

VERMOGEN, RENDEMENT EN KARAKTERISTIEKEN VAN TRANSFORMATOREN

10.1. VERMOGENS IN EEN TRANSFORMATOR

In een transformator onderscheiden we *actieve*, *reactieve* en *schijnbare vermogens*.

De *actieve vermogens* omvatten diverse delen :

- het uit het voedingsnet opgenomen actief vermogen door de primaire, nl. $U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$;
- het joule-effect in primaire en secundaire wikkelingen, nl. $I_1^2 \cdot R_1$ en $I_2^2 \cdot R_2$;
- de hysteresis- en wervelstroom- of foudaaltverliezen in de ferromagnetische kring, d.w.z. de ijzerverliezen, waarvan de waarde bij benadering gelijk is aan $U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$ (als we het aandeel $I_0^2 \cdot R_1$ in het bij nullast door de primaire opgenomen actief vermogen verwaarlozen) ;
- het actief vermogen dat door de secundaire aan de belasting wordt afgeleverd, nl. $U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$.

Merken we op dat de *ijzerverliezen* voor alle belastingen gelijk zijn als U_1 en f constant blijven.

De *reactieve vermogens* zijn :

- het uit het voedingsnet opgenomen reactief vermogen door de primaire, nl. $U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$;
- het reactief vermogen dat zorgt voor het handhaven van de gemeenschappelijke magnetische flux ϕ , nl. $U_1 \cdot I_0 \cdot \sin \varphi_0$ (d.i. het *magnetiserend reactief vermogen*) ;
- de reactieve vermogens welke de primaire en secundaire lekfluxen verzorgen : $I_1^2 \cdot \omega L_{l1}$ en $I_2^2 \cdot \omega L_{l2}$;
- het reactief vermogen dat door de secundaire aan de belasting wordt afgeleverd : $U_2 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2$.

De *schijnbare vermogens* zijn :

- het schijnbaar vermogen dat door de primaire wikkeling uit het voedingsnet wordt opgenomen , nl. $S_1 = U_1 \cdot I_1$;
- het schijnbaar vermogen dat door de secundaire wikkeling aan de belasting wordt overgedragen, nl. $S_2 = U_2 \cdot I_2$.

Wat de actieve en reactieve vermogens betreft kunnen we schrijven :

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0 + U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (W)$$

$$Q_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = I_1^2 \cdot \omega L_{11} + I_2^2 \cdot \omega L_{12} + U_1 \cdot I_0 \cdot \sin \varphi_0 + U_2 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 \quad (\text{var})$$

Dit zijn formules (10.1).

Door het feit dat de *joule-verliezen* en de *ijzerverliezen* steeds slechts *relatief klein* zijn t.o.v. de andere vermogens in een transfo, kunnen we uit de eerste vergelijking afleiden dat het *primair actief vermogen in evenredigheid groter wordt naarmate het secundair actief vermogen toeneemt*.

Dit is ook zo met het *primair reactief vermogen*, dat steeds *ongeveer gelijk blijft aan het secundair reactief vermogen*, vermits het magnetiserend reactief vermogen constant is en de *reactieve vermogens voor de lekfluxen relatief klein* zijn.

Het is duidelijk dat het primair schijnbaar vermogen S_1 als uitdrukking heeft :

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (\text{VA}) \quad (10.2)$$

Het schijnbaar vermogen van de secundaire is :

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} \quad (\text{VA}) \quad (10.3)$$

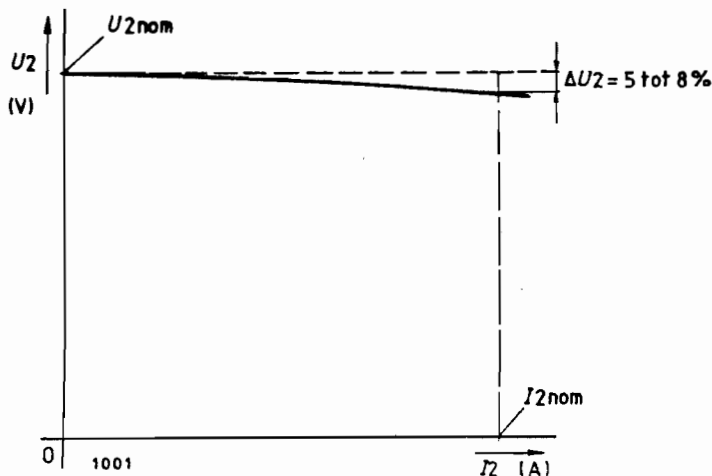
In deze uitdrukking is :

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$$

$$Q_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2$$

10.2. UITWENDIGE KARAKTERISTIEK VAN EEN TRANSFORMATOR

Deze karakteristiek geeft het verband aan tussen de secundaire klemspanning U_2 en de secundaire stroom I_2 , bij constante primaire klemspanning U_1 en constante secundaire faseverschuiving (zie afb.10.01).



Afb.10.01.

Uitwendige karakteristiek van een transformator.

Bij de nominale secundaire stroomsterkte treedt een spanningsdaling op van 5 tot 8 %. Er is wel de mogelijkheid deze spanningsdaling te neutraliseren door bijschakelen van extra windingen.

10.3. RENDEMENT VAN EEN TRANSFORMATOR

Het *totaal rendement* van een transformator is de verhouding van het *nuttig actief vermogen* dat door de secundaire wikkeling aan de belasting wordt afgeleverd en het *totaal actief vermogen* dat door de primaire uit het net wordt afgenomen :

$$\eta = \frac{P_{n2}}{P_{t1}} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_j + P_{hf}} \quad (\%) \quad (10.4)$$

In deze uitdrukking is :

$$P_j = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 = \text{actief vermogenverlies door joule-effect in primaire en secundaire wikkelingen ;}$$

$$P_{hf} = U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0 - I_0^2 \cdot R_1 = \text{actief vermogenverlies door hysteresis en foucaultstromen in de ferromagnetische kring.}$$

De *hysteresisverliezen* zijn evenredig met de frequentie (f) en met de magnetische inductie tot de macht 1,6 ($B^{1,6}$), terwijl de *foucaultverliezen* evenredig zijn met de frequentie tot de tweede macht (f^2) en met de magnetische inductie tot de tweede macht (B^2).

Door het feit dat in een transfo, zowel de frequentie f als de magnetische inductie B constante waarden hebben, zijn de *ijzerverliezen* ook *constant*.

De uitdrukking ervan is :

$$P_{hf} = U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0 - I_0^2 \cdot R_1 \quad (W) \quad (10.5)$$

In moderne transformatoren is het globaal ijzerverlies ongeveer 0,1 tot 1 % van het nuttig vermogen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat *transformatoren van groot vermogen procentueel minder ijzerverlies* hebben.

Het actief vermogenverlies door joule-effect is evenredig met de primaire en secundaire stromen in de tweede macht :

$$P_j = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 \quad (W) \quad (10.6)$$

In moderne transformatoren is het joule-effect ongeveer 0,25 tot 2% van het nuttig vermogen. Ook stellen we vast dat in transformatoren van groot vermogen procentueel minder joule-verliezen optreden.

Volgende stelling kan worden bewezen :

Het rendement van een transformator bereikt een maximale waarde als de belasting derwijze is dat het actief vermogenverlies door joule-effect gelijk is aan het actief vermogenverlies door hysteresisverschijnselen en foucaultstromen (d.w.z. als het jouleverlies = het ijzerverlies).

Het *momenteel rendement*, d.w.z. het rendement op een bepaald ogenblik, van moderne transformatoren is zeer hoog en bereikt waarden tussen de 98 en de 99 procent.

Het *praktisch of gemiddeld rendement* van een transformator is *lager* dan het momenteel rendement, omdat een transformator niet voortdurend werkt onder

maximale belasting. Dit rendement bereikt praktisch bv. 95 %.

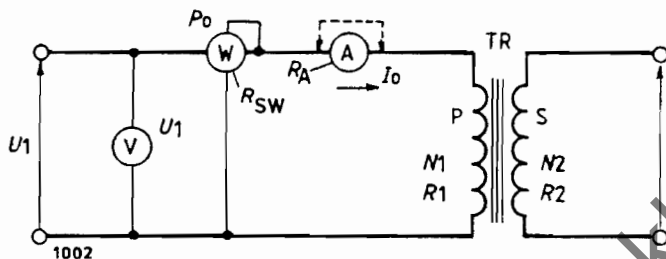
10.4. NULLASTPROEF VAN EEN TRANSFORMATOR

Wij weten reeds dat de *magnetische flux* van een transformator voor alle belastingen dezelfde is als bij nullast, als tenminste de toegepaste spanning en de frequentie hiervan steeds dezelfde blijven.

De *ijzerverliezen*, die slechts functie zijn van de *magnetische inductie* en van de *frequentie*, zijn dus voor alle belastingen gelijk en dezelfde als bij nullast.

Deze verliezen kunnen dus experimenteel worden bepaald bij nullast door de zgn. *nullastproef*.

Voor de uitvoering van de *nullastproef* schakelen we de primaire winding van de transformator aan op de *nominale spanning*, met tussenschakeling van een *wattmeter*, een *voltmeter* en een *amperemeter*, ingesteld op gepaste meetbereiken (zie afb.10.02).



Afb.10.02.

Nullastproef van een transformator.

Het *actief vermogen* P_0 , aangeduid door de W-meter, is de som van de *ijzerverliezen* in de *ferromagnetische kring*, het *jouleverlies* in de *primaire winding*, het *jouleverlies* in de *A-meter*, het *jouleverlies* in de *spanningskring* van de *W-meter* :

$$P_0 = Phf + I_0^2 \cdot R_1 + I_0^2 \cdot R_A + \frac{U_1^2}{R_{SW}} \quad (W) \quad (10.7)$$

In deze uitdrukking is :

- P_0 = het opgenomen actief vermogen in watt (W) ;
- I_0 = de nullaststroom in ampere (A) ;
- Phf = de som van de hysteresis- en foucaultverliezen of de ijzerverliezen in watt (W) ;
- R_A = de ohmse weerstand van de amperemeter in ohm (Ω) ;
- R_{SW} = de ohmse weerstand van de spanningskring van de wattmeter in ohm (Ω) ;
- R_1 = de ohmse weerstand van de primaire winding van de transfo in ohm (Ω).

Door de A-meter even te overbruggen tijdens het aflezen van de aanduiding van de W-meter kan het gedeelte $I_0^2 \cdot R_A$ worden geëlimineerd, terwijl de jouleverliezen $I_0^2 R_1$ en $U_1^2 \div R_{SW}$ kunnen worden berekend.

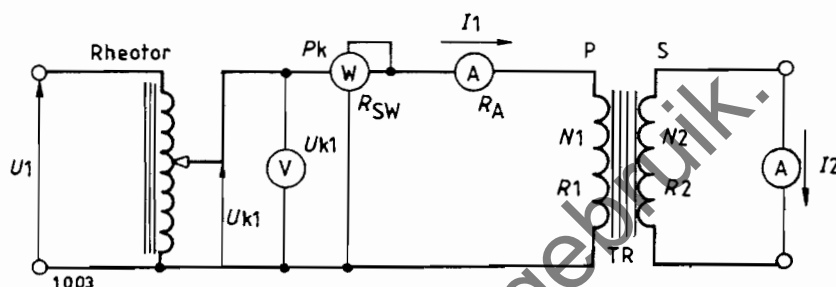
Aldus kunnen de ijzerverliezen op eenvoudige wijze worden afgeleid uit bovenstaande uitdrukking.

In principie kan de nullastproef worden uitgevoerd, zowel aan de hoogspanningszijde als aan de laagspanningszijde, d.w.z. dat de keuze van primaire of secundaire geen belang heeft.

Maar we moeten toch opmerken dat de *nullastproef* voor *HS-transformatoren* steeds aan de *laagspanningszijde* wordt uitgevoerd.

10.5. KORTSLUITPROEF VAN EEN TRANSFORMATOR

In de *kortsluitproef* van een transformator sluiten we de primaire wikkeling aan op een *verminderde spanning*, via een *regelbare transformator* of *rheotor*, met tussenschakeling van een *wattmeter*, een *voltmeter* en een *ampere-meter*, terwijl de secundaire wikkeling is kortgesloten (eventueel via tussenschakeling van een *ampere-meter*).



Afb.10.03. Kortsluitproef van een transformator.

Het schakelschema voor de kortsluitproef is voorgesteld in afb.10.03.

In principie kan deze proef worden uitgevoerd, zowel aan de primaire als aan de secundaire zijde van de transformator. Maar voor *HS-transformatoren* geschiedt de proefopstelling steeds aan de *hoogspanningszijde* en wordt de *laagspanningszijde* kortgesloten.

De primair toegepaste spanning wordt geregeld vanaf nul tot de waarde U_{k1} waarbij de primaire stroom de *nominale waarde* I_1 bereikt.

Aangezien het feit dat $I_2 = (N_1 \div N_2) \cdot I_1$ zal nu ook de secundaire stroomsterkte gelijk zijn aan de *nominale waarde* I_2 .

De W-meter duidt een bepaald actief vermogen P_k aan, dat gelijk is aan de som van de *jouleverliezen in primaire en secundaire wikkelingen*, de *ijzerverliezen* in de ferromagnetische kring, het *jouleverlies in de ampere-meter* en het *jouleverlies in de spanningsspoel van de wattmeter* :

$$P_k = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + P_{hf(k)} + I_1^2 \cdot R_A + \frac{U_{k1}^2}{R_{SW}} \quad (W) \quad (10.8)$$

Door het feit dat de hysteresis- en foucaultverliezen functie zijn van de magnetische inductie en de frequentie zijn deze hier te verwaarlozen, m.a.w. de *ijzerverliezen* zijn te verwaarlozen klein in de kortsluitproef van een transformator. Inderdaad, we stellen vast dat de *kortsluitspanning* U_{k1} slechts ongeveer 5 % is van de *nominale spanning* U_1 , zodat ook de geïnduceerde ems van zelfinductie E_{k1} in de primaire wikkeling nu slechts ongeveer 5 % is van de zelfinductiespanning bij normale aansluiting van de transformator.

Bijgevolg is de magnetische inductie *bij de kortsluitproef* ook slechts ongeveer 5 % van de *nominale waarde*. De *ijzerverliezen*, zoals deze optreden

bij de kortsluitproef, zijn dus te verwaarlozen klein.

De jouleverliezen in de A-meter en in de W-meter kunnen worden berekend, maar zijn in feite ook te verwaarlozen klein *bij de kortsluitproef*.

Wij kunnen dus de *jouleverliezen* in de primaire en de secundaire wikkelingen van de transfo afleiden uit bovenstaande gelijkheid :

$$P_j = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 \quad (W) \quad (10.9)$$

Deze *jouleverliezen*, bepaald door uitvoering van de *kortsluitproef*, zijn gelijk aan de *jouleverliezen bij vollast* van de transformator, omdat de primaire en secundaire stromen dezelfde zijn voor de twee gevallen.

De *kortsluitproef* stelt ons dus in staat de *jouleverliezen van een transfo bij vollast* te bepalen.

Belangrijk is te noteren dat er een *essentieel verschil* bestaat tussen de *kortsluitproef* en de *vollastproef*.

Bij de *kortsluitproef* is het vermogen zeer klein, door het feit dat de spanningen zo laag zijn.

Bij de *vollastproef* gaat men uit van de nominale waarden van spanningen en stromen, zodat hier de vermogens ook de nominale waarden bereiken.

10.6. BEPALEN VAN HET RENDEMENT VAN EEN TRANSFORMATOR

Het rendement van een transformator kan worden bepaald volgens verschillende methoden.

10.6.1. ONRECHTSTREEKSE OF INDIRECTE METHODE

Hierbij worden de *ijzerverliezen* en de *jouleverliezen* afzonderlijk bepaald, respectievelijk door de *nullastproef* en de *kortsluitproef*.

Het rendement van de transfo, bij nominale spanningen en stromen is dan :

$$\eta = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_{hf} + P_j} = \frac{S_2 \cdot \cos \varphi_2}{S_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_{hf} + P_j}$$

Indien de primaire en secundaire stromen kleiner zijn dan de nominale waarden, moet het jouleverlies worden berekend volgens de formule :

$$P_j = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2$$

Men verkrijgt dan het momenteel rendement bij de gegeven stroomsterkten.

10.6.2. RECHTSTREEKSE OF DIRECTE METHODE

De actieve vermogens aan primaire en secundaire zijde worden gemeten bij middel van twee wattmeters die eventueel aangesloten zijn via *spannings- en stroommeettransformatoren* (zie : Hoofdstuk 13).

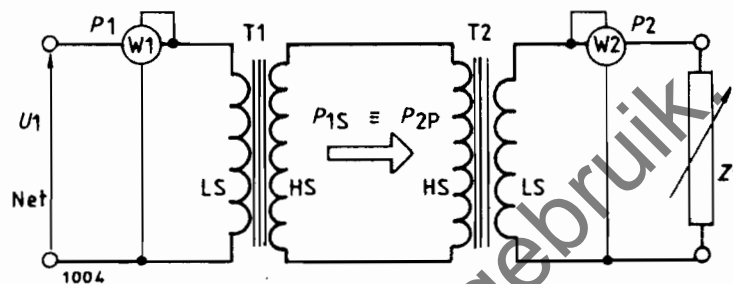
Het rendement van de transfo is de verhouding van de twee gemeten vermogens :

$$\eta = P_2 \div P_1$$

10.6.3. OPPOSITIEMETHODE

Dit is in feite ook een *onrechtstreekse methode*, die kan worden toegepast als men twee *identieke transformatoren* ter beschikking heeft. Het is dus een interessante methode voor de *transformatorfabriek* waar dikwijls transformatoren van hetzelfde type in serie worden geconstrueerd.

De methode wordt vooral toegepast bij HS-transformatoren. Men sluit de HS-wikkeling van de ene transformator aan op de HS-wikkeling van de andere transformator. Eén LS-zijde wordt aangesloten op de nominale spanning, met tussenschakeling van een wattmeter. De andere LS-zijde wordt belast met een instelbare impedantie via een wattmeter (zie afb.10.04), zodat bij diverse belastingen kan worden gewerkt.



Afb.10.04. Oppositiemethode voor de bepaling van het rendement van transformatoren.

Het rendement van de twee transformatoren is natuurlijk identiek.

Voor de linker transfo geldt : $\eta = P_{1S} \div P_1$

En voor de rechter transfo : $\eta = P_2 \div P_{2P}$

Nu is : $P_{1S} = P_{2P}$, omdat het nuttig actief vermogen van T_1 geheel wordt overgedragen aan T_2 .

Bijgevolg is : $\eta^2 = \frac{P_{1S} \cdot P_2}{P_1 \cdot P_{1S}} = \frac{P_2}{P_1}$

Hieruit volgt : $\eta = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}$

10.7. EQUIVALENTE KRING VAN EEN TRANSFORMATOR

Vraagstukken in verband met spanningen en stromen in transformatoren kunnen vectoriëel worden opgelost, volgens de vectordiagrammen die we reeds eerder hebben bestudeerd.

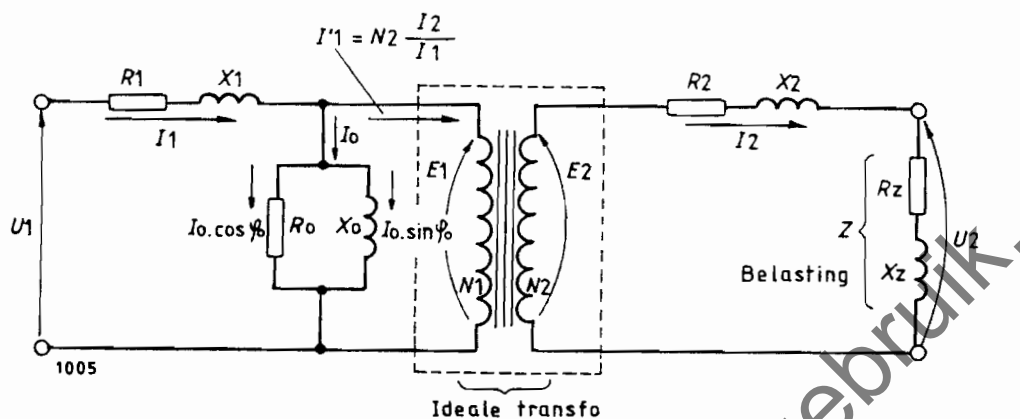
Maar deze methode vergt veel tijd, terwijl het moeilijk is in een vectordiagram de kleine spanningsvectoren $I \cdot R$ en $I \cdot \omega L$ op eenzelfde schaal voor te stellen zoals gebruikt voor U_1 , E_1 , U_2 en E_2 .

Daarom wordt het schema van een *reële transformator* vervangen door het *equivalent schema* van een *fictieve transformator* met een *windingsverhouding* van $1 \div 1$.

In afb.10.05 is een eerste equivalente kring voorgesteld. Hierin is R_0 de

resistantie en X_0 de reactantie van de magnetisatiekring. De waarden ervan zijn zó gekozen dat, bij toepassing van de tegen-ems E_1 (die praktisch gelijk is aan U_1), in R_0 een stroom $I_0 \cdot \sin \theta = I_0 \cdot \cos \varphi_0$ zou vloeien (zie vectordiagrammen in afb. 9.10, 9.11 en 9.12), en in X_0 een stroom $I_0 \cdot \cos \theta = I_0 \cdot \sin \varphi_0$.

De waarden R_0 en X_0 kunnen ook worden vervangen door de conductantie $G_0 = (1 \div R_0)$ en de susceptantie $B_0 = (1 \div X_0)$.



Afb. 10.05. Equivalente kring van een transformator.

De resulterende stroom I_0 komt overeen met de magnetisatiestroom of nullaststroom I_0 .

De ideale transformator, die in de equivalente kring voorkomt, heeft geen ohmse weerstand of resistantie, geen reactantie en geen magnetische weerstand of reluctantie.

De ohmse weerstanden en reactanties van primaire en secundaire zijn respectievelijk R_1 , X_1 en R_2 , X_2 . De belasting is voorgesteld door een resulterende weerstand of resistantie R_z en een resulterende reactantie X_z .

We kunnen de equivalente kring uit afb. 10.05 vereenvoudigen door de secundaire impedanties over te brengen naar de primaire zijde, d.w.z. door te stellen dat $N_1 \div N_2' = 1$.

Hierbij blijven de werkingsvoorwaarden in de primaire identiek, terwijl in de secundaire kring de actieve en reactieve vermogens constant moeten blijven. Bovendien mag de verdeling van de vermogens over de verschillende elementen van de equivalente kring niet worden gewijzigd. De faseverschuivingen tussen de stromen en spanningen in de diverse elementen van de kring moeten eveneens dezelfde zijn.

We weten dat :

$$E_1 = (N_1 \div N_2) \cdot E_2 \quad (V) \quad (10.10)$$

Indien de reële transformator wordt vervangen door een fictieve transformator met een secundair aantal windingen $N_2' = N_1$, is de secundaire ems E_2' van deze fictieve transfo gelijk aan de primaire ems E_1 van de reële transfo :

$$E_2' = (N_1 \div N_2) \cdot E_2 \quad (V) \quad (10.11)$$

Hetzelfde verband kunnen we schrijven voor de secundaire spanningsverliezen :

$$U_2' = (N_1 \div N_2) \cdot U_2$$

$$I_2' \cdot R_2' = (N_1 \div N_2) \cdot I_2 \cdot R_2$$

$$\sim I_2' \cdot X_2' = (N_1 \div N_2) \cdot I_2 \cdot X_2$$

Het *schijnbaar vermogen* in de secundaire moet constant blijven :

$$E_2' \cdot I_2' = E_2 \cdot I_2 = (N_1 \div N_2) \cdot E_2 \cdot I_2'$$

Hieruit volgt :

$$\boxed{I_2' = (N_2 \div N_1) \cdot I_2} \quad (\text{A}) \quad (10.12)$$

We zien dus dat $|I_2'| = I_1'$, d.w.z. dat de equivalente secundaire stroomsterkte gelijk is aan de primaire stroomcomponente die het demagnetiserend effect van de secundaire stroom compenseert.

Wel zijn deze twee stromen *in tegenfase*.

De voorwaarden van *onveranderlijke inwendige actieve en reactieve secundaire vermogens*, getransponeerd naar de primaire zijde, zijn :

$$I_2'^2 \cdot R_2' = I_2^2 \cdot R_2 = (N_2 \div N_1)^2 \cdot I_2^2 \cdot R_2'$$

$$I_2'^2 \cdot X_2' = I_2^2 \cdot X_2 = (N_2 \div N_1)^2 \cdot I_2^2 \cdot X_2'$$

Hieruit volgt :

$$\boxed{\begin{array}{l} R_2' = (N_1 \div N_2)^2 \cdot R_2 \\ X_2' = (N_1 \div N_2)^2 \cdot X_2 \end{array}} \quad (\Omega) \quad (10.13)$$

In deze uitdrukkingen is :

$$R_2' = \text{de equivalente resistantie in ohm } (\Omega) ;$$

$$X_2' = \text{de equivalente reactantie in ohm } (\Omega) ;$$

van de secundaire wikkeling.

Wat de *equivalente resistantie* en de *equivalente reactantie* van de *belasting* betreft verkrijgen we hetzelfde verband met de *reële resistanties* en *reactanties*.

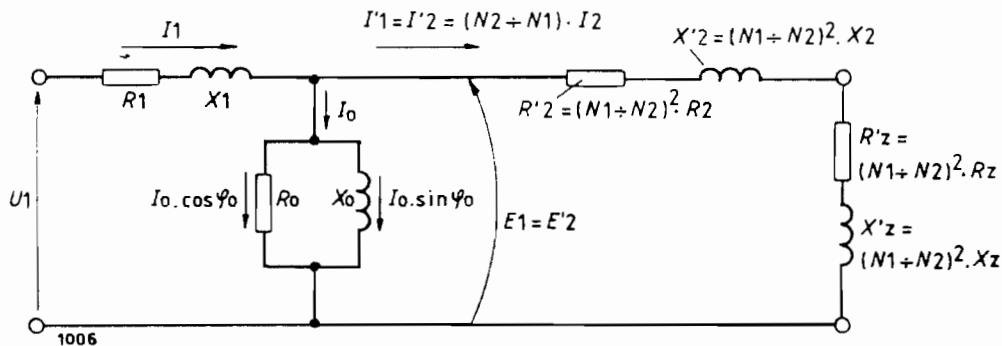
$$\boxed{\begin{array}{l} R_Z' = (N_1 \div N_2)^2 \cdot R_Z \\ X_Z' = (N_1 \div N_2)^2 \cdot X_Z \end{array}} \quad (\Omega) \quad (10.14)$$

Aldus verkrijgen we een vereenvoudigd equivalent schema van de transformator, volgens afb.10.06.

Deze equivalente kring kan nog worden vereenvoudigd door de zeer kleine *spanningsverliezen* $I_0 \cdot R_1$ en $I_0 \cdot X_1$ te verwaarlozen en door de resistantie R_1 en de reactantie X_1 te transponeren naar de rechterzijde van R_0 en X_0 .

Wij *combineren* daarna nog de resistantie R_1 van de primaire met de *equivalente*

resistentie R_2' van de secundaire. Tevens combineren we de reactantie X_1 van de primaire met de equivalente reactantie X_2' van de secundaire.

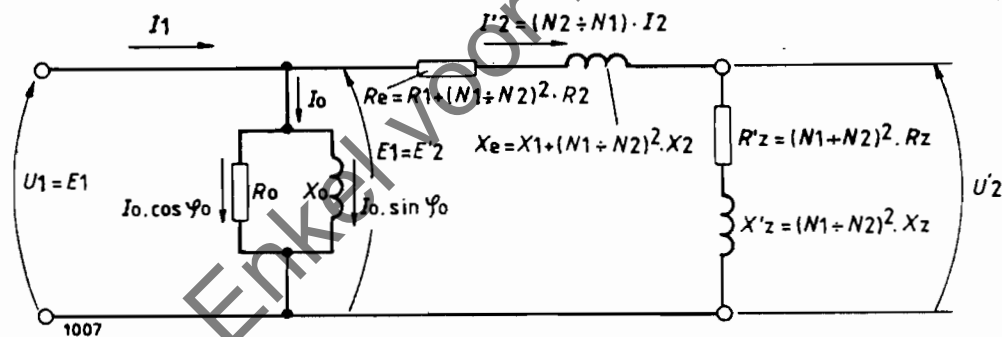


Afb.10.06. Equivalent schema van een transfo, waarbij de secundaire resistenties en reactanties getransponeerd zijn naar de primaire kring, met equivalente waarden.

Aldus ontstaat de equivalente kring volgens afb.10.07, met de inwendige equivalente resistentie R_e en de inwendige equivalente reactantie X_e van de trafo.

De uitdrukkingen ervan zijn :

$R_e = R_1 + R_2' = R_1 + (N_1 \div N_2)^2 \cdot R_2$	(Ω)	(10.15)
$X_e = X_1 + X_2' = X_1 + (N_1 \div N_2)^2 \cdot X_2$		



Afb.10.07. Vereenvoudigd equivalent schema van een transformator.

De constante grootheden R_o en X_o van de magnetisatiekring kunnen worden bepaald uit de nullastproef.

Immers, uit de formule : $P_o = U_1 \cdot I_o \cdot \cos \varphi_o$

kunnen we afleiden : $\cos \varphi_o = P_o \div U_1 \cdot I_o$

Hieruit kunnen we ook $\sin \varphi_o$ berekenen.

Wij verkrijgen verder :

$R_o = \frac{U_1}{I_o \cdot \cos \varphi_o} \cong \frac{E_1}{I_o \cdot \cos \varphi_o}$	(Ω)	(10.16)
$X_o = \frac{U_1}{I_o \cdot \sin \varphi_o} \cong \frac{E_1}{I_o \cdot \sin \varphi_o}$		

De *equivalente resistantie* R_e en de *equivalente reactantie* X_e van de transfo kunnen worden bepaald uit de *kortsluitproef*.

Door het feit dat deze proef wordt uitgevoerd bij een zeer lage primaire spanning (ongeveer 5 % van de nominale waarde van U_1) is hier de magnetisatiestroom I_0 te verwaarlozen klein, zodat :

$$I_2' = I_1$$

Uit de relatie : $P_j = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 = I_1^2 \cdot R_e$

volgt dan :

$$R_e = P_j \div I_1^2 \quad (\Omega) \quad (10.17)$$

Bij de kortsluitproef is $U_2' = 0$, zodat :

$$E_1 = U_{k1} = I_2' \cdot Z_e = I_1 \cdot Z_e$$

Dus : $Z_e = U_{k1} \div I_1 \quad (\Omega) \quad (10.18)$

In deze formule is Z_e de *equivalente impedantie* van de transformator, terwijl U_{k1} de *kleine toegepaste klemspanning* (= kortsluitspanning) is op de primaire van de transfo bij de kortsluitproef.

De equivalente impedantie is ook :

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2} \quad (\Omega) \quad (10.19)$$

Hieruit kan dan de equivalente reactantie worden berekend :

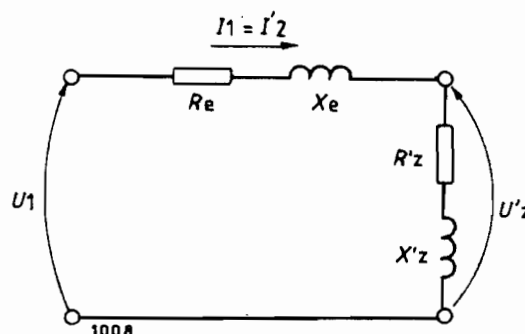
$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} \quad (\Omega) \quad (10.20)$$

Door het feit dat de grootheden R_e , X_e en Z_e kunnen worden bepaald uit de kortsluitproef noemen we deze respectievelijk ook nog : *kortsluitresistantie*, *kortsluitreactantie* en *kortsluitimpedantie*.

In *approximatieve berekeningen* verwaarlozen wij de kleine primaire nullaststroom I_0 geheel, zodat een *zeer vereenvoudigde equivalente kring* van de transfo wordt verkregen, zoals voorgesteld in afb.10.08.

Afb.10.08.

Meest vereenvoudigde
equivalente kring van
een transformator.



10.8. SPANNINGSVARIATIES IN TRANSFORMATOREN

De *secundaire spanningsvariatie* van een transformator is de *verhouding* van het verschil tussen de secundaire klemspanningen bij nullast en bij belasting tot de nominale secundaire nullastspanning bij constante primaire klemspanning.

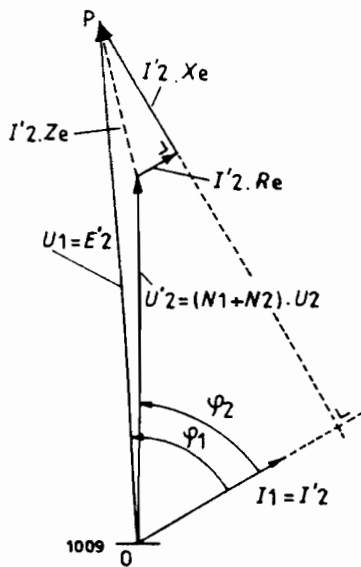
Deze spanningsvariatie of -verandering wordt uitgedrukt in % van de nominale

secundaire nullastspanning.

De *grootte van de arbeidsfactor* heeft invloed op de procentuele spanningsvariatie, zodat deze erbij moet worden vermeld. Dit zal verder worden verklaard.

In afb. 10.09 is de equivalente secundaire klemspanning U_2' verticaal getekend. Bij *inductieve belasting* is de equivalente secundaire stroom I_2' over een hoek φ_2° naijlend op de equivalente secundaire klemspanning.

De vectoriële som van U_2' , $I_2' \cdot R_e$ en $I_2' \cdot X_e$ geeft ons de primaire klemspanning U_1 .



Afb. 10.09.

Vectordiagram van de spanningen van een transfo, in overeenstemming met het zeer vereenvoudigd equivalent schema.

We weten dat $I_2' = I_1$ als we I_0 verwaarlozen, zoals werd ondersteld in het zeer vereenvoudigd equivalent schema.

Indien de primaire klemspanning U_1 wordt constant gehouden zal de equivalente secundaire klemspanning U_2' variëren in functie van de equivalente secundaire stroom I_2' en dus zal de werkelijke secundaire klemspanning U_2 ook veranderen in functie van de secundaire stroom I_2 .

De procentuele spanningsverandering is dus :

$$\Delta U_2 = \frac{100(E_2 - U_2)}{E_2} = \frac{100(E_2' - U_2')}{E_2'}$$

Of :

$$\Delta U_2 = \frac{100(U_1 - U_2')}{U_1} \quad (\%) \quad (10.21)$$

Inderdaad :

$$E_2' = (N_1 \div N_2) \cdot E_2$$

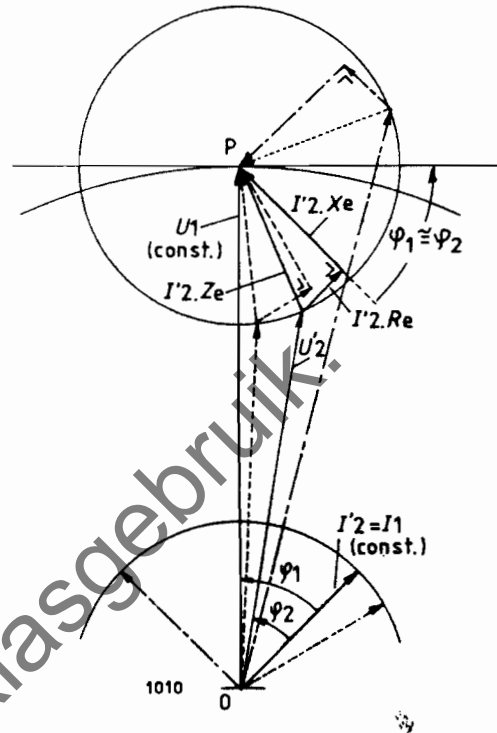
$$U_2' = (N_1 \div N_2) \cdot U_2$$

$$E_2' = E_1 = U_1$$

De spanningsverandering ΔU_2 is ook *afhankelijk van de arbeidsfactor*.

Onderstellen we bv. dat, bij constante primaire klemspanning U_1 en constante

equivalente secundaire stroom I_2' , faseverschuiving φ_2 groter wordt in positieve zin (inductieve belasting).
 In dit geval zal de equivalente secundaire klemspanning U_2' dalen. Indien φ_2 stijgt in negatieve zin (capacitieve belasting) neemt U_2' toe (zie afb.10.10).



Afb.10.10.

Invloed van de arbeidsfactor op de procentuele secundaire spanningsvariatie van een transformator.

Als $U_2 < E_2$, of $U_2' < U_1$ is de procentuele spanningsverandering *positief* (inductieve belasting).

Als $U_2 > E_2$, of $U_2' > U_1$ is de procentuele spanningsverandering *negatief* (capacitieve belasting).

Uit het vectordiagram volgens afb.10.10 volgt dat, bij inductieve belasting :

$$\begin{aligned} U_1 - U_2' &\cong I_2' \cdot R_e \cdot \cos \varphi_2 + I_2' \cdot X_e \cdot \sin \varphi_2 \\ &= I_1 (R_e \cdot \cos \varphi_2 + X_e \cdot \sin \varphi_2) \end{aligned}$$

Bij capacitieve belasting is :

$$\begin{aligned} U_1 - U_2' &\cong I_2' \cdot R_e \cdot \cos \varphi_2 - I_2' \cdot X_e \cdot \sin \varphi_2 \\ &= I_1 (R_e \cdot \cos \varphi_2 - X_e \cdot \sin \varphi_2) \end{aligned}$$

De formule van de procentuele spanningsvariatie wordt aldus :

$$\Delta U_2 = \frac{100 \cdot I_1 (R_e \cdot \cos \varphi_2 \pm X_e \cdot \sin \varphi_2)}{U_1} \quad (V) \quad (10.22)$$

In de praktische uitvoering zijn *hoogspanningstransformatoren* voorzien van *aftakkingen* en *schakelinrichtingen*, zodat het mogelijk is op eenvoudige wijze de secundaire spanning bij te regelen en constant te houden door bij- of uitschakelen van het gepast aantal windingen.

De hier uitgewerkte theorie voor de eenfase transformator is ook geldig voor iedere fase van driefasen en meerfasen transformatoren.

10.9. OEFENINGEN

1. Een eenfase transformator, met een schijnbaar vermogen van 840 VA, is primair gewikkeld voor 240 V en secundair voor 380 V. Bij de uitvoering van de nullastproef meten we : $I_0 = 0,12$ A en $P_0 = 12$ W.
Bij de kortsluitproef meten we : $U_{k1} = 15$ V, $P_j = 30$ W, $I_1 = 3,5$ A en $I_2 = 2,21$ A.
Bepaal de elementen van de vereenvoudigde equivalenten kring volgens afb.10.07.

OPLOSSING

Uit de formule : $P_0 = U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$ volgt : $I_0 \cdot \cos \varphi_0 = P_0 \div U_1$

$$I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 12 \div 240 = 0,050 \text{ A}$$

De resistantie van de magnetisatiekring is dan :

$$R_0 = U_1 \div I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 240 \div 0,050 = 4800 \Omega$$

De reactieve componenten van de magnetisatiestroom is :

$$I_0 \cdot \sin \varphi_0 = \sqrt{I_0^2 - (I_0 \cdot \cos \varphi_0)^2} = \sqrt{0,0144 - 0,0025} = 0,109087 \text{ A}$$

Bijgevolg is de reactantie van de magnetisatiekring :

$$X_0 = U_1 \div I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 240 \div 0,109087 = 2200 \Omega$$

De equivalenten resistantie van de transformator is dan :

$$R_e = P_j \div I_1^2 = 30 \div 3,5^2 = 2,45 \Omega$$

De equivalenten impedantie van de trafo is nu :

$$Z_e = U_{k1} \div I_1 = 15 \div 3,50 = 4,286 \Omega$$

Aldus kan de equivalenten reactantie worden berekend als volgt :

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = \sqrt{(4,286)^2 - (2,45)^2} = 3,516 \Omega$$

2. Een transformator voor 13000 V / 220 V - 50 Hz levert een nuttig actief vermogen van 25 kW bij een arbeidsfactor gelijk aan de eenheid. Het ijzerverlies is 246 W. De weerstanden van primaire en secundaire windingen bedragen respectievelijk 54 Ω en 0,0148 Ω . De kortsluitspanning is 4 % van de nominale spanning.
Bepaal de equivalenten resistantie en de equivalenten reactantie van deze transfo.
Bereken het rendement bij vollast en bepaal tevens de belasting waarvoor het rendement maximaal is. Bepaal ook dit maximaal rendement.

OPLOSSING

Het actief secundair vermogen, afgeleverd aan de belasting, is :

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$$

Hieruit volgt : $I_2 = P_2 \div U_2 \cdot \cos \varphi_2 = 25000 \div 220 \cdot 1 = 113,6364 \text{ A}$

Nu is praktisch : $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$

Bijgevolg is : $I_1 = U_2 \cdot I_2 \div U_1 = 220 \cdot 113,6364 \div 13000 = 1,9231 \text{ A}$

Het totaal jouleverlies in de primaire en secundaire wikkelingen is :

$$\begin{aligned} P_j &= I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 = (1,9231)^2 \cdot 54 + (113,6364)^2 \cdot 0,0148 \\ &= 391 \text{ W} \end{aligned}$$

De equivalente resistantie van de transfo is :

$$R_e = P_j \div I_1^2 = 391 \div (1,9231)^2 = 105,72 \Omega$$

De equivalente impedantie van de trafo is dus :

$$Z_e = U_{k1} \div I_1 = 0,04 \cdot 13000 \div 1,9231 = 270,40 \Omega$$

Hieruit berekenen we de equivalente reactantie :

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = \sqrt{(270,40)^2 - (105,72)^2} = 248,87 \Omega$$

Het rendement bij vollast is :

$$\eta = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_j + P_{hf}} = \frac{25000}{25000 + 391 + 246} = 0,9752$$

Of : $\eta = 97,52 \%$

Het rendement is maximaal als de belasting zo is dat het jouleverlies gelijk is aan het ijzerverlies, d.w.z. als $P_j = 246 \text{ W}$.

In dit geval is de primaire stroom :

$$I_1 = \sqrt{P_j \div R_e} = \sqrt{246 \div 105,72} = 1,5254 \text{ A}$$

En de secundaire stroom :

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

De belasting, waarvoor het rendement maximaal is, bedraagt dan ook :

$$U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 220 \cdot 90,1373 \cdot 1 = 19830 \text{ W} = 19,83 \text{ kW}$$

Het maximaal rendement is dus :

$$\eta_{\max} = 19830 \div (19830 + 246 + 246) = 0,9758$$

Of : $\eta_{\max} = 97,58 \%$

10.10. HERHALINGSVRAGEN

1. Welke diverse vermogens kunnen we onderscheiden in een transformator ? Schrijf de wiskundige uitdrukkingen ervan.

2. Uit welke delen bestaat het actief vermogen van een transformator ? Schrijf de wiskundige uitdrukkingen ervan en leg uit.
3. Uit welke delen is het reactief vermogen van een transformator samengesteld ? Schrijf de wiskundige uitdrukkingen ervan en leg uit.
4. Wat is het rendement van een transformator ? Schrijf de wiskundige uitdrukkingen ervan.
5. Wanneer is het rendement van een transformator maximaal ?
6. Hoe gaat men tewerk bij het uitvoeren van de nullastproef van een transformator ? Teken het schema van de schakeling en leg uit waartoe deze proef dient.
7. Hoe wordt de kortsluitproef voor een transformator uitgevoerd ? Teken het schema van de schakeling en leg uit waartoe deze proef dient.
8. Volgens welke drie methoden kan het rendement van een transformator worden bepaald ? Verklaar deze werkwijzen.
9. Teken het schema van de basis-equivalente kring van een transformator en verklaar de betekenis van de diverse componenten of delen die in deze kring voorkomen.
10. Teken de equivalente kring van een transformator waarbij de secundaire resistanties en reactanties getransponeerd zijn naar de primaire kring. Schrijf de uitdrukkingen van de diverse componenten of delen.
11. Teken het vereenvoudigd equivalent schema van een transformator en vermeld de betekenis van de diverse grootheden die hierin voorkomen. Schrijf ook de uitdrukkingen hiervan.
12. Teken het meest vereenvoudigde equivalent schema van een transformator en schrijf de uitdrukkingen van de diverse grootheden die hierin voorkomen.
13. Wat is de secundaire spanningsverandering van een transformator ? Schrijf de uitdrukking ervan.
14. Toon aan dat de secundaire spanningsverandering afhankelijk is van de arbeidsfactor.

10.11. VRAAGSTUKKEN

1. Een eenfase transformator van 50 kVA is gewikkeld voor 3200 V / 220 V - 50 Hz. Bij de nullastproef, uitgevoerd aan de secundaire zijde, is $I_0 = 8,75$ A en $P_0 = 224$ W.
De weerstand van de laagspanningswikkeling is $0,026 \Omega$.
Bereken de ijzer verliezen, de actieve en reactieve componenten van de magnetisatiestroom, de faseverschuiving tussen de magnetisatiestroom en de nullastflux en de uitdrukking van I_0 in % van de vollaststroom.
($P_{hf} = 222$ W ; $I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 1,0182$ A ; $I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 8,69$ A ; $\theta = 6^\circ 42'$;
 $I_0 = 3,85$ % van I_1 bij vollast).
2. Een transfo van 2 kVA is primair gewikkeld voor 220 V en secundair voor 440 V. De metingen bij de nullastproef zijn : $U_1 = 220$ V ; $I_0 = 0,28$ A ; $P_0 = 32$ W.
De ohmse weerstand van de primaire wikkeling is $0,46 \Omega$.
De kortsluitproef geeft als meetresultaten : $U_{k1} = 22$ V ; $I_1 = 9,0909$ A ; $I_2 = 4,545$ A ; $P_j = 48$ W.
Bepaal de waarden van R_0 , X_0 , R_e , X_e en de ijzer verliezen.
($R_0 = 1512,5 \Omega$; $X_0 = ~~1512,5~~ 919,52 \Omega$; $R_e = 0,58 \Omega$; $X_e = 2,35 \Omega$;
 $P_{hf} = 31,9639$ W).
3. Een eenfase transformator met een schijnbaar vermogen van 25 kVA levert een secundaire stroom van 102 A bij een arbeidsfactor van 0,80.

De primaire nullaststroom is 0,40 A bij een arbeidsfactor van 0,31. Er zijn 2080 primaire en 89 secundaire windingen.

De resistanties van primaire en secundaire wikkelingen zijn respectievelijk 8Ω en $0,010 \Omega$.

De zelfinductiecoëfficiënten tengevolge van de lekfluxen zijn $L_{11} = 0,07 \text{ H}$ en $L_{12} = 0,0003 \text{ H}$. De effectieve staaldoorsnede van de kern is 169 cm^2 .

Bereken de maximale waarde van de magnetische inductie, de ems van wederzijdse inductie in de secundaire, de primaire stroomsterkte, de primaire klemspanning, de primaire ems van zelfinductie en de primaire arbeidsfactor.

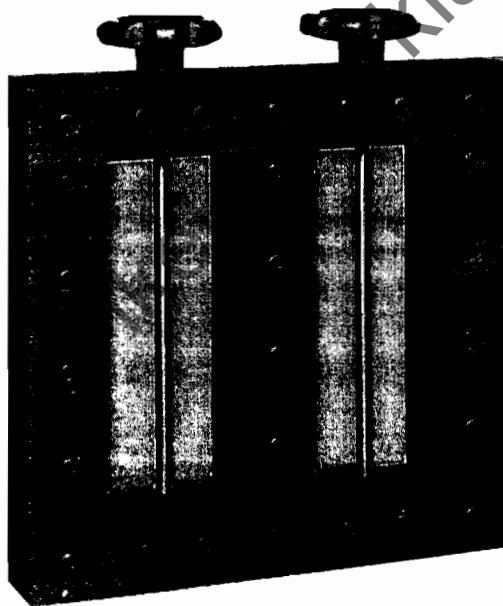
$$(B_m = 0,74 \text{ Wb/m}^2 ; E_2 = 247 \text{ V} ; I_1 = 4,75 \text{ A} ; U_1 = 5875 \text{ V} ; E_1 = 5773 \text{ V} ; \cos \varphi_1 = 0,746).$$

4. Op een eenfase transformator, met een schijnbaar vermogen van 4 MVA, voor 66 kV / 6,6 kV - 50 Hz, wordt de kortsluitproef uitgevoerd door de secundaire kort te sluiten.

Het opgenomen vermogen langs de primaire zijde is dan 28 kW bij een kortsluitspanning van 4,2 kV.

Bepaal de maximale primaire en secundaire stromen, alsmede de equivalente resistantie en reactantie van deze transformator.

$$(I_1 = 60,61 \text{ A} ; I_2 = 606,1 \text{ A} ; R_e = 7,62 \Omega ; X_e = 68,88 \Omega).$$



Afb.10.11. Ferromagnetische kring van drie-fasen experimenteertransformator van het kern-type (LEYBOLD).