9

TRANSFORMATOREN

9.1. ALGEMEENHEDEN

9.1.1. INLEIDING

Een *transformator* is een *statisch elektromagnetisch toestel* dat, in het algemeen, dient voor de omzetting van elektrische energie bij een bepaalde spanning, in elektrische energie bij een andere spanning, met dezelde frequentie.

De werking van de transformator is gebaseerd op het verschijnsel van de *wederzijdse elektromagnetische inductie* (zie : ELEKTRICITEIT - DEEL I - "GELIJKSTROOMTHEORIE" - Hoofdstuk 11 - "DE ELEKTROMAGNETISCHE INDUCTIE" -).

De *wederzijdse elektromagnetische inductie* is het verschijnsel van het ontstaan van een inductie-ems in een spoel tengevolge van stroomveranderingen in een andere spoel.

De mogelijkheid om, *via transformatoren, zeer hoge spanningen* (220 kV, 380 kV, 550 kV en zelfs 1500 kV) te verkrijgen laat toe *zeer grote hoeveelheden elektrische energie over lange afstanden te transporteren, zonder overdreven spanningsverliezen en vermogenverliezen.*

We weten immers dat, om een *bepaald elektrisch vermogen* over te brengen, de *stroomsterkte kleiner* is *naarmate de spanning hoger* is. Een *kleinere stroomsterkte* betekent *minder spanningsverlies* ($I.R$) in de leidingen en tevens *minder vermogenverlies* (I^2R).

In de statorwikkelingen van de *synchrone generatoren*, zoals geïnstalleerd in moderne *elektrische centrales*, worden rechtstreeks driefasen spanningen geïnduceerd van 6000 V, 10500 V, 14500 V en zelfs 24000 V.

Machine-transformatoren, opgesteld in *hoofdtransformatiestations* naast de elektrische centrales, verhogen deze spanningen tot 70 kV, 150 kV, 220 kV, 380 kV of zelfs 550 kV.

De elektrische energie wordt dan, onder deze *zeer hoge spanningen*, over grote afstanden naar *transformatiestations* getransporteerd, via luchtleidingen.

Bij middel van *verdelingstransformatoren*, opgesteld in deze transformatiestations, worden de zeer hoge spanningen naar lagere waarden getransformeerd (bv. van 380 kV naar 70 kV).

Van hieruit wordt de elektrische energie verder getransporteerd naar de *belangrijke verbruikscentra*, waar de spanning nogmaals naar een lagere waarde wordt getransformeerd (bv. van 70 kV naar 10 kV).

De elektrische energie wordt onder deze hoge spanningen van 10 kV overge-

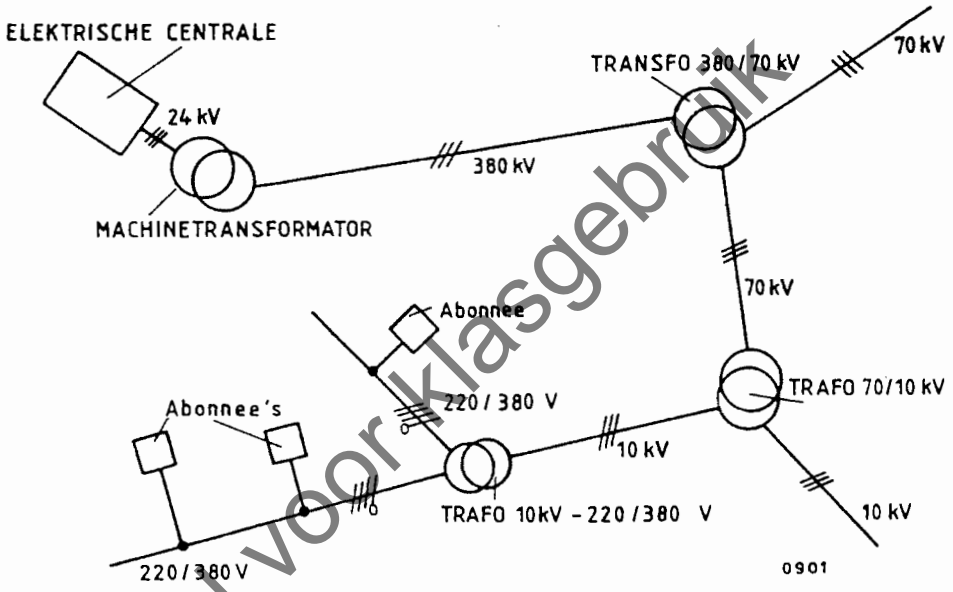
Enkel voor klasgebruik

bracht naar *nettransformatoren*, opgesteld in *onderstations*, waar de spanning wordt getransformeerd naar 220/380 V.

Onder deze *lage spanningen* wordt de elektrische energie afgeleverd aan de *abonnees* of *cliënten*.

In *nijverheidsondernemingen* worden ook dikwijls hoge spanningen (bv. 3 kV of 6 kV) rechtstreeks aangewend voor de voeding van elektromotoren van groot vermogen.

Onderstations worden opgericht in belangrijke verdeelcentra van elektrische energie, d.w.z. in nijverheidsondernemingen die grote hoeveelheden elektrische energie verbruiken en in diverse wijken van steden en gemeenten (zie afb.9.01).



Afb.9.01. Verdeling van de elektrische energie.

Voor talrijke toepassingen zijn *lage* en *zeer lage spanningen* vereist. Deze worden ook verkregen dank zij transformatoren (beltransformatoren, speelgoedtransformatoren, voedingstransformatoren, lastransformatoren, veiligheidstransformatoren enz.).

Zeer belangrijk zijn de toepassingen waarbij elektrische energie onder vorm van *gelijkspanning* is vereist. En deze gelijkspanningen worden meestal verkregen uit wisselspanningen die, met tussenschakeling van *spanningsverlagende* en *spanningsscheidende transformatoren*, worden *gelijkgericht* met *siliciumdioden* in *brugschakelingen* (zie : Hoofdstuk 29).

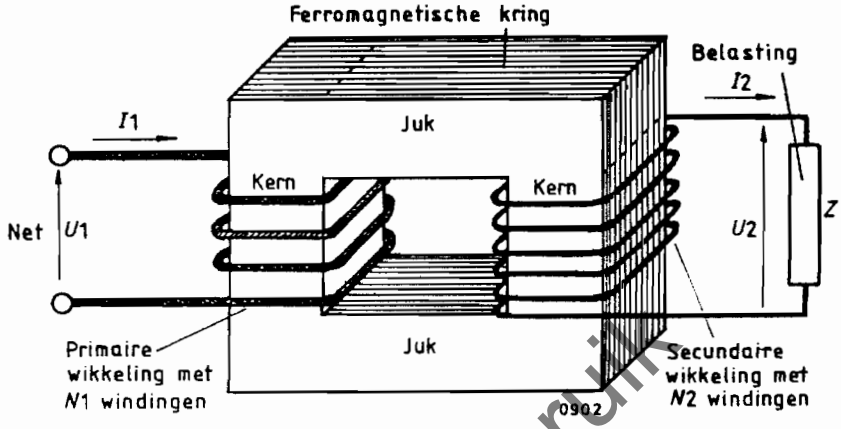
Anderzijds worden elektrische *meetinstrumenten*, elektrische *regelapparatuur* en *relais* heel dikwijls aangesloten via *meettransformatoren* (*stroommeettransformatoren* en *spanningsmeettransformatoren*), vooral in de *hoogspanningstechniek* (*HS-techniek*).

Uit het voorgaande blijkt dus duidelijk de *grote betekenis van de transformator in de elektrotechniek en in de elektronica.*

Enkel voor klasgebruik

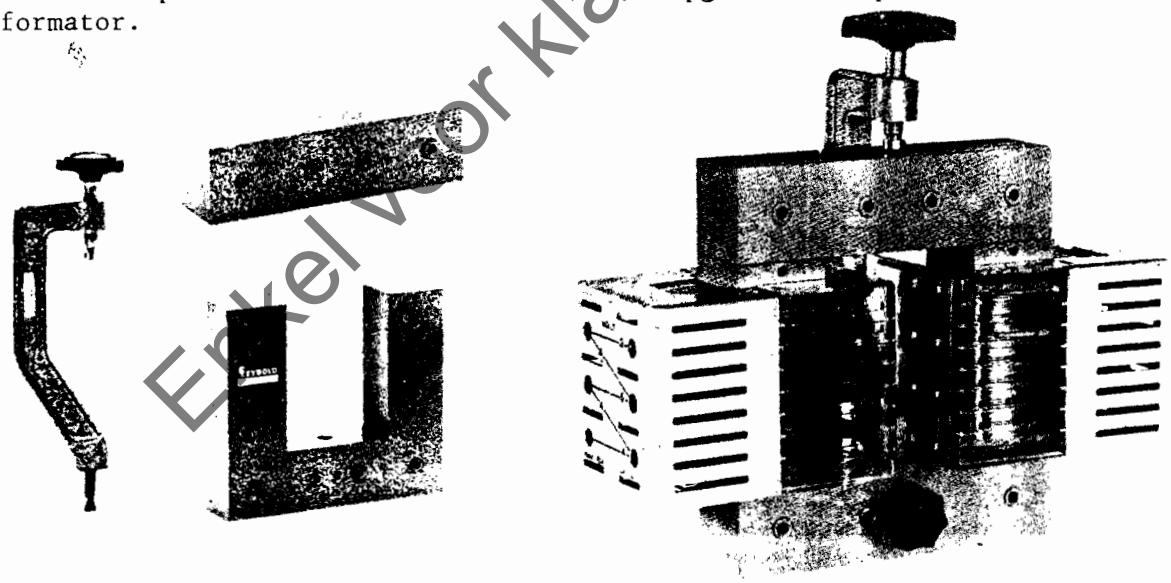
9.1.2. SAMENSTELLING VAN EEN TRANSFORMATOR

In de meest eenvoudige uitvoering is een transformator samengesteld uit een *gelamelleerde ferromagnetische kring* uit siliciumstaal, voorzien van *twee wikkelingen*, die galvanisch van elkaar gescheiden zijn (afb.9.02).



Afb.9.02. Samenstelling van een eenvoudige transformator.

De wikkelingen zijn aangebracht rond de *kernen* van de ferromagnetische kring. Deze kernen staan magnetisch met elkaar in verbinding door *sluitstukken* of *jukken*. In afb.9.03 zien we de delen van de magnetische kring van een experimenteertransformator en een opgebouwde experimenteertransformator.



Afb.9.03. Delen van een experimenteertransformator en opgebouwde experimenteertransformator (LEYBOLD).

De wikkeling die de elektrische energie uit het net opneemt is de *primaire*. De wikkeling die elektrische energie aflevert aan de uitwendige kring is de *secundaire*.

Het aantal *windingen* van de primaire wordt voorgesteld door N_1 en dit van de secundaire door N_2.
Indien de primaire spanning U_1 groter is dan de secundaire spanning U_2 spreken we van een *spanningsverlagende transformator*. In het andere geval hebben we te doen met een *spanningsverhogende transformator*.

Enkel voor klasgebruik

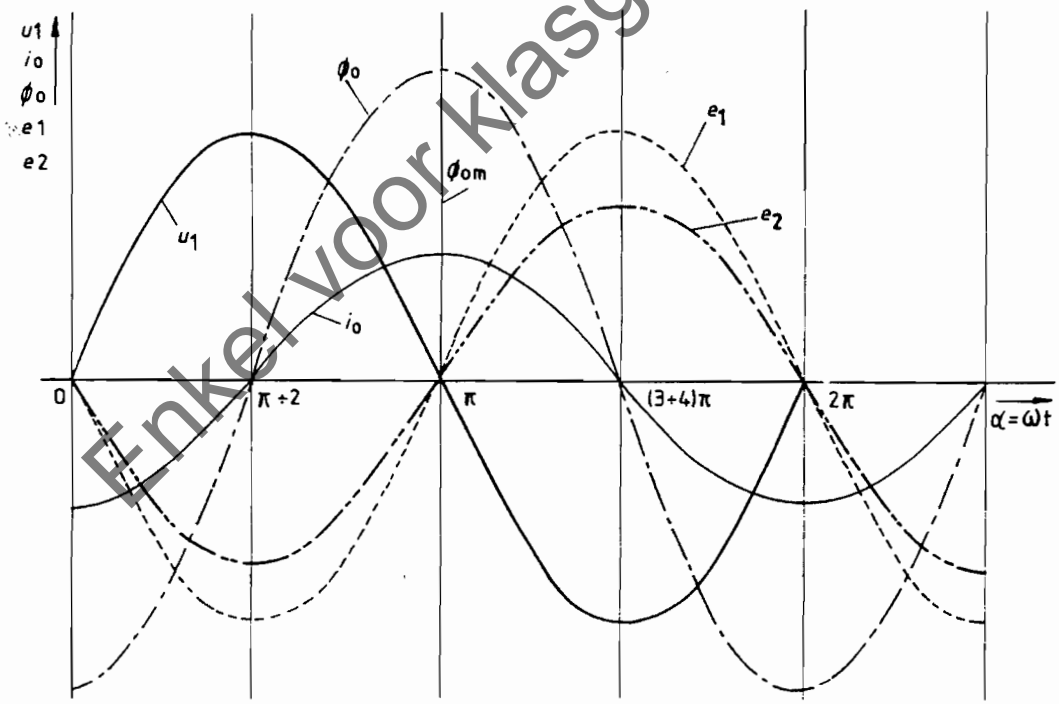
9.1.3. PRINCIEP VAN DE WERKING VAN DE TRANSFORMATOR

In een *ideale transformator* wordt uitgegaan van de onderstelling dat :

- de ohmse weerstanden van de wikkelingen nul zijn, zodat hierin geen spanningsverliezen en geen vermogenverliezen optreden ;
- de hysteresis- en wervelstroomverliezen nul zijn ;
- de magnetische flux geheel verloopt in de ferromagnetische kring zelf en er dus geen lekfluxen zijn.

Als de *primaire wikkeling* van zo een *ideale transfo*, bij *open secundaire kring*, d.w.z. *bij nullast* wordt aangesloten op een sinusoïdale spanning u_1 ontstaat hierin een nullaststroom i_0 die 90° naijlend is op spannning u_1. In feite vormt de primaire van deze transfo immers een *zuivere zelfinductiekring*.

In fase met stroom i_0 ontstaat een *sinusoïdale magnetische flux* ϕ_0, welke in de *primaire wikkeling* een *elektromotorische spanning van zelfinductie* e_1 induceert en in de *secundaire wikkeling* een *ems van wederzijdse inductie* e_2. Beide elektromotorische spanningen zijn 90° el *naijlend op de flux* (zie afb.9.04 en 9.05).



Afb.9.04. *Grafische voorstelling van de primaire nullaststroom, de flux en de geïnduceerde spanningen in primaire en in secundaire wikkelingen.*

De flux varieert van 0 tot $+\phi_{om}$ tijdens 1÷4 periode, zodat de fluxvariatie $\Delta\phi = \phi_{om}$ en het *tijdsinterval* $\Delta t = T \div 4$.

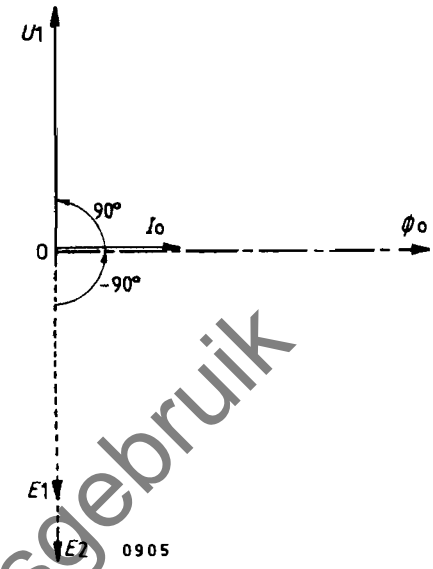
De *gemiddelde waarden* van de *ems van zelfinductie* en van de *ems van wederzijdse inductie* zijn dus :

$$E_{1gem} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} N_1 = \frac{\phi_{om} \cdot 4}{T} N_1 = 4 . f . N_1 . \phi_{om}$$

Enkel voor klasgebruik

$$E_{2gem} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} N_2 = \frac{\phi_{om} \cdot 4}{T} N_2 = 4 . f . N_2 . \phi_{om}$$

Uit de gemiddelde waarden van deze spanningen kunnen we de effectieve waarden afleiden, door te vermenigvuldigen met de factor $\pi \div 2\sqrt{2} = 1,11$.



Afb. 9.05.
Vectordiagram van spanningen, stromen en flux van een transformator bij nullast.

Inderdaad : $E_{gem} = (2 \div \pi) . E_{max}$ en $E = (1 \div \sqrt{2}) . E_{max}$

zodat : $E = (1 \div \sqrt{2}) . (\pi \div 2) . E_{gem} = 1,11 . E_{gem}$

Bijgevolg :

$$\boxed{\begin{array}{l} E_1 = 4,44 . f . N_1 . \phi_{om} \\ \hline E_2 = 4,44 . f . N_2 . \phi_{om} \end{array}} \quad \text{(V)} \qquad (9.1)$$

Hieruit volgt dat de *transformatieverhouding* gelijk is aan de *windingsverhouding*

$$\boxed{k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}} \qquad (9.2)$$

De geïnduceerde *ems van zelfinductie* in de primaire wikkeling *is gelijk en tegengesteld* aan de *toegepaste klemspanning*.

Als de *ideale transfo* langs de secundaire wikkeling *wordt belast*, zal een secundaire stroom I_2 in de verbruiker vloeien bij een klemspanning U_2. Deze stroom doet een secundaire flux ϕ_2 ontstaan die, volgens de *wet van Lenz*, tracht de *inducerende flux* ϕ_0 *te verzwakken*. Tengevolge van de kleinere flux in de ferromagnetische kring ontstaat in de primaire wikkeling van de transformator een kleinere tegenwerkende ems van zelfinductie. Aldus neemt de primaire stroom toe en stijgt van de waarde I_0 tot de waarde I_1. Deze stroom I_1 doet een flux ϕ_1 ontstaan.
Er zijn dan twee magnetische fluxen ϕ_1 en ϕ_2 tegelijkertijd aanwezig in de ferromagnetische kring.

Maar volgende stelling kan worden bewezen : in *iedere elektrische machine*, aangesloten op een *constante spanning* met een *constante frequentie*, blijft de *magnetische flux* steeds *constant* voor *alle belastingen*.

Enkel voor klasgebruik

De resulterende flux ϕ van de primaire en secundaire fluxen ϕ_1 en ϕ_2 is dus gelijk aan de flux ϕ_0 bij nullast veroorzaakt door stroom I_0.

Uiteindelijk zal dus, bij belasting van een *ideale transformator*, de geïnduceerde ems van zelfinductie in de primaire weer gelijk en tegengesteld zijn aan de toegepaste klemspanning, terwijl ook aan de secundaire zijde de ems van wederzijdse inductie gelijk is aan de klemspanning en in dezelfde zin werkt.

Uit formule 9.2 volgt dan ook :

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}} \qquad (9.3)$$

Het *elektrisch vermogen* dat door de secundaire wikkeling aan de *buitenkring* wordt afgeleverd is gelijk aan het elektrisch vermogen dat door de primaire wikkeling uit het *voedingsnet* wordt afgenomen (tenminste in een ideale transformator) :

$$U_1.I_1.\cos\varphi_1 = U_2.I_2.\cos\varphi_2$$

Maar ook kan men voor de ideale transformator vaststellen dat $\varphi_1 = \varphi_2$, zodat :

$$U_1.I_1 = U_2.I_2$$

Bijgevolg :

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}} \qquad (9.4)$$

Deze uitdrukking is *volkomen juist* voor een *ideale transformator*. Voor een transfo uit de praktijk van de elektrotechniek is *bij nullast* de primaire stroom I_0 zeer klein, zodat de primaire ems van zelfinductie E_1 bij benadering gelijk is aan de primair toegepaste klemspanning U_1, terwijl $E_2 = U_2$. Formule 9.3 is dan ook toepasselijk.

Indien echter formule 9.4 wordt toegepast voor een transfo uit de praktijk *bij vollast* is de fout 2 tot 3 % (zie verder in dit hoofdstuk).

9.2. VECTORDIAGRAMMEN

9.2.1. VECTORDIAGRAM VAN SPANNINGEN EN STROMEN VOOR EEN TRANSFO BIJ NULLAST

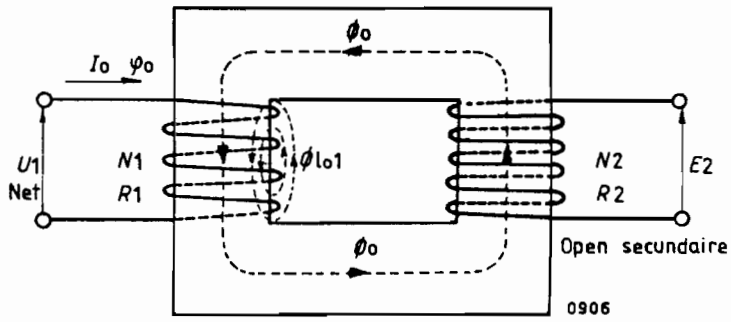
Als een transformator, met *open secundaire kring*, d.w.z. *bij nullast*, primair wordt aangesloten op een netspanning U_1 (afb.9.06) vloeit hierin een *nullaststroom* I_0, die in realiteit *iets minder dan* 90° *naijlend* is op de toegepaste spanning U_1, d.w.z. dat $\varphi_0 < 90°$.

Deze primaire nullaststroom I_0 doet in de ferromagnetische kring een magnetische nullastflux ϕ_0 ontstaan, die sinusvormig is en die over een bepaalde kleine hoek θ naijlend is op de nullaststroom I_0, dit tengevolge van de invloed van het hysteresisverschijnsel en van de foucaultstromen (afb.9.07).

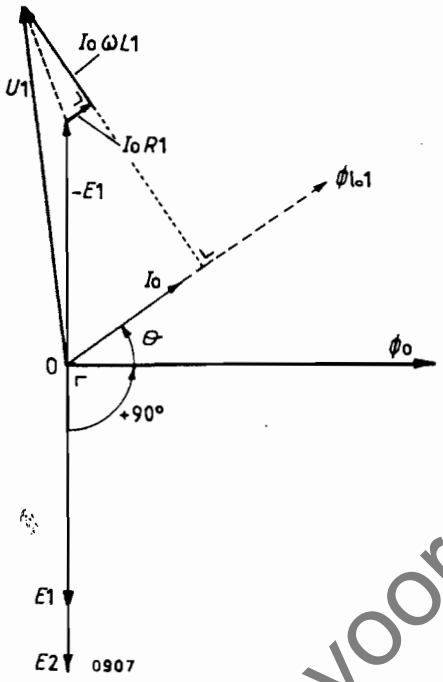
De primaire nullaststroom I_0 kan worden gesplitst in twee componenten, die loodrecht op elkaar staan. Er is de *actieve componente* of *watt-componente* $I_{0w} = I_0.\sin\theta \cong I_0.\cos\varphi_0$, die in fase is met E_1 en dus praktisch in fase

Enkel voor klasgebruik

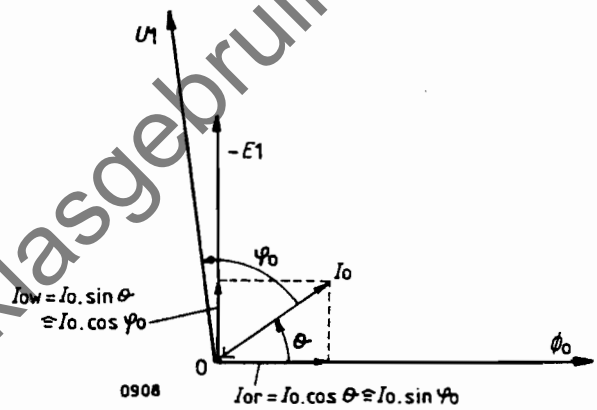
met U_1. Deze componente wordt ook de *ijzerverliescomponente* genoemd, omdat deze bepalend is voor de grootte van de hysteresis- en foucaultverliezen.



Afb.9.06. De transformator bij nullast.



Afb.9.07. Vectordiagram van spanningen en stroom voor een transfo bij nullast.



Afb.9.08. Componenten van de primaire nullaststroom van een transformator.

Enkel voor klasgebruik

En er is de *reactieve componente* of *wattloze-componente* $I_{or} = I_o.\cos\theta \cong I_o.\sin\varphi_o$ in fase met ϕ_o en welke zorgt voor het ontstaan en het in stand houden van de magnetische flux ϕ_o. Deze componente wordt daarom ook wel de *magnetische componente* genoemd.

Het actief vermogen $P_o = U_1.I_o.\cos\varphi_o$ is het *vermogenverlies* door *hysteresisverschijnselen* en *foucaultstromen* (of *wervelstromen*) in de ferromagnetische kring en door *joule-effect* $I_o^2.R_1$ in de primaire wikkeling :

$$P_o = U_1.I_o.\cos\varphi_o = P_{hf} + P_{j1} = P_{hf} + I_o^2.R_1$$

Het *reactief vermogen* $Q_o = U_1.I_o.\sin\varphi_o$ zorgt voor de aanwezigheid van de nullastflux ϕ_o.

Alle windingen van de primaire wikkeling omvatten alle magnetische krachtlijnen van de flux ϕ_o. Maar stroom I_o veroorzaakt tevens een primaire nullastlekflux ϕ_{lo1}, die *praktisch geheel in de lucht* verloopt en dus *in fase* is met I_o. De windingen van de primaire wikkeling omvatten eveneens praktisch alle krachtlijnen van deze primaire lekflux, maar de windingen van de secundaire

wikkeling worden er in het geheel niet door beïnvloed.

De nullastflux ϕ_o induceert in de primaire wikkeling een ems van zelfinductie E_1 en in de secundaire wikkeling een ems van wederzijdse inductie E_2. Beide elektromotorische spanningen zijn 90°el naijlend op de gemeenschappelijke flux ϕ_o en dus onderling in fase (zie : ELEKTRICITEIT - DEEL II - "WISSELSTROOM- EN DRAAISTROOMTHEORIE" - Hoofdstuk 1 - "ALGEMEENHEDEN").

Lekflux ϕ_{lo1} induceert in de *primaire wikkeling* eveneens een *ems van zelfinductie* E_{lo1}, die 90°el naijlend is op deze flux.

Er verschijnen dus drie spanningsverliezen in de primaire wikkeling, met name :

- de zelfinductiespanning E_1, veroorzaakt door flux ϕ_o en 90°el naijlend op ϕ_o ;
- de zelfinductiespanning E_{lo1}, veroorzaakt door de lekflux ϕ_{lo1} en 90°el naijlend op ϕ_{lo1} ;
- het ohms spanningsverlies $I_o.R_1$, veroorzaakt in de ohmse weerstand van de primaire wikkeling en in fase met I_o.

Tussen deze *drie spanningen* en de *toegepaste netspanning* U_1 bestaat volgend vectoriëel verband :

$$\boxed{\vec{U}_1 = \vec{E}_1 + \vec{E}_{lo1} + \vec{I}_o.R_1} \qquad \text{(V)} \qquad (9.5)$$

In het vectordiagram van spanningen en stromen tekenen we, bij overeenkomst, de spanningsverliezen in tegenfase met hun eigenlijke plaats (zie afb.9.07).

9.2.2. VECTORDIAGRAMMEN VAN SPANNINGEN EN STROMEN VOOR EEN BELASTE TRANSFORMATOR

Zoals reeds vermeld is de *resulterende magnetische flux* in de ferromagnetische kring van een transformator *onafhankelijk van de belasting*, onder voorwaarde dat de *toegepaste spanning* en de *frequentie* ervan *constant* zijn.
Bij nullast is de flux :

$$\boxed{\phi_o = \frac{N_1 . I_o}{R_m}} \qquad \text{(Wb)} \qquad (9.6)$$

In deze formule is $R_m = \dfrac{l}{\mu_o . \mu_r . A}$ de *magnetische weerstand* of *reluctantie* van de ferromagnetische kring in ampere per weber (A/Wb).

Een secundaire belastingsstroom I_2 veroorzaakt een magnetische flux ϕ_2 met als uitdrukking :

$$\boxed{\phi_2 = \frac{N_2 . I_2}{R_m}} \qquad \text{(Wb)} \qquad (9.7)$$

Bij deze secundaire stroom I_2 behoort een primaire stroom I_1, zodat de primaire flux eveneens is gestegen van ϕ_o tot ϕ_1 :

$$\boxed{\phi_1 = \frac{N_1 . I_1}{R_m}} \qquad \text{(Wb)} \qquad (9.8)$$

Enkel voor klasgebruik

Volgens de vectoriële gelijkheid :

$$\vec{\phi} = \vec{\phi}_o = \vec{\phi}_1 + \vec{\phi}_2$$

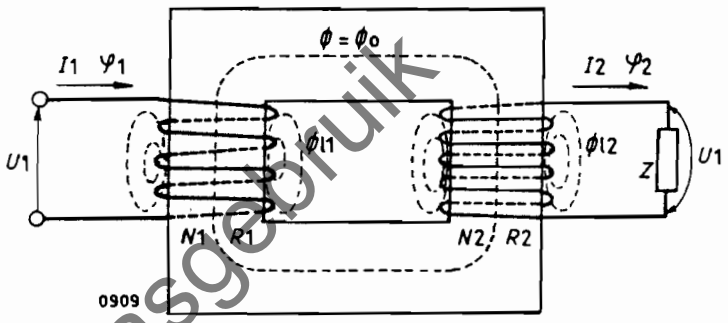
is :

$$\boxed{\frac{N_1 . \vec{I}}{R_m} = \frac{N_1 . \vec{I}_1}{R_m} + \frac{N_2 . \vec{I}_2}{R_m}}$$

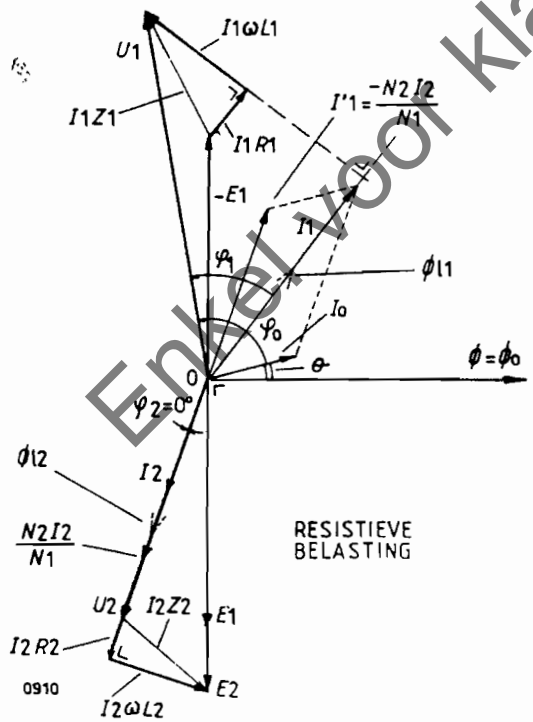
Hieruit volgt :

$$\boxed{\vec{I}_1 = \vec{I}_o + (-\frac{N_2}{N_1}\vec{I}_2)} \qquad \text{(A)} \qquad (9.9)$$

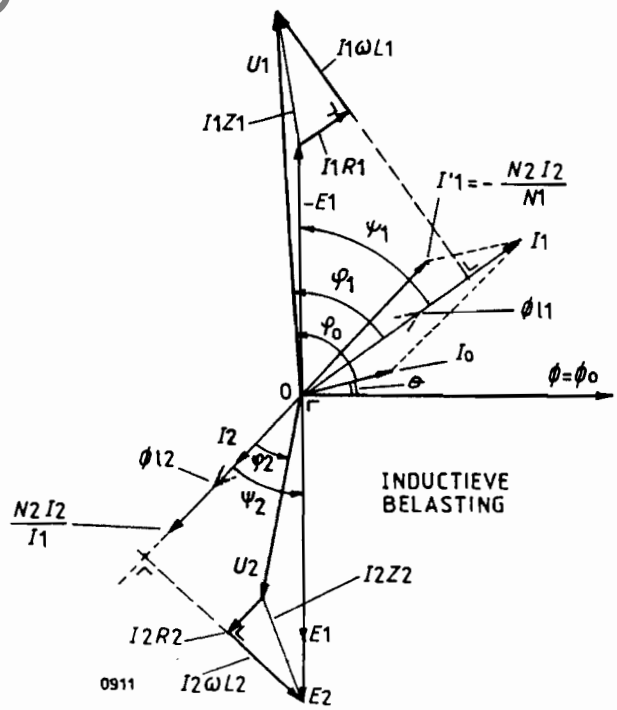
We kunnen dus *grafisch* en *analytisch* de primaire stroom I_1 bepalen als de *primaire nullaststroom* I_o en de *secundaire stroom* I_2 zijn gekend (zie afb. 9.10, 9.11 en 9.12).



Afb. 9.09.
Magnetische fluxen in een belaste transfo.



Afb. 9.10. Vectordiagram van spanningen en stromen van een transfo bij ohmse belasting.



Afb. 9.11. Vectordiagram van spanningen en stromen van een transfo bij inductieve belasting.

De *primaire stroomcomponente* die de *demagnetiserende* invloed van de secundaire stroom compenseert is :

$$\boxed{I_1' = -\frac{N_2}{N_1} I_2} \qquad \text{(A)} \qquad (9.10)$$

Enkel voor klasgebruik

De magnetische lekfluxen, respectievelijk veroorzaakt door de stromen I_1 en I_2, zijn ϕ_{lo1} , ϕ_{lo2} (zie afb.9.09).

De twee lekfluxen induceren respectievelijke zelfinductiespanningen in de primaire en secundaire wikkelingen :

$$\boxed{\begin{aligned} E_{l1} &= I_1.X_{l1} = I_1.\omega L_{l1} \\ E_{l2} &= I_2.X_{l2} = I_2.\omega L_{l2} \end{aligned}} \quad \text{(V)} \qquad (9.11)$$

In deze uitdrukkingen zijn X_{l1} en X_{l2} respectievelijk de *primaire* en de *secundaire lekreactanties*, terwijl L_{l1} en L_{l2} respectievelijk de *primaire* en de *secundaire lekflux-zelfinductiecoëfficiënten* zijn, met als uitdrukkingen :

$$\boxed{\begin{aligned} L_{l1} &= \frac{N_1.\phi_{l1}}{I_1} \\ L_{l2} &= \frac{N_2.\phi_{l2}}{I_2} \end{aligned}} \quad \text{(H)} \qquad (9.12)$$

Voor de elektrische grootheden van de primaire wikkeling geldt aldus volgende gelijkheid :

$$\boxed{\begin{aligned} \vec{U}_1 &= \vec{E}_1 + \vec{I}_1.R_1 + \vec{I}_1.\omega L_{l1} \\ &= \vec{E}_1 + \vec{I}_1.Z_1 \end{aligned}} \quad \text{(V)} \qquad (9.13)$$

Een analoge gelijkheid kan worden geschreven voor de elektrische grootheden van de secundaire wikkeling :

$$\boxed{\begin{aligned} \vec{E}_2 &= \vec{U}_2 + \vec{I}_2.R_2 + \vec{I}_2.\omega L_{l2} \\ &= \vec{U}_2 + \vec{I}_2.Z_2 \end{aligned}} \quad \text{(V)} \qquad (9.14)$$

De uitdrukkingen Z_1 en Z_2 zijn de inwendige impedanties van respectievelijk de primaire en de secundaire wikkelingen :

$$\boxed{\begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{R_1^2 + (\omega L_{l1})^2} \\ Z_2 &= \sqrt{R_2^2 + (\omega L_{l2})^2} \end{aligned}} \quad (\Omega) \qquad (9.15)$$

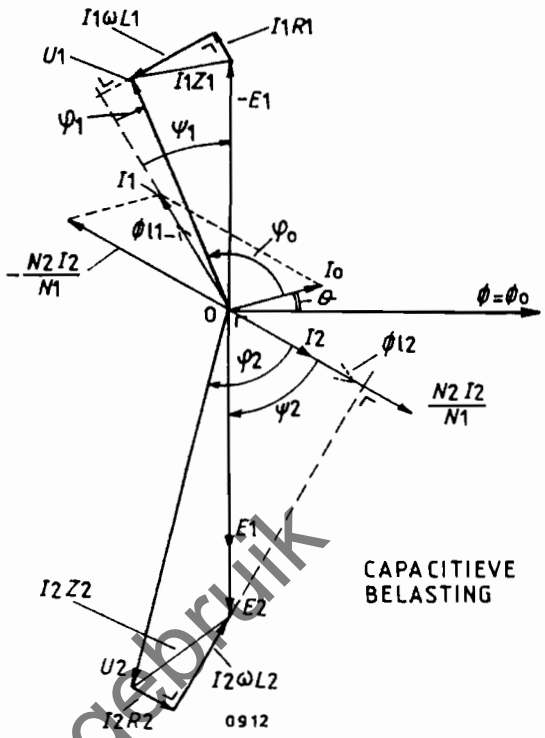
In afb.9.10 is het vectordiagram van de spanningen en de stromen getekend voor een transformator bij *ohmse belasting*, waarbij I_2 in fase is met U_2.

In het geval van *inductieve belasting* heeft het vectordiagram van spanningen en stromen het uitzicht van afb.9.11.

Voor een transformator bij *capacitieve belasting* is het vectordiagram van spanningen en stromen zoals voorgesteld in afb.9.12.

Merkwaardig is vast te stellen dat, in het geval van een *capacitief belaste transformator*, de *secundaire klemspanning groter is dan de ems van wederzijdse inductie* in de secundaire wikkeling.

Enkel voor klasgebruik

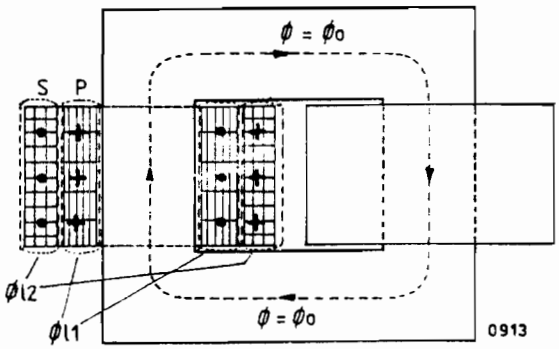


Afb.9.12.

Vectordiagram van spanningen en stromen voor een capacitief belaste transformator.

9.3. VOORDELEN EN NADELEN VAN DE LEKREACTANTIES VAN EEN TRANSFO

In een transformator zijn de *lekreactanties* gewoonlijk niet gewenst, omdat zij *spanningsverliezen* veroorzaken. Daarom wordt de constructie van transformatoren derwijze opgevat dat de lekfluxen ϕ_{l1} en ϕ_{l2} slechts *klein* zijn.
Maar anderzijds worden *eventuele kortsluitstromen* door de lekreactanties begrensd, hetgeen de transfo beveiligt tegen beschadiging, terwijl bovendien het vereiste schakelvermogen van de vermogenschakelaars kleiner mag gekozen worden.
In de praktijk worden transformatoren dus *niet* gebouwd met de *kleinst mogelijke lekreactanties*, maar wel met *voldoende lekreactanties om de kortsluitstromen te beperken tot bv. 7 of 30 maal de vollaststroom.*
De automatische beveiligingsschakelaars hebben dan de tijd om de transfo van het net af te schakelen vóór dat deze beschadigd zou zijn.
De lekreactanties worden verminderd door de primaire en secundaire wikkelingen als *coaxiale spoelen* uit te voeren, met slechts zo klein mogelijke afstanden tussen de opeenvolgende spoelen (zie afb.9.13).

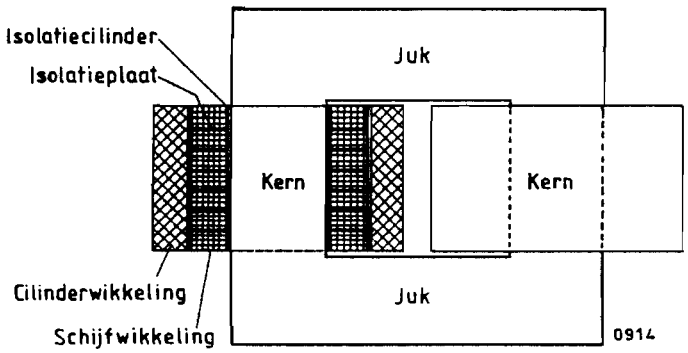


Afb.9.13.

Coaxiale primaire en secundaire wikkelingen om de lekfluxen te verminderen.

Enkel voor klasgebruik

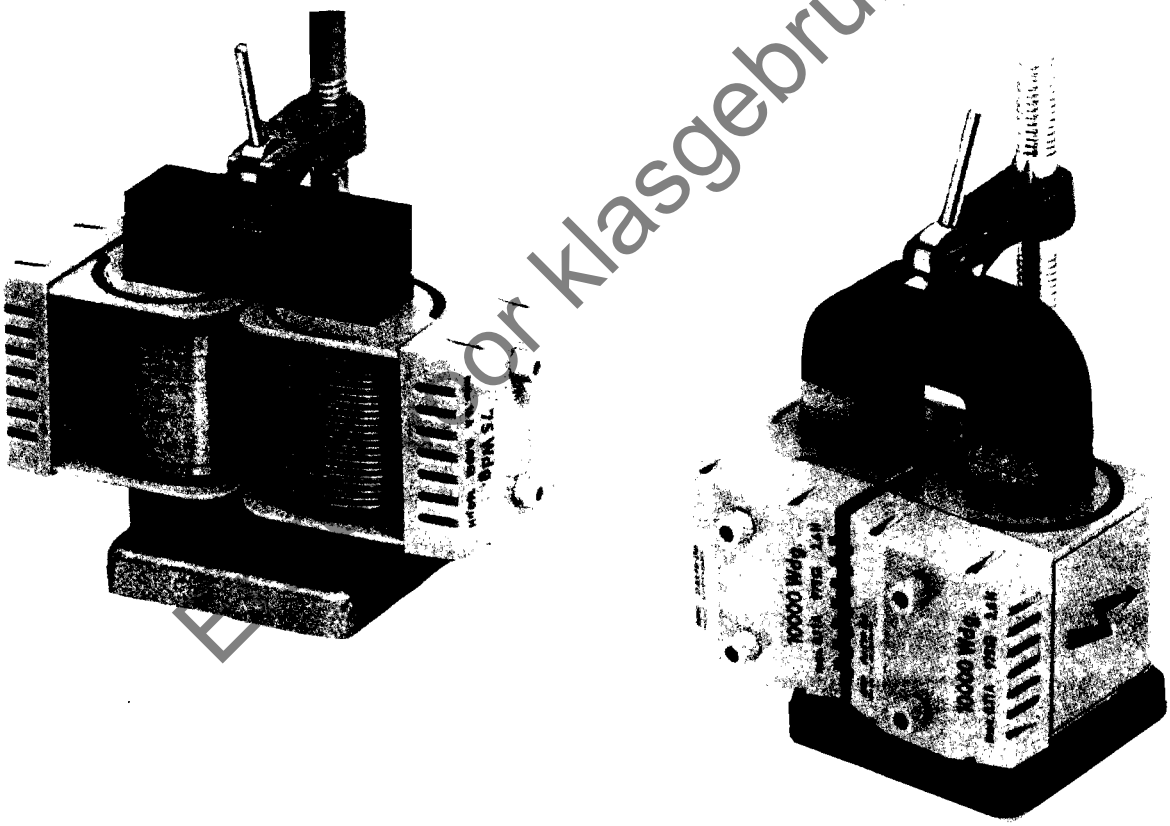
Ook worden dikwijls *schijfwikkelingen* toegepast met de bedoeling de grootte van de lekreactanties te verminderen (zie afb.9.14).



Afb.9.14.
Transfo met schijfwikkeling voor de vermindering van de lekfluxen.

Transformatoren voor de voeding van *hoogspannings-gasontladings-verlichtingsbuizen*, *speelgoedtransformatoren* en *lastransformatoren* worden uitgevoerd met grote lekreactanties om onder belasting de *vereiste spanningsdaling te verkrijgen* (zie : Hoofdstuk 13).

Exemplaar voor klasgebruik



Afb.9.15. Experimenteertransformatoren met verschillende uitvoeringen van ferromagnetische kring (PHYWE).

9.4. OEFENINGEN

1. De secundaire wikkeling van een transformator heeft 80 windingen. De hierin geïnduceerde spanning heeft een effectieve waarde van 28 V. Bereken de amplitude van de magnetische flux.
   Welk is het aantal windingen van de primaire als deze aangesloten is op 220 V - 50 Hz ?

OPLOSSING

Uit de formule : $E_2 = 4{,}44.f.N_2.\phi_{om}$

volgt : $\phi_{om} = 28 \div 4{,}44.50.80 = 0{,}001577$ Wb

Uit de relatie : $\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}$

volgt : $N_1 = \frac{E_1}{E_2} N_2 = \frac{220}{28} 80 = 629$ windingen

2. De primaire van een transformator is aangesloten op een spanning van 6600 V - 50 Hz. Het aantal windingen van de secundaire bedraagt 55 en de transformatieverhouding is 30.
Bereken de secundaire spanning en het primair aantal windingen.

OPLOSSING

Uit de formule : $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$

volgt : $E_2 = E_1 \div k = 6600 \div 30 = 220$ V

en : $N_1 = k.N_2 = 30.55 = 1650$ windingen

3. De kern van een transfo voor 6000 / 220 V - 50 Hz heeft een doorsnede van 160 cm^2 waarvan 92 % effectief ferromagnetisch materiaal en 8 % isolatie. De maximale inductie bij nullast is 1,40 Wb/m^2.
Bepaal het aantal windingen van primaire en secundaire, alsook de transformatieverhouding.

OPLOSSING

De flux bij nullast is : $\phi_{om} = B_m.A = 1{,}4.0{,}92.160.10^{-4} = 0{,}02061$ Wb

Uit de formules : $E_1 = 4{,}44.f.N_1.\phi_{om}$ en $E_2 = 4{,}44.f.N_2.\phi_{om}$

volgt : $N_1 = \frac{E_1}{4{,}44.f.\phi_{om}} = \frac{6000}{4{,}44.50.0{,}02061} = 1312$ windingen

$N_2 = \frac{E_2}{4{,}44.f.\phi_{om}} = \frac{220}{4{,}44.50.0{,}02061} = 48$ windingen

De transformatieverhouding is dus :

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1312}{48} = 27{,}33$$

9.5. HERHALINGSVRAGEN

1. Wat is een transformator ?
2. Op welke verschijnsel is de werking van een transformator gebaseerd ?
3. Bespreek het nut en het belang van transformatoren.
4. Wat zijn machine-transformatoren ? Verklaar uw antwoord.
5. Welke functie hebben distributietransformatoren ? Leg dit uit.
6. Hoe is een transformator opgebouwd ? Welke zijn de hoofddelen en volgens welke principepen moet de samenstelling geschieden ?

Enkel voor klasgebruik

7. Wat is een ideale transformator ?
8. Bespreek de principiële werking van een ideale transformator en teken het nullast-vectordiagram van stroom, flux en spanningen.
9. Schrijf de formules voor de berekening van de effectieve waarden van de primaire zelfinductiespanning en de secundaire ems van wederzijdse inductie in functie van de flux en het aantal windingen.
10. Wat is de transformatieverhouding van een transformator ?
11. Welk verband bestaat er tussen de transformatieverhouding en de windingsverhouding ?
12. Welk verband bestaat er tussen de primaire en secundaire fluxen bij belasting van een transformator en de flux bij nullast ? Schrijf dit verband in een wiskundige uitdrukking en leg deze uit.
13. Teken het vectordiagram van spanningen en stromen voor een reële transformator bij nullast en verklaar de betekenis van iedere vector.
14. In welke componenten kan de primaire nullaststroom van een reële transfo worden gesplitst ? Welke betekenis hebben deze componenten en hoe worden ze genoemd ?
15. Schrijf de wiskundige uitdrukking van het actief vermogen dat een reële transformator bij nullast opneemt uit het net. In welke vermogens wordt dit primair nullastvermogen omgezet ?
16. Welke betekenis heeft het primair reactief nullastvermogen van een transformator ?
17. Wat zijn primaire en secundaire lekfluxen ?
18. Teken en bespreek het vectordiagram van spanningen, stromen en fluxen van een reële transformator bij ohmse belasting.
19. Teken en bespreek het vectordiagram van spanningen, stromen en fluxen van een reële transformator bij inductieve belasting.
20. Teken en bespreek het vectordiagram van spanningen, stromen en fluxen van een reële transformator bij capacitieve belasting.
21. Welke zijn de voordelen en welke de nadelen van de lekreactanties in een transformator ?
22. Welke transformatoren worden geconstrueerd met grote lekreactanties ? Waarom is dit zo ?

Enkel voor klasgebruik

9.6. VRAAGSTUKKEN

1. De primaire wikkeling van een transformator voor 10 kV / 220 V - 50 Hz bevat 2000 windingen.
   Bereken het aantal windingen van de secundaire, de transformatieverhouding en de amplitude van de nullastflux.

   (N_2 = 44 windingen ; k = 45,4545 ; ϕ_{om} = 0,0225 Wb)

2. De globale doorsnede van de kern van een eenfase transformator is 35 cm^2. Van deze sectie is 90 % ferromagnetisch materiaal en 10 % is isolatie. De maximale inductie is 1,46 Wb/m^2.
   Bereken het aantal windingen van primaire en secundaire wikkelingen voor volgende drie gevallen :
   (1) - transfo 380 V / 220 V - 50 Hz ;
   (2) - transfo 380 V / 220 V - 60 Hz ;
   (3) - transfo 380 V / 220 V - 50 Hz met dubbele globale doorsnede van de kern, d.w.z. 70 cm^2.

   (Eerste geval : N_1 = 372 windingen en N_2 = 216 windingen ;
   Tweede geval : N_1 = 310 windingen en N_2 = 180 windingen ;
   Derde geval : N_1 = 186 windingen en N_2 = 108 windingen).

3. De globale doorsnede van de ferromagnetische kring van een eenfase transformator is 78 cm^2. Hiervan is 92 % staal en 8 % isolatie.

De maximale waarde van de magnetische inductie is 1,32 Wb/m^2.
Bereken het aantal windingen van primaire en secundaire wikkelingen als het een transfo betreft van 22 kV / 220 V - 50 Hz.

(N_1 = 10462 windingen ; N_2 = 105 windingen)

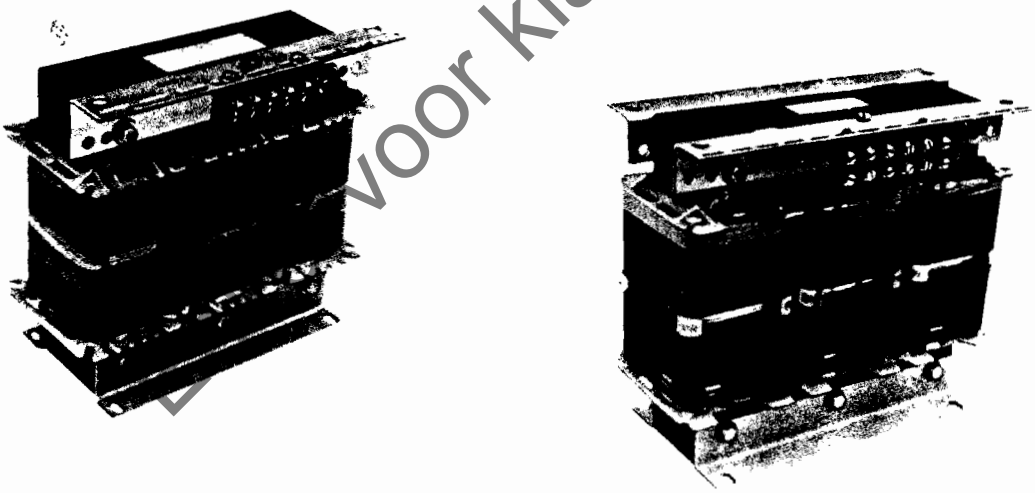
4. Een transformator neemt een primaire nullaststroom op van 9,70 A en een actief nullastvermogen van 184 W, bij een spanning van 220 V - 50 Hz.
Bereken de actieve en de reactieve componente van de magnetisatiestroom en bepaal de voorijlingshoek van deze stroom t.o.v. de flux.

(I_{ow} = 0,836364 A ; I_{or} = 9,663877 A ; θ = 5°)

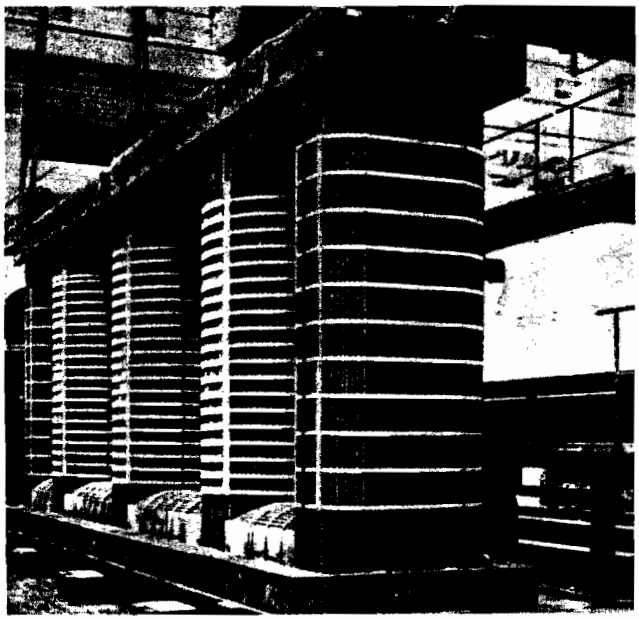
5. De nullaststroom van een eenfase transformator van 2 MVA bedraagt 2,25 % van de nominale primaire vollaststroom. De nominale primaire en secundaire spanningen zijn respectievelijk 24 kV en 3,2 kV.
Het opgenomen vermogen bij nullast is 6,25 kW. De weerstand van de primaire wikkeling is 1033 Ω.
Bereken de nullaststroom, de actieve en reactieve componenten van deze nullaststroom, de faseverschuiving van de nullaststroom en de nullastflux en het hysteresisverlies.

(I_o = 1,88 A ; I_{ow} = 0,260418 A ; I_{or} = 1,861876 A ; θ = 8° ; P_{hf} = 2600 W).

voor klasgebruik

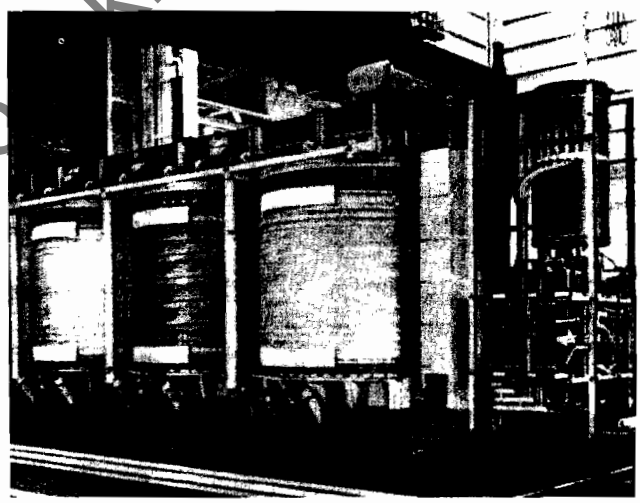


Afb.9.16. Driefasen transformatoren van klein vermogen, met ferromagnetische kring van het kern-type (SIEMENS).



①

②



Enkel voor klasgebruik

Afb. 9.17. Driefasen vijfbenige machinetransformator van 725 MVA :
1 - ferromagnetische kring zonder wikkelingen
2 - ferromagnetische kring voorzien van wikkelingen en met aangebouwde trappenschakelaar (TRAFO-UNION).