

12

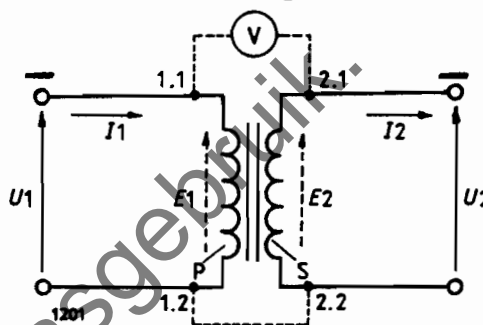
SCHAKELING VAN TRANSFORMATOREN

12.1. POLARITEIT VAN TRANSFORMATOREN

Beschouwen we, volgens afb.12.01, een eenfase transformator, waarvan P de primaire wikkeling en S de secundaire wikkeling is.

Afb.12.01.

Polariteit van een transformator.



Punten 1.1 en 2.1 hebben *dezelfde* polariteit, d.w.z. dat stroom I_1 , die in punt 1.1 vanuit het voedingsnet toekomt, praktisch *in fase* is met stroom I_2 die vanuit punt 2.1 de secundaire verlaat (en omgekeerd).

Verbinden we nu de punten 1.2 en 2.2 met elkaar en schakelen we een V-meter tussen de punten 1.1 en 2.1. Indien we nu een spanning U_1 aansluiten op de primaire wikkeling, zal deze V-meter een spanning $U_1 - U_2$ aanduiden als de polariteiten van de punten 1.1 en 2.1 *werkelijk dezelfde* zijn (bv. *negatief* op een bepaald ogenblik, waarbij *tegelijktijd* de polariteiten van punten 1.2 en 2.2 *beide positief* zijn).

Indien dit *niet het geval* is zal de V-meter een spanning $U_1 + U_2$ aanwijzen.

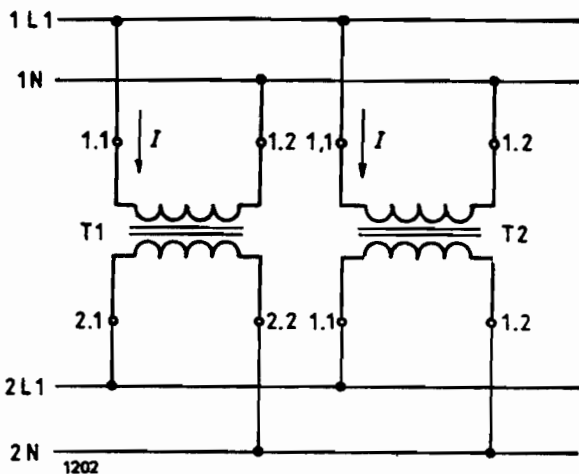
Bij middel van dit *eenvoudig experiment* kunnen we dus controleren welke punten *dezelfde* polariteit hebben.

12.2. PARALLELSCHAKELING VAN EENFASE TRANSFORMATOREN

Bij parallelwerkende transformatoren worden de primaire wikkelingen gevoed door hetzelfde net, terwijl de secundaire wikkelingen onderling in parallel zijn geschakeld en energie leveren aan een gemeenschappelijke belasting (zie afb.12.02).

Twee eenfase transformatoren die in parallel worden geschakeld moeten voldoen aan *drie voorwaarden* :

- de *secundaire spanningen* moeten *in fase* zijn, d.w.z. *dezelfde* polariteit hebben ;
- de *secundaire nullastspanningen* moeten *gelijk* zijn ;
- de transformatoren moeten *dezelfde kortsluitspanningen* hebben, d.w.z. dat de spanningsverliezen in de secundaire wikkelingen gelijk moeten zijn bij evenredige verdeling van de belasting (in evenredigheid met de schijnbare vermogens van de in parallel geschakelde transformatoren).



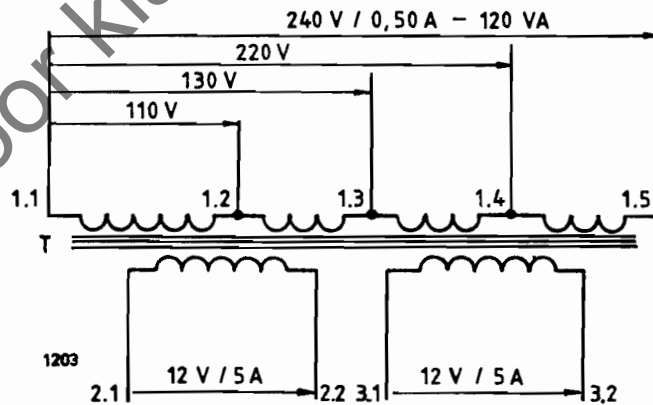
Afb.12.02.

Twee eenfase transformatoren in parallel.

12.3. INTERCONNECTIES IN TRANSFORMATOREN

Voedingstransformatoren van klein vermogen, voor gelijkrichters bv., worden meestal uitgevoerd met meerdere wikkelingen aan de secundaire zijde en met aftakkingen op de primaire wikkeling.

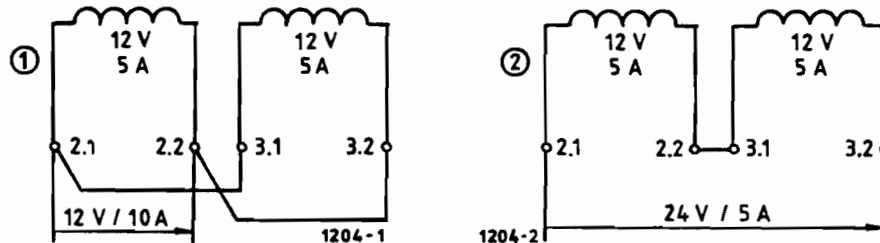
In afb.12.03 is een eenvoudig voorbeeld van dergelijke transformator voorgesteld. Deze transfo kan primair worden aangesloten op vier verschillende netspanningen. Wat de secundaire betreft zijn er drie mogelijke schakelingen. Op de eerste plaats kan men gescheiden beschikken over twee maal 12 V.



Afb.12.03.

Voedingstransformator van klein vermogen

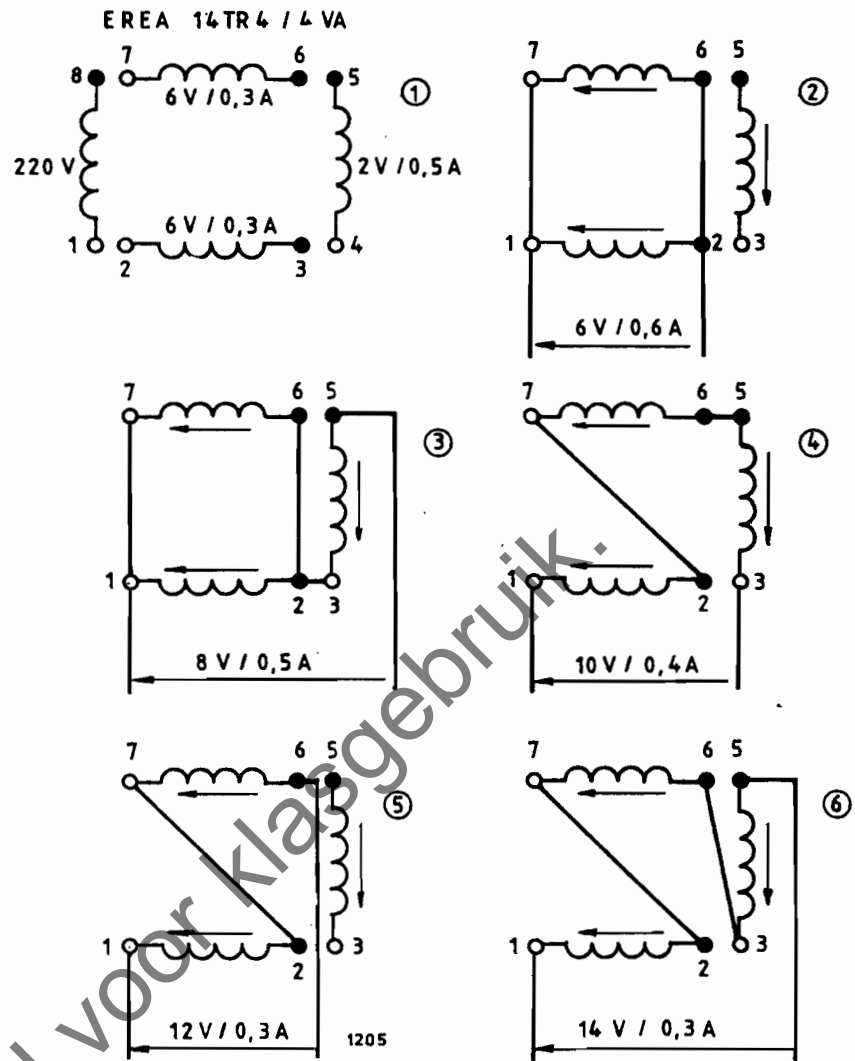
Door de twee secundaire wikkelingen in parallel te schakelen beschikt men over één maal 12 V met een dubbele stroomsterkte van $2 \times 5 \text{ A} = 10 \text{ A}$ (afb. 12.04-1).



Afb.12.04. Parallel- en serieschakeling van de twee secundaire wikkelingen van de transformator uit afb.12.03.

Bij serieschakeling van de twee secundaire wikkelingen verkrijgt men 24 V, met een maximale stroomsterkte van 5 A.

Een ander voorbeeld is voorgesteld in afb.12.05.



Afb.12.05. Voedingstransformator met mogelijkheid de secundaire wikkelingen te schakelen voor spanningen van 6, 8, 10, 12 en 14 V, met respectievelijke stromen van 0,6 A, 0,5 A, 0,4 A, 0,3 A en 0,3 A (EREA).

12.4. SPANNINGSREGELING VAN TRANSFORMATOREN

Tengevolge van belastingsvariaties blijft de spanning van een transformator aan de secundaire zijde *niet constant*, hetgeen in feite *niet toelaatbaar* is.

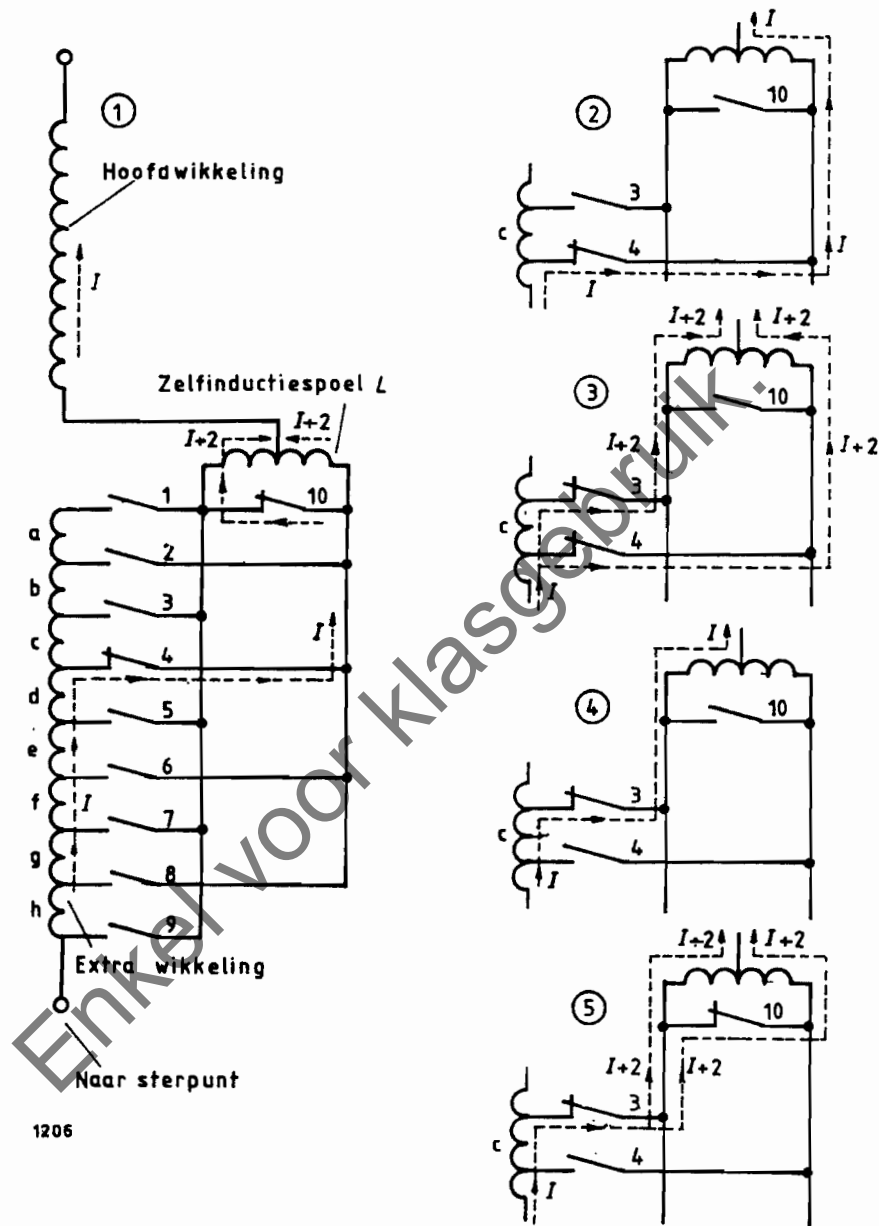
De spanning moet dus voortdurend worden bijgesteld en dit moet geschieden onder belasting, d.w.z. *zonder de transfo af te schakelen*.

Gewoonlijk past men een *trappenregelaar* toe, waarbij telkens een zeker aantal windingen kunnen worden *bijgeschakeld* of *afgeschakeld*.

In afb.12.06 is de prinsieschakeling voorgesteld van een trappenschakelaar met acht trappen. In de getekende situatie, met schakelcontacten 4 en 10 in de gesloten stand, zijn er vijf trappen ingeschakeld van de extra wikkeling. In de zelfinductiespoel vloeien de twee gelijk stromen $I \div 2$ in *tegengestelde zin*, zodat de twee geïnduceerde zelfinductiespanningen elkaar compenseren.

Onderstellen we nu dat moet overgeschakeld worden naar zes ingeschakelde trappen.

Daartoe wordt eerst schakelaar 10 geopend en daarna schakelaar 3 gesloten. Aldus komt trap c parallel te staan over de zelfinductiespoel. De kring is niet onderbroken. Nu wordt schakelaar 4 geopend en daarna schakelaar 10 eveneens geopend. De trap c is aldus bijgeschakeld.

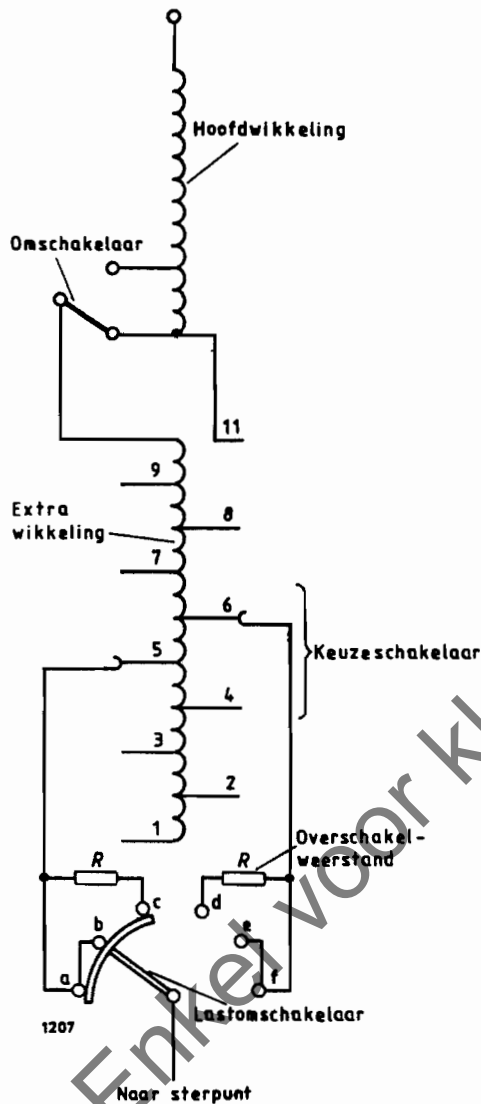


Afb.12.06. Trappenschakeling met acht trappen.

Merken we op dat, nadat schakelaar 10 is geopend, de totale stroom I door de rechter helft van de zelfinductiespoel vloeit. Met schakelaars 3 en 4 gesloten vloeien weer stromen $I \div 2$ door beide helften. Als 3 alleen gesloten is, vloeit stroom I door de linker helft. Bij sluiten van schakelaar 10 vloeien weer stromen $I \div 2$ door beide helften van de zelfinductiespoel.

In afb.12.07 is een trappenschakeling getekend voor negen trappen, uitgerust met een keuzeschakelaar, een omschakelaar en een lastomschakelaar. In de getekende situatie zijn alle windingen boven punt 5 ingeschakeld. Onderstellen we nu dat windingen moeten worden bijgeschakeld tot in punt 4.

Daartoe mag het rechtse contact van de keuzeschakelaar eenvoudig van punt 6 naar punt 4 worden overgeschakeld.



Afb. 12.07. Trappenschakeling voor negen trappen (AEG-TELEFUNKEN).

Afb. 12.08. Trappenschakelaar 110 kV - 400 A (TRAFO UNION).

Daarna wordt de lastomschakelaar in de uiterst rechtse positie gebracht. Tijdens deze overschakeling zullen kortstondig contactpunten b, c en d met elkaar verbonden zijn. Hierdoor komt het gedeelte 4-5 van de extra wikkeling over de twee in serie geschakelde weerstanden R te staan, hetgeen zonder gevaar is toegelaten.

12.5. DRIEFASEN TRANSFORMATOREN

12.5.1. SCHAKELGROEPEN

De windingen van *driefasen transformatoren* kunnen in *ster* of in *driehoek* worden geschakeld. Wat de *secundaire winding* van *nettransformatoren* of *distributietransformatoren* betreft wordt gewoonlijk de *zig-zag-schakeling* toegepast. Dit is in feite een variante van de *sterschakeling*.

De schakelingen van de *primaire wikkelingen* en van de *secundaire wikkelingen* moeten niet dezelfde zijn, maar wel moet erop worden gelet dat de *secundaire spanningen*, van transformatoren die onderling *in parallel* moeten werken, *in fase* zijn.

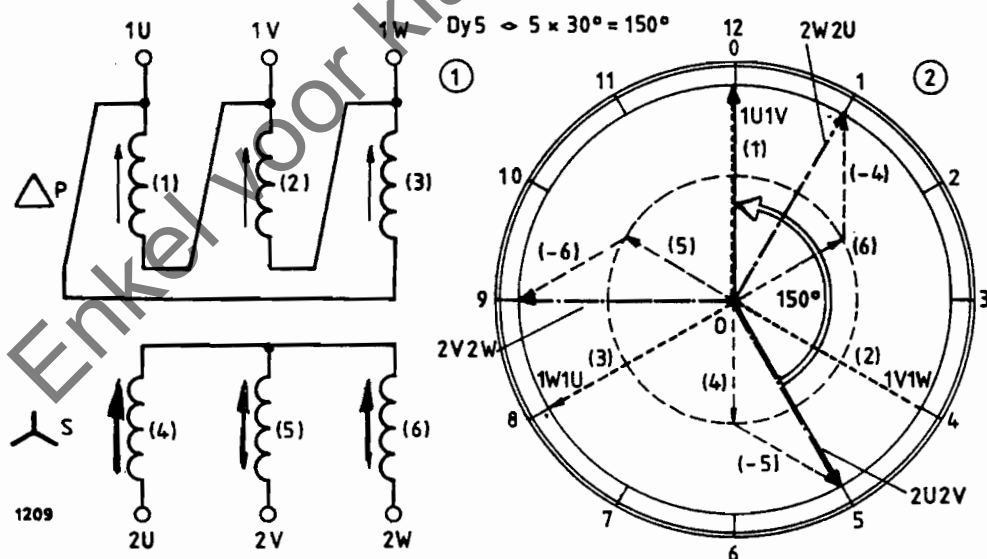
De diverse schakelingen die in de elektrische energietechniek worden toegepast zijn verdeeld in vier *schakelgroepen*.

Alleen transformatoren die tot *eenzelfde schakelgroep* behoren mogen onderling *in parallel* worden geschakeld, omdat alleen bij deze trafo's de *secundaire spanningen* onderling *in fase* zijn.

Een *schakelgroep* kenmerkt de *schakelingen* van *primaire en secundaire wikkelingen* en de *faseverschuiving* tussen *primaire en secundaire lijnspanningen*.

De *faseverschuiving* wordt aangeduid door een *kengetal*. Dit is het zgn. *klokcijfer* dat met 30 vermenigvuldigd de *faseverschuivingshoek* in graden weergeeft tussen de lijnspanningen van *primaire en secundaire*.

Om dit klokcijfer af te leiden tekenen we de *spanningsvector* van de eerste lijnspanning van de *primaire* in de richting 12 h van de lange wijzer van een uurwerk. De *spanningsvector* van de eerste lijnspanning van de *secundaire* tekenen we op de plaats van de korte wijzer. Als bv. deze vector in stand 5 h komt, is het klokcijfer voor deze transformator 5 en de *faseverschuiving* tussen overeenkomstige lijnspanningen van *primaire en secundaire* is dan $5 \times 30 = 150^\circ$ el.



Afb. 12.09. Bepalen van het klokcijfer van een Dy5-schakeling :
1 - schakelschema ; 2 - vectordiagrammen van primaire en secundaire spanningen.

In afb. 12.09 is het schakelschema getekend van een driefasen transformator in driehoek-ster-schakeling, samen met de vectordiagrammen van de primaire en secundaire spanningen (in een zgn. klok-diagram).

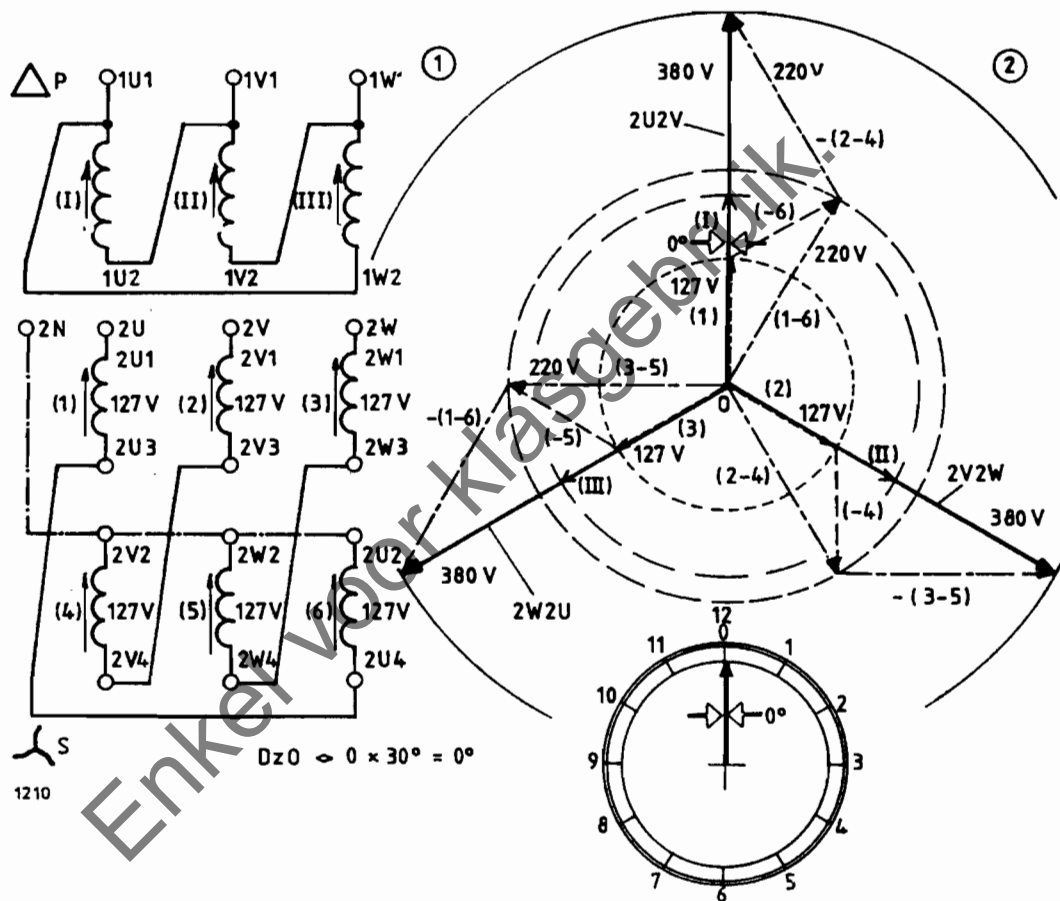
12.5.2. ZIGZAG-WIKKELING

De *belasting* van *distributietransformatoren* is veelal samengesteld uit *eenfase verbruikers*. Als de *secundaire wikkeling* een *sterschakeling* is

van 220/380 V betekent dit dat de fasen afzonderlijk heel dikwijls sterk uiteenlopend zijn belast.

Teneinde een meer *gelijkmatige belasting* te verkrijgen is een andere wijze van schakelen van de secundaire wikkelingen ontwikkeld, nl. de *zigzag-schakeling*.

In afb.12.10 is een *mogelijke zigzag-schakeling* voorgesteld. Iedere fase-wikkeling is opgebouwd uit twee identieke wikkelingen, die op twee verschillende kernen van de ferromagnetische kring zijn gewikkeld.



Afb.12.10. Distributietransformator met primaire in driehoek en secundaire in zigzag (Dz0-schakeling).

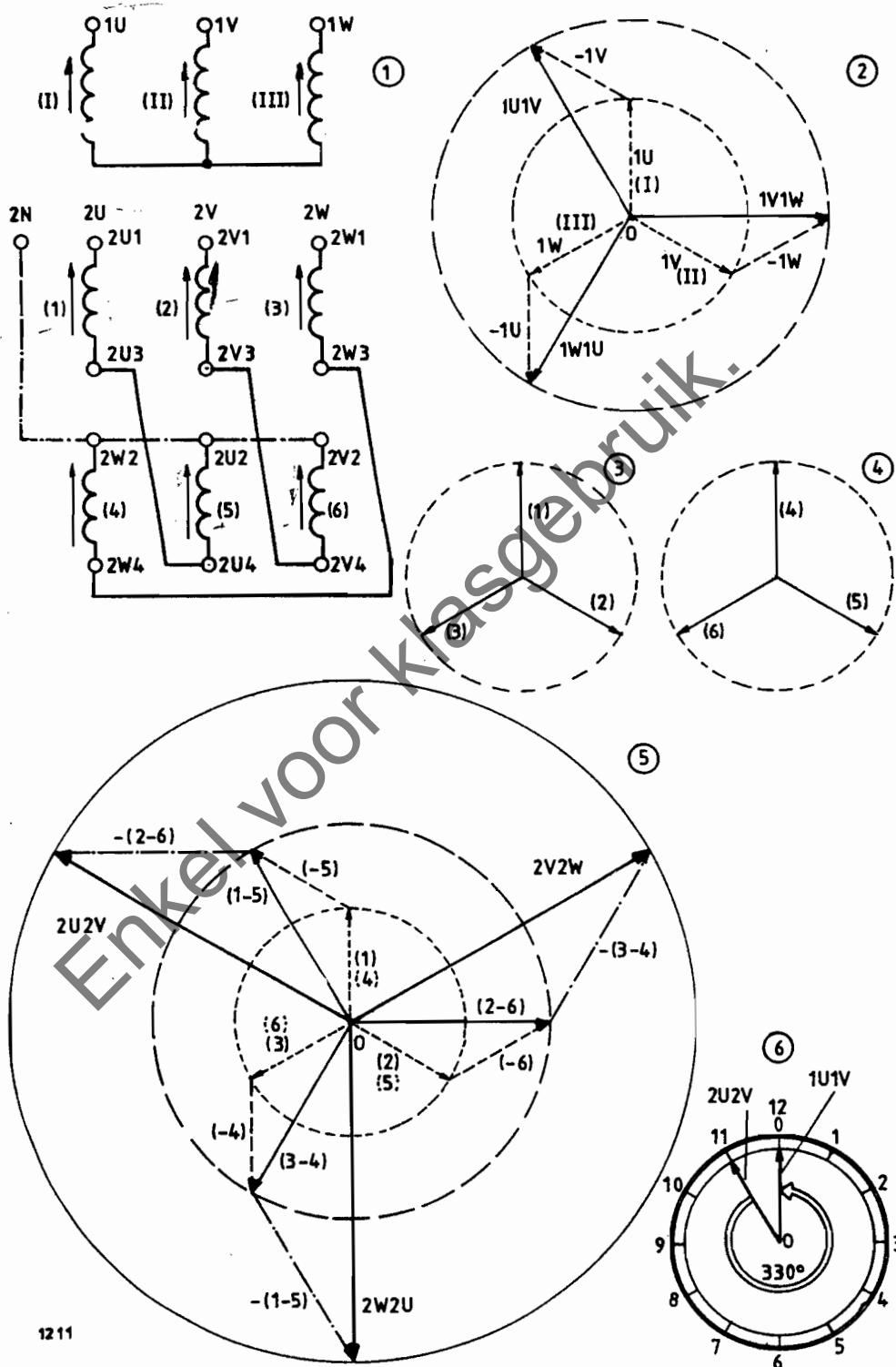
Onderstellen we bv. dat de spanningen per deelwikkeling 127 V zijn. Deze spanningen zullen we eenvoudig voorstellen door (1)(6). De vector-diagrammen van de diverse spanningen zijn in afb.12.10-2 voorgesteld. We stellen dus vast dat de secundaire fasespanningen 220 V en de secundaire lijnspanningen 380 V zijn.

Bij belasting van de fase 2N2U wordt deze verdeeld over de wikkelingen (1) en (6) op de kernen I en III. Een belasting aangesloten op de lijnspanning 2U2V wordt verdeeld over de wikkelingen (1), (2), (4) en (6) en dus over de kernen I, II en III.

De hier voorgestelde transformator is uitgevoerd volgens de Dz0-schakeling.

In afb.12.11 is het schema getekend van een distributietransformator met

primaire in ster-schakeling en secundaire in zigzag-schakeling. Ook zijn hier de vectordiagrammen getekend en het klokdiagram. Het betreft een transformator volgens de schakeling Yz11.



Afb.12.11. Bepalen van het klokcijfer van een transformator volgens de Yz11-schakeling : 1 - schakelschema ; 2 , 3, 4 en 5 - vectordiagrammen ; 6 - klokdiagram.

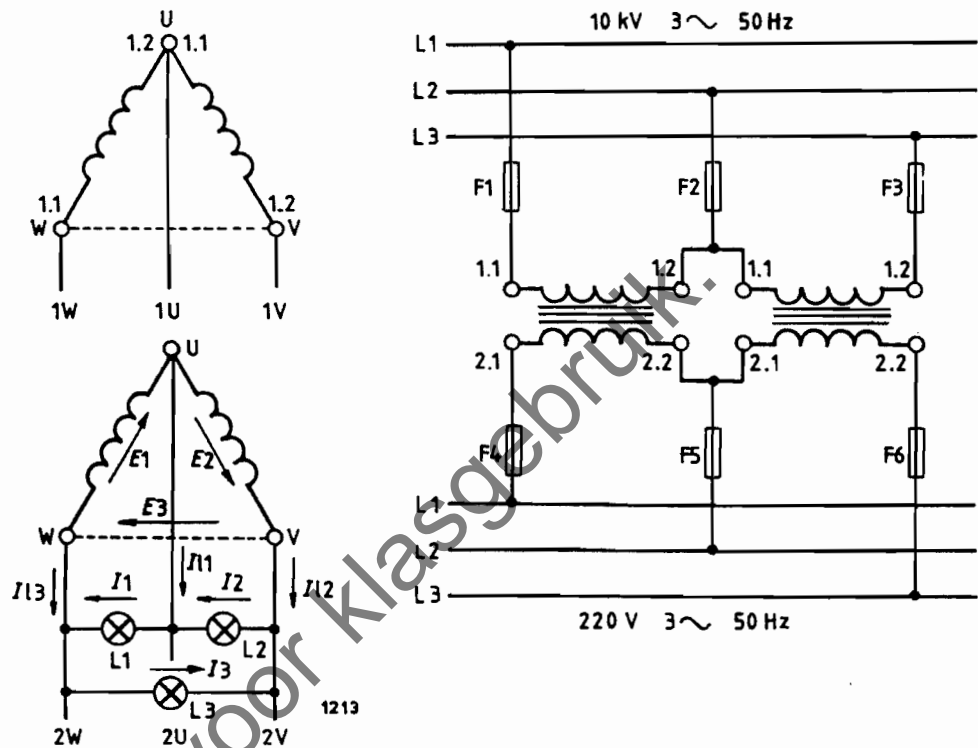
KLOK- GETAL	SCHAKEL- GROEP	SCHEMATISCHE VOORSTELLING		SCHAKELING		TRANSFORMATIE- VERHOUDING $k = U_{HS} \div U_{LS}$
		HS	LS	HS	LS	
0	Dd0					$(N1 \div N2) = k$
	Yy0					$(N1 \div N1) = k$
	Dz0					$(2N1 \div 3N2) = (2 \div 3) \cdot k$
5	Dy5					$(N1 \div \sqrt{3} N2) = (1 \div \sqrt{3}) \cdot k$
	Yd5					$(\sqrt{3} N1 \div N2) = \sqrt{3} \cdot k$
	Yz5					$(2N1 \div \sqrt{3} N2) = (1 \div \sqrt{3}) \cdot k$
6	Dd6					$(N1 \div N2) = k$
	Yy6					$(N1 \div N2) = k$
	Dz6					$(2N1 \div 3N2) = (2 \div 3) \cdot k$
11	Dy11					$(N1 \div \sqrt{3} N2) = (1 \div \sqrt{3}) \cdot k$
	Yd11					$(\sqrt{3} N1 \div N2) = \sqrt{3} \cdot k$
	Yz11					$(2N1 \div \sqrt{3} N2) = (2 \div \sqrt{3}) \cdot k$

Afb.12.12. Schakelgroepen van driefasen transformatoren.

12.5.3. V-SCHAKELING

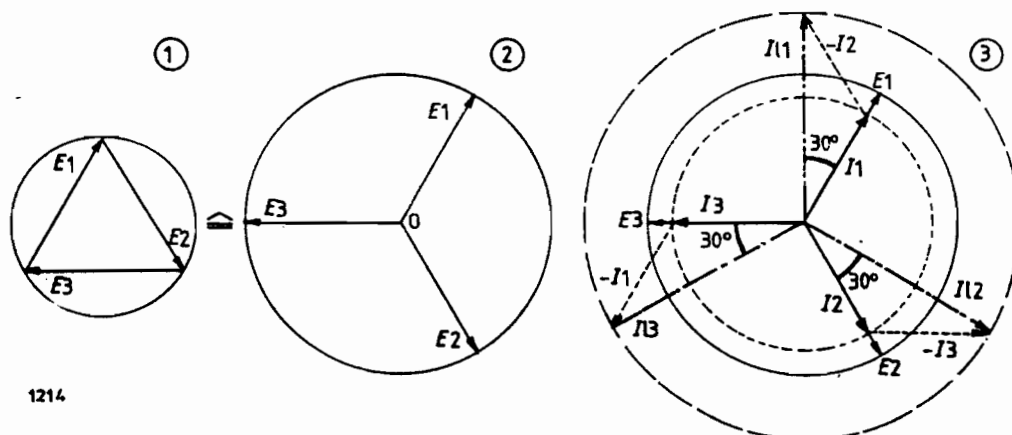
Onderstellen we dat één fasewikkeling wordt verwijderd, zowel van de primaire als van de secundaire van een driefasen transformator in driehoek-driehoek-schakeling.

Er ontstaat dan een zgn. open-driehoek- of V-schakeling van twee éénfase transformatoren (zie afb.12.13).



Afb.12.13. De V-schakeling van twee éénfase transformatoren vormt een driefasen systeem.

De lijnstroom is hier gelijk aan de fase­stroom en dus $\sqrt{3}$ maal kleiner dan voor de originele transformator in driehoek, terwijl een fase­verschuiving van 30° el bestaat tussen de lijnstromen en de fase­spanningen bij ohmse belasting. Dit is voorgesteld in afb.12.14. Tussen lijn­spanning E_1 en lijn­stroom I_{11} bestaat een fase­verschuiving van 30° el.



Afb.12.14. Vectordiagrammen van secundaire spanningen en stromen bij ohmse belasting van een driefasen transformator in V-schakeling.

Als de belasting *ohms* is, dus een arbeidsfactor van één heeft, zal de transformator zelf toch werken met een $\cos \varphi = 0,866$.

De verhouding van het actief vollastvermogen van een transformator in open-driehoek-schakeling tot het actief vollast-vermogen van de overeenkomende transformator in driehoekschakeling, bij ohmse belasting is dus :

$$(2 \div 3) \cdot 0,866 = 0,5780 = 57,80 \%$$

De V-schakeling van vermogentransformatoren wordt soms wel toegepast voor de voeding van HS-lijnen, vooral daar waar een sterke toename van het verbruik te verwachten is in de toekomst. Er worden aanvankelijk slechts twee eenfase transformatoren in V-schakeling of in open-driehoekschakeling opgesteld. Het vermogen hiervan wordt zo gekozen dat kan worden voldaan aan het gevraagde vermogen tijdens de eerst volgende jaren. Daarna schakelt men een derde transformator bij als het gevraagde vermogen groter is geworden dan het vermogen dat de transformatoren in V-schakeling kunnen leveren. Aldus ontstaat een gewone driehoekschakeling, met een vermogentoeename van 42,20 %.

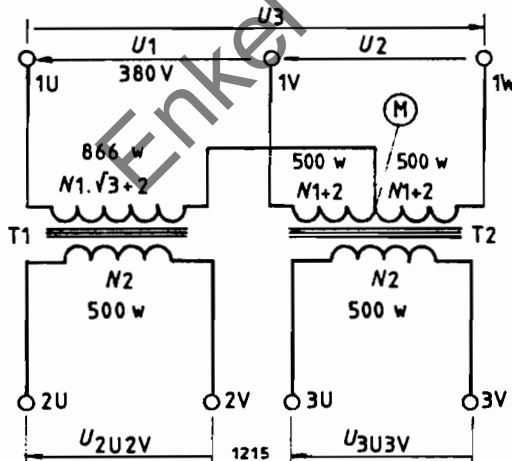
Ook wordt deze schakeling veel gebruikt bij *spanningsmeettransformatoren*, *beveiligingsrelais* en *rheotoren* of *regelbare autotransformatoren*.

12.5.4. SCOTT-SCHAKELING

Een transformator in *Scott-schakeling* is in feite opgebouwd uit twee éénfase transformatoren waarmee een driefasen spanning kan worden omgevormd in een tweefasen spanning.

Het is dus een *fase-transformator*: drie spanningen onder 120° el worden omgevormd in twee spanningen onder 90° el.

In afb.12.15 is de schakeling van een Scott-transformator voorgesteld, met aanduiding van het aantal windingen van een voorbeeld-transfo.



Afb.12.15.
Scott-transformator.

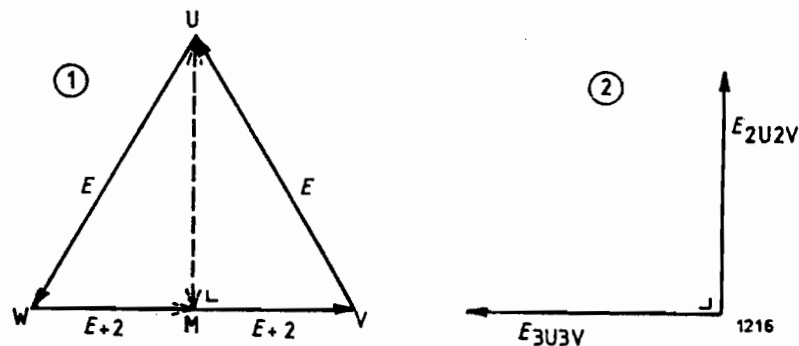
Het vectordiagram van de diverse spanningen is in afb.12.16 getekend. De primaire van transfo T1 is aangesloten op een spanning :

$$U_M = \sqrt{E^2 - \left(\frac{E}{2}\right)^2} = \frac{\sqrt{3}}{2} E$$

De primaire van transfo T2 wordt gevoed met een spanning E .

Als het aantal windingen van de secundaire wikkelingen N_2 is en het aantal

windingen van de primaire van de tweede transformator N_1 , zal dus het aantal windingen van de primaire van de eerste transformator moeten zijn : $(\sqrt{3} \div 2) \cdot N_1$.



Afb.12.16. Vectordiagram van primaire en secundaire spanningen van een Scott-transformator.

De Scott-transformator wordt toegepast voor de voeding van tweefasen inductiemotoren met omschakelbaar aantal polen. Bij tweefasen motoren is inderdaad het aantal om te schakelen wikkelluiteinden kleiner dan bij driefasen motoren.

12.6. HERHALINGSVRAGEN

1. Hoe kan worden gecontroleerd welke klemmen van een transformator dezelfde polariteit hebben? Leg dit uit op basis van een schema.
2. Aan welke voorwaarden moeten eenfase transformatoren voldoen opdat ze in parallel zouden geschakeld kunnen worden?
3. Waartoe dienen interconnecties in transformatoren? Bespreek een concreet voorbeeld met schema.
4. Hoe geschiedt de spanningsregeling in een vermogentransformator met trappenschakelaar? Teken het schema en verklaar de werking.
5. Welke drie basisschakelingen zijn er voor driefasen vermogentransformatoren? Teken deze en leg uit.
6. Wat is de betekenis van het klokcijfer van een driefasen transformator? Leg dit uit op basis van een concreet voorbeeld.
7. Kunnen driefasen transformatoren, die tot verschillende schakelgroepen behoren, onderling in parallel geschakeld worden? Verklaar uw antwoord.
8. Wat is een zigzag-schakeling? Teken het schema ervan en ook het vectordiagram van de spanningen.
9. Teken het schema van de V-schakeling van twee eenfase transformatoren en teken het vectordiagram van de spanningen. Hoe wordt deze schakeling nog genoemd?
10. Wat weet u in verband met de lijnstroom en de faseverschuiving tussen lijnstroom en lijnspanning voor een driefasen transformator in V-schakeling? Welke verhouding bestaat er tussen de actieve vermogens bij vollast van een driefasen transformator in V-schakeling en een overeenkomstige klassieke driefasen transformator?
11. Teken het schema en het vectordiagram van de spanningen van een fase-transformator in Scott-schakeling. Waartoe wordt dit type transformator aangewend?

12.7. VRAAGSTUKKEN

1. Een driefasen transformator in ster-ster-schakeling, met een schijnbaar vermogen van 60 kVA heeft een transformatieverhouding van 10 kV/380 V.

De inwendige weerstand per primaire fasewikkeling is $1,50 \Omega$ en deze van iedere secundaire fasewikkeling is $0,02 \Omega$. De globale ijzerverliezen bedragen 900 W.

- Bereken :
- het rendement als $P_2 = 60 \text{ kW}$ bij $\cos \varphi_2 = 1$;
 - het rendement als $P_2 = 6 \text{ kW}$ bij $\cos \varphi_2 = 1$;
 - het rendement als $S_2 = 60 \text{ kVA}$ bij $\cos \varphi_2 = 0,80$;
 - het gemiddeld rendement als $S_2 = 60 \text{ kVA}$ bij $\cos \varphi_2 = 0,80$ indien deze belasting 5 uren per dag is ingeschakeld, terwijl de transformator zelf 24 uren op 24 uren blijft aangesloten.

(eerste geval : $\eta = 97,80 \%$; tweede geval : $\eta = 87 \%$; derde geval : $\eta = 97 \%$; vierde geval : $\eta_{\text{gem}} = 90,80 \%$).

2. Een driehoek-zigzag-transformator moet voorzien zijn voor een primaire spanning van $3 \times 20 \text{ kV}$ en een secundaire spanning van $3 \times 380 \text{ V}$. Primair is het aantal windingen per fasewikkeling 3200. Bepaal het aantal windingen per secundaire deelwikkeling of spoel. ($N_2' = 21$).
3. Een driefasen motor met een nuttig vermogen van $18,50 \text{ kW}$ wordt gevoed door een driefasen transformator van $10 \text{ kV} / 380 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$ die in driehoek-ster is geschakeld. De motor werkt bij een arbeidsfactor van $0,85$ en met een rendement van 88% . Het rendement van de transformator is $98,30 \%$. Bereken de primaire lijnstroom en de secundaire lijnstroom van deze transfo. ($I_p = 1,45 \text{ A}$; $I_s = 37,58 \text{ A}$).
4. Een onderneming verbruikt 100 kVA driefasen schijnbaar elektrisch vermogen voor verwarming en 250 kVA voor de voeding van driefasen inductiemotoren met een gemiddelde arbeidsfactor van $0,80$. De voeding geschiedt vanuit een driefasen transformator van $6,6 \text{ kV} / 380 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$, waarvan het rendement op 100% wordt ondersteld. Bereken de fasestromen aan de primaire en secundaire zijden van de trafo als deze achtereenvolgens geschakeld zou zijn :
 - (1) - in ster-driehoek ;
 - (2) - in driehoek-ster ;
 - (3) - in open-driehoek.
 (eerste geval : $I_p = 29,34 \text{ A}$; $I_s = 294,22 \text{ A}$;
 tweede geval : $I_p = 16,94 \text{ A}$; $I_s = 509,60 \text{ A}$;
 derde geval : $I_p = 29,34 \text{ A}$; $I_s = 509,60 \text{ A}$).
5. Een driefasen transformator van 30 kVA is in ster-ster geschakeld. De primaire lijnspanning is 6000 V of 6 kV en de wikkelverhouding is $10 \div 1$. Bepaal het aantal windingen per secundaire spoel, de primaire en secundaire vollaststromen en de secundaire lijnspanning. Het aantal windingen van één secundaire spoel is 1200. ($N_1 = 120$ windingen ; $I_1 = 2,89 \text{ A}$; $I_2 = 28,90 \text{ A}$; $E_2 = 600 \text{ V}$).
6. Een driefasen transformator, die in driehoek-ster is geschakeld, levert 50 kVA bij een secundaire lijnspanning van 380 V . De wikkelverhouding is

15 ÷ 1. Bepaal het aantal windingen van één primaire spoel, de primaire en secundaire vollaststromen en de primaire lijnspanning.
Het aantal windingen per secundaire spoel is 57.

($N_1 = 855$ windingen ; $I_1 = 8,75$ A ; $I_2 = 75,97$ A ; $E_1 = 3$ kV).

7. Een driehoek-zigzag-transformator heeft een wikkelverhouding van 16 ÷ 1 van één primaire spoel t.o.v. één secundaire spoel. De secundaire lijnstrom is 180 A.

Bepaal : - het totaal schijnbaar vermogen ;

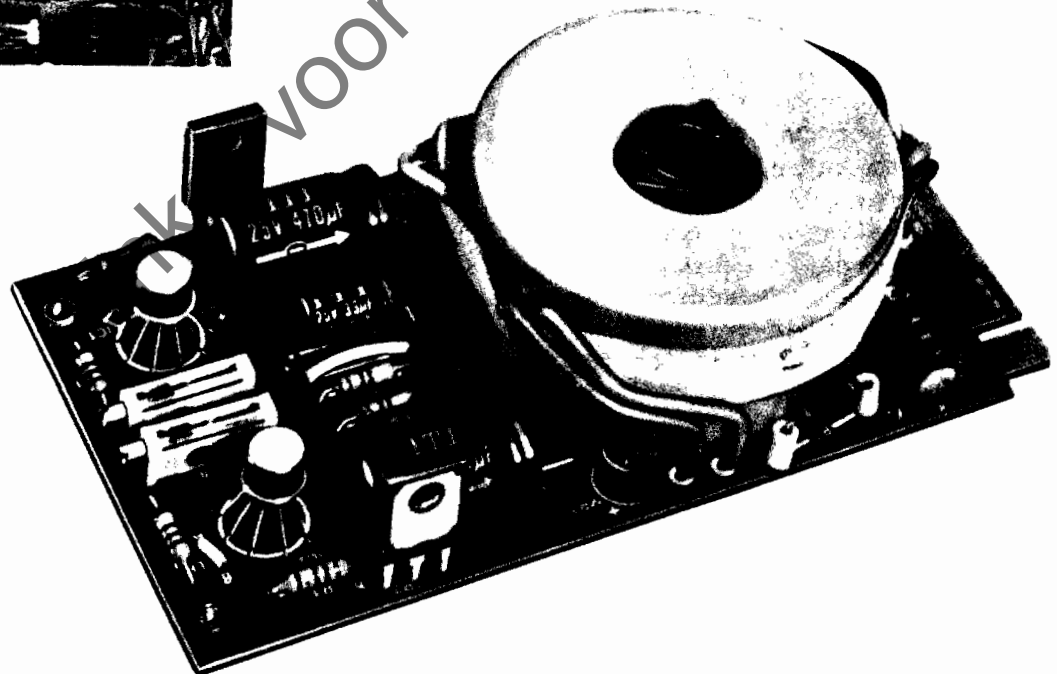
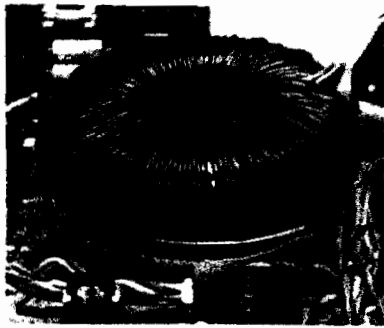
- het aantal windingen per primaire spoel, als het aantal windingen van één secundaire spoel 16 is ;

- de primaire lijnstrom ;

- de primaire fasestroom ;

- de primaire lijnspanning.

($S = 118,472$ kVA ; $N_1 = 256$ windingen ; $I_1 = 33,66$ A ; $I_{1f} = 19,43$ A ; $E_1 = 2032$ V).



Afb.12.17. Ringkerntransformator en voedingsapparaat met ringkerntransformator voor 12 tot 15 V DC - 500 mA (ITT).