransformeerd wordt naar 220/380 V. Onder de spanning van 220/380 V wordt de elektrische energie aan de kleine verbruikers geleverd. Voor andere toepassingen zijn soms lage en zeer lage spanningen vereist. Deze zeer lage spanningen worden weer door tussenschakeling van transformatoren verkregen, bv. veiligheidstransformatoren, beltransformatoren, lastransformatoren enz. Tegenwoordig worden ook heel wat gelijkspanningen vereist. Die worden dan verkregen door wisselspanning, afkomstig van een aanpassingstransformator, gelijk te richten. Een andere uitvoering zijn meettransformatoren die vooral in de hoogspanningstechniek gebruikt worden om de meetkring te scheiden van de hoge spanningen (spanningsmeettransformatoren). Ook worden ze gebruikt om zeer hoge stromen te transformeren naar lagere, met gewone meettoestellen meetbare stroomsterkten (stroommeettransformatoren).

Uit wat voorafgaat, blijkt duidelijk de grote omvang van het toepassingsgebied van de transformatoren in de elektrotechniek. De onderstaande afbeelding betreft een transformator met een vermogen van 20 MVA (15,4/6,3 kV).



2.1 Bepaling

Doelstelling

- Omschrijven wat een transformator is.

Een transformator is een statisch toestel dat dient om elektrische wisselstroomenergie met een gegeven spanningswaarde om te zetten in elektrische wisselstroomenergie met een andere spanningswaarde en dat bij gelijkblijvende frequentie.

2.2 Principiële samenstelling en werking van een eenfasetransformator

Doelstelling

- De principiële samenstelling en werking van een eenfasetransformator beschrijven.

2.2.1 Principiële samenstelling

Een eenfasetransformator is samengesteld uit een gelamelleerde ferromagnetische keten, voorzien van twee elektrisch volledig gescheiden windingen. In fig. 70 wordt deze keten voorgesteld.

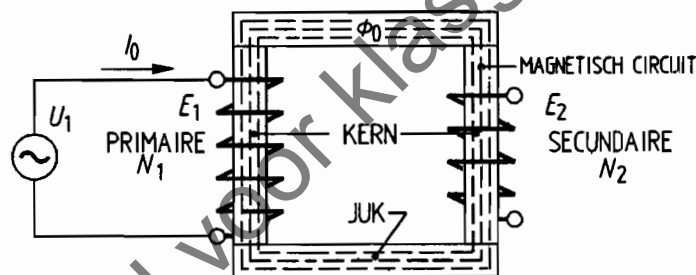


fig. 70

De ene winding, de z.g. *primaire winding*, wordt aangesloten op het aanwezige net. De andere winding, de *secundaire winding*, voedt de gebruiker(s). De transformator*kern* is dat deel van de magnetische keten waarrond de beide spoelen aangebracht zijn. Het deel dat de transformator*kern* verbindt en de magnetische keten sluit, noemt men het *juk*.

2.2.2 Principiële werking

Door het aanleggen van een wisselspanning U_1 ontstaat in de primaire winding een stroom I_0 die in de magnetische keten een wisselflux (ϕ_0) zal opwekken die zich sluit door de secundaire winding. Beide windingen omvatten een identieke flux ϕ_0 zodat de geïnduceerde spanning ($E = \frac{\Delta\phi_0}{\Delta t}$) per winding, voor de primaire en de secundaire gelijk is.

$$\text{Dus: } E_1 = N_1 \frac{\Delta\phi_0}{\Delta t} \quad \text{en} \quad N_2 \frac{\Delta\phi_0}{\Delta t}$$

Door het aantal windingen van de secundaire winding (N_2) te wijzigen, kan men de grootte van de secundair geïnduceerde spanning E_2 naar willekeur aanpassen.

2.3 Werking van de ideale transformator

We beschouwen de werking bij respectievelijk

- nullast,
- belasting.

2.3.1 De ideale transformator bij nullast

Doelstellingen

- De begrippen nullast en ideale transformator toelichten.
- De principewerking van de ideale transformator bij nullast verklaren.
- Uit de principewerking het vectordiagram van een transformator bij nullast afleiden.
- De transformatieverhouding afleiden.

Begrippen

Nullast betekent dat er geen verbruiker aangesloten is op de secundaire wikkeling. Bij een ideale transformator veronderstellen we:

- dat de primaire en secundaire spoel geen gelijkstroomweerstand hebben ($R_1 = R_2 = 0$); er zijn dus geen spannings- of vermogenverliezen;
- dat er geen ijzerverliezen optreden, m.a.w. de flux is in fase met de stroomsterkte;
- dat de primaire en secundaire spoel geen lekflux vertonen, d.w.z. beide wikkelingen omvatten een gelijke flux ϕ_0 .

Principewerking

Sluiten we de primaire wikkeling van de transformator aan op een sinusvormige wisselspanning U_1 (fig. 71), dan vormt deze onbelaste transformator een zuivere inductantie L aangesloten op wisselspanning (fig. 72). De opgenomen stroom I_0 zal 90° naïjlen op U_1 , en in fase zijn met de flux ϕ_0 in de magnetische keten (fig. 73).

Zowel in de primaire als in de secundaire wikkelingen worden spanningen E_1 en E_2 geïnduceerd die tegengesteld gericht zijn aan de ontstaansoorzaak (in dit geval de aangelegde spanning U_1).

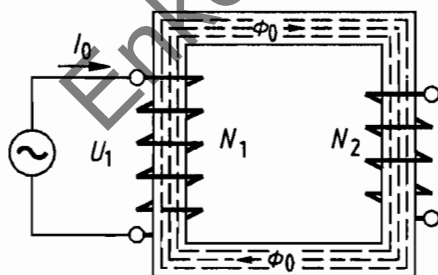


fig. 71

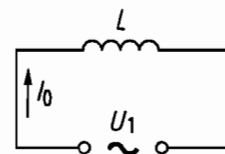


fig. 72

In fig. 73 is het vectordiagram weergegeven.

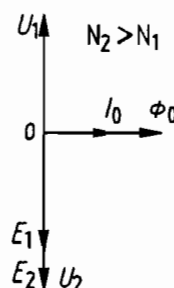


fig. 73

Voor de primaire spoel is de geïnduceerde spanning E_1 een *zelfinductiespanning*:

$$E_1 = N_1 \cdot \frac{\Delta\phi_0}{\Delta t}$$

Voor de secundaire spoel is de geïnduceerde spanning E_2 een spanning van wederzijdse inductie:

$$E_2 = N_2 \cdot \frac{\Delta\phi_0}{\Delta t}$$

Omdat de omsloten fluxverandering $\left(\frac{\Delta\phi_0}{\Delta t}\right)$ voor beide spoelen identiek is, kan men schrijven in absolute waarden:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 \cdot \frac{\Delta\phi_0}{\Delta t}}{N_2 \cdot \frac{\Delta\phi_0}{\Delta t}}$$

of $\boxed{\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}}$ of $\boxed{\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2}}$

m.a.w. de geïnduceerde spanning per winding is aan primaire en secundaire zijde gelijk. Aangezien de gelijkstroomweerstand, de ijzerverliezen en de lekflux als niet-bestaand beschouwd worden, is de zelfinductiespanning van de primaire wikkeling (E_1) gelijk en tegengesteld aan de aangelegde spanning ($U_1 = -E_1$). In het vectordiagram van fig. 73 is E_2 iets groter voorgesteld dan E_1 ; dit kan enkel wijzen op een groter aantal windingen van de secundaire t.o.v. de primaire spoel ($N_2 > N_1$).

Transformatieverhouding k

Omdat $U_1 = -E_1 = -N_1 \cdot \frac{\Delta\phi_0}{\Delta t}$

en $U_2 = E_2 = N_2 \cdot \frac{\Delta\phi_0}{\Delta t}$ (onbelast)

kunnen we schrijven:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{-E_1}{E_2} = - \frac{-N_1 \cdot \frac{\Delta\phi_0}{\Delta t}}{N_2 \cdot \frac{\Delta\phi_0}{\Delta t}} = \frac{-N_1}{N_2}$$

Het minteken betekent dat er een faseverschuiving van 180° is tussen U_1 en U_2 .

We schrijven in absolute waarden:

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

met k : transformatieverhouding

Bij een ideale transformator verhouden de spanningen $\frac{U_1}{U_2}$ zich zoals de *windingsverhouding* ($\frac{N_1}{N_2}$). Deze constante verhouding noemen we de *transformatieverhouding k*.

2.3.2 De ideale transformator bij belasting

Doelstellingen

- De principewerking van de ideale transformator bij belasting verklaren en de transformatieverhouding afleiden.
- Uit de principewerking het vectordiagram van een belaste ideale transformator afleiden.

Principewerking

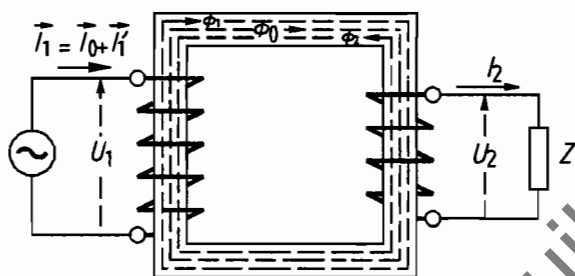


fig. 74

Door het aansluiten van een verbruiker (impedantie) vloeit er een stroom I_2 door de secundaire spoel (fig. 74). Deze stroom veroorzaakt een flux (ϕ_2) in de magnetische keten die rechtstreeks evenredig is met het aantal ampèrewindingen van de secundaire spoel $N_2 \cdot I_2$ en gericht is tegen de heersende flux ϕ_0 .

Bij een belaste, ideale transformator blijft bij constante primaire spanning, frequentie en aantal windingen de flux ϕ_0 in de keten constant.

Dit volgt uit:

$$U_1 = -E_1 = -N_1 \cdot \frac{\Delta \phi_0}{\Delta t} = 4,44 \phi_0 \cdot N \cdot f$$

Aangezien de flux ϕ_2 de oorspronkelijke flux ϕ_0 tegenwerkt, zal een supplementaire stroom I'_1 uit het net getrokken worden (E_1 heeft de neiging om te dalen omdat ϕ_0 dreigt te verminderen) die een flux ϕ_1 opwekt, evenredig met $N_1 I'_1$, gelijk en tegengesteld gericht aan ϕ_2 . Op deze manier blijft de flux in de kern constant op de waarde ϕ_0 bij nullast.

Vermits $\phi_1 = \phi_2$ mogen we stellen:

$$N_2 I_2 = N_1 I'_1$$

of

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I'_1}$$

Omwille van de ideale situatie is ook bij belasting $-E_1 = U_1$ en $E_2 = U_2$ en kunnen we schrijven in absolute waarden:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I'_1} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Vectorieel wordt dit voorgesteld zoals in fig. 75.

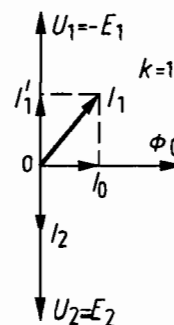


fig. 75

Toelichting

Doelstellingen

- De werkelijke waarde van de primaire stroom in verband brengen met de secundaire stroom.
- De verhouding tussen primair en secundair vermogen toelichten.

De primaire stroom

$\vec{I}_1 = \vec{I}_1' + \vec{I}_0$ is voorgesteld in het vectordiagram van fig. 75. We stellen vast dat de faseverschuiving tussen I_1 en I_2 geen 180° is; in werkelijkheid zal dat ook zo zijn. Aangezien over het algemeen I_0 klein is t.o.v. de belastingsstroom I_1' , is deze afwijking dikwijls te verwaarlozen.

Vermogens

Uit de betrekkingen

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{en} \quad \frac{I_1'}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

volgt door vermenigvuldiging van de overeenkomstige leden van de gelijkheden

$$\frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{I_1'}{I_2} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 1$$

dat $U_1 \cdot I_1' = U_2 \cdot I_2$ of $S_1 = S_2$

m.a.w. het geleverde secundaire schijnbare vermogen S_2 wordt supplementair uit het primair aangesloten net getrokken. Beide zijn dus aan elkaar gelijk.

2.4 Werking van de niet-ideale eenfasetransformator

2.4.1. De niet-ideale transformator bij nullast

Doelstelling

- Het vectordiagram van een niet-ideale transformator bij nullast toelichten.

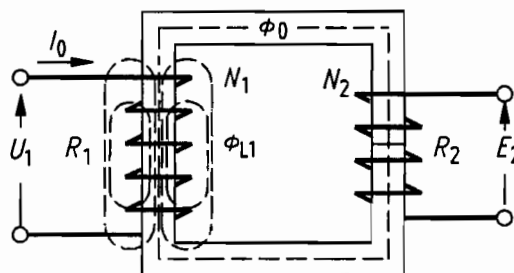


fig. 76

In tegenstelling tot de ideale transformator

- hebben de spoelen een gelijkstroomweerstand (R_1 en R_2) die een spannings- en vermogenverlies veroorzaakt bij het vloeien van een stroom;
- ontstaat rond de primaire spoel een lekflux ϕ_{L1} , zodra er stroom vloeit. Niet alle veldlijnen van de primaire sluiten zich m.a.w. doorheen de ferromagnetische keten;

- zijn er ijzerverliezen. Die zijn als constant te beschouwen aangezien de flux in de magnetische keten ϕ_0 (belast of onbelast) ongeveer constant blijft.

Sluiten we de primaire wikkeling aan op spanning U_1 , dan zal er een stroom I_0 vloeien die φ_0° (bijna 90°) najlt op de aangelegde spanning U_1 (fig. 77).

Deze stroom I_0 veroorzaakt een magnetische flux die sinusvormig verloopt en die zich splitst in twee deelfluxen:

- een (hoofd)flux ϕ_0 die gemeenschappelijk is voor de primaire en secundaire wikkeling en die omwille van de ijzerverliezen een kleine hoek α° najlt op de stroom I_0 ;
- een lekflux ϕ_{L1} die zich hoofdzakelijk via de lucht rond de primaire wikkeling sluit en in fase is met de stroom I_0 .

De flux ϕ_0 induceert in de primaire en de secundaire wikkelingen de spanningen E_1 en E_2 die allebei 90° najlen op ϕ_0 . De lekflux ϕ_{L1} induceert op zijn beurt een spanning E_{L1} die op zijn beurt 90° najlt op ϕ_{L1} . De aangelegde primaire spanning U_1 zal bijgevolg gelijk zijn aan de vectoriële som van de ohmse spanningsval ($R_1 I_0$) en beide voornoemde inductiespanningen E_1 en E_{L1} .

Of
$$\vec{U}_1 = (-\vec{E}_1) + (-\vec{E}_{L1}) + \vec{R}_1 \vec{I}_0$$

Uit wat voorafgaat, kunnen we stellen dat de lekflux een inductieve spanningsval zal veroorzaken. Om de invloed van de lekflux praktisch te verrekenen voeren we een fictieve reactantie $X_{L1} = \omega L_1$ in die een inductieve spanningsval $X_{L1} \cdot I_0$ veroorzaakt.

De bovenstaande vergelijking wordt dan: $\vec{U}_1 = (-\vec{E}_1) + \vec{R}_1 \vec{I}_0 + \vec{X}_{L1} \cdot \vec{I}_0$

Vectorieel is dit voorgesteld in fig. 77.

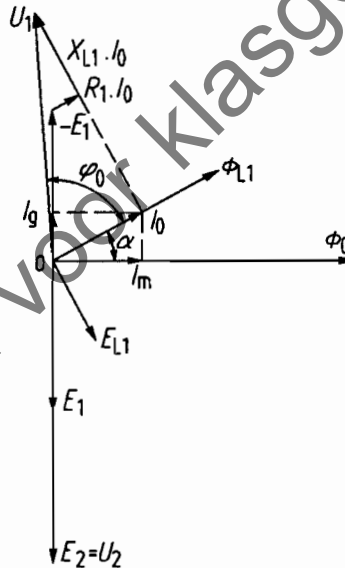


fig. 77

Toelichting

Doelstellingen

- Uit het vectordiagram de transformatieverhouding k van een niet-ideale transformator bij nullast afleiden.
- Het opgenomen vermogen van een transformator bij nullast toelichten.
- Het gebruik van de vector $-E_1$ verduidelijken.

Transformatieverhouding k

Uit het vectordiagram van fig. 77 blijkt dat U_1 niet meer juist gelijk is aan en geen 180° meer verschoven is t.o.v. $-E_1$. De transformatieverhouding k , zoals gesteld bij de ideale transformator, wijkt hier dus een beetje af.

We kunnen praktisch schrijven:

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

Vermogens van een transformator bij nullast

We vereenvoudigen de berekeningen door te stellen dat U samenvalt (in fase is) met $-E$ (fig. 78). Dit heeft op het resultaat een verwaarloosbare invloed en vereenvoudigt de berekeningen.

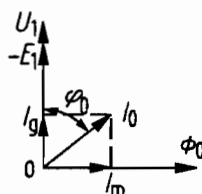


fig. 78

We ontbinden I_0 in twee loodrechte componenten (fig. 78).

Component I_m : in fase met ϕ_0 . Deze component houdt de gemeenschappelijk omsloten flux in stand en neemt een reactief vermogen $Q_0 = U_1 I_0 \sin \varphi_0$ uit het net.

Component I_g : in fase met E_1 (U_1). Deze component neemt een actief vermogen $P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0$ uit het net. Dit actieve vermogen is bepalend voor de ijzerverliezen (magnetische verliezen) en het joule-effect (koperverliezen) $R_1 I_0^2$ in de primaire wikkeling.

Vector $-E_1$

Om de waarde van de primaire spanningen vectorieel eenvoudig af te leiden, tekenen we de vector $-E_1$ gelijk in absolute waarde, maar tegengesteld van zin aan de geïnduceerde spanning E_1 . Dit verandert niets aan de nauwkeurigheid waarmee faseverschuivingen en absolute spanningswaarden worden bepaald.

2.4.2 De niet-ideale transformator bij belasting

Doelstellingen

- Het vectordiagram van de niet-ideale transformator bij belasting opbouwen.
- Uit het vectordiagram de transformatieverhouding k van een niet-ideale transformator bij belasting opbouwen.

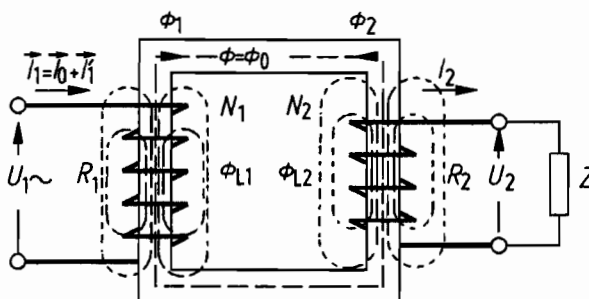


fig. 79

Principewerking

Als gevolg van het aansluiten van een impedantie Z vloeit er secundair een stroom I_2 . Die wekt een flux ϕ_2 op (evenredig met $N_2 I_2$) die de bestaande flux tegenwerkt. Aangezien de flux in de kern bij nullast en belasting gelijk blijft (U_1 en f zijn constant), zal een primaire belastingscomponent I_1' een flux ϕ_1 opwekken (evenredig met $N_1 I_1'$), die gelijk en tegengesteld is aan ϕ_2 . De primaire stroom is dan $\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + \vec{I}_1'$.

Door de belastingsstroom I_2 ontstaat op zijn beurt aan de secundaire spoel een lekflux ϕ_{L2} die een inductieve spanningsval $X_{L2} \cdot I_2$ veroorzaakt. De gelijkstroomweerstand R_2 veroorzaakt daarbuiten een ohmse spanningsval $R_2 I_2$.

Opstelling van het vectordiagram

Voor de duidelijkheid van het vectordiagram stellen we $k = 1$.

- 1 We vertrekken met de gekende gegevens van de belasting en tekenen U_2 met I_2 die φ_2° naait op U_2 (fig. 80).
- 2 De stroom I_2 veroorzaakt in de secundaire wikkeling een ohmse ($R_2 I_2$) en een inductieve ($X_{L2} I_2$) spanningsval.

$$\text{Nu is } \vec{E}_2 = \vec{U}_2 + \vec{R}_2 I_2 + \vec{X}_{L2} I_2$$

- 3 Vermits $\frac{E_1}{E_2} = k = 1$ is $E_1 = E_2$.

We tekenen $-E_1$ gelijk en tegengesteld aan E_2 .

De flux ϕ_0 ijlt 90° voor op E_1 en wordt veroorzaakt door de magnetisatiestroom I_m (reactieve component van I_0) die in fase is met ϕ_0 .

De actieve component I_g van I_0 is in fase met $-E_1$ en dekt de ijzerverliezen (magnetische verliezen).

- 4 $\vec{I}_0 = \vec{I}_m + \vec{I}_g$
- 5 De primaire stroom $\vec{I}_1 = \vec{I}_1' + \vec{I}_0$ en $I_1' = I_2$ ($k = 1$), maar in tegenfase.
- 6 $\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + \vec{R}_1 I_1 + \vec{X}_{L1} I_1$

In fig. 80 is het vectordiagram van een *inductieve belasting* getekend. Een gelijkaardige redenering geldt als de belasting ohms of capacitef is.

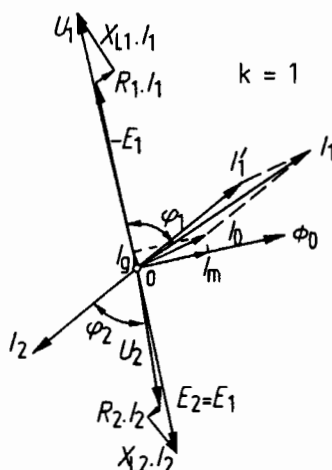


fig. 80

In fig. 81 is het vectordiagram van een *capacitieve belasting* voorgesteld. We stellen vast, net zoals bij de synchrone generator, dat de secundaire klemspanning groter kan worden dan de geïnduceerde spanning E_2 in de secundaire wikkeling.

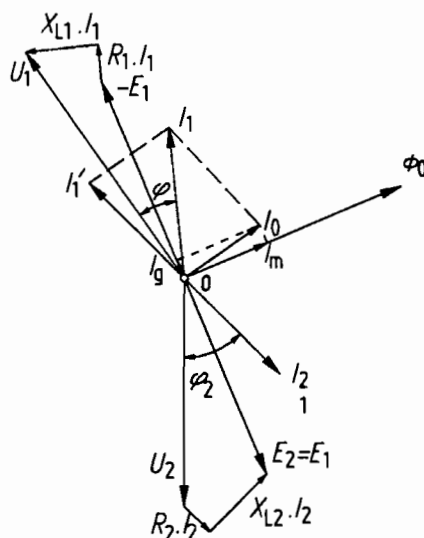


fig. 81

Toelichting

Transformatieverhouding k

Uit het vectordiagram van fig. 80 blijkt duidelijk dat U_1 en U_2 geen 180° verschoven zijn en dat ze niet meer gelijk zijn aan respectievelijk E_1 en E_2 . Hetzelfde kan gesteld worden als we de primaire en secundaire stroomsterkten I_1 en I_2 beschouwen.

We kunnen dit praktisch als volgt schrijven: $k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \cong \frac{U_1}{U_2} \cong \frac{I_2}{I_1}$

Vectordiagram

De vectordiagrammen geven een vertekend beeld van de werkelijkheid omdat:

- de spanningsvallen t.a.v. de primaire en secundaire spanningen te groot getekend zijn;
- de nullaststroom I_0 t.o.v. de belastingsstroom eveneens te groot getekend is.

2.5 Opbouw van de equivalente keten van een transformator

Doelstelling

- Uitgaande van het elektrische schema van een transformator een elektrisch vervangschema (equivalente kring) opbouwen.

2.5.1 Principeschema

Het elektrische schema van een transformator kan worden voorgesteld zoals in fig. 82. Elektrisch zijn de primaire en secundaire kring gescheiden.

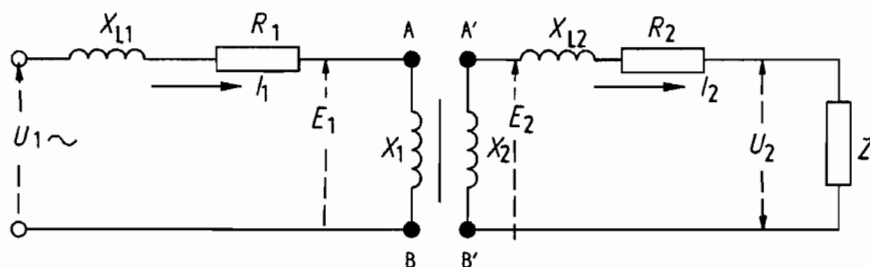


fig. 82

R_1 en R_2 : gelijkstroomweerstand van primaire en secundaire wikkeling
 X_{L1} en X_{L2} : inductieve lekreactanties ten gevolge van de lekfluxen ϕ_{L1} en ϕ_{L2}
 X_1 en X_2 : hoofdreactanties van primaire en secundaire wikkeling

2.5.2 Opbouw van de equivalente kring

Het opstellen van een nauwkeurig vectordiagram van een transformator en het vectorieel bepalen van ongekende grootheden vergt veel tijd en is daarenboven niet nauwkeurig. Om dat te verhelpen stellen we een elektrisch schema (equivalente kring) op dat toelaat de ongekende grootheden door berekeningen af te leiden. Deze 'fictieve' kring zal zodanig samengesteld zijn dat alle berekende grootheden zoals bv. deelspanningen, deelstromen en faseverschuivingen met de werkelijkheid moeten overeenkomen.

In het principeschema van de reële transformator van fig. 82 merken we twee elektrisch van elkaar gescheiden delen. Om op onze vertrouwde manier berekeningen uit te voeren is het nodig dat we beide kringen versmelten tot één elektrische kring. We noemen dit verder de equivalente kring.

Stel dat $k = 1$

In dit geval is $E_1 = E_2$. Punten A en A', B en B' bevinden zich dan op dezelfde potentiaal. Er verandert dus niets aan de stroomverdeling in de keten als A met A' en B met B' verbonden wordt. De twee hoofdspoelen X_1 en X_2 , die de gemeenschappelijke flux omsluiten en de spanningen E_1 en E_2 induceren, vervangen we door één enkele spoel, nl. X_m . Deze X_m neemt de stroom I_m op die zorgt voor de gemeenschappelijk omsloten flux ϕ_0 . X_m neemt enkel reactief vermogen op (I_m ijlt 90° na op $-E_1$).

De ijzerverliezen worden vertegenwoordigd door een gelijkstroomweerstand R_g die een stroomsterkte I_g opneemt (in fase met E_1). De weerstand is zodanig gekozen dat het jouleverlies $R_g \cdot I_g^2$ dat hij veroorzaakt even groot is als het ijzerverlies in de ferromagnetische keten. We krijgen nu het volgende elektrische schema:

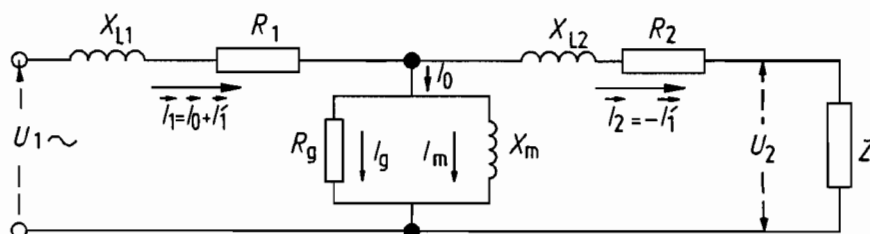


fig. 83

Stel dat $k \neq 1$

Wanneer we de doorverbinding A - A' en B - B' hier uitvoeren, dan leggen we aan de secundaire wikkeling een spanning E_1 aan die gelijk is aan $k \cdot E_2$ ($E_1 = k E_2$).

Opdat de reële vergelijking

$$\vec{E}_2 = \vec{U}_2 + \vec{R}_2 I_2 + \vec{X}_{L2} I_2 \quad (1)$$

dan nog zou blijven bestaan, moet ook het tweede lid van de vergelijking met k vermenigvuldigd worden.

We krijgen dan

$$k \vec{E}_2 = k \vec{U}_2 + k \vec{R}_2 I_2 + k \vec{X}_{L2} I_2 \quad (2)$$

Vermits de transformatieverhouding $k \neq 1$ is de stroomsterkte $I_1 \neq I_2$.

Ten gevolge van de secundair aangesloten belasting zal een supplementaire stroomsterkte I'_1 uit het net getrokken worden gelijk aan $I'_1 = \frac{I_2}{k}$.

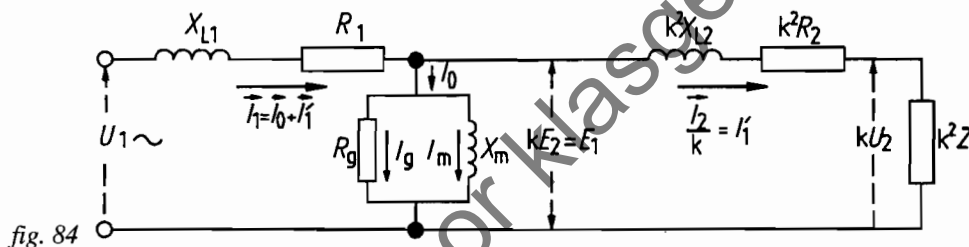
Met $I_2 = k \cdot I'_1$ wordt de vergelijking (2):

$$k \cdot \vec{E}_2 = k \cdot \vec{U}_2 + k \cdot \vec{R}_2 \cdot k \cdot \vec{I}'_1 + k \cdot \vec{X}_{L2} \cdot k \cdot \vec{I}'_1$$

$$\text{of} \quad k \cdot \vec{E}_2 = k \cdot \vec{U}_2 + k^2 \cdot \vec{R}_2 \cdot \vec{I}'_1 + k^2 \cdot \vec{X}_{L2} \cdot \vec{I}'_1 \quad (3)$$

We stellen vast dat de oorspronkelijke evenwichtsvergelijking (1) niet gewijzigd is. De vergelijking (3) is identiek en werd enkel anders geschreven.

Het schema dat overeenstemt met de vergelijking (3) noemen we de equivalente keten; die is weergegeven in fig. 84.



Een mogelijke interpretatie die we ter verduidelijking nog toevoegen, stelt dat we met een k -maal hogere spanning aan de belasting (het omgezette vermogen is constant) een k -maal kleinere stroomsterkte veroorzaken. Deze stelling kunnen we enkel handhaven als daartegenover staat dat de impedanties vermenigvuldigd worden met k^2 .

Om bij voltooide berekeningen met behulp van dit schema terug te keren tot de werkelijke grootte van de elementen, volstaat het de verkregen resultaten van de primaire keten te behouden en die van de secundaire keten om te rekenen met de coëfficiënten k of k^2 .

2.5.3 Bepalen van de elementen van de equivalente keten

Doelstelling

- Met behulp van de nullast- en kortsluitproef de samenstellende elementen van de equivalente keten bepalen.

De elementen van de equivalente keten kunnen worden bepaald door het uitvoeren van een nullast- en een kortsluitproef.

a Nullastproef (onbelaste transformator)

Met de nullastproef is het mogelijk de parallelelementen (R_g en X_m) te bepalen. Omdat de flux ϕ_0 bij nullast en bij belasting ongewijzigd blijft, zullen ook de ijzerverliezen

constant zijn en kunnen we deze laatste bepalen door de transformator op nullast aan te sluiten op de nominale spanning U_1 en frequentie f .

We maken een proefopstelling zoals gegeven in fig. 85.

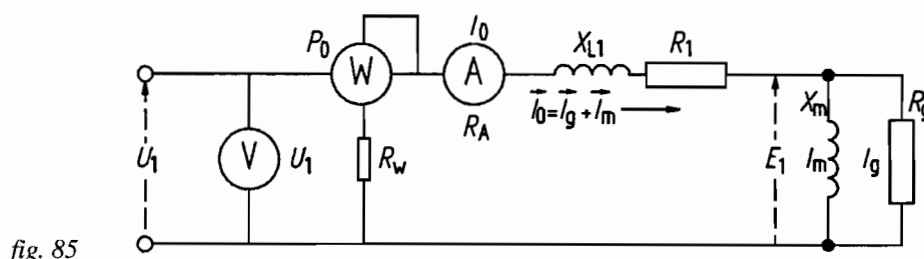


fig. 85

De secundaire elementen worden niet getekend omdat ze geen stroom voeren. Aangezien de nullaststroom I_0 en de elementen R_A , R_1 en X_{L1} klein zijn, verwaarlozen we de primaire spanningsvallen en stellen $U_1 = -E_1$ (fig. 85).

De wattmeter duidt op een kleine fout na $\left(R_1 I_0^2 + R_A I_0^2 + \frac{U^2}{R_w}\right)$ de ijzerverliezen P_{Fe}

aan. Voor nauwkeuriger metingen zou men nog correcties kunnen toepassen.

De aanduiding van de wattmeter:

$$P_0 = U_1 \cdot I_0 \cos \varphi_0$$

Daaruit volgt:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 \cdot I_0} \Rightarrow \varphi_0$$

$$I_g = I_0 \cos \varphi_0 \Rightarrow R_g = \frac{U_1}{I_g} = \frac{P_0}{I_0^2} \quad (\Omega)$$

$$I_m = I_0 \sin \varphi_0 \Rightarrow X_m = \frac{U_1}{I_m} \quad (\Omega)$$

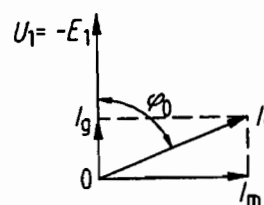


fig. 86

b Kortsluitproef

De meetopstelling is hier als volgt:

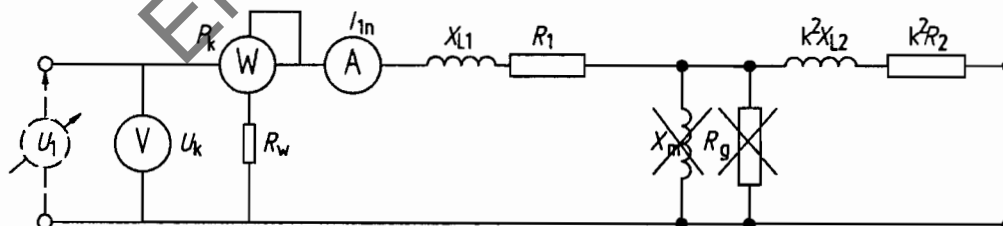


fig. 87

We sluiten de secundaire wikkeling van de transformator kort (fig. 87) en regelen de primaire spanning, bv. via een regelbare spanningsbron U_1 , totdat de A-meter de nominale primaire stroom I_{1n} aanduidt. De secundaire stroom bereikt dan eveneens zijn nominale waarde I_{2n} . Deze stroomwaarde bij verlaagde spanning wordt snel bereikt, aangezien enkel de serie-elementen van de equivalenten keten de stroom beperken.

De elementen R_g en X_m hebben t.o.v. $k^2 R_2$ en $k^2 X_{L2}$ een zeer grote waarde en staan bovendien op verlaagde spanning aangesloten, zodat de opgenomen stroom door de elementen R_g en X_m verwaarloosbaar klein wordt.

De kortsluitspanning U_k is klein ($\pm 5\%$ van U_{1n}).

Voor de gemeten kortsluitspanning geldt de formule:

$$U_k = I_{1n} \sqrt{(R_1 + k^2 R_2)^2 + (X_{L1} + k^2 X_{L2})^2}$$

terwijl voor het opgenomen vermogen P_k , aangeduid door de W-meter, geldt:

$$P_k = I_{1n}^2 (R_1 + k^2 R_2)$$

Daaruit volgt dat:

$$R_1 + k^2 R_2 = \frac{P_k}{I_{1n}^2}$$

$$\text{en} \quad X_{L1} + k^2 X_{L2} = \sqrt{\frac{U_k^2}{I_{1n}^2} - (R_1 + k^2 R_2)^2}$$

We kennen nu wel de som van de gelijkstroom- en lekinductieve weerstanden. Om de afzonderlijke elementen R_1 , $k^2 R_2$, X_{L1} en $k^2 X_{L2}$ te bepalen gaan we als volgt te werk:

$$R_1 = k^2 R_2 = \frac{R_1 + k^2 R_2}{2} \Rightarrow R_2 = \frac{R_1}{k^2}$$

$$X_{L1} = k^2 X_{L2} = \frac{X_{L1} + k^2 X_{L2}}{2} \Rightarrow X_{L2} = \frac{X_{L1}}{k^2}$$

Deze berekeningswijze is niet exact. In de meeste gevallen voldoet deze benaderende berekeningswijze echter wel. De kortsluitproef stelt ons daarenboven in staat de joule-verliezen te bepalen die optreden bij vollast van de transformator.

2.6 Uitwendige karakteristiek van de eenfasetransformator

Doelstelling

- In de onderscheiden belastingsgevallen (ohms, inductief en capacitef) de uitwendige karakteristieken van een transformator tekenen en aan de hand van vectordiagrammen het verloop verklaren.

Deze karakteristiek geeft het verband aan tussen de secundaire klemspanning U_2 en de secundaire stroom I_2 . De aangelegde spanning U_1 , de frequentie f en $\cos \varphi$ van de belasting moeten constant blijven.

Uit het vectordiagram (fig. 80) hebben we al kunnen vaststellen dat de spanning U_2 bij een inductieve belasting verandert naarmate de stroom I_2 , maar ook de verschuivingshoek φ_2 verandert. De verandering van de secundaire spanning hangt dus niet alleen af van de grootte van de belasting, maar ook van de faseverschuiving.

Zo veroorzaakt een inductieve belasting altijd een verlaging van U_2 ; deze verlaging neemt toe naarmate I_2 meer nabijlt op U_2 .

Is de belasting voldoende capacitef, dan kunnen we uit het vectordiagram afleiden dat U_2 groter kan zijn dan de secundaire geïnduceerde spanning E_2

In fig. 88 is het verloop van de uitwendige karakteristieken in de onderscheiden belastinggevallen voorgesteld.

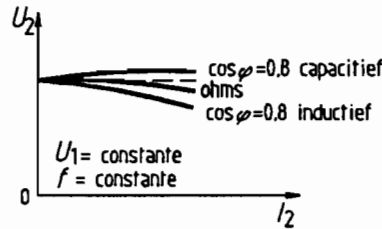


fig. 88

Bij nominale belasting (inductief) treedt er bij vermogentransformatoren een spanningsdaling op van 5 à 8 %. Deze spanningsdaling kunnen we compenseren door extra windingen bij te schakelen.

2.7 Rendement van eenfasetransformatoren

Doelstellingen

- De formule voor het bepalen van het rendement van een eenfasetransformator opstellen.
- De onderscheiden verliezen van een transformator toelichten.
- Het verloop van het rendement overeenkomstig de belasting tekenen en het verloop verklaren.
- De invloed van de arbeidsfactor op het verloop van de rendementskromme illustreren.

Zoals bij alle machines is het rendement de verhouding tussen het nuttige en het totaal toegevoerde actieve vermogen.

$$\eta = \frac{P_n}{P_t} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_v}$$

met

P_v : de som van de verliezen

$$P_v = P_{Cu} + P_{Fe}$$

$P_{Cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$: het jouleverlies in de primaire en secundaire wikkeling (zie kortsluitproef)

$P_{Fe} = U_1 I_0 \cos \varphi_0 - I_0^2 R_1$: het ijzerverlies in de magnetische keten (zie nullastproef)

De ijzerverliezen zijn evenredig met de frequentie (f) en het kwadraat van de magnetische inductie (B_m). Aangezien deze grootheden bij een transformator constant zijn bij alle belastingen, mogen we stellen dat de ijzerverliezen ook constant zijn. Het jouleverlies daarentegen neemt toe met de primaire en secundaire stroom in het kwadraat. De jouleverliezen zijn dus sterk afhankelijk van de belasting.

Het verloop van de rendementskrommen is weergegeven in fig. 89.

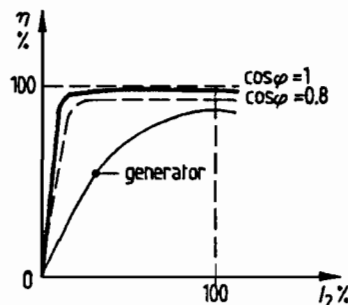


fig. 89

We merken dat, in vergelijking met de wisselstroomgenerator, de grafiek veel vlugger stijgt en nadien een vlakker verloop kent. Zoals bij wisselstroomgeneratoren wordt het rendement eveneens beïnvloed door de arbeidsfactor van de verbruiker. Hoe hoger $\cos \varphi$, hoe beter het rendement.

Toelichting

Doelstellingen

- De invloed van toegevoegde apparatuur op het rendement illustreren.
- De voorwaarde voor maximumrendement toelichten.
- Het belang van de kortsluitimpedantie toelichten en de waarde bepalen.
- Het begrip *ingangsimpedantie* toelichten.
- Het begrip *verliescijfer van transformatorblik* toelichten.

Grote vermogenstransformatoren

Bij grote transformatoren is meestal een reeks toegevoegde apparaten aanwezig zoals een ventilator, een circulatiepomp voor koeling e.d.m. De vermogens, opgeslorpt door deze apparaten, moeten bij het berekenen van het rendement van de transformator mee verrekend worden.

Maximumrendement

Men kan aantonen dat het rendement van een transformator maximaal wordt bij een belasting waarbij de koperverliezen gelijk worden aan de ijzerverliezen. Moderne vermogenstransformatoren hebben een ijzerverlies van 0,1 tot 1 % van het nuttig vermogen, terwijl het joule-effect 0,25 à 2 % van het nuttig vermogen bedraagt. Bij het streven naar maximumvermogen ($P_{Fe} = P_{Cu}$) zal de meest economische verhouding tussen maximumrendement en constructiekosten moeten worden gekozen.

Kortsluitimpedantie Z_k

Uit de kortsluitproef (par. 2.5.3) weten we dat

$$U_k = I_{ln} \sqrt{(R_1 + k^2 R_2)^2 + (X_{L1} + k^2 X_{L2})^2}$$

Het enige element dat de stroomsterkte bij kortsluiting beperkt, is de kortsluitimpedantie

$$Z_k = \sqrt{(R_1 + k^2 R_2)^2 + (X_{L1} + k^2 X_{L2})^2}$$

We vinden deze waarde uit de kortsluitproef:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{ln}}$$

We stellen vast dat de lekfluxen bij kortsluiting een dempende werking hebben. Dit heeft als voordeel dat de transformator afgeschakeld kan worden voor er beschadiging optreedt.

Ingangsimpedantie Z_i

Dit is de totale impedantie van de transformator voor het voedend net, met inbegrip van de belastingsimpedantie Z_b . Uit het elektrische schema leiden we zijn waarde af:

$$Z_i = \sqrt{(R_1 + k^2 R_2 + k^2 R_b)^2 + (X_{L1} + k^2 X_{L2} + k^2 X_b)^2}$$

met

$$\vec{Z}_b = \vec{R}_b + j\vec{X}_b$$

Verliescijfer van transformatorblik

Bij de gebruikelijke inductiewaarden van industriële transformatoren ($1,3$ à $1,8 \text{ Wb/m}^2$) met netfrequentie 50 Hz en bij een omgevingstemperatuur van 20°C , schommelt het verliescijfer tussen $0,4$ en $0,6 \text{ W/kg}$.

2.8 Driefasetransformatoren

Doelstellingen

- Het verband tussen de eenfase- en de driefasetransformator toelichten, wat de principewerking en de constructie betreft.
- De mogelijke schakelingen van driefasetransformatoren beschrijven.
- De schakelingen van de genormaliseerde schakelgroepen toelichten.
- De betekenis van het klokgetal verduidelijken.
- Uit de klemaanduidingen de schakelgroep afleiden.

Principewerking

De principes die gelden voor de eenfasetransformator zijn integraal van toepassing op de driefasetransformator, met dien verstande dat al de grootheden per fase moeten worden beschouwd.

Een driefasetransformator kan worden opgebouwd met drie identieke eenfasetransformatoren (fig. 90), ofwel in een systeem met een gemeenschappelijke magnetische keten (fig. 91). De eenfasige uitvoering wordt vooral toegepast bij zeer grote vermogens (goedkopere reserve-eenheid).

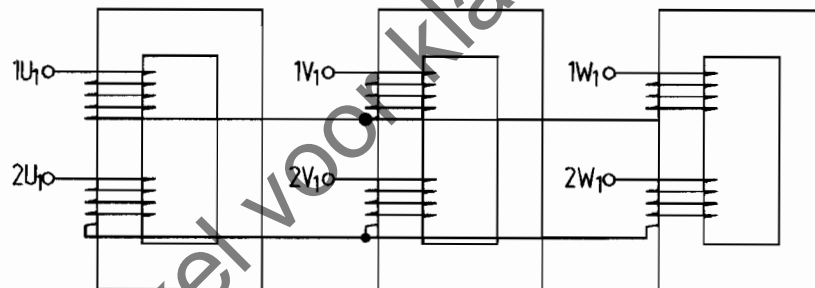


fig. 90

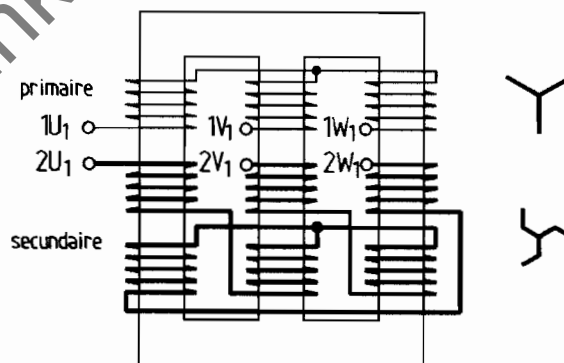


fig. 91

2.8.1 Schakelen van driefasetransformatoren

a Mogelijke schakelingen

Zowel de hoogspannings- als laagspanningswikkeling kunnen in driehoek (D) of in ster (Y) geschakeld worden.

Bij nettransformatoren schakelt men de secundaire ook in z.g. *zigzagschakeling*. Bij de zigzagschakeling bestaat elke secundaire wikkeling uit twee gelijke deelwikkelingen die op twee verschillende kernen zijn geplaatst (fig. 92).

Schematisch stellen we de zigzagschakeling voor zoals in fig. 93.

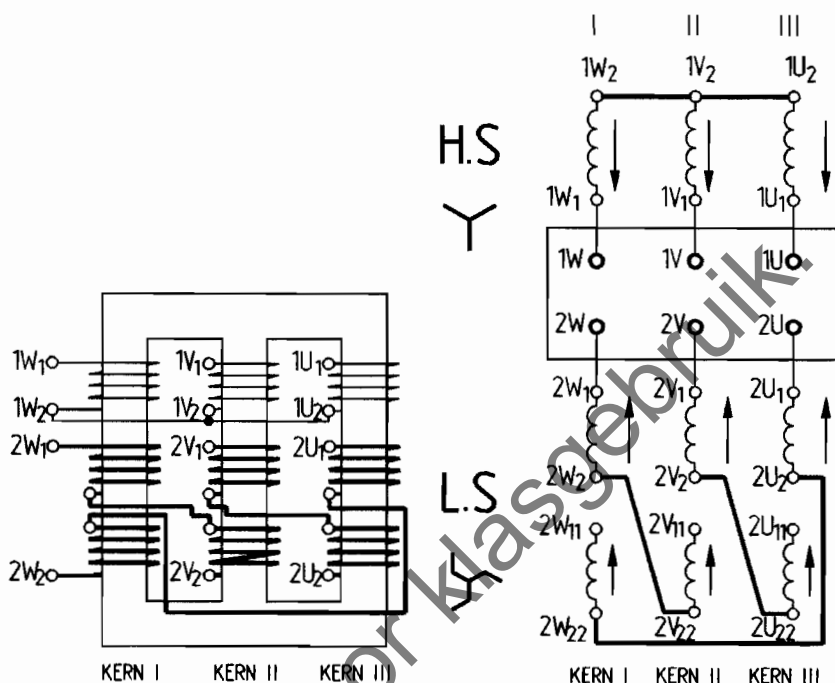


fig. 92

De verbinding tussen beide wikkelhelften is zodanig dat de geïnduceerde spanningen vectorieel afgetrokken worden. Het is in feite een speciale sterschakeling. Deze schakeling biedt voordelen bij driefasennetten met asymmetrische belasting: de belastingsverdeling over de drie secundaire fasen wordt gelijkmatiger verdeeld over de primaire fasen (netzijde).

Welke schakeling de beste is, kan naar de toepassing waarvoor de transformator bestemd is van geval tot geval verschillen. Een nadeel van de zigzagschakeling is dat ze meer koper vergt (ca. 15 %), m.a.w. dat ze grotere jouleverliezen meebrengt en dus duurder is. Om deze redenen komt de zigzagtransformator minder frequent voor.

b Schakelgroepen

Naar gelang van de schakelverbindingen van de hoog- en laagspanningswikkeling en van de daaruit voortvloeiende faseverschuiving tussen overeenkomstige HS- en LS-spanningen worden de gebruikelijke driefasetransformatoren ingedeeld in vier schakelgroepen. Elk van deze schakelgroepen bevat nog drie schakelingen zodat er twaalf genormaliseerde schakelcombinaties bestaan.

In de tabel (fig. 95) zijn deze twaalf schakelcombinaties schematisch weergegeven. Elke schakeling wordt aangeduid door een hoofdletter D of Y, gevolgd door een kleine letter d, y of z (eventueel ook n) en een cijfer dat men *klokgetal* noemt. De hoofdletter geeft de schakelwijze van de hoogspanningswikkelingen (driehoek of ster) aan. De kleine letter duidt de schakelwijze van de laagspanningswikkelingen (driehoek, ster of zigzag) aan; 'n' duidt op de aanwezigheid van een naar buiten gebracht en bruikbaar secundair sterpunt.

c Klokgetal

Het klokgetal geeft het aantal keren 30° faseverschuiving tussen de HS- en gelijknamige LS-sterspanningsvector.

Voorbeeld: Yz11 geeft aan dat de HS-wikkeling in ster is geschakeld, de LS-wikkeling in zigzag en dat er tussen beide gelijknamige spanningen (primair en secundair) een faseverschuiving is van $11 \times 30^\circ = 330^\circ$.

De *sterspanningsvector* bepalen we door een vector te tekenen die de verbinding vormt tussen het sterpunt (fictief of werkelijk) en het uiteinde van de fasespanningsvector van bv. de eerste fase U . Als het spanningsdiagram een driehoek is, neemt men als fictief sterpunt het middelpunt van de driehoek.

Als men nu de sterspanningsvector van één HS-wikkeling laat samenvallen met de grote wijzer van een klok wanneer die op 12 staat, dan zal de stand van de sterspanningsvector van de overeenkomstige LS-wikkeling de functie van kleine wijzer van de klok vervullen. Het uur dat deze laatste vector dan weergeeft, geeft meteen het *klokgetal* weer. De waarde van de faseverschuiving tussen HS en LS vinden we door het klokgetal te vermenigvuldigen met 30° . In het voorbeeld is dit $11 \times 30^\circ = 330^\circ$.

De voorstelling van fig. 94 geeft een extra dimensie aan het begrip klokgetal.

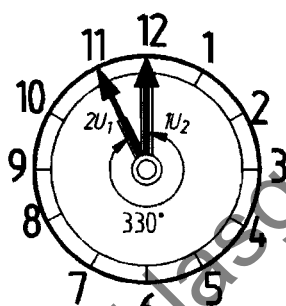


fig. 94

d Genormaliseerde schakelingen

Voor de genormaliseerde schakelingen komen enkel de klokgetallen 0 (in fase), 5 (150°), 6 (180°) en 11 (330°) voor. De kennis van dit klokgetal is belangrijk voor het in parallel schakelen van transformatoren: de faseverschuiving tussen overeenkomstige spanningen in de HS- en LS-wikkelingen moet dezelfde zijn. Bij transformatoren met hetzelfde klokgetal is dit het geval, zodat ze in parallel kunnen werken. Soms is het in parallel schakelen van transformatoren met ongelijk klokgetal mogelijk door omwisseling van aansluitingen aan de aansluitklemmen.

In de volgende figuren zijn de genormaliseerde schakelingen in detail voorgesteld. Om nu bij elke schakelgroep de transformatieverhouding en het klokgetal van een driefasetransformator op een systematische manier terug te kunnen vinden, moeten we vooraf enkele afspraken maken:

- 1 Alle wikkelingen hebben dezelfde wikkelzin.
- 2 De ligging van de HS- en LS-wikkelingen op het schakelschema stemt overeen met de ruimtelijke ligging op de transformatorkernen.
- 3 We nemen als positieve fasespanningszin de zin wijzend naar de transformatorklem.
- 4 De hoogspanningswikkeling (HS) wordt aan een rechtsdraaiend spanningsstelsel aangesloten.
- 5 Bij de driehoekschakeling wordt, ter vereenvoudiging, de fictieve sterspanningsfactor getekend. We brengen die in relatie met de grote wijzer voor het bepalen van het klokgetal.

De klemaanduidingen op het klemmenbord geven een beeld van de inwendige verbindingen. Het wikkeleind dat rechtstreeks met een aansluitklem verbonden is, wordt aangegeven op het klemmenbord.

Schakel- groep	Klok- cijfer	SCHAKELING		Schematische voorstelling		Transformatie- verhouding $\frac{U_1}{U_2}$
		H.S.	L.S.	H.S.	L.S.	
I	0					$\frac{N_1}{N_2}$
						$\frac{N_1}{N_2}$
						$\frac{2N_1}{3N_2}$
II	6					$\frac{N_1}{N_2}$
						$\frac{N_1}{N_2}$
						$\frac{2N_1}{3N_2}$
III	5					$\frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$
						$\frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}$
						$\frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$
IV	11					$\frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$
						$\frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}$
						$\frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$

fig. 95

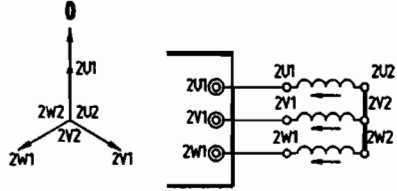
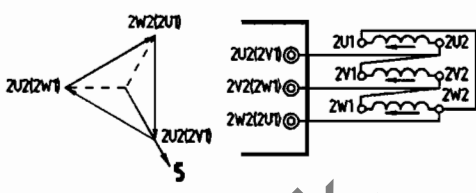
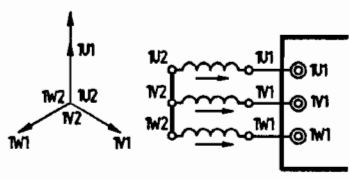
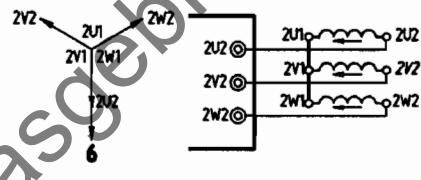
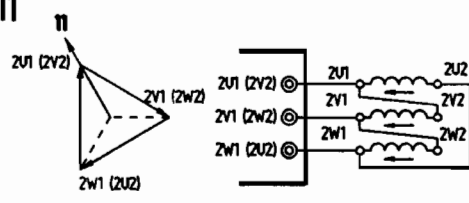
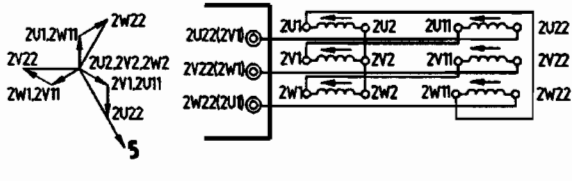
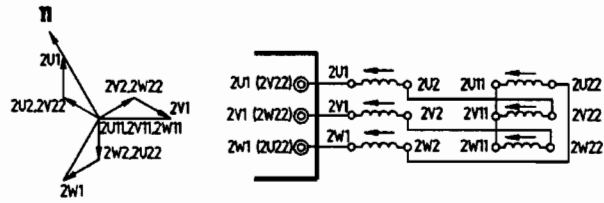
Hoogspanningszijde	Laagspanningszijde
	Y y 0 
	Y d 5 
Sterschakeling Y 	Y y 6 
	Y d 11 
	Y z 5 
	Y z 11 

fig. 96a

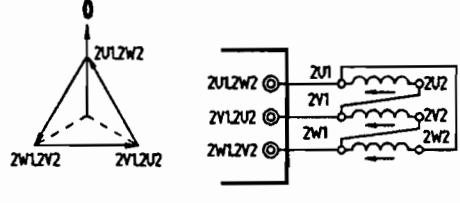
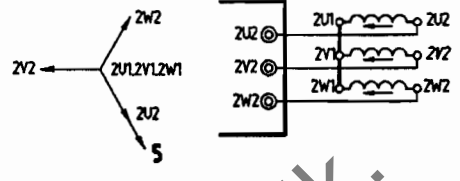
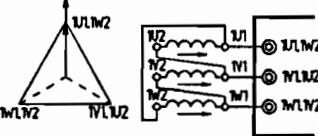
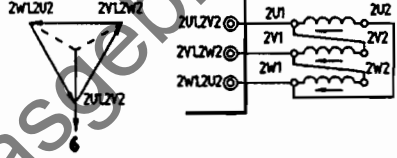
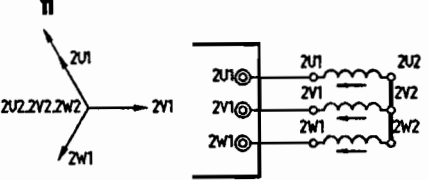
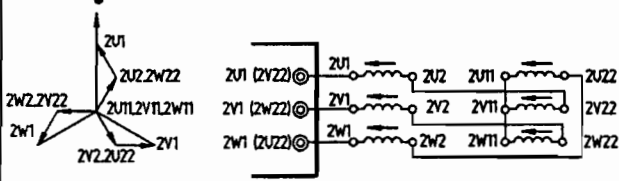
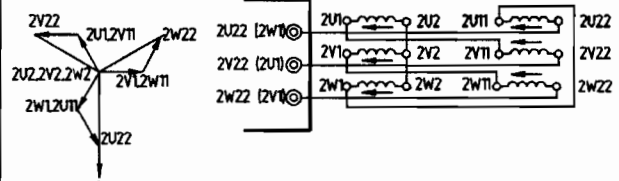
Hoogspanningszijde	Laagspanningszijde
	D d 0 
	D y 5 
Driehoekschakeling D 	D d 6 
	D y 11 
	D z 0 
	D z 6 

fig. 96b

- Bij een sterschakeling staat dus bij elke klem slechts één letter, voorafgegaan door het cijfer 1 of 2. Het cijfer 1 wijst op de HS-wikkeling, het cijfer 2 op de LS-wikkeling.
- Een driehoekschakeling herkennen we aan de twee letterindexen die rechtstreeks met de klem verbonden zijn, eveneens voorafgegaan door het cijfer 1 of 2.
- Bij een zigzagschakeling ligt slechts één wikkelsuiteinde rechtstreeks aan een aansluitklem. Onrechtstreeks is het betreffende wikkelsuiteinde verbonden met een wikkelsuiteinde van een spoel op een andere kern. Het wikkelsuiteinde dat onrechtstreeks verbonden is met de spoel op een andere kern, wordt tussen haakjes bij de betreffende aansluitklem aangegeven.

Om de genormaliseerde schema's (fig. 96a-96b) aan te duiden gaan we uit van de volgende gegevens:

- De wikkeleinden met als eerste cijferindex 1 of 11 geven het begin van de wikkeling aan; de cijfers 2 of 22 geven het einde van de wikkeling aan.
- De cijferindexen 1 zijn altijd naar het klemmenbord gericht.

Uit de gegevens van het klemmenbord, in de zin zoals ze voorgesteld zijn, kunnen altijd de inwendige schakeling en het klokgetal afgeleid worden.

Voorbeeld:

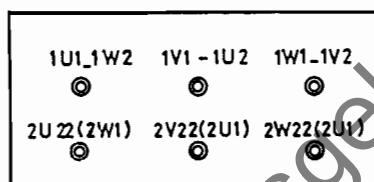


fig. 97

De aanduidingen bij de hoogspanningsklemmen wijzen op een driehoekschakeling. (Twee spoeleinden zijn rechtstreeks in contact met de aansluitklem.) De aanduidingen bij de laagspanningsklemmen wijzen op een zigzagschakeling. (De klem aanduiding tussen haakjes wijst op een indirecte aansluiting van een tweede spoel.)

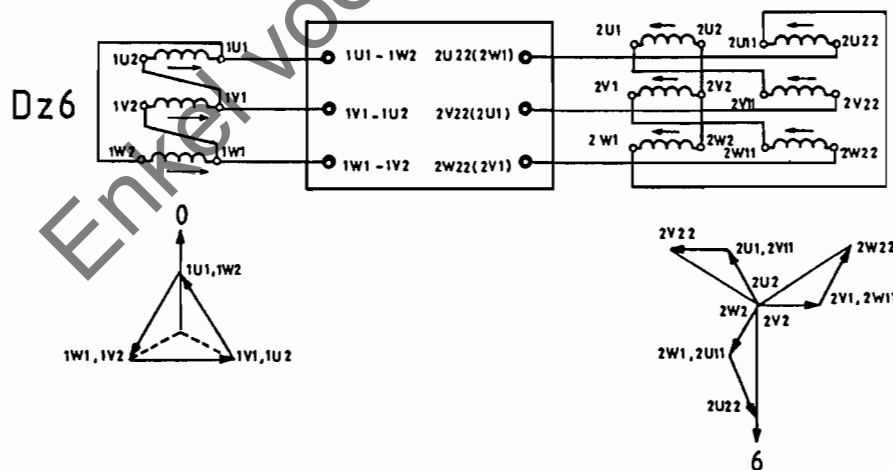


fig. 98

Uit het aansluitschema en de spanningszin leiden we het vectordiagram van fig. 98 af.

2.8.2 Parallel schakelen van transformatoren

Doelstelling

- De voorwaarden voor het parallel schakelen van transformatoren toelichten.

We beschouwen alleen het geval waarbij de transformatoren door hetzelfde net gevoed worden en de secundaire wikkeling op dezelfde belasting aangesloten is.

a Parallel schakelen van eenfasetransformatoren

Voorwaarden

- Dezelfde *transformatieverhouding* k . Dit impliceert ook *gelijkheid van de secundaire nullastspanningen*. Als er een verschil zou bestaan tussen de spanningswaarden van beide in parallel te schakelen transformatoren dan ontstaat een circulatiestroom in de secundaire wikkelingen, zowel bij nullast als bij belasting. Deze circulatiestroom heeft bij transformatoren enkel nadelig effect omwille van het joule-effect dat veroorzaakt wordt.
- Dezelfde *nominale spanning*. Als van twee in parallel geschakelde transformatoren de nominale spanningen niet dezelfde zouden zijn dan zou een van beide transformatoren op een te hoge spanning werken (met een te hoge magnetisatiestroom) of op een te lage spanning, waardoor de transformator slecht benut wordt.
- Dezelfde *kortsluitspanning*. Twee in parallel werkende transformatoren kan men voorstellen door de eenvoudige elektrische keten van fig. 99

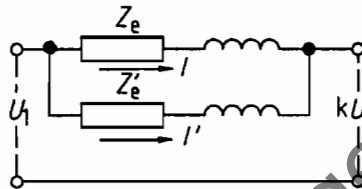


fig. 99

waaruit we afleiden dat

$$U_1 - k \cdot U_2 = Z_e \cdot I = Z'_e \cdot I'$$

De stromen I en I' moeten evenredig zijn met de nominale stromen van de transformatoren. Het product van de equivalente impedantie (Z_e) met de nominale stroomsterkte is immers niets anders dan de kortsluitspanning U_k . M.a.w. de transformatoren zullen in verhouding tot hun nominale stromen belast worden als ze dezelfde kortsluitspanning hebben. Een maximale afwijking van 10 % is in de praktijk toegestaan.

- Hetzelfde *argument* voor de verschillende equivalente impedanties. Als het argument hetzelfde is, zullen de stromen in de transformatoren in fase zijn met de totale stroom. De verliezen door joule-effect in de groep transformatoren zullen dan tot een minimum herleid zijn.
- In de praktijk zal men de verhouding van de vermogens beperken tot 1/3, beter nog tot 1/2.

b Parallel schakelen van driefasetransformatoren

- De voorwaarden voor eenfasetransformatoren blijven gelden.
- De driefasetransformatoren moeten tot *dezelfde schakelgroep* behoren. Is dit niet het geval, dan ontstaan in de secundaire intense circulatiestromen wegens hun faseverschil.
- Er moet *gelijkheid van faseopeenvolging* zijn: verkeerde faseopeenvolging leidt tot inwendige kortsluiting.
- De principes van het in parallel schakelen van synchrone generatoren kunnen hier eveneens toegepast worden.

Toelichting

Mogelijke parallelschakeling

Het is mogelijk transformatoren met klokgetal 5 of 0 in parallel te schakelen met transformatoren met de respectieve klokgetallen 11 en 6. Aangezien de faseverschuivingen telkens 180° bedragen, kunnen we die van fase omkeren door de HS- of LS-wikkelingen om te polen.

2.9 Bijzondere schakelingen

2.9.1 De V-schakeling

Doelstelling

- De werking en het nut van de V-schakeling verklaren.

Naar gelang van de omstandigheden kan men een driefasige spanning op verschillende manieren transformeren naar een andere waarde:

- Bij vierleidernetten (dus met nulleider) kan op elke fase een transformator worden geschakeld.
- Bij drieleidernetten kunnen we de transformatoren schakelen zoals besproken in de voorgaande leerstof (Y-D-zigzag).
- Een andere mogelijkheid die regelmatig voorkomt, is de V-schakeling. Hierbij transformeren we een driefasige spanning met slechts twee transformatoren. (Zie schematische voorstelling in fig. 100.)

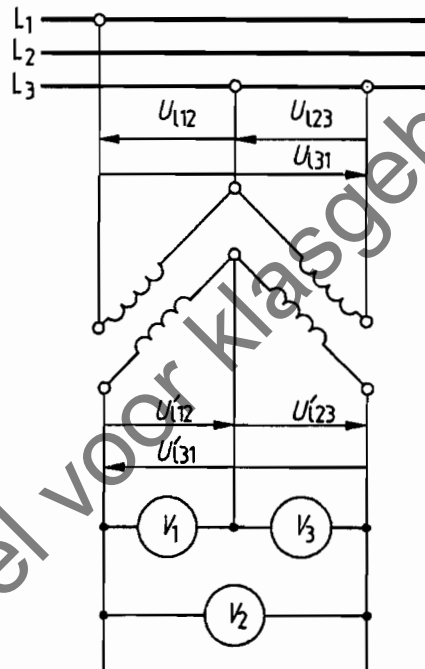


fig. 100

Rekening houdend met de transformatieverhouding van de transformatoren meet V_1 de spanning U_{L12} en V_3 de spanning U_{L23} . Nu is vectorieel

$$\vec{U}'_{L12} + \vec{U}'_{L23} + \vec{U}'_{L31} = 0$$

of
$$\vec{U}'_{L31} = -(\vec{U}'_{L12} + \vec{U}'_{L23})$$

Bijgevolg meet V_2 de spanning U_{L31} .

In vergelijking met een driehoekschakeling van drie transformatoren zal een V-schakeling maar een actief vermogen kunnen omzetten van 57,8 % van het actieve vermogen met drie transformatoren.

De V-schakeling wordt veel toegepast bij spanningsmeettransformatoren, regelbare spaartransformatoren en beveiligingsrelais.

2.9.2 De Scottschakeling

Doelstelling

- De principewerking en het gebruik van de Scottschakeling toelichten.

Doel van de Scottschakeling

De Scottschakeling heeft tot doel een tweefasenet te voeden vanuit een driefasenet of omgekeerd.

Een tweefasenet veronderstelt twee gelijke spanningen ($U_1 = U_2$), die onderling loodrecht op elkaar staan. De faseverschuiving is in dit geval 90° .

Principewerking

Om te komen tot een tweefasenet schakelen we twee eenfasetransformatoren zoals in fig. 101.

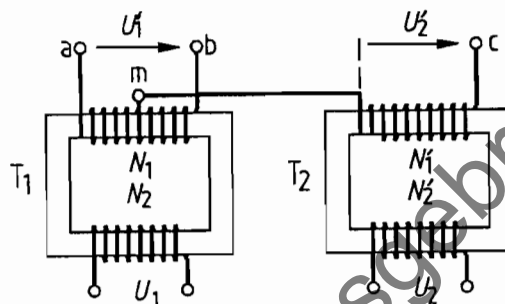


fig. 101

De driefasespanning sluiten we aan op de punten a , b en c . In het vectordiagram van fig. 102 stellen de drie zijden van de gelijkzijdige driehoek de drie lijnspanningen van het driefasenet voor.

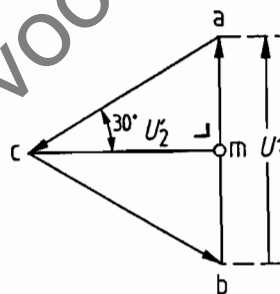


fig. 102

Tussen de aansluitpunten c en m (zie ook fig. 101) vinden we de spanning

$$U'_2 = U_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Deze spanning U'_2 , samen met de spanning U'_1 , vormt een tweefasesysteem van twee *ongelijke spanningen* die onderling 90° verschoven zijn.

Aangezien de twee spanningen van een tweefasesysteem onderling even groot moeten zijn, is het nodig op de *transformatieverhouding* van beide transformatoren in te spelen. De waarden van de getransformeerde secundaire spanningen bedragen

$$U_1 = U'_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad \text{en} \quad U_2 = U'_2 \cdot \frac{N'_2}{N'_1} \quad \text{of} \quad U_2 = U'_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{N'_2}{N'_1}$$

Vermits U_1 gelijk moet zijn aan U_2 moet ook

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{N'_2}{N'_1}$$

Het aantal windingen van beide transformatoren moet nu zodanig gekozen worden dat aan de bovenstaande gelijkheid voldaan is.

Nemen we bv. $N_2 = N'_2$, dan moet het primaire aantal windingen van T_2 gelijk zijn aan

$$N'_1 = N_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Toepassingsgebied

De Scottschakeling wordt gebruikt voor het voeden van tweefase-inductiemotoren met een omschakelbaar aantal polen.

2.10 Speciale transformatoren en transformatorschakelingen

2.10.1 De spaartransformator of autotransformator

Doelstelling

- De principewerking van de spaartransformator verduidelijken en het toepassingsgebied omschrijven.

Zoals blijkt uit het prinsipeschema van fig. 103 is bij de eenfasetransformator de laagspanningswikkeling een deel van de hoogspanningswikkeling, m.a.w. eenzelfde wikkeling kan terzelfder tijd de rol vervullen van primaire en secundaire wikkeling.

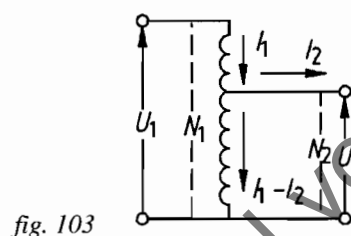


fig. 103

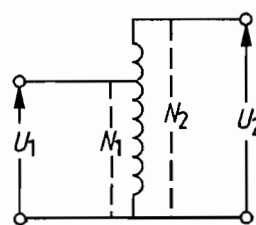


fig. 104

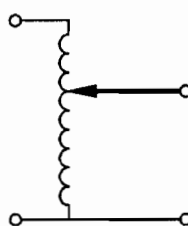


fig. 105

Men legt de netspanning U_1 aan de wikkeling met N_1 windingen en de secundaire spanning takken we af op N_2 windingen. Omdat in elke winding dezelfde spanning wordt geïnduceerd, is de spanningsverdeling over de wikkelingen uniform.

Bij verwaarlozing van de inwendige spanningsvallen kunnen we schrijven:

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}$$

Is de transformator uitgevoerd met een schuifcontact (fig. 105), dan is het mogelijk een regelbare spanning (rheotor) te krijgen.

De principes voor de werking van de gewone transformator kunnen we zonder meer toepassen op deze transformator.

Zoals uit de fig. 103 en 104 blijkt, kan dit type transformator zowel gebruikt worden voor spanningsverlaging als voor spanningsverhoging.

Voordelen

- De transformator is eenvoudiger te construeren door het feit dat er maar één wikkeling aanwezig is.
- Door het feit dat er maar één wikkeling aanwezig is, heeft deze transformator minder verliezen en daardoor is hij ook goedkoper.
- Bij een gewone transformator worden de N_1 -windingen doorlopen door een stroom I_1 , de N_2 -windingen door een stroom I_2 . Bij de spaartransformator daarentegen worden $N_1 - N_2$ windingen doorlopen door een stroom I_1 en N_2 windingen door een stroom $I_1 - I_2$. Dit betekent op zijn beurt minder jouleverlies, minder koper en dus ook een kleiner gewicht.

Nadeel

De secundaire wikkeling is elektrisch niet gescheiden van de primaire wikkeling waardoor de mogelijkheid bestaat om via de secundaire wikkeling in contact te komen met de (bv. hoge) primaire spanning. Voor het geval dat de primaire wikkeling tussen twee lijndraden van een voedend driefasenet staat, is tussen het gemeenschappelijk punt van de primaire en secundaire wikkeling en de aarde altijd de netspanning aanwezig. Dit is een erg gevaarlijke situatie waardoor deze transformator verboden is als speelgoed-, bel- en lastransformator.

Toepassingsgebied

- De spaartransformator komt zowel in eenfase- als in driefase-uitvoering voor.
- Niettegenstaande de grote (economische) voordelen van deze (spaar)transformator is het toepassingsgebied niet algemeen uit veiligheidsoverwegingen.
- Dit type transformator wordt gebruikt als hoogspanningsvermogenstransformator (bij zeer grote vermogens), bij transport van elektrische energie en als transformator met regelbare spanning (rheotor) voor het aanlopen van wisselstroommotoren, zowel synchrone als asynchrone motoren.

2.10.2 De regeltransformator

Doelstelling

- De principewerking en het toepassingsgebied van de regeltransformator omschrijven.

Regeltransformatoren worden gebruikt in gevallen dat bij primair constante spanning de secundaire spanning moet kunnen worden geregeld, ofwel wanneer bij veranderende primaire spanning de secundaire spanning constant moet worden gehouden. In beide gevallen gebeurt het regelen van de spanning door het in- of uitschakelen van primaire of secundaire windingen.

Wordt bv. bij constante primaire spanning het aantal secundaire windingen verhoogd, dan verhoogt de secundaire spanning. Zouden we, in hetzelfde geval, het aantal windingen van de primaire wikkeling verhogen, dan neemt de spanning per winding af en daalt de secundaire spanning. Om de secundaire spanning op te drijven, moeten we dus het aantal primaire windingen verminderen.

Toepassingsgebied

Bij distributietransformatoren is meestal een spanningsregeling voorzien om eventuele spanningsafwijkingen te compenseren. Deze regeling bedraagt meestal $\pm 5\%$ van de nominale spanning. De verstelling van de spanningsregeling gebeurt in de gewone gevallen uitsluitend als de transformator uitgeschakeld is. In gevallen waar het noodzakelijk is, kan, mits gebruik van speciale schakelsystemen, de regeling ook tijdens de werking gebeuren.

Bij hoogspanningstransformatoren gebeurt de spanningsregeling bijna altijd in de hoogspanningszijde omdat daar de kleinste stromen vloeien en de spanningsregelaar het goedkoopst uitvalt.

2.10.3 *De meettransformatoren***Doelstellingen**

- Het gebruik van meettransformatoren toelichten.
- De typische eigenschappen van een spanningsmeettransformator en een stroommeettransformator toelichten.

Algemeen

Meettransformatoren zijn spanningsverlagende of stroomverlagende transformatoren, vooral gebruikt in hoogspanningsinstallaties. Bij spanningsverlagende transformatoren bedraagt de secundaire spanning normaal slechts 100 V, bij stroomtransformatoren is de stroom slechts 5 à 10 A. Hier zijn de transformatieverhouding en de verschuiving tussen primaire en secundaire spanning zo nauwkeurig mogelijk bepaald. De meettransformatoren zijn geconstrueerd voor kleine vermogens.

Spanningstransformatoren

Spanningstransformatoren werken op constante primaire spanning. Bovendien is de flux in de magnetische keten praktisch constant, welke ook de belasting is.

Stroommeettransformatoren

De werking van stroommeettransformatoren is wel enigszins afwijkend. Bij de stroommeettransformator wordt de primaire wikkeling in serie geplaatst met een lijn die doorlopen wordt door een stroom I , bepaald door de lijnimpedantie Z en onafhankelijk van de belasting van de secundaire (fig. 106).

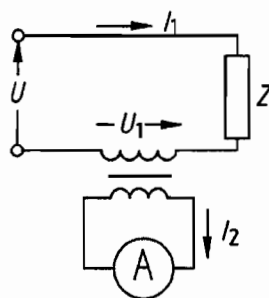


fig. 106

Levert de secundaire een stroom I_2 , dan kan de primaire geen overeenstemmende stroom opnemen om de flux in de magnetische keten constant te houden.

De totale flux in de kern wordt des te kleiner naarmate de secundaire meer stroom levert. De flux bereikt een minimumwaarde wanneer de secundaire wordt kortgesloten of, wat hetzelfde is, als de secundaire wordt aangesloten op een ampèremeter. Omdat dit het normale gebruik van de transformator is, zal men de transformator, meer bepaald de magnetische keten, voor dit regime berekenen. Hieruit leiden we af dat de secundaire

keten van een stroomtransformator nooit mag worden geopend; anders bereikt de flux in de kern een te hoge waarde en treden er ten gevolge daarvan overdreven verliezen op die de kern verhitten. Er kunnen ook gevaarlijke overspanningen optreden waardoor de nauwkeurigheid verdwijnt.

Een bijzondere uitvoering van de stroomtransformator, geschikt voor grote stroomsterkten, is die waar de magnetische keten onmiddellijk over de geleider geschoven wordt en waarbij de geleider zelf de primaire wikkeling van de transformator vormt. De secundaire wikkeling is op de magnetische keten aangebracht zoals aangegeven in fig. 107.

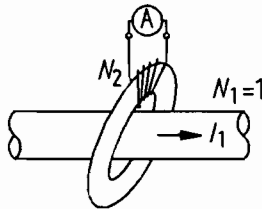


fig. 107

Meer bijzonderheden aangaande meettransformatoren worden in het vak elektrometrie behandeld.

2.10.4 De veiligheidstransformator

Doelstelling

- De typische eigenschappen van een veiligheidstransformator beschrijven.

Veiligheidstransformatoren zijn gebouwd zoals gewone transformatoren met twee van elkaar gescheiden wikkelingen. De secundaire wikkeling levert een zeer lage spanning (meestal 24 V) die veilig is bij het aanraken. Het vermogen van veiligheidstransformatoren is relatief laag, omdat ze aangewend worden voor het voeden van handlampen (in kruipkelders, smeerputten in garages, vochtige lokalen enz.).

2.10.5 De speelgoedtransformator (kortsluitvaste transformator)

Doelstelling

- De typische eigenschappen van een speelgoedtransformator toelichten.

Speelgoedtransformatoren zijn veiligheidstransformatoren (gescheiden wikkelingen) met een relatief klein vermogen, waarvan de spanning 12 V is. De lekreactanties zijn hier bijzonder groot, waardoor ze bestand zijn tegen het kortsluiten van de secundaire wikkeling. In vele gevallen is de secundaire spanning continu regelbaar tussen 0 en 12 V.

2.10.6 De scheidingstransformator

Doelstelling

- De typische eigenschappen van een scheidingstransformator beschrijven.

De scheidingstransformator is een transformator waarbij de secundaire spanning even hoog is als de primaire. Hij heeft tot doel de secundaire spanning elektrisch van het voedende net gescheiden te houden. Het is eveneens een veiligheidstransformator die toegepast wordt bij voeding van verkeerslichten.

2.10.7 De lastransformator

Doelstelling

- De principewerking en de constructiebijzonderheden van een lastransformator uitleggen.

De ontsteekspanning (nullast) tussen laselektrode en werkstuk moet, om een goede ontsteking van de vlamboog te krijgen, 70 tot 80 V bedragen. Nadat de boog ontstoken is, moet de spanning tot 20 à 40 V dalen. Omdat de stroom bij het lassen zo constant mogelijk moet blijven, moet de stroomspanningskarakteristiek eruitzien zoals weergegeven in fig. 108. Uit deze figuur blijkt dat in het normale werkingsgebied (20 à 30 V) de booglengte (spanning) aanzienlijk mag veranderen zonder dat de stroomsterkte veel wijzigt.

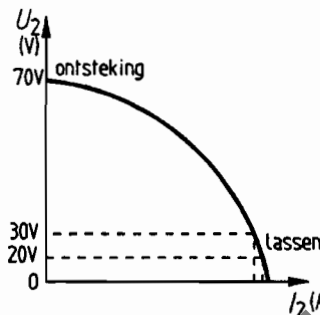


fig. 108

Om deze uitwendige karakteristiek te krijgen, zijn er verscheidene mogelijkheden, bv. het plaatsen van tegengesteld werkende windingen. Ook kan men een zelfinductiespoel in de secundaire keten van de transformator plaatsen, zodat er een groot inductief spanningsverlies ontstaat. De grootte van de lasstroom zou dan ingesteld worden door het aanpassen van de waarde van de bijgeschakelde zelfinductie.

Een andere methode is de lastransformator zodanig te construeren dat slechts een gedeelte van het opgewekte magnetische veld bij belasting door de secundaire spoel gaat. De overige flux (lekflux) sluit zich buiten deze spoel om. Dit kan bv. gebeuren door een schuifbare ijzeren kern (magnetische shunt) toe te passen (fig. 109).

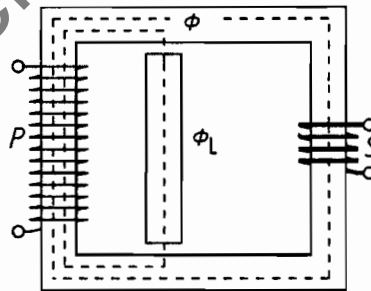


fig. 109

2.10.8 De impulstransformator

Doelstelling

- De principewerking en constructiebijzonderheden van een impulstransformator toelichten.

De impulstransformator zet sinusvormige spanningen om in pulsen. Hij wordt als dusdanig gebruikt voor het bezorgen van ontsteekimpulsen bij thyristorsturingen. De transformator wijkt constructief af van een gewone transformator doordat de kern die de secundaire wikkeling bevat (A_2) een kleinere doorsnede heeft dan de kern die de primaire wikkeling omvat (A_1) (fig. 110).

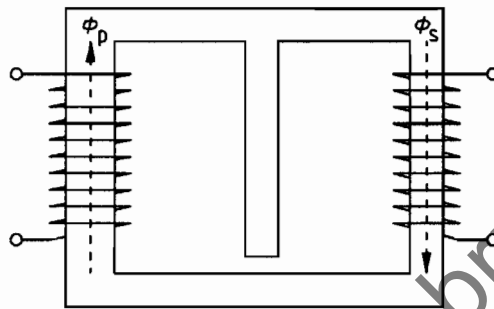


fig. 110

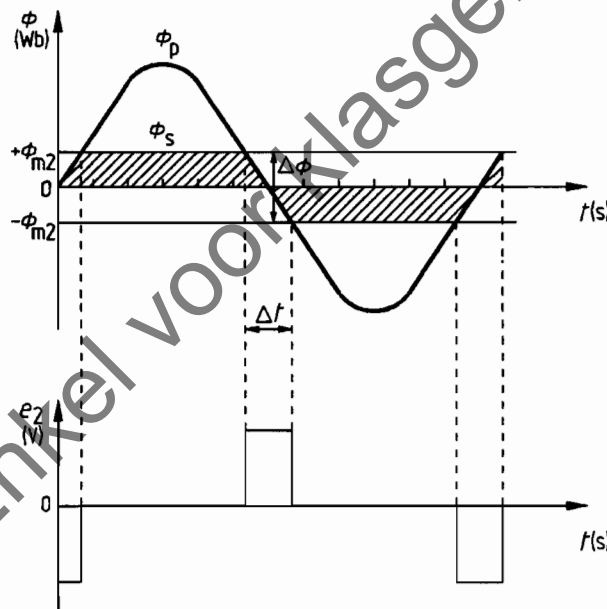


fig. 111

Met deze schikking komt de kern van de secundaire wikkeling zeer snel in verzadiging. In fig. 111 is het fluxverloop weergegeven.

In de secundaire wikkeling wordt slechts spanning geïnduceerd als er fluxverandering optreedt. Dit gebeurt (periodisch) gedurende de korte tijdspanne dat Φ_s verandert van $+\Phi_{m2}$ tot $-\Phi_{m2}$ of omgekeerd.

2.11 Constructiebijzonderheden bij transformatoren

2.11.1 De magnetische keten

Doelstellingen

- De technologische constructiebijzonderheden van het kern- en jukmateriaal omschrijven.
- De constructievorm onderscheiden en de typische eigenschappen toelichten.

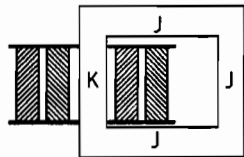


fig. 112

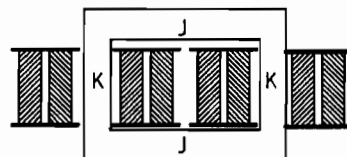


fig. 113

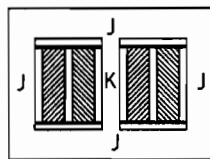


fig. 114

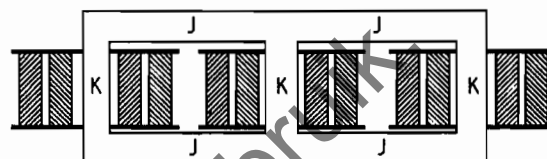


fig. 115

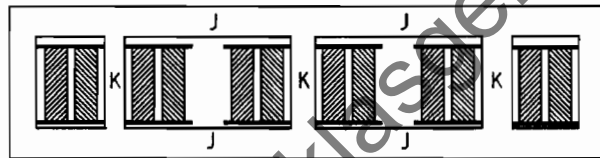


fig. 116

K: kernen; J: jukken

De delen van de magnetische keten die door de wikkelingen omwonden worden, noemt men *kernen*, de verbindingsstukken tussen de kernen noemt men *jukken*.

a Kern- en jukmateriaal

De magnetische keten wordt gevormd door van elkaar geïsoleerde (chemische) platen met een dikte van 0,35 mm. De lamellering is noodzakelijk voor het beperken van wervelstroomverlies. Omdat de wervelstromen in een vlak liggen, loodrecht op de veldlijnen die ze veroorzaken, moet het vlak van de platen altijd evenwijdig met het veld worden geplaatst. Aldus worden de wervelstromen binnen de beperkte doorsnede van de plaat gehouden.

Het doorgaans gebruikte materiaal is siliciumijzer of textuurblik.

Bij *Silicium-ijzer* bedraagt het maximumgehalte aan Silicium ca. 5 %.

De aanwezigheid van silicium biedt de volgende voordelen:

- Het in ijzer aanwezige cementiet (Fe_3C) wordt omgezet in grafiet: cementiet heeft een nadelige invloed op het hysteresisverlies en de permeabiliteit.
- Het ijzer wordt gedesoxydeerd zodat de permeabiliteit verbetert en de hysteresisverliezen nogmaals beperkt worden.
- De resistiviteit vermeerderd waardoor de wervelstroomverliezen verder verminderen.
- De verouderingsverschijnselen verminderen aanzienlijk.

Aan het gebruik van silicium zijn echter ook nadelen verbonden:

- De verzadigingsfunctie vermindert.
- Het materiaal wordt bros.

Merken we tevens op dat een hoger siliciumgehalte economisch verwerkingsproblemen oproept.

Textuurblik of gericht blik

Dit soort blik krijgt men door siliciumijzer koud te walsen en het tussen twee walsbewerkingen in te gloeien. Bij dit blik zijn de magnetische eigenschappen in de walsrichting aanzienlijk beter.

b Vormen

Zowel de eenfase- als de driefasetransformatoren worden uitgevoerd volgens het kerntype (fig. 112, 113 en 115) en het manteltype (fig. 114 en 116).

fig. 112: kerntype. Dit is de meest eenvoudige constructie. De lekfluxen zijn relatief groot en het rendement is klein. Dit type komt enkel nog voor bij zeer kleine vermogens.

fig. 113: kerntype. De primaire en secundaire spoel zijn in tweeën gesplitst en over de twee kernen verdeeld. De lekfluxen zijn kleiner; het rendement stijgt. De constructie is duurder.

fig. 114: manteltype. Dit type komt zeer veel voor. Omdat de flux zich in tweeën splitst, heeft het juk de helft van de kerndoorsnede. Het juk vormt hier gelijktijdig een mechanische bescherming van de wikkelingen. De lekfluxen worden hier veel kleiner en het rendement stijgt.

fig. 115: geeft de voorstelling van een driefasekerntransformator met drie benen. De drie kernen hebben dezelfde doorsnede.

fig. 116: driefasetransformator van het manteltype uitgevoerd met vijf benen. De buitenste benen vormen mee het juk en hebben een doorsnede gelijk aan de helft van de kerndoorsnede. Dit type komt vooral voor bij zeer grote vermogens.

Omdat de spoelen die rond de kernen worden gelegd gewoonlijk cirkelvormig zijn (eenvoudigste constructie) moet, om bij de gegeven kerndoorsnede zo weinig mogelijk koper te gebruiken, de vorm van deze kerndoorsnede zo veel mogelijk de cirkelvorm benaderen. Voor transformatoren met klein vermogen worden de kernen met vierkante of rechthoekige kerndoorsnede uitgevoerd. Als het vermogen toeneemt, zal men de kerndoorsnede samenstellen uit 2, 3, 4, 5 of meer (fig. 117 en 118) plaatbreedten. Door de platen in evolvente krommen te plooien, kan men een kerndoorsnede krijgen die bijna volledig cirkelvormig is (fig. 119).

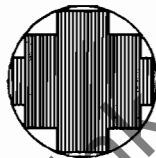


fig. 117

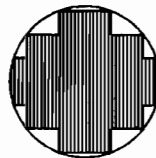


fig. 118

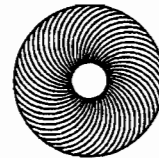


fig. 119

c C-kerntransformator

De C-kerntransformator wordt gebruikt voor beperkte vermogens (tot 100 kVA). De magnetische keten bestaat uit siliciumblik dat tot band gewalst is.

Met deze band maakt men een ovale kern. De verschillende lagen van deze kern worden van elkaar geïsoleerd en door een bindmiddel samengehouden. De kern wordt in twee delen gezaagd om er de spoelen over aan te brengen, vandaar de naam C-kern (fig. 120).



fig. 120

2.11.2 De wikkelingen

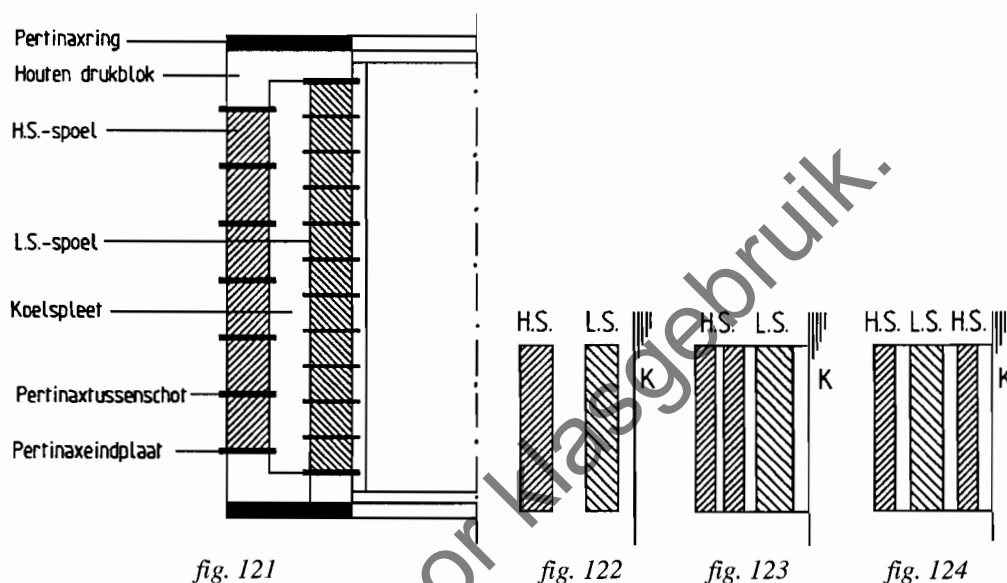
Doelstelling

- De verschillende wikkelsystemen onderscheiden.

De wikkelingen worden vervaardigd uit elektrolytisch koper. Tot een doorsnede van 10 mm² wordt een cirkelvormige, daarboven een rechthoekige doorsnede gebruikt.

Voor het plaatsen van de wikkelingen worden verschillende systemen toegepast:

- de *gewone* cilinderwikkeling (fig. 121);
- de *dubbelconcentrische* wikkeling: hierbij liggen de spoelen ofwel aan dezelfde kant ofwel aan weerszijden van de laagspanningsspoel (fig. 122 en 123).



Meestal past men de concentrische wikkelmethode toe. Hierbij worden primaire en secundaire wikkelingen, met inachtneming van een zekere afstand, om elkaar gelegd. Met deze opstelling is de lekflux kleiner (primaire en secundaire lekfluxen heffen elkaar grotendeels op). Met het oog op de isolatie t.o.v. de massa wordt de LS-wikkeling om de binnenkant gelegd (fig. 124). De HS-wikkeling wordt ingedeeld in spoelen (zie fig. 127) met een beperkt aantal windingen per laag, om het potentiaalverschil tussen de geleiders te verminderen. De spoelen worden verder in serie geschakeld en axiaal t.o.v. elkaar geplaatst. Begin en einde van de spoelen worden extra geïsoleerd als bescherming tegen doorslag t.g.v. stootspanningen.

Men maakt bovendien een onderscheid tussen de z.g. *cilinderwikkeling* (fig. 125) en *schijfwikkeling* (fig. 126).

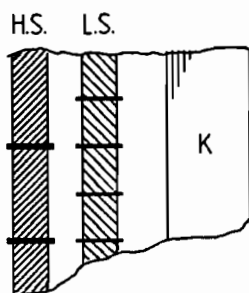


fig. 125

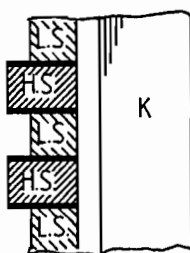


fig. 126

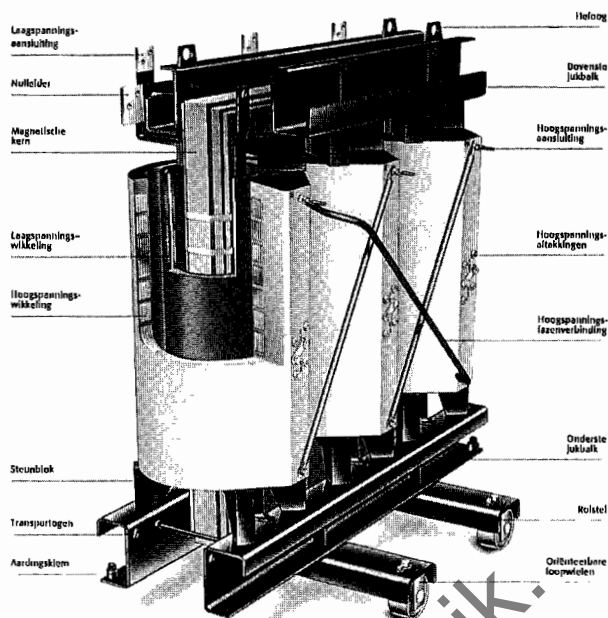


fig. 127

Alubandtransformatoren

Aluminium als bedrijfseconomisch vervangproduct van koper treedt steeds meer op de voorgrond, hoewel bij gelijkblijvende wikkellingsverliezen de doorsnede van de geleiders 1,65- à 1,75-maal groter wordt dan bij kopergebruik. Daardoor vergroot het wikkelvolumen met ca. 80 %.

Aluminium wordt vooral gebruikt omwille van de veel geringere kostprijs van de grondstof (slechts 33 % van de kostprijs van koper), de betere bewerkbaarheid (walsen tot zeer dunne platen met constante dikte en glanzend effen oppervlakken), de verwerking op wikkelfanden (verkorte productietijd) en de grotere precisie van het eindproduct.

- Voor de laagspanningswikkeling wordt de aluminiumband op vensterhoogte van de transformator (d.i. de afstand tussen bovenste en onderste juk) gewikkeld, samen met de twee lagen speciaal isolatiepapier. Begin en einde van de bandwikkeling worden voorzien van aluminium verbindingstukken.
- Voor de hoogspanningswikkeling wordt aluminium rond- of vlakdraad gebruikt, omspannen met een of meer lagen kabelpapier.

Fig. 128 geeft een idee van de wikkelmwijze van een LS-wikkeling van een alubandtransformator.

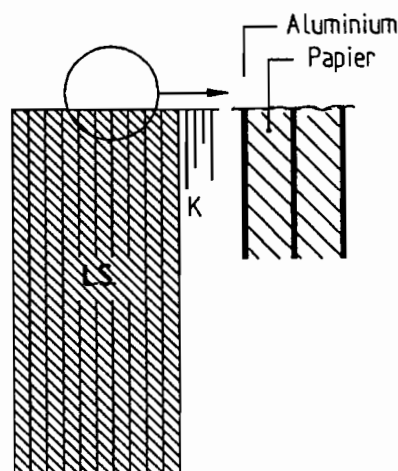


fig. 128

2.11.3 Koeling van HS-vermogenstransformatoren

Doelstellingen

- Het koelen van een transformator met olie nader omschrijven.
- De hoofdkenmerken van een gietharstransformator nader toelichten.

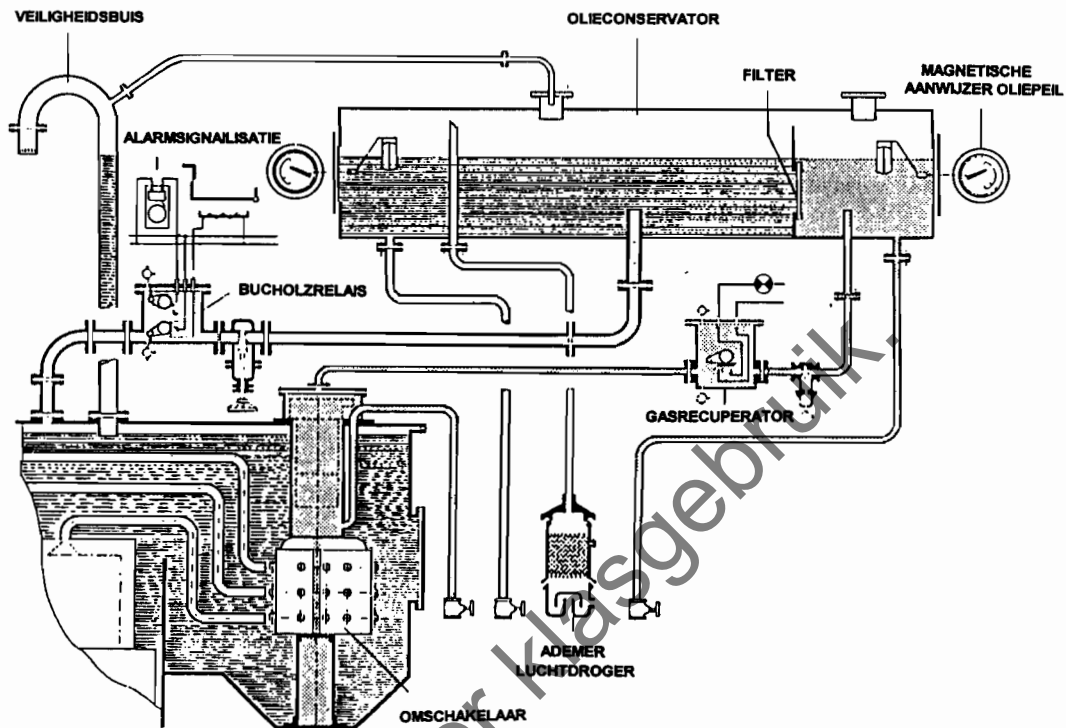


fig. 129

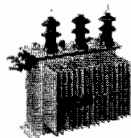
a Algemeen

Door ijzer- en koperverliezen verwarmt de transformator. Om de temperatuur niet te hoog te laten oplopen, wordt koeling toegepast. Het meest toegepaste systeem is *oliekoeling*. De olie geleidt de warmte naar de transformatorbakwand. Die zorgt door straling en convectorie voor warmteafvoer.

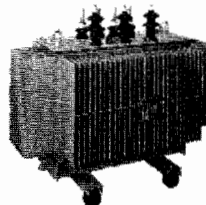
b Systemen

- Transformatoren met beperkt vermogen

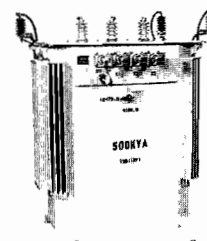
Voor transformatoren met een vermogen van 100 tot 630 kVA wordt de bakwand geprofileerd uitgevoerd om het contactoppervlak met de omringende lucht te vergroten. De onderstaande foto's laten dit duidelijk zien.



100 kVA



630 kVA

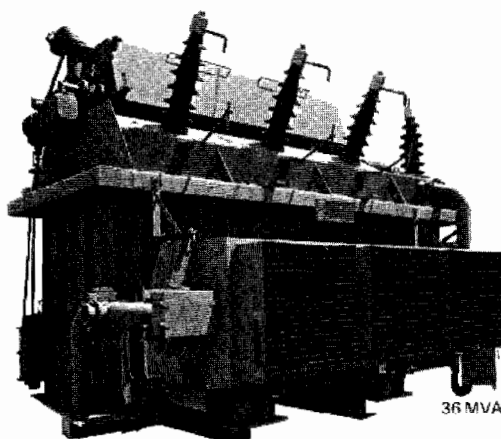


500 kVA

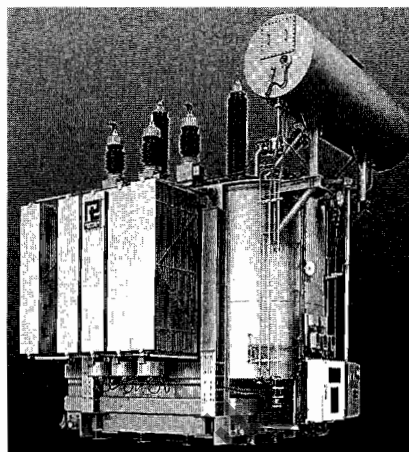
Door toepassing van zijkoelers kan het koeleffect nog vergroot worden.

– Transformatoren met groot vermogen

Voor transformatoren met vermogens groter dan 630 kVA gebruikt men transformatorbakken met aangepaste buisharpconstructie (ovaalvormige doorsnede) of maakt men gebruik van een aanblaaskoelinrichting en/of wordt de circulerende olie naar oliekoelers gevoerd.



36 MVA



90 MVA

Deze aanblaaskoelinrichting wordt automatisch in werking gebracht bij het overschrijden van een ingestelde temperatuur.

c Toebehoren

Bij de koelinrichting hoort meestal nog:

- een olieconservator,
- een ademdop of luchtdroger
- een veiligheidsbuis.

De olieconservator

Wegens het uitzetten en inkrimpen van het luchtvolume boven de transformatorolie moet een transformator lucht afgeven of opnemen. Dit is het zogenaamde 'ademen' van de transformator. De conservator is een gelaste stalen ketel die op of in de onmiddellijke omgeving van de transformator wordt geplaatst. Door middel van een pijp staat de olie in de conservator in verbinding met de olie in de transformatorbak. Door het ademen is het niet mogelijk de olie van de lucht afgesloten te houden omdat de uitzettingscoëfficiënten van olie en van de transformatorbak verschillend zijn. De olie komt in de conservator slechts in contact met de lucht langs een betrekkelijk klein oppervlak. Daardoor is de oxidatiegraad gering. Daarenboven is de temperatuur van de olie hier lager dan in de transformatorbak. De olieconservator (ook wel het *expansievat* genoemd) dient om de goede kwaliteit van de transformatorolie als koel- én isolatiemiddel te handhaven, maar ook om het oliepeil constant te houden. Bij de conservator hoort meestal nog een *ademer*.

De ademer (fig. 130)

De ademer belet het indringen van stof en vochtigheid bij het ademen. Stof en vocht verminderen immers de doorslagspanning van de olie.

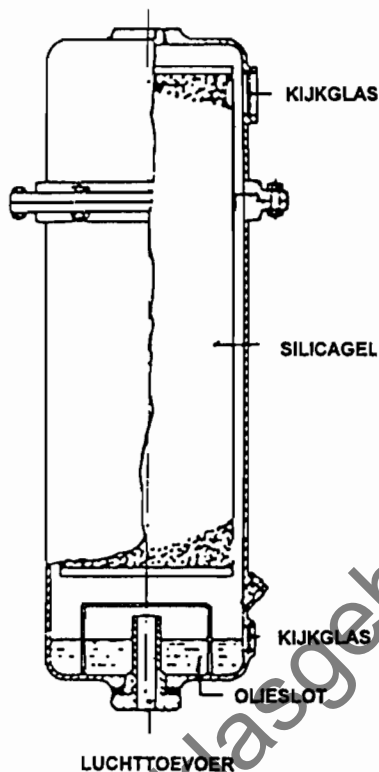


fig. 130

Werking: de buitenlucht wordt aangezogen via een olieslot dat het stof opslorpt. Vervolgens passeert de lucht een ruimte die opgevuld is met een hygroscopische stof: silicagel. Deze gel is vermengd met kobaltchloride dat de stof blauw kleurt. Wanneer de silicagel verzadigd is met vocht is zijn kleur paars geworden. Door een kijkglas kan men dit nagaan. De vulling kan verwijderd, gedroogd en opnieuw gebruikt worden.

De veiligheidsbuis

De veiligheidsbuis belet overdruk in de olieconservator.

De gietharstransformator (foto p. 90)

Als koelvloeistof gebruikte men in het verleden askarel. Uit veiligheidsoverwegingen werd het gebruik van askarel als koelvloeistof verboden. Dit verbod heeft het ontwikkelen van 'droge' transformatoren met natuurlijke luchtkoeling sterk bevorderd. Gietharstransformatoren zijn milieuvriendelijk. Thermisch beveiligd kunnen ze zelf nooit de oorzaak zijn van brand. De brandbaarheid van giethars wordt aanzienlijk verminderd door toepassing van anorganische vulstoffen die de giethars zelfdovend maken.

De gietharstransformator is vooral geschikt voor opstelling in openbare gebouwen, ziekenhuizen, metro's e.d. Op plaatsen met hoog brandrisico is hij zeker aan te raden, bv. in mijnen, chemische fabrieken, schepen enz.

De laagspanning is ontworpen tot maximaal 1000 V en de hoogspanning voldoet aan de isolatieklasse 7,2 kV tot maximaal 24 kV. Een uitbreiding naar 36 kV wordt voorzien.

2.12 Spanningsregeling bij transformatoren

Doelstellingen

- Het principe van de spanningsregeling bij transformatoren beschrijven.
- Aan de hand van een schema de werking van de spanningsregelaar toelichten.

Voorafgaande bemerkingen

- Zijn de vermogenstransformatoren rechtstreeks aangesloten op de alternatoren, dan gebeurt de spanningsregeling op de alternator zelf.
- Bij koppelnetten vindt de regelbare transformator toepassing om de elektriciteitsbedrijven de mogelijkheid te verschaffen actieve en reactieve energie uit te wisselen, zonder dat de spanning van de generatorrails waarop de verbruikers zijn aangesloten veranderd hoeft te worden.

De regeltransformator wordt ook gebruikt om de netspanning voor de industrie, die via de 10 kV-netten gevoed wordt, constant te houden. De spanningsregeling gebeurt gewoonlijk op de HS-wikkeling. Het is een regeling $\pm 5\%$ op de nominale HS-waarde.

a De spanningsregelaar

Als voorbeeld nemen we een trappenregelaar (31 trappen: fig. 131). De schakelaar bestaat uit een grofregelaar, een fijnregelaar en een aandrijfmechanisme. Met behulp van de grofregelaar is de spanning, die voor de getekende stand minimaal is, te vermeerderen met $3 \times 8 \Delta U$. Met de fijnregelaar is elke vermeerdering van $8 \Delta U$ nog in 7 trappen ΔU verdeeld. In totaal zijn er dus $3 \times 8 + 7 = 31$ trappen, waarbij de minimumspanning met $31 \Delta U$ vermeerderd kan worden.

De eigenlijke lastschakelaar is ingebouwd in de fijnregelaar.

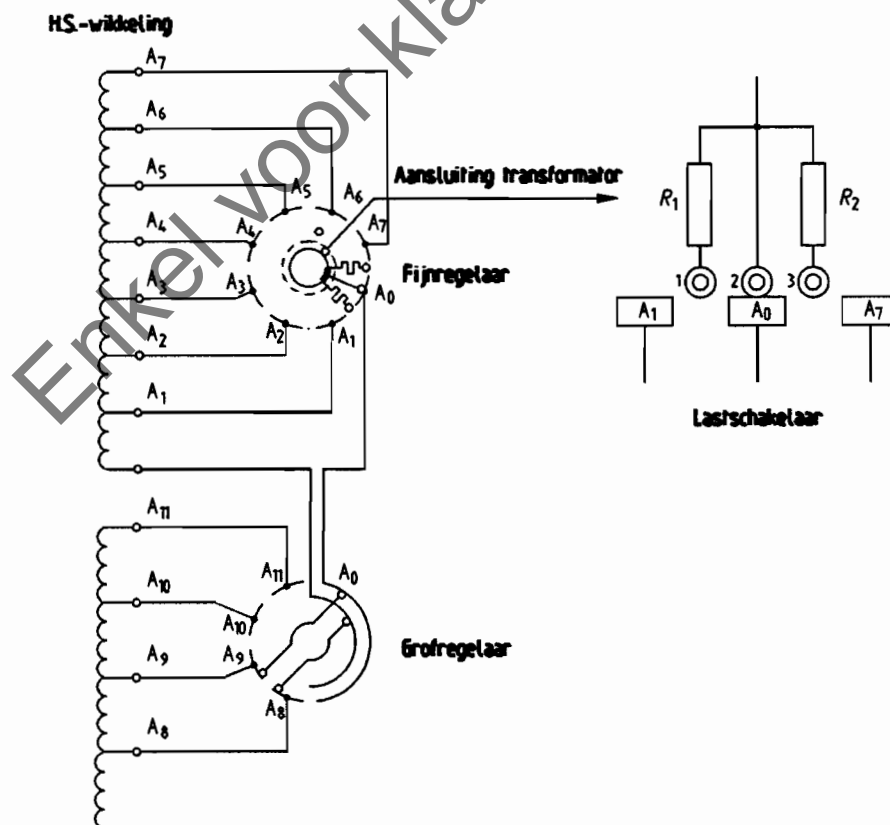


fig. 131

b Werking

Moet de spanning met ΔU verhoogd worden, dan moet de aftakking van het contact A_0 verplaatst worden naar A_1 . Hierbij komt vooreerst de weerstand R_1 over de contacten A_0 en A_1 te staan, doordat de contactrol 1 op A_1 komt. Vervolgens worden beide contacten overbrugd door de serieschakeling van R_1 en R_2 , terwijl de aftakking naar het net plaatsheeft vanuit het knooppunt van beide weerstanden. Bij de derde fase van de schakeling zijn beide contacten door de weerstand R_2 overbrugd. Ten slotte bevindt alleen de contactrol 2 zich in het midden van contact A_1 . Op deze manier kan de spanning tot 7-maal met ΔU vermeerderd worden zonder onderbreking of hoge kortsluitstromen.

Voordat dan verder geschakeld kan worden (hogere spanning), moet men eerst de grofregelaar schakelen. Zonder bezwaar kan de contactrol 4 naar het contact A_9 verplaatst worden, omdat deze schakeling stroomloos geworden is. Het contact A_0 ligt immers geheel vrij. Het krijgt na het schakelen echter een spanning die 8 ΔU hoger is dan aanvankelijk. Omdat het contact A_7 nu een spanning gekregen heeft die 7 ΔU hoger is, is A_0 slechts ΔU hoger dan A_7 , zodat in dit stadium de fijnregelaar weer verder kan schakelen tot de spanning weer met 7 ΔU vermeerderd is. Vervolgens komt de grofregelaar weer in werking waarvan, na het schakelen van de fijnregelaar, ook contactrol 5 naar het contact A_9 verplaatst is, zodat rol 4 naar A_{10} verschoven kan worden.

De spanningsregelaars voor grote transformatoren worden meestal op afstand bediend. Een standaardwijssapparaat duidt aan welke klem van de transformator in dienst is.

2.13 Voorbeelden

- 1 Een ideale eenfasetransformator met schijnbaar vermogen van 12 kVA is primair aangesloten op een spanning van 10 kV, 50 Hz. Het primaire aantal windingen is 1500 en de windingsverhouding is 6,82. Bereken de secundaire spanning, de waarde van de flux, de primaire en secundaire nominale stroom.

Oplossing

Bij een ideale transformator is

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$U_2 = \frac{U_1}{k} = \frac{10\,000}{6,82} = 1466,27 \text{ V}$$

$$\phi_m = \frac{E_1}{4,44 \cdot N_1 \cdot f} = \frac{10\,000}{4,44 \cdot 1500 \cdot 50} = 0,03 \text{ Wb}$$

$$I_1 = \frac{S}{U_1} = \frac{12\,000}{10\,000} = 1,2 \text{ A}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{k} \Rightarrow I_2 = k \cdot I_1 = 6,82 \cdot 1,2 = 8,18 \text{ A}$$

- 2 Een ideale onbelaste eenfasetransformator is aangesloten op een wisselspanningsbron met frequentie 50 Hz. De maximale fluxwaarde is $0,5 \cdot 10^{-3}$ Wb. Het primaire aantal windingen is 1200; het secundaire aantal windingen is 275. Hoe groot zal de primair aangelegde spanning moeten zijn en hoe groot is de secundair geïnduceerde spanning?

Oplossing

$$\begin{aligned} \text{Ideaal: } U_1 &= E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_m \\ &= 4,44 \cdot 50 \cdot 1200 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 133,2 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} \Rightarrow E_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot E_1 = \frac{275}{1200} \cdot 133,2 = 30,525 \text{ V}$$

- 3 Een onbelaste ideale eenfasetransformator heeft primair 1000 windingen en is aangesloten op een spanning van 220 V, 50 Hz. Als de reluctantie van de magnetische kring $5 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}$ bedraagt, hoe groot is dan:
- de flux (maximumwaarde);
 - de magnetiseringsstroom;
 - de opgenomen stroom uit het net;
 - de coëfficiënt van zelfinductie van de primaire spoel?

Oplossing

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{1000^2}{5 \cdot 10^6} = 0,2 \text{ H}$$

De flux

$$\phi_m = \frac{E}{4,44 \cdot f \cdot N} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 1000} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Wb (maximumwaarde)}$$

$$\phi_m = \frac{N_1 \cdot I_{m\max}}{R_m} \Rightarrow I_{m\max} = \frac{\phi_m \cdot R_m}{N_1} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^6}{10^3} = 5 \text{ A}$$

De effectieve waarde van de primair opgenomen stroom

$$I_1 = \frac{I_{m\max}}{\sqrt{2}} = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3,54 \text{ A}$$

Bij een ideale onbelaste transformator is de magnetiseringsstroom gelijk aan de opgenomen stroom.

- 4 Een eenfasetransformator bij nullast neemt onder een spanning van 220 V, 50 Hz een stroom op van 4,25 A. De faseverschuiving is 80° en het primaire aantal windingen is 575. Hoe groot is de maximale fluxwaarde in de kern, de waarde van de magnetiseringsstroom en de grootte van de ijzerverliezen? We verwaarlozen de ohmse en inductieve spanningsval van de primaire wikkeling.

Oplossing

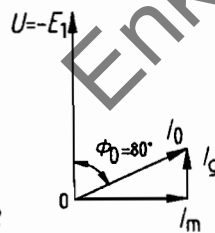


fig. 132

$$I_g = I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 4,25 \cdot \cos 80^\circ = 0,738 \text{ A}$$

$$I_m = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 4,25 \cdot \sin 80^\circ = 4,185 \text{ A}$$

$$P_{Fe} = 220 \cdot 0,738 = 162,36 \text{ W}$$

$$\phi_m = \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 575} = 1,7223 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

- 5 Een ideale driefasetransformator, geschakeld D-y, transformeert 10 000 V, 50 Hz naar 380 V lijnspanning. De secundaire lijnstroom bedraagt 150 A. Elke secundaire wikkeling bevat 60 windingen. Bereken de secundaire fasespanning, de primaire fase- en lijnstroom, het primaire aantal windingen en het schijnbare maximale vermogen van de transformator.

Oplossing

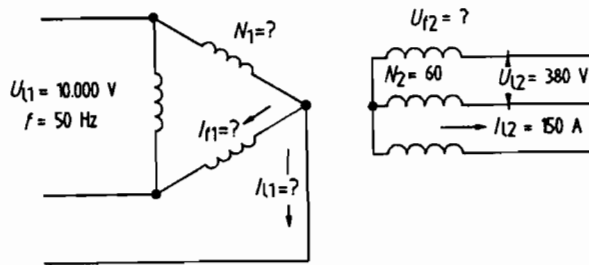


fig. 133

$$U_{F2} = \frac{U_{L2}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,4 \text{ V}$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{L2} \cdot I_{L2} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 150 = 98\,726,9 \text{ VA}$$

$$I_{L1} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{L1}} = \frac{98\,726,9}{\sqrt{3} \cdot 10\,000} = 5,7 \text{ A}$$

$$I_{F1} = \frac{I_{L1}}{\sqrt{3}} = \frac{5,7}{\sqrt{3}} = 3,29 \text{ A}$$

$$N_1 = \frac{U_{F1}}{U_{F2}} \cdot N_2 = \frac{10\,000}{219,4} = 2734,73 = 2735 \text{ windingen}$$

2.14 Toepassingen

- 1 Een onbelaste ideale eenfasetransformator heeft primair 1500 windingen. De maximale fluxwaarde is $0,7 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$. Bereken de coëfficiënt van zelfinductie L van deze spoel als de opgenomen stroom 3 A bedraagt.
- 2 Een niet-ideale eenfasetransformator heeft primair 1500 windingen en wordt met open secundaire wikkeling aangesloten op een net van 220 V, 50 Hz. Het actieve vermogen opgenomen uit het net bedraagt 77 W. De reluctantie van de magnetische keten is $8 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}$. De gelijkstroomweerstand van de primaire spoel en de invloed van de lekflux mogen verwaarloosd worden. Bereken de stroom die wordt opgenomen uit het net en de faseverschuivingshoek φ_0 .
- 3 Bij een ideale eenfasetransformator wordt een spanning van 0,8 V/winding geïnduceerd. Hoe groot is de kerndoorsnede als $f = 50 \text{ Hz}$ en de maximale fluxdichtheid 1,5 T?
- 4 Van een ideale eenfasetransformator is de kerndoorsnede 200 cm^2 . De maximale fluxdichtheid bedraagt 1,6 T bij een frequentie van 50 Hz. De primaire spanning is 10 000 V terwijl de voltmeter op de secundaire 380 V aangeeft. Bereken de maximale waarde van de flux, het primaire en het secundaire aantal windingen en de transformatieverhouding.
- 5 Een driefasetransformator is primair in ster aangesloten op een spanning van 10 kV, 50 Hz. Het aantal primaire wikkelingen per fase is 3000. De secundaire wikkeling bestaat per fase uit twee in serie geschakelde spoelen van elk 60 windingen. Hoe groot is de secundaire lijnspanning wanneer de secundaire wikkeling in ster en in zigzag staat? Bereken eveneens de maximuminductie als de kerndoorsnede 100 cm^2 is.

2.15 Diagnostische toets

Zie Toetsenboekje.

2.16 Herhalingstaken – Basis

- 1 Een ideale driefasige driehoek-stertransformator met een schijnbaar vermogen van 1000 kVA transformeert 12 kV naar 380 V (lijnspanning) met een frequentie van 50 Hz. Het aantal primaire windingen is 3300. Bereken het aantal secundaire windingen en de primaire en secundaire lijn- en fasestromen.
- 2 Geschakeld als Y-d-transformator meten we secundair een lijnspanning van 0,5 kV bij een primaire lijnspanning van 10 000 V, 50 Hz. Bereken de secundaire lijnspanning als de laagspanningswikkeling in zigzag geschakeld wordt.
- 3 Een driefasetransformator met een eenfasige transformatieverhouding van 10 wordt primair aangesloten op een net van 10 kV, 50 Hz. Hoe groot is de secundaire fase- en lijnspanning bij respectievelijk de volgende schakelingen: Y-y; Y-d; D-y; D-d; Y-z en D-z?
- 4 In een transformator wordt een spanning geïnduceerd van 1 V per winding. Als $f = 50$ Hz en $B_m = 1,2$ T, bereken dan de kerndoorsnede.
- 5 Een groep gloeilampen neemt een vermogen op van 8 kW via een eenfasetransformator 1200/200 V. Bij nullast neemt de transformator een stroom op van 0,8 A die 75° naait op de spanning. Bereken de primair en secundair opgenomen stroom.

2.17 Verrijkingsopdrachten

- 1 Een eenfasetransformator is belast en voert een stroom van 120 A bij $\cos \varphi = 0,8$ (inductief). De secundaire klemspanning is 6 kV, 50 Hz. De gelijkstroomweerstand van de secundaire $R_2 = 2 \Omega$ en de coëfficiënt van zelfinductie die de lekflux in rekening brengt $L_2 = 0,04$ H. Hoe groot zijn de secundair geïnduceerde spanning en het inwendige spanningsverlies?
- 2 Een driefasetransformator van 100 kVA heeft bij vollast ($\cos \varphi = 0,8$) een koperverlies van 1200 W. De ijzerverliezen bedragen 300 W. Bereken het rendement bij 4/4-, 3/4-, 2/4- en 1/4-belasting in de veronderstelling dat de arbeidsfactor 0,8 blijft. Voor welke waarde van de belasting is het rendement maximaal?
- 3 Een driefasetransformator is primair in ster geschakeld. De primaire spanning bedraagt 12 kV, 50 Hz. Het primaire aantal windingen per fase bedraagt 6300, de secundaire bestaat per fase uit 2×80 windingen. Bereken de secundaire spoelspanning, de fasespanning en de lijnspanning wanneer de secundaire respectievelijk in ster en in zigzag wordt geschakeld.
- 4 Een driefasetransformator is D-z geschakeld op een net van 70 kV, 50 Hz. Hij transformeert de spanning naar 380 V bij een vermogen van 100 kVA. De ijzerdoorsnede van de kern bedraagt 240 cm^2 bij een inductiewaarde van 1,2 T. Bereken:
 - het primaire en het secundaire aantal windingen;
 - de primaire en secundaire lijnstromen bij nominale ohmse belasting;
 - het rendement bij nominale belasting en $\cos \varphi = 0,8$;
 - het rendement bij halve belasting en $\cos \varphi = 0,8$.
 De ijzerverliezen bedragen 1,6 kW en de nominale koperverliezen 1,76 kW.
- 5 Een driehoek-stertransformator is aangesloten op 20 kV, 50 Hz. Per fase heeft men primair 5000 en secundair 50 windingen. Op de secundaire wikkelingen sluit men tussen elke twee lijndraden een toestel met $R = 0,5 \Omega$ en $L = 3 \cdot 10^{-3}$ H. Bereken de grootte van het primair opgenomen schijnbare vermogen. We beschouwen het rendement gelijk aan 1.

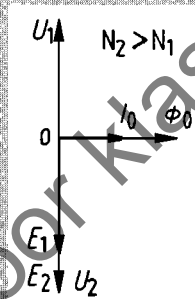
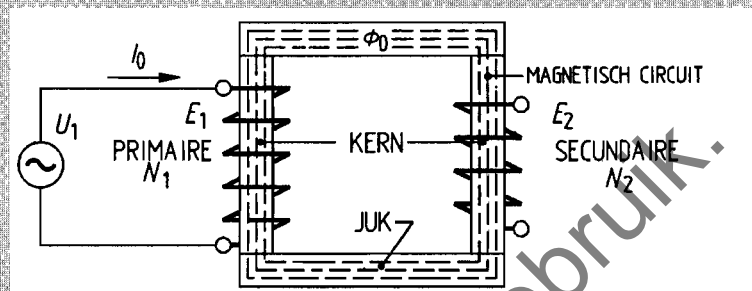
SYNTHESE

Transformatoren

Definitie

Een transformator is een statisch toestel dat elektrische wisselstroomenergie met een gegeven spanningswaarde omzet in elektrische wisselstroomenergie met een andere spanningswaarde bij gelijkblijvende frequentie.

Principewerking



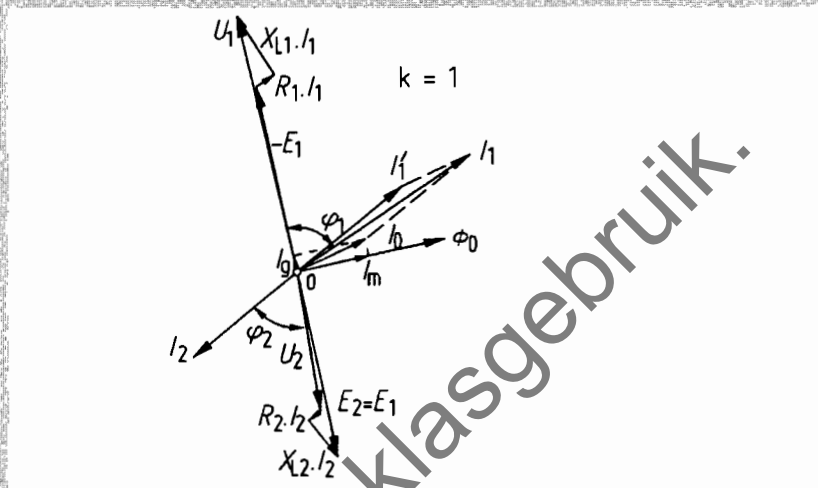
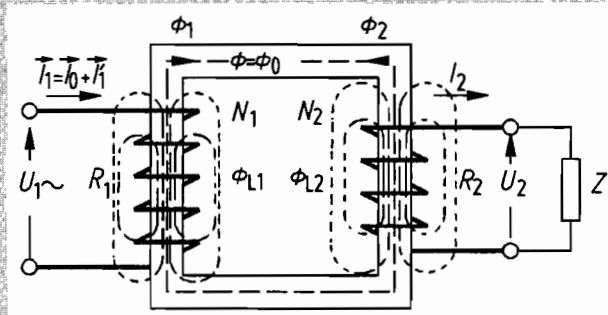
De magnetische flux, veroorzaakt door de primaire wikkeling aan te sluiten op een wisselspanning, wordt omsloten door de secundaire wikkeling. Beide wikkelingen omvatten een identieke flux ϕ_0 zodat de *geïnduceerde spanning per winding* voor de primaire en secundaire wikkeling dezelfde is. Door het aantal windingen van de secundaire wikkeling N_2 te wijzigen, kan men de grootte van de secundaire geïnduceerde spanning E_2 naar willekeur aanpassen.

De zelfinductiespanning $E_1 = N_1 \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$ (V)

De wederzijdse inductiespanning $E_2 = N_2 \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$ (V)

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

De niet-ideale transformator bij belasting



Opbouw van het vectordiagram ($k = 1$)

- 1 We vertrekken vanuit de (gekende) aangesloten belasting met de meetbare grootheden van de secundaire keten en tekenen U_2 met de stroom I_2 die φ_2° naaijlt op U_2 .
- 2 De stroom I_2 veroorzaakt in de secundaire wikkeling een ohmse ($R_2 \cdot I_2$) en een inductieve ($X_{L2} \cdot I_2$) spanningsval.

$$\vec{E}_2 = \vec{U}_2 + R_2 \vec{I}_2 + X_{L2} \cdot \vec{I}_2$$
- 3 Vermits $k = 1$ is $E_1 = E_2$.
 We tekenen $-E_1$ (gelijk en tegengesteld aan E_2).
- 4 De nullaststroom $\vec{I}_0 = \vec{I}_m + \vec{I}_g$.
 De flux ϕ_0 ijlt 90° voor op E_1 en wordt veroorzaakt door de magnetisatiestroom I_m (reactieve component van I_0) die in fase is met ϕ_0 . De actieve component I_g van I_0 is in fase met $-E_1$ en dekt de ijzerverliezen (magnetische verliezen).
- 5 De primaire stroom bij belasting $\vec{I}_1 = \vec{I}_1' + \vec{I}_0$ met $I_1' = I_2$, ($k = 1$) maar in tegenfase.
- 6
$$\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + R_1 \cdot \vec{I}_1 + X_{L1} \cdot \vec{I}_1$$

Mogelijke schakelingen

Zowel de hoogspannings- als de laagspanningswikkelingen kunnen in driehoek (D) of in ster (Y) geschakeld worden. Bij distributietransformatoren past men voor de secundaire wikkelingen ook de z.g. zigzagschakeling (z) toe.

Schakelgroepen

Naar gelang van de schakelingen van de hoog- en laagspanningswikkeling en van de daaruit voortvloeiende faseverschuiving tussen overeenkomstige HS- en LS-wikkelingen worden de driefasetransformatoren ingedeeld in vier schakelgroepen. Elk van deze schakelgroepen bevat nog drie schakelingen. De twaalf schakelcombinaties die zo ontstaan zijn genormaliseerd.

Klokgetal

Het klokgetal is karakteristiek voor een bepaalde schakeling van de fasewikkelingen van een driefasetransformator.

Het klokgetal geeft de faseverschuiving aan tussen de hoog- en laagspanningszijde. De verschuivingshoek bepalen we door het klokgetal te vermenigvuldigen met 30° .

Parallel schakelen

a In parallel schakelen van eenfasetransformatoren

Voorwaarden

- Dezelfde *transformatieverhouding* k . Dit impliceert ook *gelijkheid van de secundaire nullastspanningen*.
- Dezelfde *nominale spanning*.
- Dezelfde *kortsluitspanning*.
- Hetzelfde *argument* door de verschillende equivalente impedanties.
- In de praktijk zal men de verhouding van de vermogens beperken tot $1/3$, beter nog tot $1/2$.

b In parallel schakelen van de driefasetransformatoren

Voorwaarden

- De voorwaarden voor eenfasetransformatoren blijven ook hier gelden.
- Dezelfde schakelgroep.
- Gelijke faseopvolging.

Voor het in parallel schakelen van transformatoren gelden dezelfde principes als bij het in parallel schakelen van synchrone generatoren.

Bijzondere schakelingen

De V-schakeling

Hierbij wordt een driefasespanning getransformeerd met slechts twee transformatoren.

De V-schakeling wordt veel toegepast bij spanningsmeettransformatoren, regelbare transformatoren en beveiligingsrelais.

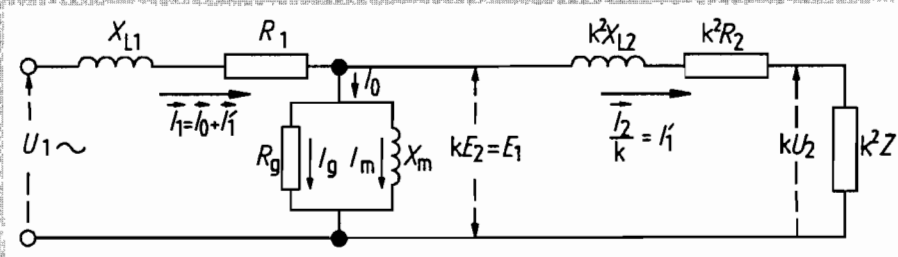
De Scottschakeling

Met de Scottschakeling is het mogelijk een tweefasenet te voeden vanuit een driefasenet.

Speciale transformatoren

We vermelden de spaartransformator, de regeltransformator, de meettransformator, de veiligheidstransformator, de speelgoedtransformator (kortsluitvast), de scheidingstransformator, de lastransformator, de impulstransformator.

De equivalente keten



Op basis van het vectordiagram is het mogelijk de bovenstaande *equivalente keten* samen te stellen.

Omdat de resultaten van de berekeningen moeten overeenkomen met de werkelijke waarden is het nodig de secundaire passieve elementen van de equivalente keten te vermenigvuldigen met de coëfficiënt k^2 . Deze aanpassing van de secundaire passieve elementen is nodig omdat in deze keten een k -maal hogere spanning een k -maal kleinere stroom veroorzaakt.

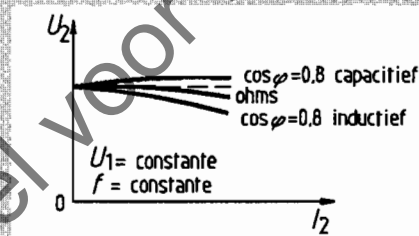
Uit de equivalente keten blijkt dat:

$$k \cdot E_2 = k \cdot U_2 + k^2 \cdot R_2 \cdot I_1' + k^2 \cdot X_{L2} \cdot I_1'$$

Bepalen van de elementen van de equivalente keten

Voor het bepalen van de passieve elementen van de equivalente keten voeren we de nullastproef en de kortsluitproef uit.

Uitwendige karakteristiek van de eenfasetransformator



Zoals bij de synchrone wisselstroomgeneratoren stellen we hier vast dat bij een voldoende capacitiële belasting de secundaire spanning toeneemt bij toenemende belasting. Ook de faseverschuiving ($\cos \varphi$) beïnvloedt de uitwendige karakteristiek van een transformator.

Rendement van een eenfasetransformator

$$\eta = \frac{P_n}{P_t} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_v}$$

Met P_v gelijk aan de som van de verliezen.

Driefasetransformator

Een driefasetransformator kan worden beschouwd als een samenstelling van drie identieke eenfasetransformatoren. De principes die gelden voor de eenfasetransformator zijn integraal van toepassing op de driefasetransformator.