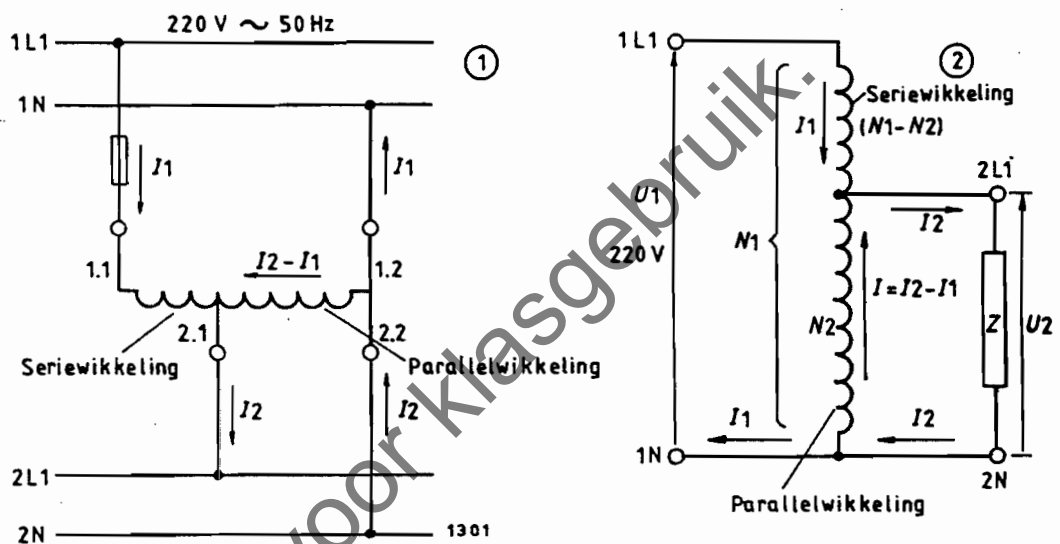


BUZONDERE TRANSFORMATOREN

13.1. AUTOTRANSFORMATOR

Een autotransformator of spaartransformator bevat slechts één wikkeling, waarvan een gedeelte van de windingen gemeenschappelijk is aan de primaire en de secundaire (zie afb.13.01).



Afb.13.01. Schakelschema's van een autotransformator :
 (1) - genormaliseerd schema ;
 (2) - prinsiepschema.

De spaartransfo volgens afb.13.01 heeft een wikkeling met N_1 windingen, waarvan er N_2 gemeenschappelijk zijn aan de primaire en de secundaire. Deze N_2 windingen vormen de zgn. *parallelwikkeling*. Het overige gedeelte van de wikkeling, met $N_1 - N_2$ windingen is de *seriewikkeling*.

Bij aansluiting van een belasting Z vloeit een secundaire stroom I_2 en een primaire stroom I_1 . Door het feit dat, in deze schakeling, U_2 kleiner is dan U_1 zal I_2 groter zijn dan I_1 . De stromen I_1 en I_2 zijn in *tegenfase*, zodat in de *parallelwikkeling* een stroom $I = I_2 - I_1$ vloeit.

De intensiteit van de stroom in de parallelwikkeling is dus *kleiner* dan de secundaire stroom in de belasting.

In het geval dat $N_2 = N_1 \div 2$, is $I_2 = 2 \cdot I_1$ en $I = 2 \cdot I_1 - I_1 = I_1$. De gehele wikkeling mag dan worden gewikkeld met wikkeldraad van dezelfde doorsnede, want de stromen in het serie-gedeelte en in het parallel-gedeelte zijn even groot.

In het geval dat $N_2 > N_1 \div 2$, is $I_2 < 2 \cdot I_1$ en $I < I_1$, zodat de parallelwikkeling van dunnere draad mag worden gewikkeld.

Indien $N_2 < N_1 \div 2$, is $I_2 > 2 \cdot I_1$ en $I > I_1$, zodat nu de N_2 windingen van wikkeldraad met grotere doorsnede moeten zijn.

De autotransformator is dus economisch wat constructie betreft, vooral als $k = U_1 \div U_2$ de eenheid benadert. Er is minder gewicht koperdraad nodig, maar ook het volume van de ferromagnetische kring is geringer.

Als $k = 1$ is $U_2 = U_1$ en valt de eigenlijke transformatiefunctie van de autotransformator weg.

Het schijnbaar vermogen dat via de transformator wordt getransformeerd van de primaire naar de secundaire is :

$$S_{\text{autotr.}} = (U_1 - U_2) \cdot I_1 = \frac{(U_1 - U_2) \cdot U_1 \cdot I_1}{U_1} = \frac{U_1 - U_2}{U_1} S_1$$

Of : $S_{\text{autotr.}} = S_1 \left(1 - \frac{1}{k}\right)$ (VA) (13.1)

In deze formule is $S_1 = U_1 \cdot I_1$ = het schijnbaar vermogen dat door het voedingsnet wordt afgeleverd aan de transformator.

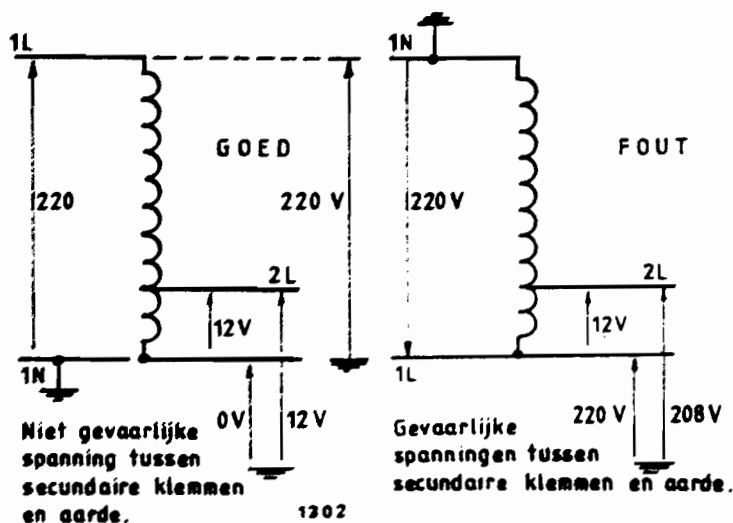
Als $k = 2$ is $S_{\text{autotr.}} = (1 \div 2) \cdot S_1$ d.w.z. dat de autotransformator slechts 50 % van het schijnbaar vermogen dat het net aflevert moet transformeren. Het schijnbaar vermogen dat de transformator moet transformeren is zelfs nul als $k = 1$.

De ferromagnetische kring kan dan ook in evenredigheid licht worden gekozen.

Het is duidelijk dat het primair schijnbaar vermogen gelijk is aan het secundair schijnbaar vermogen :

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 = S_2$$
 (VA) (13.2)

Voor eenzelfde vermogen is de autotransformator dus veel minder duur dan de transfo met gescheiden windingen : hij is lichter wat koper en transfo-blik betreft, vereist een kleinere magnetisatiestroom en heeft een groter rendement.



Afb. 13.02.

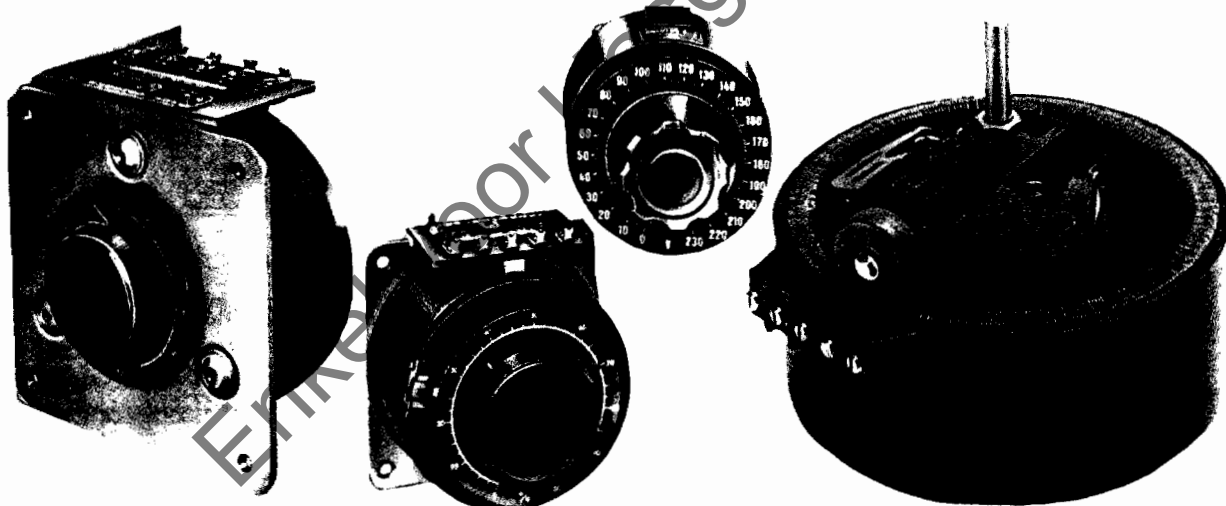
Schakelingen van autotransformatoren (GOED en FOET).

Door het feit dat de secundaire niet gescheiden is van de primaire mogen spaartransformatoren niet voor alle toepassingen worden angewend. Ze zijn bv. *verboden* voor speelgoedtransformatoren, voor beltransformatoren en voor lastransformatoren. Het gevaar bestaat immers dat de hogere spanning in contact komt met de secundaire.

Het gemeenschappelijk punt moet steeds zijn verbonden met de nulgeleider van het net. Als dit niet zo is heerst de netspanning tussen de secundaire en de aarde, hetgeen bijzonder gevaarlijk is (zie afb.13.02). Dit probleem doet zich *altijd* voor als de autotransfo wordt aangesloten tussen twee lijndraden van een drie-leider-net van 220 V.

Autotransformatoren worden angewend als startinrichtingen voor synchrone en asynchrone motoren, als spanningsdelers in testkringen en in laboratoriaproeven, als hoogspanningstransformatoren van zeer groot vermogen (bv. tot 1000 MVA) voor transport van grote hoeveelheden elektrische energie over grote afstanden en tevens in distributiekringen als het verschil tussen primaire en secundaire spanningen niet heel groot is (bv. 10 kV en 12 kV).

Autotransformatoren kunnen ook worden uitgevoerd met een *schuifcontact* of een *rolcontact*, zodat het aantal secundaire windingen kan worden gewijzigd en aldus ook de secundaire spanning. We spreken hier van een *regelbare autotransformator* of *rheotor* (afb.13.03). Deze bestaan in eenfase en in



Afb.13.03. Regelbare autotransformatoren of rheotoren (ADB en REO).

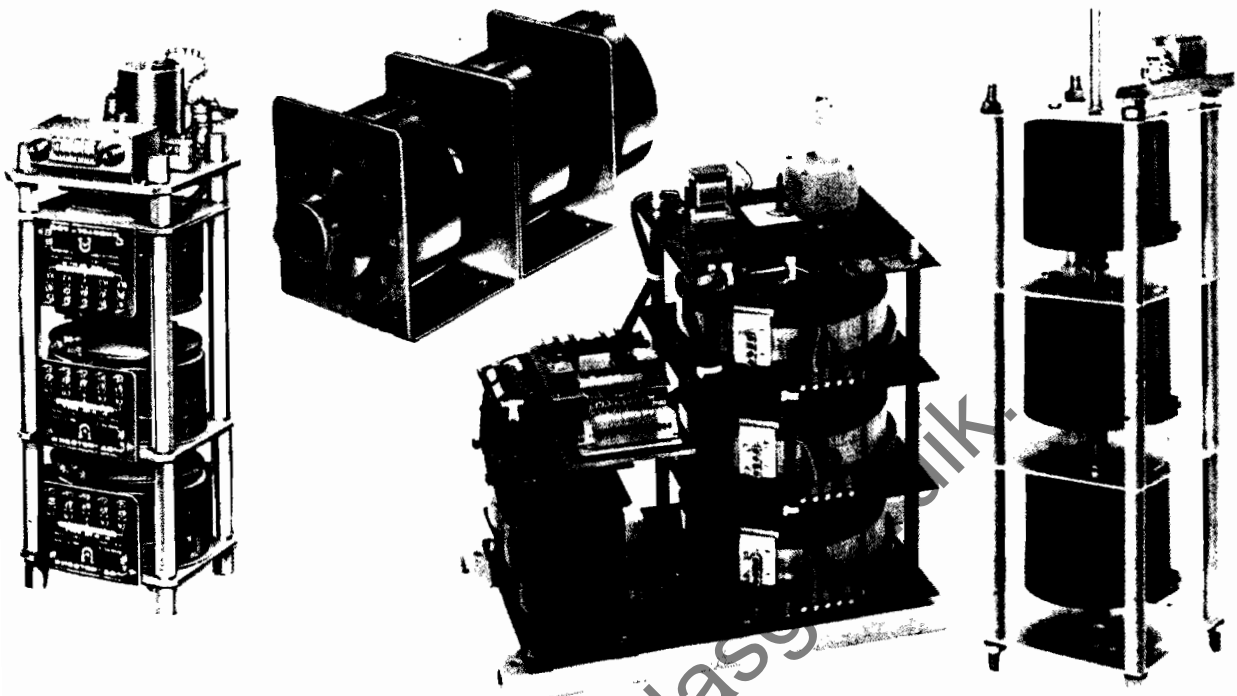
driefasen uitvoeringen. De driefasen rheotoren kunnen opgebouwd zijn uit twee eenfase rheotoren in open-driehoek of V-schakeling of uit drie eenfase rheotoren, telkens op eenzelfde as gemonteerd (afb.13.04).

Het is duidelijk dat het regelbereik van de secundaire spanning van een regelbare autotransfo of rheotor hoger kan zijn dan de primaire spanning (zie afb.13.05).

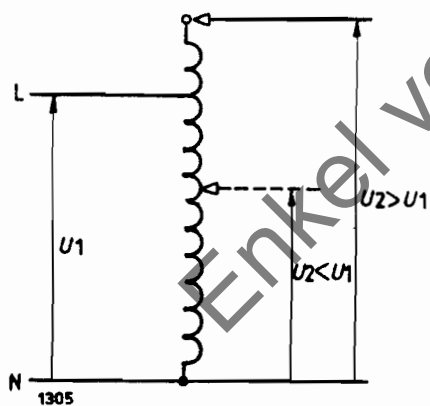
In afb.13.06 is een autotransformator voorgesteld met trappen-regeling. In afb.13.06-1 is de secundaire spanning, afgetakt via de midden-aftakking op de hulp-autotransformator (of zelfinductiespoel), gelijk aan de maximale spanning van de autotransformator.

Als y één trap lager contact maakt met de wikkeling van de autotransfo, terwijl x op de originele positie blijft staan, fungeert de hulptransfo

T2 als spanningsdeler en de secundaire spanning is nu ongeveer gelijk aan de gemiddelde waarde van de spanningen tussen het gemeenschappelijk punt en de aftakpunten x en y.

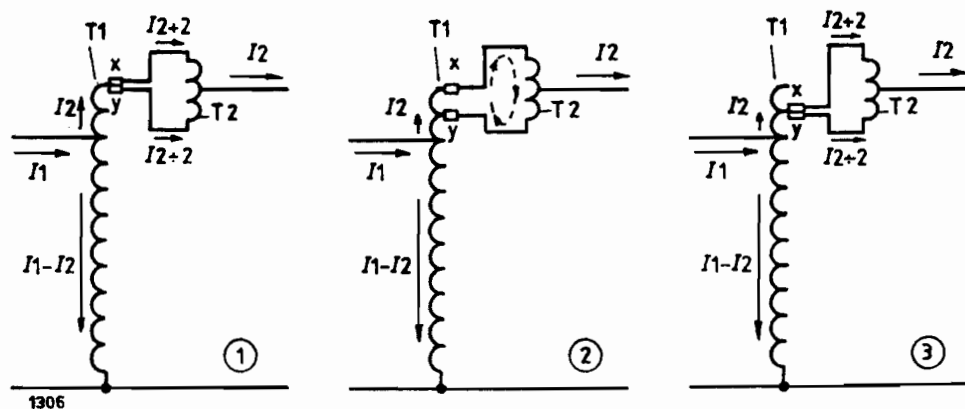


Afb.13.04. Driefasen regelbare autotransformatoren of rheotoren (ADB en REO).



Afb.13.05. Regelbare autotransformator of rheotor, met mogelijkheid van secundaire spanningsregeling tot boven de primaire spanning (spanningsverhogende rheotor).

In afb.13.06-3 is de omschakelprocedure beëindigd. Beide contactvingers zijn nu verbonden met het eerstvolgende lager contactpunt van de transfo.



Afb.13.06. Autotransformator met trappenregeling.

De secundaire spanning komt nu ongeveer overeen met deze die heerst tussen het gemeenschappelijk punt en het aftakingspunt.

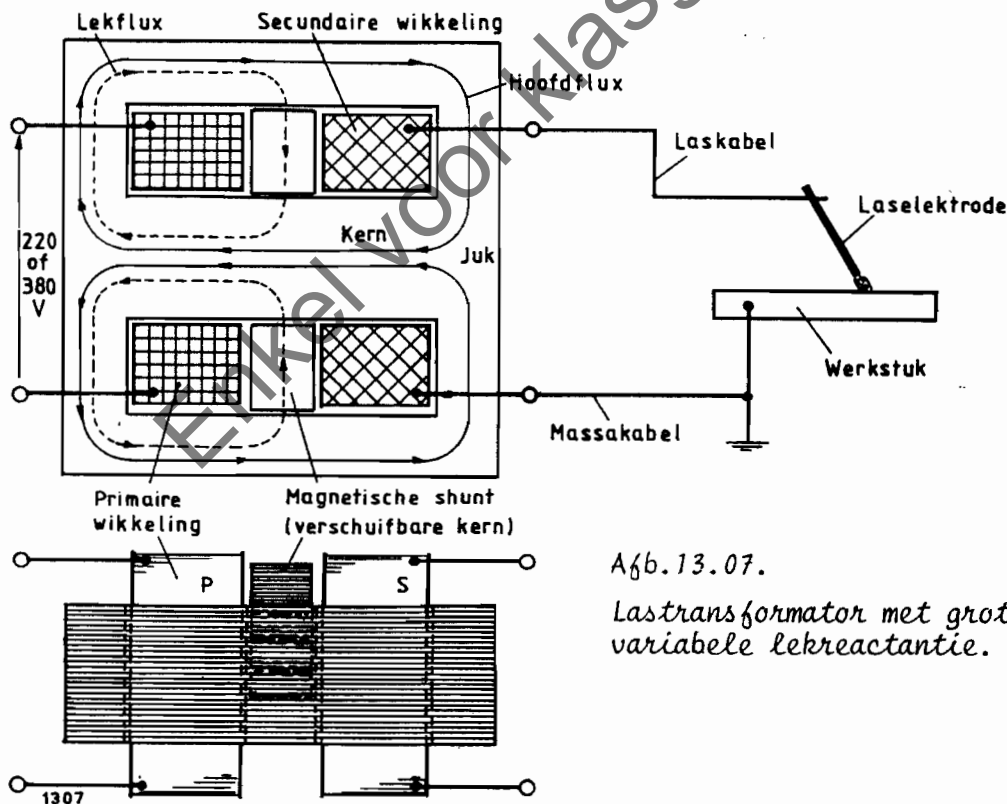
Belangrijk is te noteren dat, tijdens de overschakeling, de belastingsstroom niet wordt onderbroken. Wel vloeit de secundaire stroom even via het halve aantal windingen van de hulp-autotransfo, waarbij een klein spanningsverlies optreedt.

13.2. LASTRANSFORMATOR

Voor de *ontsteking* van de vlamboog tussen laselektrode en werkstuk is een spanning vereist van 60 tot 80 V (= *ontstekingsspanning*). Als de boog eenmaal ontstoken is moet de spanning dalen tot de veel lagere *brandspanning*, die slechts 20 tot 40 V bedraagt, bij stromen van 80 tot 1000 A. De *elektrische geleidbaarheid* tussen elektrode en werkstuk wordt immers veel groter tengevolge van het ionisatieverschijnsel.

De secundaire spanning van de lastransformator moet dus, tijdens het lassen, *automatisch dalen* tot ongeveer de *helft van de nullastspanning*. Dit kan worden gerealiseerd door de lastransformator uit te voeren met een *veranderlijke* (d.w.z. regelbare) *grote lekreactantie*, of door in serie met de lastransformator een *afzonderlijke reactantie* te voorzien.

In afb.13.07 is een lastransformator met grote, variabele lekreactantie getekend.



Afb.13.07.

Lastransformator met grote, variabele lekreactantie.

De ferromagnetische kring tussen primaire en secundaire is *geshunteerd* door een *verschuifbare kern*.

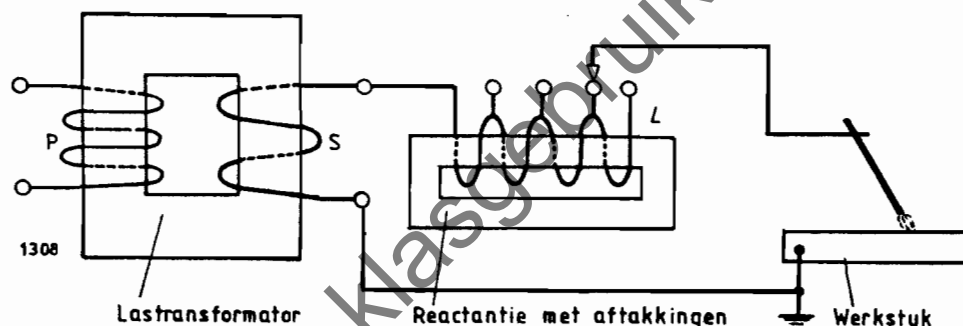
Bij *nullast* zal de primaire flux, die nog geen tegenwerking ondervindt vanwege de secundaire, praktisch geheel worden omvat door de windingen van de secundaire spoel, omdat de krachtlijnen, via deze weg, geen luchtspleten moeten overbruggen.

Er ontstaat aldus een hoge ems van wederzijdse inductie in de secundaire, waarmee de vlamboog kan worden ontstoken : de hoge *nullastspanning* is gelijk aan de *ontsteekspanning* van de boog.

Als de boog gevormd is levert de secundaire van de transfo de *lasstroom* af, welke een secundaire flux voortbrengt die de sterker geworden flux, van de eneneens toegenomen primaire stroom, *tegenwerkt*. Aldus zal een gedeelte van de resulterende flux, via de verschuifbare kern worden afgeleid, zodat de ems van wederzijdse inductie in de secundaire daalt.

Voor de *kleinste lasstroom* is de kern geheel ingeschoven en ze wordt geleidelijk verder uitgeschoven naarmate de lasstroom moet toenemen. Voor de *grootste lasstroom* is de kern helemaal uitgeschoven. We verkrijgen hier dus een *continue regeling van de intensiteit van de lasstroom*.

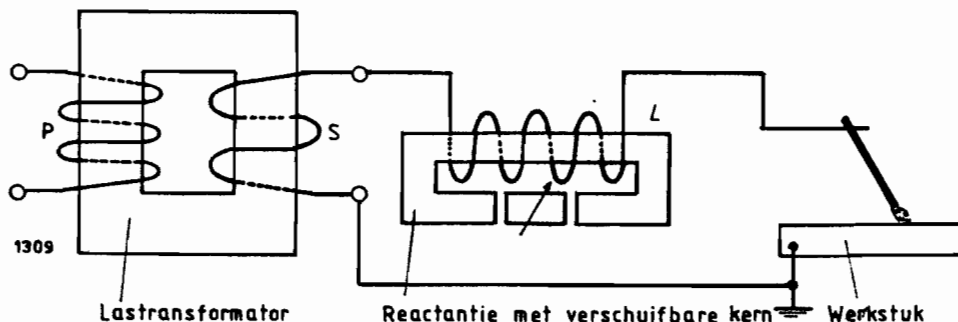
In afb.13.08 is een lastransformator voorgesteld met *in serie geschakelde regelbare reactantie*.



Afb.13.08. Lastransformator met in serie geschakelde regelbare reactantie, of trapsgewijze instelbare reactantie.

Deze reactantie is opgebouwd uit een ferromagnetische kring met grote luchtspleet en een wikkeling met een bepaald aantal aftakkingen. Voor de kleinste lasstroom is de spoel geheel ingeschakeld, terwijl voor grotere lasstromen op een kleiner aantal windingen wordt afgetakt.

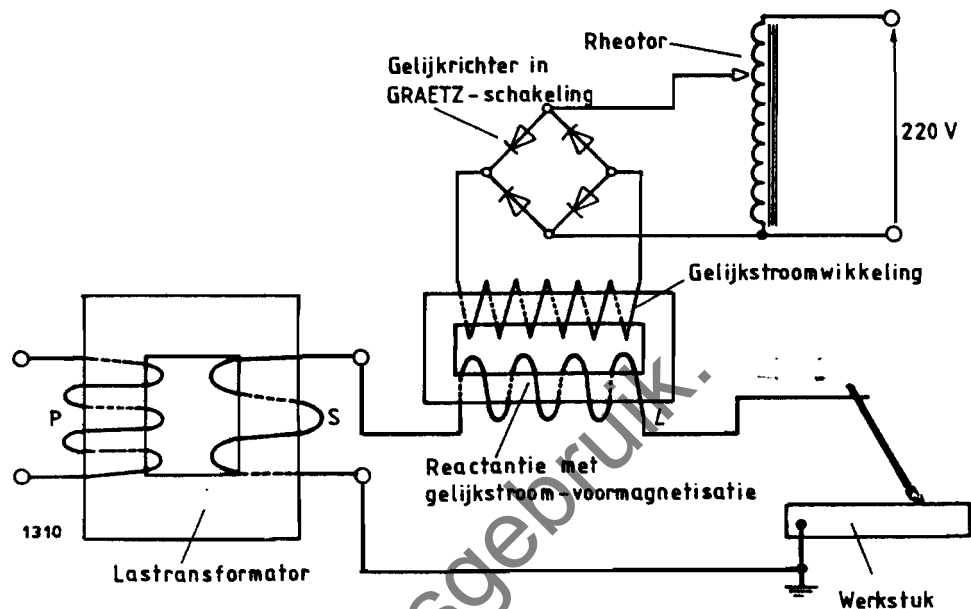
In een andere uitvoering met in serie geschakelde lekreactantie zijn geen aftakkingen voorzien, maar de zelfinductiecoëfficiënt is regelbaar door verschuiven van een gelamelleerde ijzeren kern (afb.13.09).



Afb.13.09. Lastransformator met in serie geschakelde continu regelbare reactantie door verschuifbare kern.

Dit maakt een continue en soepele regeling van de lasstroom mogelijk, zoals bij de lastransformator met eigen variabele lekreactantie.

Een moderne oplossing tot het verkrijgen van een continu variabele reactantie is gebruik te maken van *gelijkstroom-voormagnetisatie*. Dit betekent dat men gebruik maakt van een *verzadigbare reactantie*. Op deze wijze kan de zelfinductiecoëfficiënt van de spoel continu worden geregeld en is bovendien op eenvoudige wijze *afstandsbediening* mogelijk (afb.13.10).



Afb.13.10. Lastransformator met in serie geschakelde continu regelbare reactantie door gelijkstroom-voormagnetisatie (verzadigbare reactantie).

Als geen gelijkstroom doorheen de voormagnetisatiewikkeling wordt gestuurd werkt de reactantie als een zelfinductiespoel met normale ferromagnetische kring.

Een bepaalde intensiteit van de gelijkstroom zorgt ervoor dat reeds een voormagnetisatie van de ferromagnetische kring van de reactantie bestaat voor één zin van de lasstroom (niet voor de andere zin). Globaal genomen vermindert de zelfinductiecoëfficiënt aldus, zodat de reactantie afneemt. Op deze wijze is een grotere lasstroom ingesteld.

Een maximale intensiteit van de gelijkstroom komt overeen met de grootst mogelijke lasstroom.

Booglassen met gelijkstroom heeft het grote voordeel dat de boog niet honderd maal per seconde wordt onderbroken, zoals dit het geval is met wisselstroom bij een frequentie van 50 Hz. Daarom wordt gelijkstroom veel gebruikt bij moeilijk laswerk, zoals bv. het lassen van roestvrij staal en van non-ferro-metalen (koper, aluminium, brons enz.).

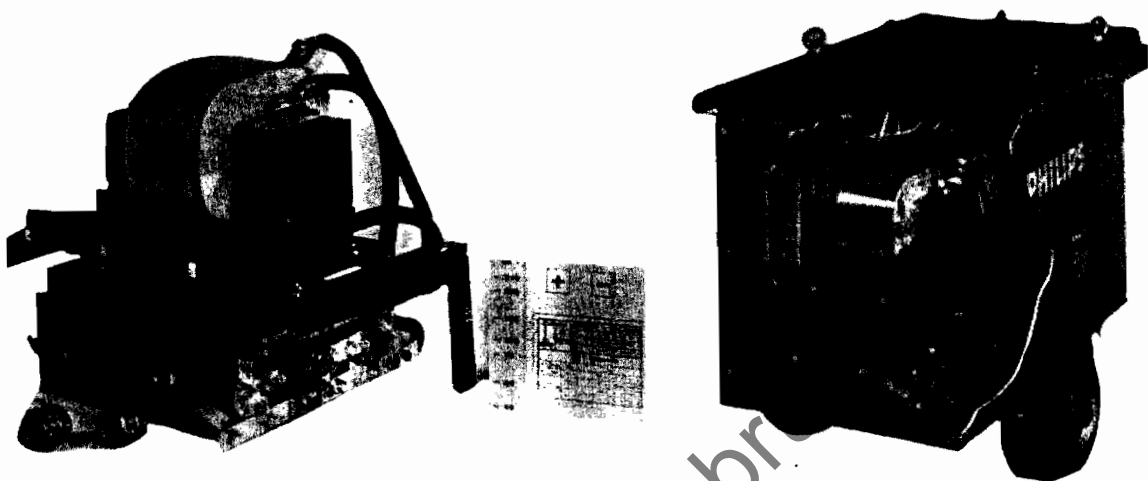
Tegenwoordig worden dus veel lasgelijkrichters aangewend. Deze zijn samengesteld uit een driefasen lastransformator en een stel siliciumgelijkrichters van groot vermogen.

De lasstroom kan ook hier op continue wijze worden geregeld bij middel van zelfinductiespoelen met gelijkstroomvoormagnetisatie (verzadigbare reactanties).

Merken we op dat, voor het gelijkstroomlassen op bouwerven, lasaggregaten

worden aangewend. Deze zijn opgebouwd uit drie hoofddelen, nl. een *dieselmotor*, een *driefasen synchrone generator* en een stel *siliciumdioden*.

In afb.13.11 zien we een lastransformator met ingebouwde lasgelijkrichter. Deze lasgelijkrichter, bestaande uit *dioden*, *afvlakspoel* en *afvlakcondensatoren* is links nog eens afzonderlijk voorgesteld.



Afb.13.11. Lastransformator met ingebouwde lasgelijkrichter. Duidelijk zichtbaar zijn de dioden, de afvlakspoel en de afvlakcondensatoren (PHILIPS).

Indien *gelijkstroomgeneratoren* worden gebruikt voor *vlambooglassen*, zijn dit ofwel *anti-compoundgeneratoren* ofwel *dwarsveldgeneratoren* ofwel *strooi-veldgeneratoren*.

13.3. MEETTRANSFORMATOREN

Meettransformatoren zijn *speciale transformatoren* van *klein vermogen* en *hoge nauwkeurigheid* welke hoge spanningen en hoge stromen naar lagere waarden transformeren.

Meettransformatoren worden aangewend :

- voor het meten van hogere spanningen en hogere stromen met gewone meetinstrumenten met laag meetbereik ;
- voor de bediening van talrijke meldingsapparaten en beveiligingsrelais in hoogspanningsinstallaties ;

Een belangrijk voordeel van meettransformatoren is dat veilige meet-, regel- en beveiligingskringen worden verkregen, die geheel gescheiden zijn van de hogere spanningen.

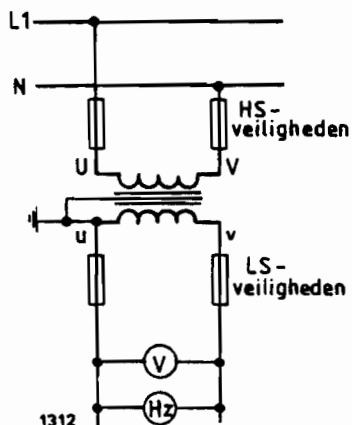
We onderscheiden de *spanningsmeettransformator* en de *stroommeettransformator*.

13.3.1. SPANNINGSMEETTRANSFORMATOR

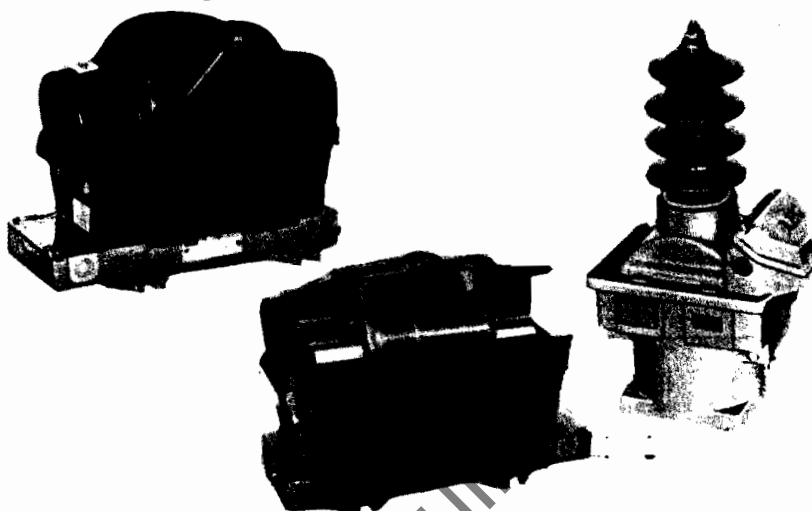
Spanningsmeettransformatoren worden aangewend voor aansluiting van voltmeters, frequentiemeters, spanningskringen van andere meetinstrumenten (zoals : $\cos \varphi$ -meters, watt-meters, var-meters, kilowattuurmeters enz.) en van beveiligingsrelais (wattmetrisch relais, bv. gebruikt voor de beveiliging tegen kortsluiting tussen windingen in een synchrone generator, uit-

schakelrelais enz.).

In afb.13.12 is het schema getekend van een spanningsmeettransformator, terwijl in afb.13.13 een aantal spanningsmeettransformatoren te zien zijn.



Afb.13.12. Schakelschema van een spanningsmeettrafo.



Afb.13.13. Diverse typen spanningsmeettransformatoren (AEG en SIEMENS).

De primaire wikkeling van een spanningsmeettrafo bestaat uit vele windingen dunne draad, terwijl de secundaire gewikkeld is voor een genormaliseerde spanning van 100 V.

Alle spanningskringen van meetinstrumenten en relais worden in parallel aangesloten op de secundaire van de spanningsmeettrafo. De resistanties van deze spanningskringen zijn zeer groot, zodat de spanningstransfo praktisch bij nullast werkt. Het verband tussen de secundaire en primaire spanningen is dus gelijk aan de windingsverhouding.

Door een juiste aansluiting is de spanning over de spanningskringen van de aangesloten meetinstrumenten in fase met de netspanning, hetgeen wel een vereiste is in watt-meters, var-meters, kWh-meters enz.

Bij de constructie van de spanningsmeettransformator moet ervoor worden gezorgd dat er een juiste evenredigheid bestaat tussen de secundaire en de primaire spanningen en dat de primaire en secundaire spanningen precies in tegenfase zijn. Daartoe is het noodzakelijk de primaire nullaststroom, de secundaire stroom en de lekfluxen zeer klein te houden door een zeer verzorgde constructie.

In realiteit zal een spanningstransformator echter toch steeds kleine foutjes vertonen in de spanningstransformatie en in de faseformatie. Er treedt dus een spanningsfout en een hoekfout op, d.w.z. dat de secundaire spanning kleiner is dan volgt uit de windingsverhouding en dat de faseverschuivingen tussen primaire en secundaire spanningen minder bedraagt dan 180° .

De spanningsfout wordt aangeduid in procentuele afwijking van de vooropgestelde waarde en de hoekfout in minuten.

Praktisch variëren deze fouten respectievelijk van 0,1 tot 3 % en van 5 tot 40 minuten voor de klassen 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 en 3.

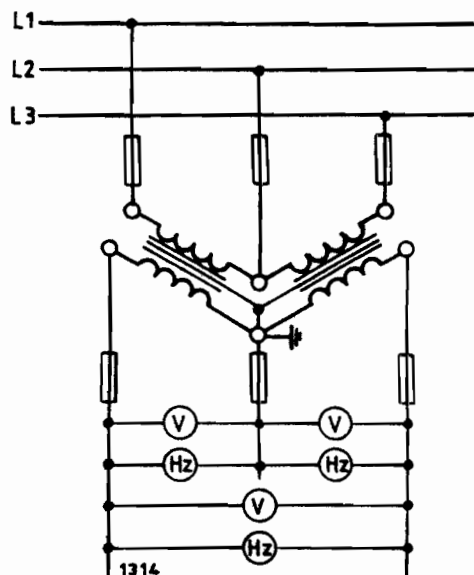
Om veiligheidsredenen moet de ferromagnetische kring en de secundaire wikkeling van een spanningsmeettrafo geaard zijn.

In de primaire kring zijn hoogspannings-smeltveiligheden voorzien en in de secundaire wikkeling laagspannings-smeltveiligheden.

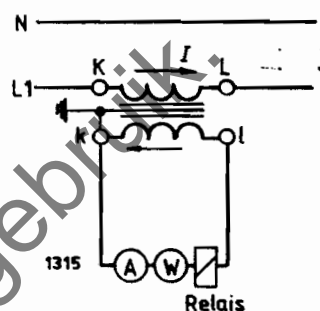
Aan de primaire zijde zijn twee HS-isolatoren in porselein of giethars aangebracht en aan de secundaire zijde twee LS-isolatoren.

Spanningsmeettransformatoren tot ongeveer 30 kV zijn uitgevoerd met giet-harsisolatie. Voor hogere spanningen wordt olie-isolatie angewend.

In driefasen netten kan worden gebruik gemaakt van drie afzonderlijke eenfase spanningsmeettransformatoren, of van één driefasen spanningsmeettransformator of van twee eenfase spanningsmeettransformatoren in open-driehoek- of V-schakeling, (zie afb.13.14).



Afb.13.14. V-schakeling van spanningsmeettransformatoren in een driefasen net.

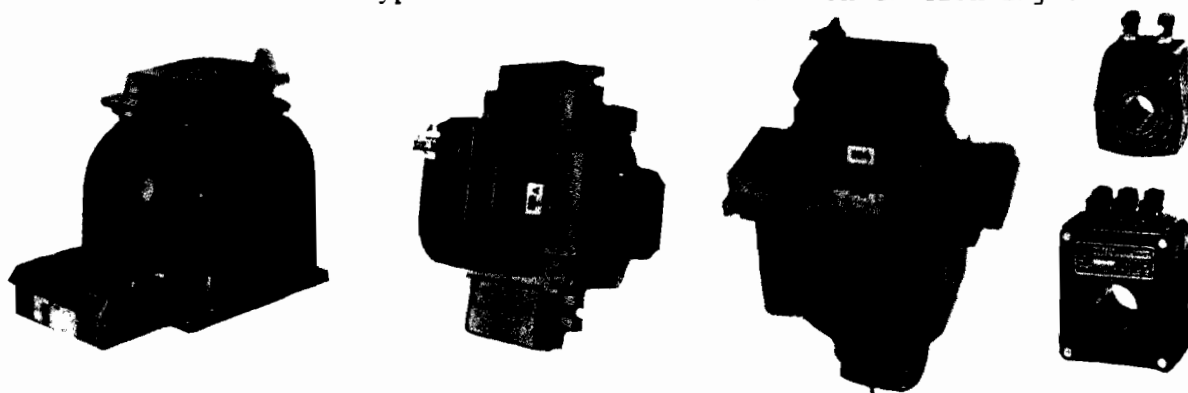


Afb.13.15. Schakelschema van een stroommeettransformator.

13.3.2. STROOMMEETTRANSFORMATOR

Stroommeettransformatoren worden angewend voor aansluiting van amperemeters, stroomkringen van andere meetinstrumenten ($\cos \varphi$ -meters, watt-meters, var-meters, kilowattuurmeters enz.) en van beveiligingsrelais (wattmetrisch relais, differentieelrelais voor beveiliging tegen kortsluiting tussen de fasen van een driefasen synchrone generator, uitschakelrelais enz.).

In afb.13.15 is het schema getekend van een stroommeettrafo, terwijl in afb.13.16 diverse typen stroommeettransformatoren te zien zijn.



Afb.13.16. Diverse typen stroommeettransformatoren (SIEMENS-AEG-BBC).

De primaire van een stroommeettransformator is direct in de kring van de te meten stroom geschakeld.

Alle stroomkringen van meetinstrumenten en relais zijn in serie aangesloten op de secundaire wikkeling.

De totale impedantie van deze kringen is relatief klein, zodat een stroommeettransfo praktisch bij kortsluiting werkt.

De primaire wikkeling van een stroommeettransfo bestaat uit één geleider, uit één winding of uit enkele windingen met een grote dwarsdoorsnede, terwijl de secundaire wikkeling relatief veel windingen bevat van wikkeldraad met een kleine doorsnede.

De impedantie van de secundaire wikkeling is dus groot t.o.v. deze van de erop aangesloten stroomkringen. De aansluiting van enkele extra stroomkringen heeft dus weinig invloed.

De secundaire spanning van een stroommeettrafo is zeer klein, bv. 1 tot 6 V. Een kleine flux is dus reeds voldoende om deze ems te induceren in de vele windingen van de secundaire wikkeling. Vandaar dat de magnetisatiestroom I_0 ook te verwaarlozen klein is.

Aldus is :
$$I_1 = (N_2 \div N_1) \cdot I_2$$

De primaire stroom kan dus worden bepaald door meting van de intensiteit van de secundaire stroom.

Indien de aansluiting juist is uitgevoerd zal de stroom in de secundaire kring in fase zijn met de lijnstroom, hetgeen van belang is in watt-meters, kilowattuurmeters enz.

De nominale secundaire stroomsterkte is gewoonlijk vastgesteld op 5 A. In de gevallen waarbij lange leidingen zijn vereist tussen de plaats van opstelling van de stroommeettrafo en de meetinstrumenten of relais, wordt een nominale secundaire stroomsterkte van 1 A gekozen.

De primaire stromen variëren van 15 A tot 20000 A of 20 kA.

Om veiligheidsredenen zijn de ferromagnetische kring en de secundaire wikkeling van de stroommeettransformator geaard.

Een dubbele eis, gesteld aan de stroommeettrafo, is dat secundaire en primaire stromen absoluut evenredig moeten zijn en dat deze stromen precies in tegenfase moeten werken.

Vandaar dat I_0 nul zou moeten zijn en dat de magnetische inductie slechts gering mag zijn (bv. 0,08 tot 0,10 Wb/m² of T).

Maar in realiteit treden toch kleine fouten op in de stroomtransformatie en in de fasetransformatie. De stroomfout varieert tussen 0,1 en 3 % en de hoekfout tussen 5 en 120 minuten, voor stroommeettransformatoren van de klassen 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 en 3.

Stroommeettransformatoren worden geconstrueerd in diverse vormen, uitvoeringen, stroomsterkten en isolaties. Gebruikte isolatiematerialen zijn persmateriaal, porselein, giethars en olie. Een enkele HS-isolator met twee aansluitpunten volstaat, omdat het spanningsverschil over de primaire klemmen slechts gering is.

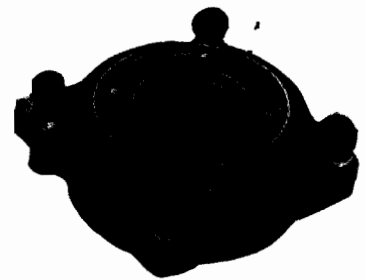
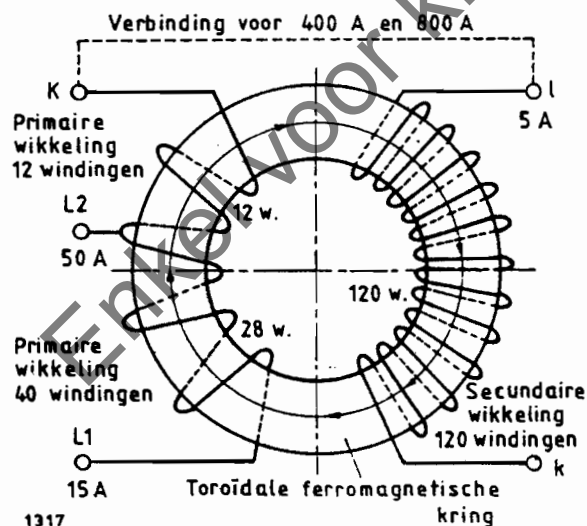
De *secundaire* van een stroommeettransformator, die primair stroom voert, mag absoluut nooit geopend worden.

In dit geval zou de transformator bij *nullast* werken. De primaire flux blijft echter integraal bestaan, want deze wordt bepaald door de primaire stroom I_1 (die de netstroom is). Deze primaire flux wordt dan niet meer tegengewerkt door een secundaire flux. De alleen heersende flux ϕ_1 doet de magnetische inductie toenemen tot intensiteiten van 1,40 tot 1,80 Wb/m², i.p.v. 0,08 tot 0,1 Wb/m², zodat :

- de ferromagnetische kring intens wordt verhit door de *grote hysteresis- en foucaultverliezen*, met gevaar voor verbranding van de isolatie ;
- in de secundaire wikkeling een *hoge ems van zelfinductie* wordt geïnduceerd, die doorslag van de isolatie kan veroorzaken en ook elektrocutiegevaar oplevert ;
- door de plotselinge stootsgewijze toename van de inductie een *zeer sterke remanente magnetisatie in één zin* kan optreden, die later fouten in de metingen kan teweegbrengen.

Als geen stroomkringen van meetinstrumenten of relais zijn aangesloten moet de secundaire van een stroomtransfo dus worden *kortgesloten* bij stroomvoerende primaire wikkeling.

In afb.13.17 is het schema getekend van een *kleine meervoudige stroomtrafo* voor laagspanning (tot 500 V).



Afb.13.17. Schema en praktische opbouw van een kleine meervoudige stroommeettransformator, klasse 0,2 (AEG-TELEFUNKEN).

De gelamelleerde ferromagnetische kring is ringvormig uitgevoerd. De secundaire wikkeling k_1 is berekend voor een nominale stroomsterkte van 5 A en bestaat uit 120 windingen. Het aantal *amperewindingen* is dus $5 \times 120 = 600$. De primaire wikkeling is voorzien van één aftakking, zodat twee primaire stroommeetbereiken zijn verkregen, nl. 15 A en 50 A. Tussen de klemmen K en L1 zijn er $600 \div 15 = 40$ windingen en tussen K en L2 zijn er $600 \div 50 = 12$ windingen. De 12 windingen voeren een maximale stroom van 50 A en de 28 windingen een maximale stroom van 15 A.

De doorsnede van de wikkeldraad van deze 28 windingen is dus veel kleiner dan van de 12 windingen.

Om primaire stromen te meten tot respectievelijk 100, 150, 200, 300 en 600 A kunnen we de primair stroomvoerende geleider respectievelijk 6 maal, 4 maal, 3 maal, 2 maal of 1 maal voeren doorheen de opening in de ferromagnetische kring, terwijl de A-meter blijft aangesloten tussen k en l. De primaire wikkeling van de stroomtrafo zelf wordt hierbij niet gebruikt.

Als we echter de klemmen l en K onderling verbinden verkrijgen we een wikkeling met een totaal aantal windingen van $120 + 40 = 160$ tussen de klemmen k en Ll. Met een nominale stroomsterkte van 5 A betekent dit $5 \times 160 = 800$ amperewindingen. Nu kunnen we de A-meter tussen de klemmen k en Ll aansluiten, om aldus als meetbereiken te verkrijgen 400 A en 800 A. Inderdaad, het volstaat de primair stroomvoerende geleider respectievelijk 2 maal en 1 maal door te voeren.

Er bestaan ook *stroommeetangen* of *amperemetrische tangen*, waarvan de ferromagnetische kring in twee delen de stroomvoerende geleider kan omvatten (afb.13.18).



Afb.13.18. Diverse typen stroommeetangen (AEG-SIEMENS-BBC-HIOKI).

Op deze wijze kan een snelle stroommeting geschieden zonder dat de stroomvoerende geleider moet worden onderbroken.

13.4. INDUCTIEREGELAARS

Een *inductieregelaar* of *draaitransformator* is een transformator waarvan de primaire wikkelingen kunnen worden verdraaid t.o.v. de secundaire wikkelingen.

Hij wordt gebruikt als *spanningsregelaar* en als *spanningsstabilisator* in de laboratoria en in de elektrische energietechniek (bv. voor het constant houden van de netspanning).

De constructie van een inductieregelaar heeft meer het uitzicht van een *inductiemotor* met *bewikkelde rotor* dan het uitzicht van een transformator.

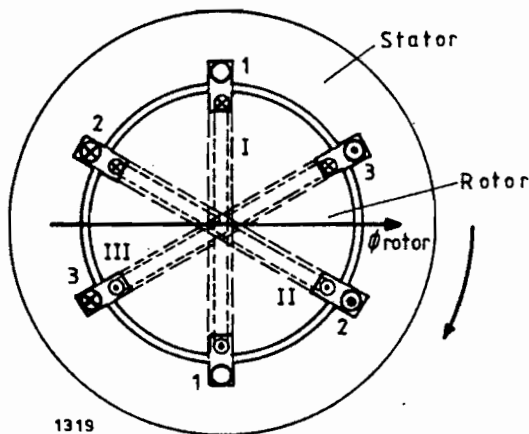
Maar de rotatiebeweging, zoals van een motor, werd onmogelijk gemaakt door

een overbrenging worm-wormwiel, d.w.z. dat de rotor alleen van buitenuit, via een worm, kan worden verdraaid.

De rotorwikkeling vormt de *primaire* van de transformator en de statorwikkeling de *secundaire*. Maar ook kan dit het omgekeerde zijn.

De uiteinden van de rotorwikkeling zijn verbonden met vaste klemmen, via flexibele leidingen.

In afb.13.19 is het uitzicht van een *driefasen inductieregelaar* voorgesteld.



Afb.13.19.

Driefasen inductieregelaar,
schematisch voorgesteld.

Als de rotorwikkeling wordt aangesloten op een driefasen spanning ontstaat een *driefasen elektromagnetisch draaiveld*, met een cirkelfrequentie $\omega = 2\pi f$ (zie : Hoofdstuk 15).

De *flux* van dit elektromagnetisch draaiveld is *constant* en gelijk aan 1,5 maal de maximale waarde van de *flux* per fase (als de intensiteit van de stroom constant blijft).

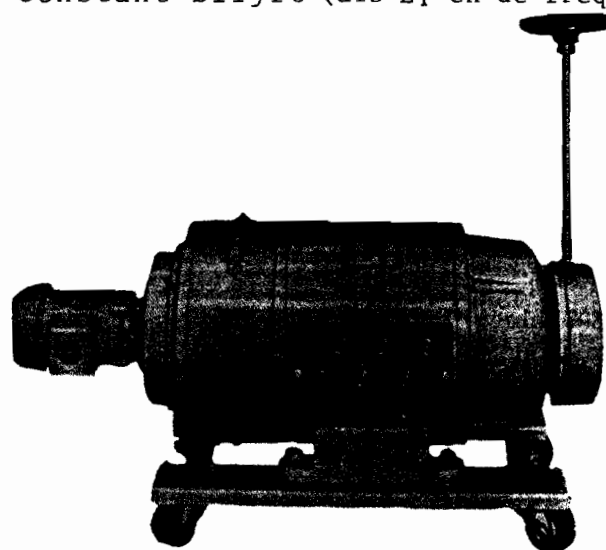
De krachtlijnen van dit draaiend magnetisch veld snijden de stilstaande geleiders van de statorwikkeling en induceren hierin elektromotorische spanningen.

Door *verdraaien* van de rotor t.o.v. de stator, naar links of naar rechts, over een bepaalde hoek θ zal de secundaire spanning E_s t.o.v. de primaire spanning E_1 een faseverschuiving θ vertonen.

Alleen de *faseverschuiving* van E_s t.o.v. E_1 *varieert*, terwijl de effectieve waarde van E_s *constant* blijft (als E_1 en de frequentie constant blijven).

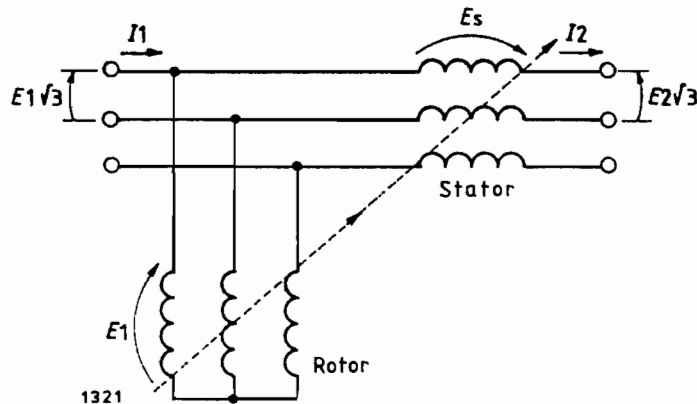
Afb.13.20.

Didactische driefasen
inductieregelaar
(CETEL-AEG).

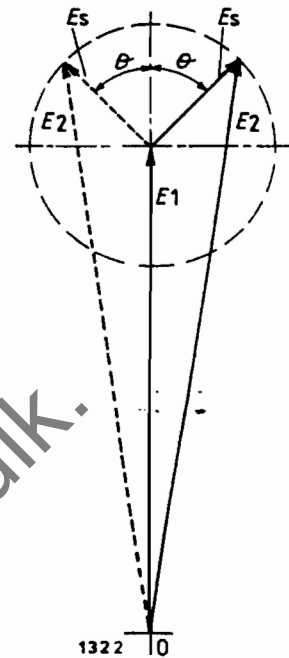


In afb.13.20 zien we het praktisch uitzicht van een didactische driefasen inductieregelaar.

In afb.13.21 is het schakelschema van een driefasen inductieregelaar getekend voor de regeling van de spanning van een driefasen net.



Afb.13.21. Spanningsregeling in een driefasen net, met een driefasen inductieregelaar.



Afb.13.22. Vectordiagram van de fasespanningen voor de inductieregelaar volgens afb.13.21.

De secundaire fasespanning kan worden bepaald uit de vectoriële gelijkheid :

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_1 + \vec{E}_s$$

Dit is in afb.13.22 voorgesteld. Als E_1 constant is kan voor E_2 een veranderlijke spanning worden verkregen, met een maximale waarde $E_1 + E_s$ en een minimale waarde $E_1 - E_s$.

Indien het aantal windingen van primaire en secundaire even groot is, zal E_s ongeveer gelijk zijn aan E_1 . In dit geval is E_2 regelbaar tussen nul en de dubbele waarde van E_1 .

Tussen E_2 en E_1 is er een zekere faseverschuiving in positieve of in negatieve zin. Als E_s in fase of in tegenfase is met E_1 is echter de faseverschuiving tussen E_2 en E_1 nul.

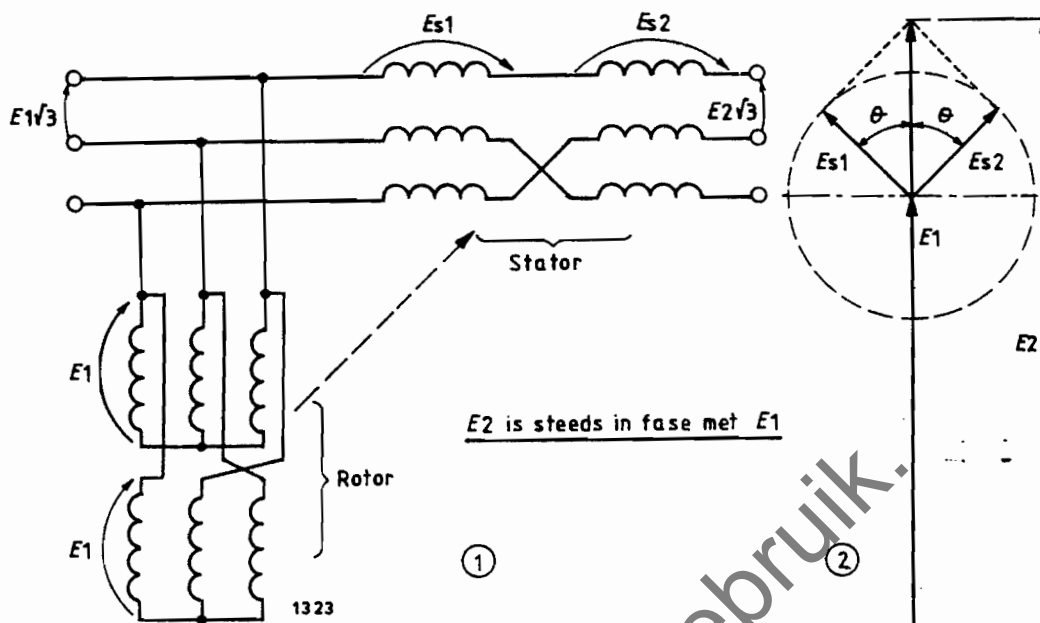
Om de faseverschuiving tussen E_2 en E_1 te neutraliseren kan worden gebruik gemaakt van een dubbele inductieregelaar, waarbij de draaizinnen van de twee rotorvelden tegengesteld zijn.

In de schakeling volgens afb.13.23 is de spaarschakeling van een dubbele driefasen inductieregelaar getekend. De lijnspanning aan de uitgang is hier $\sqrt{3} \cdot E_2$. Als, onder invloed van een veranderlijke belasting, spanning E_1 varieert, kan toch een constante uitgangsspanning E_2 worden verkregen dank zij de inductieregelaar. De verdraaiing van de rotor geschiedt automatisch bij middel van een kleine servo-motor.

Het intern reactief vermogen van de inductieregelaar is $3 \cdot E_s \cdot I_2$. Dit is dus slechts klein als slechts een kleine waarde is vereist voor E_s .

Gewoonlijk moet E_s slechts maximaal 10 % van E_2 zijn, zodat het intern

schijnbaar vermogen ook slechts 10 % is van het doorgaand schijnbaar vermogen $3 \cdot E_2 \cdot I_2$.



Afb. 13.23. Dubbele driefasen inductieregelaar in spaarschakeling
(1) - schema van de schakeling
(2) - vectordiagram van de spanningen.

De driefasen inductieregelaar met gescheiden primaire en secundaire wikkelingen wordt bv. toegepast voor de sturing van driefasen kwikdampgelijkrichters. Op de stuurroosters van deze gelijkrichters worden sinusoidale spanningen aangesloten, waarvan de faseverschuiving t.o.v. de anodespanningen kan worden geregeld. Aldus verkrijgen we een continu regelbare gelijkspanning. In dit geval fungeert de driefasen inductieregelaar als faseregelaar.

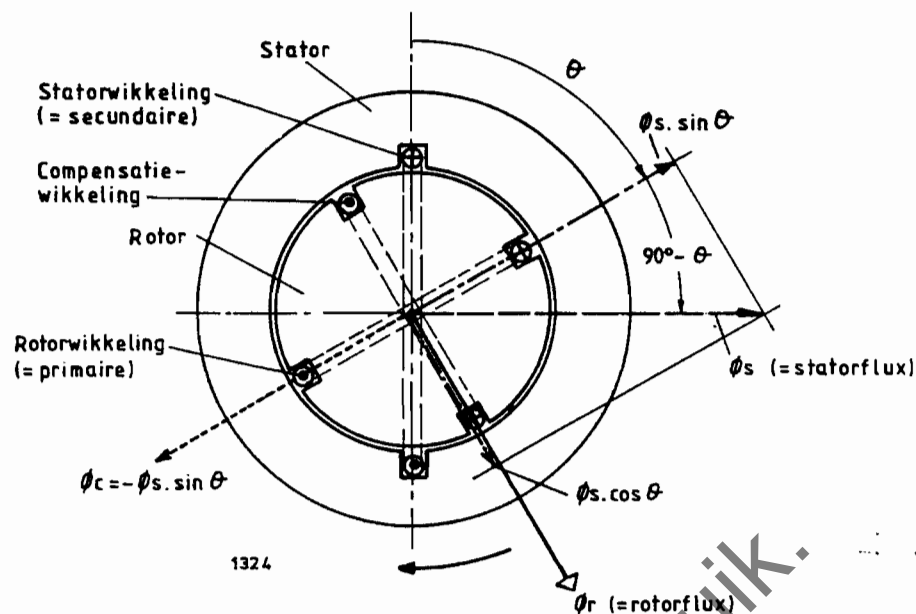
Een belangrijke toepassing van de driefasen inductieregelaar is het gebruik ervan als spanningsbron bij het ijken van elektrische energiemeters (kWh-meters en kvarh-meters). Hier worden dan afzonderlijke bronnen aangewend voor de stroomkringen en de spanningskringen.

In de stroomkringen vloeien stromen die worden geleverd door een driefasen transformator, terwijl de spanningskringen worden aangesloten op een driefasen inductieregelaar.

De inductieregelaar stelt ons aldus in staat de faseverschuiving tussen de stromen in de stroomkringen en de stromen in de spanningskringen op soepele wijze te regelen.

De energiemeters kunnen op deze wijze worden geijkt bij verschillende faseverschuivingen tussen stroom en spanning en bij alle mogelijke waarden van stroom en spanning, zonder dat men moet beschikken over een driefasen energiebron met een vermogen dat overeenkomt met het maximaal vermogen van de energiemeters. Merken we trouwens op dat steeds een hele reeks energiemeters tegelijkertijd wordt geijkt op eenzelfde proefbank.

Er worden ook eenfase inductieregelaars geconstrueerd. In afb. 13.24 is deze schematisch voorgesteld. De rotorwikkeling (primaire) is bv. op het eenfase net aangesloten, volgens afb. 13.25, terwijl de statorwikkeling (secundaire) in serie met een geleider van het net is geschakeld.



Afb.13.24. Eenfase inductieregelaar met compensatiewikkeling.

In de rotorwikkeling vloeit een sinusoidale stroom die een wisselende flux voortbrengt. Deze flux induceert in de statorwikkeling een bepaalde ems E_s die, ofwel in fase, ofwel in tegenfase is met spanning E_1 en waarvan de waarde afhangt van de verdraaiingshoek θ .

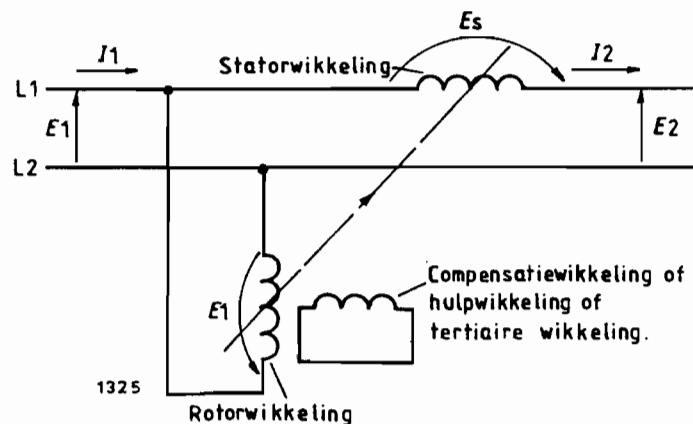
Als $\theta = 0$, d.w.z. als het vlak van de rotorwikkeling samenvalt met het vlak van de statorwikkeling is de geïnduceerde ems E_s in de statorwikkeling maximaal negatief ($E_{s\max}$). Voor $\theta = 90^\circ$ el is $E_s = 0$ en voor $\theta = 180^\circ$ el is E_s maximaal positief.

Voor een bepaalde verdraaiingshoek θ is de uitdrukking van E_s :

$$E_s = E_{s\max} \cdot \cos \theta$$

De uitgangsspanning E_2 is dus continu regelbaar tussen de waarden $E_1 - E_s$ en $E_1 + E_s$ en ze blijft in fase met E_1 (als E_s kleiner blijft dan E_1).

Bij belasting vloeit een stroom I_2 door de statorwikkeling. Deze stroom ont-wikkelt een bepaalde flux ϕ_s . De componenten van ϕ_s zijn $\phi_s \sin \theta$, loodrecht op ϕ_r en $\phi_s \cos \theta$, in tegenfase met ϕ_r . Om de eerste componente te compenseren wordt een *hulpwikkeling* voorzien in de rotor, over 90° m verschoven t.o.v. de primaire wikkeling. Deze *compensatiewikkeling* (zoals de hulpwikkeling nog genoemd wordt) is kortgesloten. De sinusoidale fluxcomponente $\phi_s \sin \theta$ induceert spanningen in de compensatiewikkeling, zodat *kortsluitstromen* ontstaan. De flux ϕ_c hiervan compenseert op ieder ogenblik de *dwarsflux* $\phi_s \sin \theta$.



Afb.13.25.

Eenfase inductieregelaar in spaarschakeling.

Op deze wijze is vermeden dat in de secundaire wikkeling een tegenspanning zou geïnduceerd worden door de dwarsflux.

13.5. SPECIALE TRANSFORMATOREN

13.5.1. VEILIGHEIDSTRANSFO

Een veiligheidstransformator is een transformator met *gescheiden primaire en secundaire wikkelingen*, bestemd voor de voeding van stroomkringen en toestellen op *zeer lage spanning* met een nominale waarde van 24 V (of maximaal 42 V).

Een voorbeeld hiervan is de *handlamptransformator*, een gesloten veiligheids-transformator bestemd voor de voeding van één of meerdere handlampen (in de autoherstelwerkplaats, bij werkzaamheden aan ketels enz.).

In afb.13.26 is een *draagbare handlamptransformator* met *dubbele of versterkte isolatie* (klasse II - isolatie) voorgesteld.

Afb.13.26.

Draagbare handlamp-
transformatoren,
220 V/24 V - 100 VA,
met dubbele
isolatie
(VYNCKIER en SIEMENS)



De secundaire wikkeling van een veiligheidstransformator *mag* nooit worden verbonden met de massa en ook niet met de eventueel aanwezige aardingsklem.

Klasse II - transformatoren (en andere klasse II -toestellen) hebben geen aardingsmogelijkheid.

13.5.2. VOEDINGSTRANSFORMATOR

Voedingstransformatoren zijn transformatoren met *gescheiden primaire en secundaire wikkelingen*, bestemd voor de voeding van elektronische apparaten.

Aan de primaire zijde zijn gewoonlijk aftakkingen voorzien voor aansluiting op 240 V, 220 V, 130 V en 110 V.

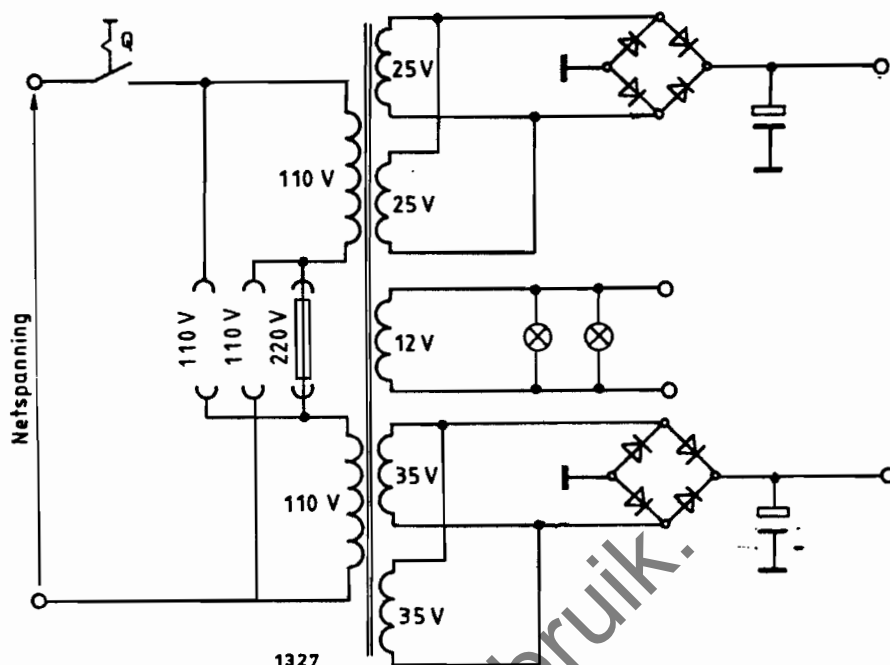
Meestal zijn er meerdere gescheiden secundaire wikkelingen.

In afb.13.27 is een voorbeeld voorgesteld.

13.5.3. SPEELGOEDTRANSFORMATOR

Speelgoedtransformatoren zijn transformatoren van relatief klein vermogen, met *gescheiden primaire en secundaire wikkelingen*, waarvan de secundaire spanning gewoonlijk 12 V is.

Ze zijn uitgevoerd met *grote lekreactanties*, zodat ze *bestand zijn tegen kortsluitingen*. In vele gevallen is de secundaire spanning continu regelbaar van 0 tot 12 V.



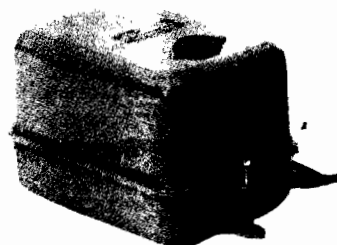
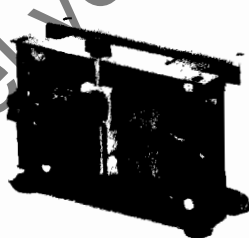
Afb.13.27. Voedingstransformator voor stereo-radio-versterker (TELEFUNKEN).

13.5.4. LEKVELDTRANSFORMATOR

Een lekveldtransformator is uitgevoerd met een instelbaar lekveld door middel van een verschuifbare kern, zoals bij een lastransformator (zie afb.13.28).

Afb.13.28.

Lekveldtransfo
(LEYBOLD).



Dit type transfo wordt toegepast als voorschakelapparaat voor HS-gasontladdingsbuizen voor verlichtingsdoeleinden.

De lekveldtrafo zorgt hierbij voor :

- de vereiste hoge ontsteekspanning ;
- de noodzakelijke spanningsdaling in normaal bedrijf (omdat de brandspanning veel lager is dan de vereiste ontsteekspanning) ;
- beperking van de bedrijfsstroom.

Volgens de grootte van de belasting moet de kern in een bepaalde stand worden gebracht en dan vastgezet.

13.6. OEFENINGEN

1. Een autotransformator wordt primair aangesloten aan een spanning van 660 V. De secundaire spanning is 220 V. Een inductiemotor, aangesloten op de secundaire, levert een nuttig vermogen van 15 kW bij een rende-

ment van 78 % en een arbeidsfactor van 0,84. Het rendement van de trafo wordt op 100 % ondersteld. Het aantal windingen per volt is 0,36.

Bereken :

- de primaire stroom ;
- de secundaire stroom ;
- het aantal windingen van de primaire ;
- het aantal windingen van de secundaire ;
- het afgeleverd schijnbaar vermogen aan de motor ;
- het eigenlijke schijnbaar vermogen, op basis waarvan deze trafo moet worden berekend.

OPLOSSING

Het toegevoerd elektrisch vermogen aan de motor is :

$$P_{tm} = P_{nm} \div \eta_m = 15000 \div 0,78 = 19231 \text{ W}$$

Het schijnbaar vermogen dat de transformator aan de motor moet leveren is :

$$S_2 = P_{tm} \div \cos \varphi_m = 19231 \div 0,84 = 22894 \text{ VA}$$

De secundaire stroomsterkte bedraagt dan :

$$I_2 = S_2 \div U_2 = 22894 \div 220 = 104 \text{ A}$$

De primaire stroomsterkte bedraagt :

$$I_1 = S_1 \div U_1 = 22894 \div 660 = 34,69 \text{ A}$$

Het aantal windingen van de primaire is :

$$N_1 = 0,36 \cdot U_1 = 0,36 \cdot 660 = 238$$

Het aantal windingen van de secundaire is :

$$N_2 = 0,36 \cdot U_2 = 0,36 \cdot 220 = 79$$

Het eigenlijke schijnbaar vermogen dat moet worden getransformeerd en waarvoor de transformator moet worden berekend is :

$$\begin{aligned} S_{\text{autotr.}} &= (U_1 - U_2) \cdot I_1 = (660 - 220) \cdot 34,69 = 15264 \text{ VA} \\ &= 15,264 \text{ kVA} \end{aligned}$$

2. Een autotransformator heeft 1600 windingen en is primair aangesloten op 500 V. Hoeveel secundaire windingen zijn er vereist tot het verkrijgen van een secundaire spanning van 220 V ?.

Op de secundaire wordt nu een inductiemotor aangesloten, met een nuttig vermogen van 3,70 kW, een rendement van 76 % en een arbeidsfactor van 0,70.

- Bereken :
- de secundaire stroomsterkte ;
 - de primaire stroomsterkte ;
 - het schijnbaar vermogen dat de secundaire moet afleveren ;
 - het schijnbaar vermogen dat effectief door de transfo moet getransformeerd worden.

OPLOSSING

Uit de formule : $\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$, volgt : $N_2 = N_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right) = \frac{1600 \cdot 220}{500} = 704$ w.

Het totaal actief vermogen dat de secundaire van de transformator moet afleveren is :

$$P_{tm} = P_{nm} \div \eta_m = 3700 \div 0,76 = 4868 \text{ W} = 4,868 \text{ kW}$$

Het schijnbaar vermogen dat door de secundaire van de transformator moet worden afgeleverd is :

$$S_2 = P_{tm} \div \cos \varphi_m = 4868 \div 0,70 = 6955 \text{ VA} = 6,955 \text{ kVA}$$

De secundaire stroomsterkte is :

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

De primaire stroomsterkte is :

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

Het schijnbaar vermogen dat de transformator effectief moet transformeren is :

$$S_{autotr.} = (U_2 - U_1) \cdot I_1 = (500 - 220) \cdot 13,91 = 3895 \text{ VA} = 3,895 \text{ kVA}$$

3. Een stroommeettrafo heeft een primair stroommeetbereik van 500 A als een geleider twee maal wordt doorgevoerd. De nominale secundaire stroomsterkte is 5 A.
Bepaal het aantal windingen van de secundaire.
Hoe groot zijn de aantallen windingen van de primaire wikkelingen om als primaire stromen te verkrijgen : 20 A, 50 A, 100 A en 200 A ?

OPLOSSING

Het aantal ampere windingen is $500 \times 2 = 1000$

Het secundair aantal windingen voor een nominale secundaire stroom van 5 A is : $1000 \div 5 = 200$.

De aantallen windingen voor de primaire zijn respectievelijk :

$$1000 \div 20 = 50 ; 1000 \div 50 = 20 ; 1000 \div 100 = 10 ; 1000 \div 200 = 5.$$

13.7. HERHALINGSVRAGEN

1. Teken het schema van een autotransformator. Welke zijn de voordelen ervan ? Leg dit uit.
2. Voor welke toepassingen mag de spaartransformator niet worden gebruikt ?
3. Vermeld drie belangrijke toepassingen van de autotransformator.
4. Hoe kan een regelbare autotransformator geconstrueerd zijn ?
5. Wat is een lastransformator ? Op welke verschillende manieren verkrijgt men de dalende uitwendige karakteristiek bij een lasinrichting met las-transformator ?
6. Hoe is een lasgelijkrichter opgebouwd ? Vermeld de hoofddelen ervan en hun functie.

7. Wat zijn meettransformatoren ? Welke twee soorten meettrafo's onderscheiden we ?
8. Wat is een spanningsmeettransfo ? Welke eisen worden eraan gesteld ? Waartoe wordt deze trafo aangewend ? Hoe worden de aansluitingen op de secundaire uitgevoerd ?
9. Wat is een stroommeettransformator ? Welke eisen worden eraan gesteld ? Waartoe worden stroomtrafo's gebruikt ? Hoe worden de aansluitingen op de secundaire uitgevoerd ?
10. Mag de secundaire van een stroommeettrafo open worden gelaten als de primaire stroom voert ? Verklaar uw antwoord.
11. Teken het schakelschema van een kleine meervoudige stroommeettrafo, met als primaire stroommeetbereiken 15 - 50 - 100 - 150 - 200 - 300 - 400 - 600 - 800 A. Leg uit.
12. Wat zijn stroommeet tangen ? Welke voordelen bieden ze ? Waartoe worden ze aangewend ?
13. Wat is een driefasen inductieregelaar ? Hoe is deze geconstrueerd ? Welk verband bestaat er tussen de primaire en secundaire spanningen wat betreft waarde en fase ?
14. Teken het schema van een driefasen spanningsregelaar met driefasen inductieregelaar in spaarschakeling. Leg de werking ervan uit.
15. Hoe is een eenfase inductieregelaar opgebouwd ? Waartoe dient de compensatiewikkeling ?
16. Teken het vectordiagram van de spanningen van een eenfase inductieregelaar en verklaar dit diagram.
17. Teken het schema van een eenfase inductieregelaar in spaarschakeling, gebruikt voor de spanningsregeling in een eenfase net en verklaar de werking ervan.
18. Wat is een veiligheidstransformator ? Welke toepassingen heeft deze transfo ?
19. Welk symbool heeft de dubbele of versterkte isolatie of klasse II-isolatie ?
20. Wat is een voedingstransformator voor een elektronisch apparaat ? Teken het schema van een eenvoudige voedingstrafo.
21. Welke eisen worden gesteld aan speelgoedtransformatoren ?
22. Welke functie heeft een lekveldtransformator als voorschakelapparaat voor gasontladingsverlichtingsbuizen ? Hoe is een lekveldtransformator geconstrueerd ?

13.8. VRAAGSTUKKEN

1. De primaire van een autotransformator wordt aangesloten op een spanning van 380 V. Er vloeit een primaire stroom van 27 A en de secundaire spanning is 220 V.
Bereken : - de secundaire stroom ;
- het schijnbaar vermogen ;
- het schijnbaar vermogen dat de transfo effectief moet transformeren.

$$(I_2 = 46,64 \text{ A} ; S_1 = S_2 = 10,26 \text{ kVA} ; S_{\text{autotr.}} = 4,32 \text{ kVA})$$

2. Een autotransformator met 1980 windingen is aangesloten op een spanning van 600 V. De secundaire spanning wordt afgetakt over 726 windingen. Het rendement van de autotransformator is 96 % als secundair een zuiver ohmse belasting van 110 Ω is aangesloten.
Bereken : - de primaire stroom ;
- de secundaire stroom ;
- het primair schijnbaar vermogen ;

- het secundair schijnbaar vermogen.

$$(I_1 = 1,53 \text{ A} ; I_2 = 2 \text{ A} ; S_1 = \cancel{880} \text{ VA} ; S_2 = \cancel{440} \text{ VA})$$

458,33

3. Een autotransformator heeft een effectief schijnbaar vermogen van 2 kVA. Het primair aantal windingen is 900 en de primaire spanning 450 V. De secundaire spanning is 220 V.

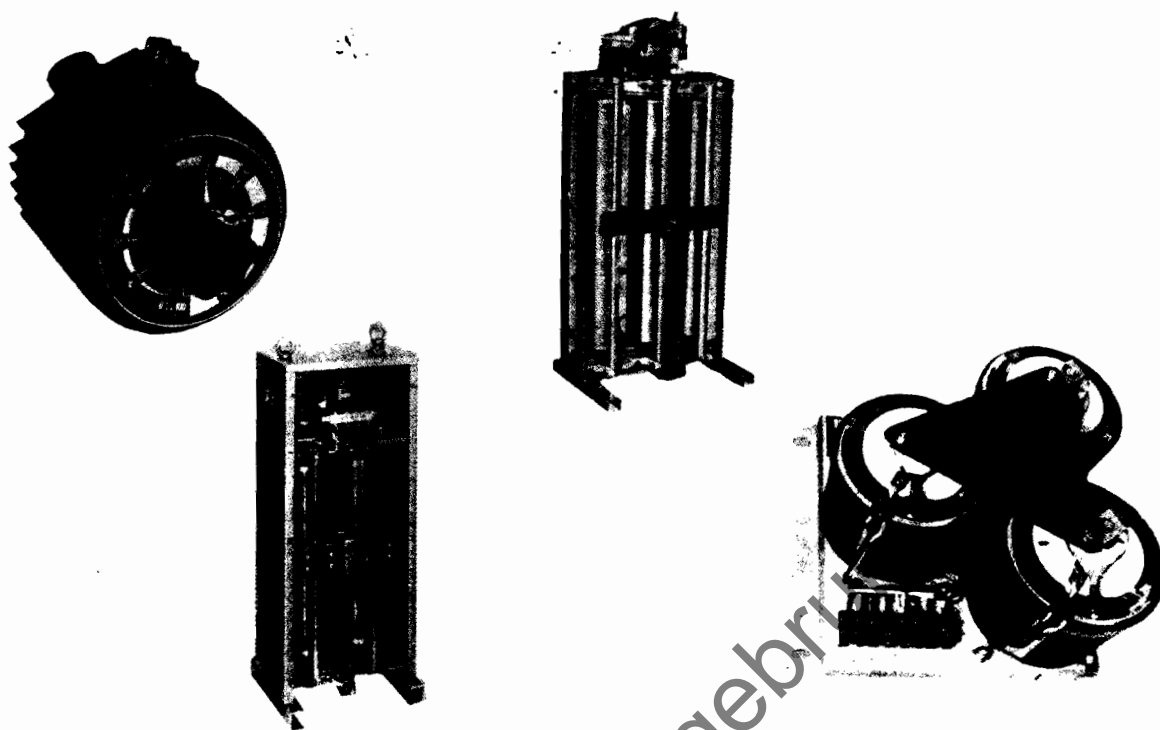
Het rendement van deze transformator is 97 %. Bepaal het aantal windingen van de secundaire.

Bereken ook de primaire stroom, de secundaire stroom, de stroom in het gemeenschappelijk gedeelte van de wikkeling en het totaal schijnbaar vermogen.

$$(N_2 = 440 \text{ windingen} ; I_1 = 8,9646 \text{ A} ; I_2 = 17,7866 \text{ A} ; S_1 = 4,034 \text{ kVA})$$



Afb.13.29. Precisie stroommeettransformatoren voor laboratoria (AEG en BBC).



Afb.13.30. Eenfase en driedfasen rheotoren (SIEMENS).



Afb.13.31. Ontstekingstransformator voor oliestookbrander,
voor 220 V / 10 kV (AEG).