

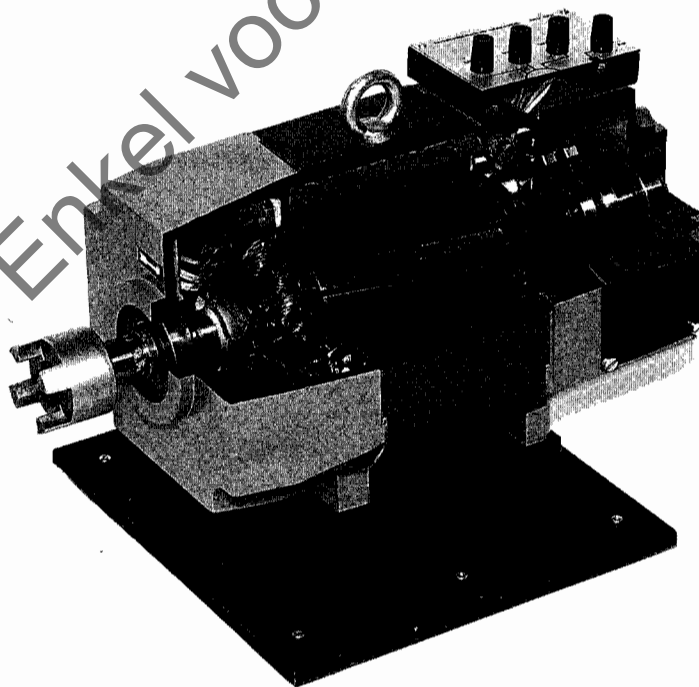
Synchrone wisselstroomgeneratoren (alternatoren)

Wegwijzer

De eerste leereenheid over de wisselstroommachines begint met de meest fundamentele machine nl. de *wisselstroomgenerator*, ook *synchrone generator* of *alternator* genoemd. Deze machine vinden we overal waar een grote hoeveelheid energie in een of andere vorm ter beschikking wordt gesteld (stromend water, getijdencentrale, brandstoffen zoals kolen en stookolie, kernenergie enz.) die dan in elektrische energie wordt omgezet. Elektrische energie heeft als groot voordeel dat de distributie ervan op een eenvoudige manier en met zeer weinig energieverlies kan gebeuren.

Het principe van de generatorwerking werd al in deel 3 A, par. 1.2 behandeld. Een raam, draaiend in een uniform magnetisch veld, genereert een sinusvormige wisselspanning. In tegenstelling tot de gelijkstroomgenerator is hier geen commutator of collector aanwezig. Daardoor is de constructie erg vereenvoudigd.

De wisselstroomgenerator, aangedreven door een motor (turbine, diesel, waterwiel ...) zal elektrische energie in de vorm van sinusvormige grootheden ter beschikking stellen. Naast zijn eenvoudige samenstelling heeft de wisselstroomgenerator het grote voordeel dat de gegenereerde spanning op een eenvoudige manier naar hogere spanningswaarden getransformeerd kan worden. Dit is belangrijk voor het energietransport over grote afstanden.



1.1 Bepaling

Doelstellingen

- Omschrijven wat een wisselstroomgenerator is.
- Andere benamingen voor een wisselstroomgenerator kennen.

Een wisselstroomgenerator is een elektrische machine die mechanische energie omzet in een- of meerfasige wisselstroomenergie.

Toelichting

Soorten wisselstroomgeneratoren

Er bestaan twee soorten wisselstroomgeneratoren:

- synchrone generatoren;
- asynchrone generatoren.

Op de asynchrone generatoren, die hun toepassing vinden in de omvorming van wind-energie, gaan we verder niet in. We behandelen uitsluitend de synchrone generatoren.

Wisselstroomgenerator

Deze benaming lijkt het meest sprekend. Wisselstroom wijst op aanwezigheid van wisselspanning zoals die gedefinieerd werd in deel 2.

Synchrone generator

In deze benaming slaat het woord 'synchroon' op het fenomeen dat er een vast verband is tussen de rotatiefrequentie van de rotor en de frequentie van de gegenereerde spanning.

Alternator

De benaming *alternator* is verouderd. Ze is afgeleid van het Franse woord *alternateur*.

1.2 Principewerking

Doelstellingen

- De principewerking van een wisselstroomgenerator illustreren.
- De uitvoeringsvormen van een wisselstroomgenerator onderscheiden en in verband brengen met hun toepassingsgebied.
- Het begrip *ankerwikkeling* bij een synchrone generator uitleggen.
- Enkele constructievormen van rotoren onderscheiden aan de hand van een figuur.

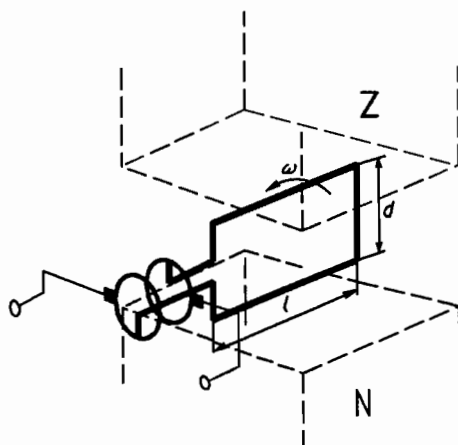


fig. 1a

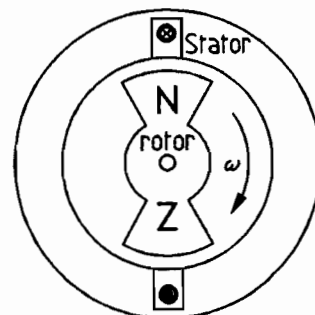


fig. 1b

Uit deel 2, par. 1.2 weten we dat bij de voorgestelde machine (fig. 1a) tussen de borstels, die op de sleepringen wrijven, een sinusvormige wisselspanning ontstaat met waarde:

$$e = E_m \cdot \sin \omega t$$

met ω : cirkelfrequentie in rad/s.

Er wordt een identieke spanning gegenereerd als we de polen rond de stilstaande winding zouden draaien (fig. 1b).

Bij wisselstroomgeneratoren worden in de praktijk beide systemen toegepast.

1 De ankerwikkeling (de wikkeling waarin de spanning gegenereerd wordt) draait tussen stilstaande polen (fig. 2)

Deze machines rangschikt men onder de 'buitenpoolmachines'. Ze worden toegepast bij kleinere vermogens.

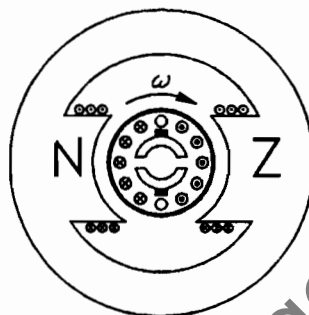


fig. 2

2 De polen draaien binnen een stilstaande statorwikkeling (fig. 3)

De machines die zo zijn uitgevoerd, rangschikt men onder de 'binnenpoolmachines'. Deze uitvoeringsvorm wordt praktisch altijd toegepast bij grotere vermogens. Zoals al eerder vermeld werd in deel 3A, noemen we het draaiende deel de *rotor* en het stilstaande deel de *stator*.

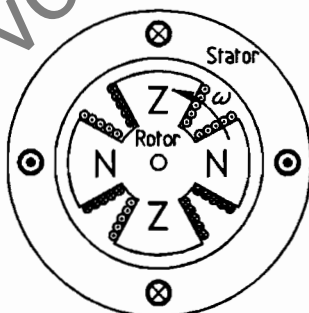


fig. 3

Toelichting

Ankerwikkeling

De ankerwikkeling is altijd de wikkeling waarin de wisselspanning gegenereerd wordt, ongeacht het feit of deze zich op de stator of de rotor bevindt.

Grote vermogens

De ankerwikkeling bevindt zich meestal op de stator omdat daar elk wrijvend contact tussen de ankerwikkeling en de vaste aansluitklemmen wordt vermeden. Dit is belangrijk, gezien de hoge spanning die gegenereerd wordt in de generator (tot ca. 35 kV), de isolatieproblemen bij beweging en de grote stromen die bij grote vermogens voorkomen (tot 1000 MW).

De functie van de rotor is dan: aan de omtrek afwisselend noord- en zuidpolen vormen. Hiervoor gebruikt men gelijkspanning. De waarde van de gelijkspanning is relatief laag (100 à 400 V) en neemt een vermogen van 0,5 à 1 % van het nominale vermogen van de synchrone generator op.

Constructievormen van de rotor bij grote vermogens

Men onderscheidt twee types:

- de rotor gevormd door lichamelijke polen;
- de rotor met een luchtspleet met constante lengte.

Generator met lichamelijke of uitspringende polen (fig. 4a en 4b)

De rotor, die draait om de as, is aan de omtrek voorzien van een aantal uitspringende poollichamen waarop poolwikkelingen zijn geplaatst. Het aantal polen is over het algemeen groot. Dit aantal is afhankelijk van de rotatiefrequentie van de aandrijvende machine. Hoe kleiner de snelheid, des te groter het aantal polen moet zijn om een bepaalde frequentie van de gegenereerde spanning te krijgen.

De diameter van de machine is groot t.o.v. zijn lengte.

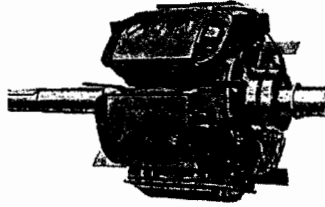


fig. 4a

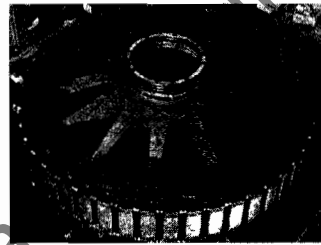


fig. 4b

Generator met constante lengte van de luchtspleet (gladde of cilindrische rotor)

Hierbij bezit de rotor, langs zijn omtrek, een rotorwikkeling. De gelijkstroom die door de wikkeling vloeit, vormt afwisselend noord- en zuidpolen (fig. 5).

Dit systeem wordt toegepast bij sneldraaiende machines, nl. 1000, 1500 en 3000 omwentelingen per minuut. Het aantal polen bedraagt hierbij resp. 6, 4 en 2, dit in de veronderstelling dat de frequentie van de opgewekte spanning 50 Hz bedraagt.

De diameter van de rotor is klein t.o.v. zijn lengte (fig. 6).

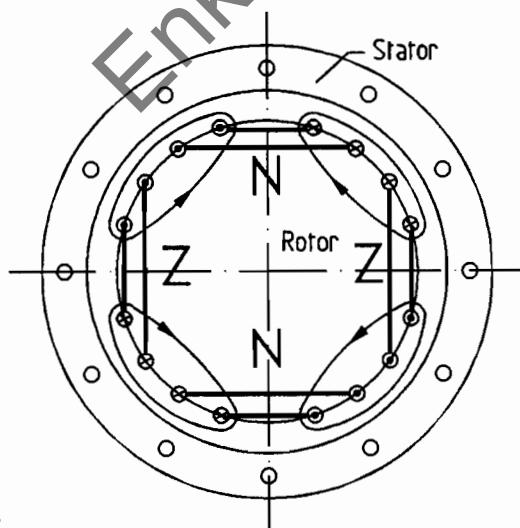


fig. 5

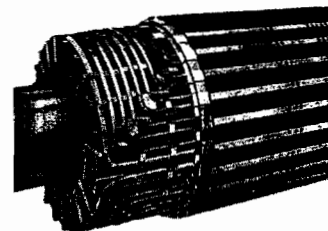


fig. 6

1.3 Ankerwikkelingen

1.3.1 Principeschakeling van een eenfasige wikkeling

Doelstellingen

- De principeschakeling van een twee-, vier- en meerpolige ankerwikkeling van een eenfasige wisselstroomgenerator verklaren.
- De technische ingrepen voor het verkrijgen van een hoger gegenereerde spanning toelichten.

Tweepolige wisselstroomgenerator

De eenvoudigste ankerwikkeling van een tweepolige wisselstroomgenerator bestaat uit één enkele winding die schematisch voorgesteld is in fig. 1. Voor een binnenpoolmachine kunnen we de wisselstroomgenerator voorstellen zoals op de doorsnedetekening van fig. 7.

In fig. 8 is het uitgeslagen wikkelschema voorgesteld.

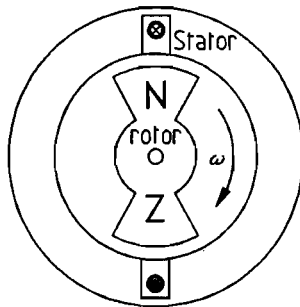


fig. 7

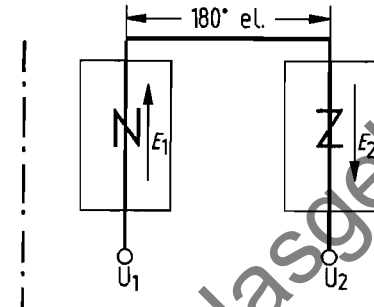


fig. 8

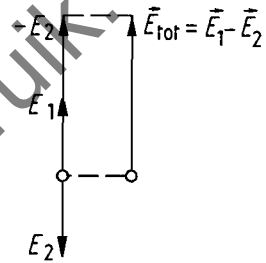


fig. 9

Als we voorlopig van de veronderstelling uitgaan dat de inductie B in de luchtspleet sinusvormig verloopt, dan zal de gegenereerde spanning per geleider ook sinusvormig zijn. De momentele waarden van de gegenereerde spanning in beide geleiders zijn identiek in grootte, maar tegengesteld van zin (fig. 8). Door beide geleiders te verbinden zoals in fig. 1 en 8 worden de twee gegenereerde spanningen samengeteld.

De totale gegenereerde spanning bedraagt:

$$\vec{E}_{\text{tot}} = \vec{E}_1 + (-\vec{E}_2) = \vec{E}_1 - \vec{E}_2 = 2 \vec{E}_1$$

In fig. 9 is het spanningsvectordiagram grafisch weergegeven.

Vierpolige wisselstroomgenerator

Principieel ziet het wikkelschema van een vierpolige, eenfasige wisselstroomgenerator met één geleider per pool eruit zoals weergegeven in fig. 10.

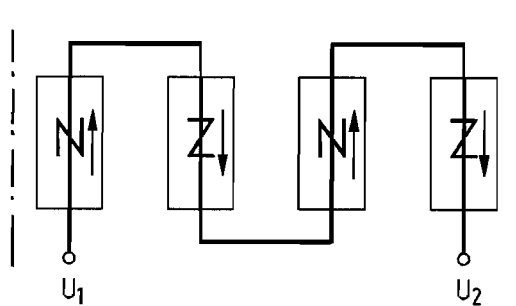


fig. 10

We merken dat alle geleiders zodanig in serie geschakeld zijn dat de gegenereerde spanningen samengeteld worden. Als principe geldt hier wel dat tussen het begin- en het

eindpunt van eenzelfde fasewikkeling enkel actieve geleiders, waarin de gegenereerde spanningen praktisch in fase zijn, onderling in serie geschakeld worden.

Meerpolige wisselstroomgenerator

Op basis van hetzelfde principe van een vierpolige wisselstroomgenerator is het mogelijk een zes-, acht- of meerpolige wisselstroomgenerator te ontwikkelen. Als algemene regel kunnen we stellen dat er per poolpaar één winding voorzien is.

Opdrijven van de gegenereerde spanning

1 Winding vervangen door een wikkeling (spoel)

De windingen uit fig. 8 en 10 genereren maar een kleine spanning. Wil men de gegenereerde spanning opdrijven, dan ligt het voor de hand dat we voor elke pool meer dan één geleider gaan plaatsen. We vervangen bijgevolg de winding uit de vorige paragrafen door spoelen met 'N' windingen, geplaatst in dezelfde gleuven zoals het voorbeeld in fig. 11 weergeeft.

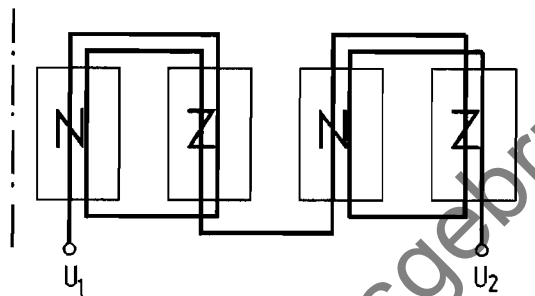


fig. 11

De totaal gegenereerde spanning is dan:

$$E_{\text{tot}} = N \cdot E$$

Met E de gegenereerde spanning per winding.

2 Benutten van het statorijzer

Zoals we merken wordt met één gleuf per pool het statorijzer slecht benut. Willen we de gegenereerde spanning enkel opdrijven door het aantal windingen van de spoel op te drijven dan zullen de gleuven breed en diep moeten worden. Deze ingreep is constructief niet aan te bevelen. Een ander gevolg daarvan is dat de vorm van de spanning meer en meer gaat afwijken van de gewenste sinusvorm.

Om het statorijzer beter te benutten verdelen we elke spoelzijde over verschillende gleuven (meergaatswikkeling). In fig. 12a is als voorbeeld het schema van een vierpolige wisselstroomgenerator getekend. Fig. 12a is vereenvoudigd voorgesteld in fig. 12b.

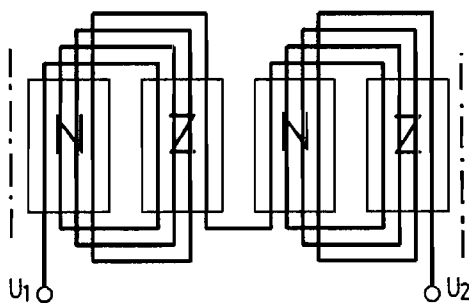


fig. 12a

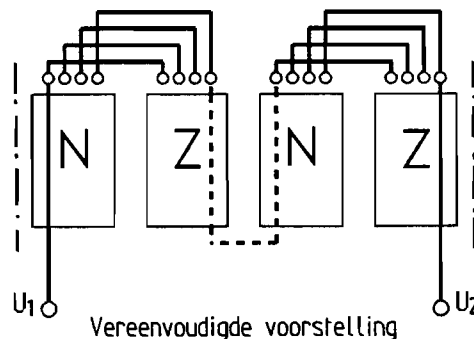


fig. 12b

Buiten het beter benutten van het statorijzer heeft deze schikking nog het voordeel dat de verkregen sinusvorm verbetert.

3 Toelichtingen

Kruisende spoelkoppen

Een nadeel van de schikking uit fig. 12a en 12b is dat de geleiders van de spoelkoppen elkaar kruisen. Wickeltechnisch is dat een nadeel. Om de kruising van de spoelkoppen te voorkomen worden de spoelen geschakeld zoals fig. 13a weergeeft. In fig. 13b is deze wikkeling geschematiseerd weergegeven.

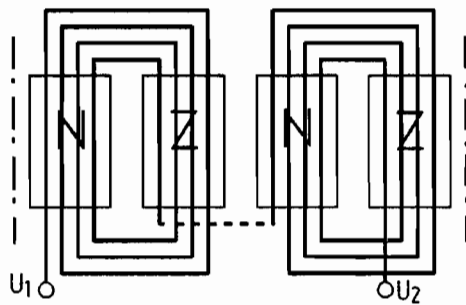


fig. 13a

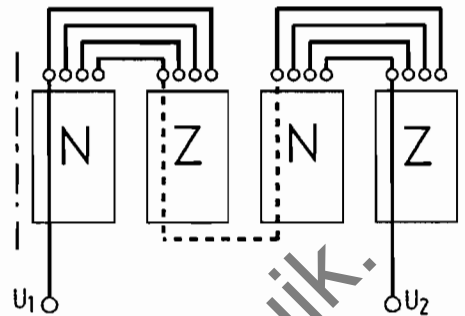


fig. 13b

Elektrotechnisch gezien is er tussen de wikkelijze van fig. 12a en fig. 13a geen verschil. De wikkelspoed van de onderscheiden spoelen van fig. 13a is echter verschillend. De uitvoering van de generatorwikkeling volgens fig. 13a is eenvoudiger.

Verdeling van de spoelkoppen

Om de spoelkoppen gelijkmatig over de hele statoromtrek te verdelen, zijn nog de volgende schikkingen mogelijk.

De spoelzijden voor één pool worden verdeeld over twee spoelen die dan verbonden worden zoals weergegeven in fig. 14.

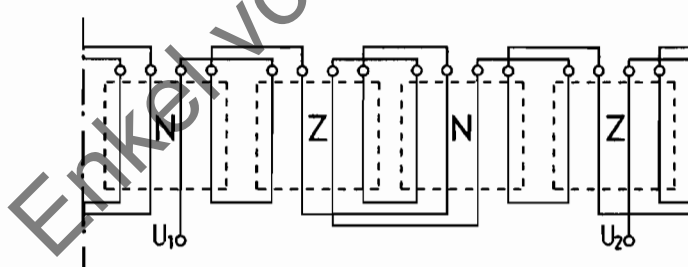


fig. 14

We stellen hier enerzijds vast dat alle wikkelspoeden gelijk zijn, maar anderzijds dat de spoelkoppen elkaar kruisen. Om dit kruisen van de spoelkoppen te vermijden is de uitvoering volgens fig. 15 aangewezen. De wikkelspoeden zijn hier echter niet meer gelijk.

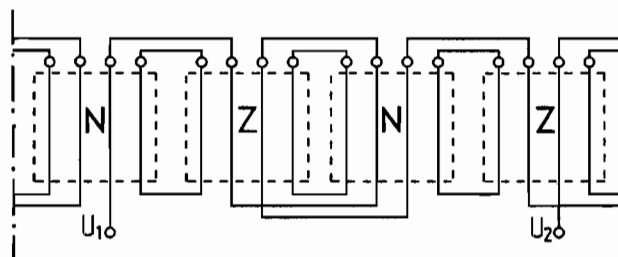


fig. 15

1.3.2 Principeschakeling van een driedfasige wikkeling

Doelstellingen

- Aan de hand van een schema het principe van de driedfasige ankerwikkeling omschrijven.
- Het verband tussen een een- en driedfasige wikkeling aantonen.
- De schakeling van de ankerwikkelingen toelichten.
- De voordelen van een driedfasige synchrone generator t.o.v. een eenfasige synchrone generator verduidelijken.

Principiële voorstelling van een tweepolige wikkeling

De driedfasige wikkeling kan worden beschouwd als een samenstelling van drie eenfasige wikkelingen die op de stator in de ruimte onderling 120° verschoven zijn. Principieel is dit voor een tweepolige generator voorgesteld in fig. 16a en 16b.

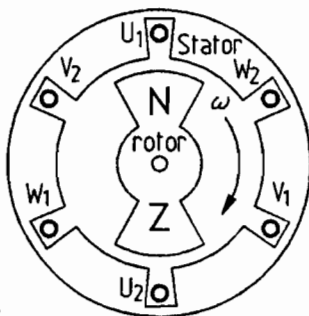


fig. 16a

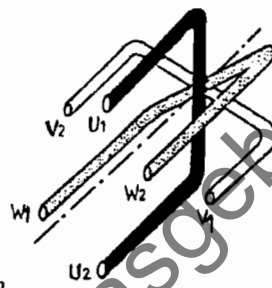


fig. 16b

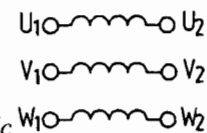


fig. 16c

De ankerwikkeling bevat drie fasewikkelingen die aangegeven worden met de aanduidingen U_1U_2 , V_1V_2 en W_1W_2 (fig. 16c).

De voorgaande wikkelttheorie is hier per fase integraal van toepassing.

Schakeling van de ankerwikkelingen

Zoals in deel 2, leereenheid 9 a) werd toegepast, kunnen de ankerwikkelingen (veelal statorwikkelingen) in ster (fig. 17a) of in driehoek (fig. 17b) geschakeld worden. Meestal wordt de sterschakeling toegepast, omdat o.m. bij ongelijke fasespanningen binnen de ankerwikkelingen geen circulatiestromen kunnen ontstaan.

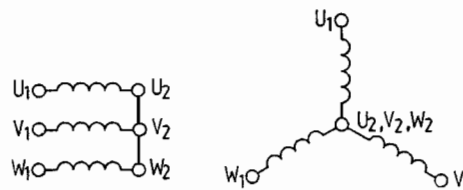


fig. 17a

sterschakeling

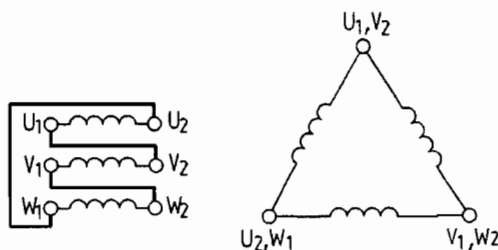


fig. 17b

driehoekschakeling

Voordelen van een driefasige wikkeling

Economisch is de driefasige synchrone generator voordeliger om de volgende redenen:

- Het anker van een driefasige machine kan volledig met geleiders voorzien worden. Bij eenfasige generatoren kan dit niet. Zou men immers de spoel verdelen over 180° el, dan is het duidelijk dat de uiterste geleiders in onbeduidende mate bijdragen tot de productie van de resulterende spanning. Toch worden de kostprijs en het gewicht van de machine erdoor verhoogd.
- Driefasige spanningen lenen zich zeer goed voor het transport van elektrische energie.
- Het omvormen van driefasespanning tot gelijkspanning gebeurt met gevoelige vermindering van de rimpelspanning zonder gebruik van afvlakcondensatoren.

Plaatsen van de spoelen op het anker

Zoals al gezegd, zijn de drie fasewikkelingen 120° el t.o.v. elkaar verschoven.

In fig. 18 is dit geïllustreerd voor een driefasige tweepolige machine $\left(1^\circ \text{ el} = \frac{1^\circ m}{p}\right)$.

Fig. 19 geeft de onderlinge verschuiving voor een vierpolige machine.

$p = 1$
 $120^\circ \text{ el} = 120^\circ \text{ meetkundig}$



fig. 18

$p = 2$
 $120^\circ \text{ el} = 60^\circ \text{ meetkundig}$



fig. 19

Ter illustratie is in fig. 20 een opengeslagen schema van een elementaire (1 gleuf/pool) vierpolige driefasige wikkeling weergegeven. Bij de vierpolige generator zijn de wikkelingen 120° el verschoven. Dit komt overeen met 60 meetkundige graden.

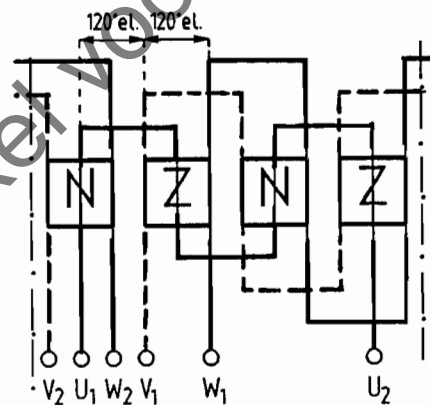


fig. 20

1.4 Het verkrijgen van een sinusvormige wisselspanning

1.4.1 Verbreden van de spoelzijden

Doelstellingen

- De invloed van de spoelverbreding op de verkregen spanningsvorm illustreren.
- De gevolgen van de spoelverbreding t.a.v. de grootte van de gegenereerde spanning, de benutting van het statorijzer en de inductieve reactantie omschrijven.

In wat voorafging, hebben we verondersteld dat de inductie B in de luchtspleet een sinusvormig verloop kende. Het gevolg daarvan was dat de spanningen, gegenereerd in de geleiders, ook een sinusvormig verloop hadden. In werkelijkheid zal de fluxdichtheid (inductie) trapeziumvormig verlopen, met als gevolg dat ook de gegenereerde spanningen in de windingen trapeziumvormig verlopen.

In de schikking van fig. 21 wordt één ankerspoel onderverdeeld in meer deelspoelen die telkens over α el graden verschoven zijn (spoelverbreding).

Per omwenteling worden in de onderscheiden deelspoelen trapeziumvormige spanningen gegenereerd. Die spanningen zijn in serie geschakeld en kunnen opgeteld worden. In fig. 22 is de som van de momentele waarden weergegeven. Tussen de uiteinden van de fasewikkeling U_1U_2 ontstaat aldus een sinusvormige wisselspanning en dit ondanks het trapeziumvormig magnetisch veld.

We merken bovendien op dat de gegenereerde spanningen in de deelspoelen niet meer in fase zijn en niet meer gelijktijdig het maximum bereiken in alle wikkelementen.

Het gevolg hiervan is dat de verkregen totale spanning kleiner is dan wanneer alle elementzijden in één gleuf voor de polen zouden liggen. Als bv. E_m de spanning voorstelt in dit laatste geval, dan krijgen we voor de spanning (bij spoelverbreding, fig. 21):

$$E = f \cdot E_m$$

De coëfficiënt f houdt rekening met de hoek α en het aantal gleuven waarover men de ankerspoel verdeelt.

Het verdelen van een spoel over verscheidene, in serie geschakelde spoelen heeft, buiten de gunstige invloed op de sinusvorm van de spanning, ook nog als voordeel:

- dat het statorijzer beter benut wordt;
- dat de inductieve reactantie van de ankerspoel vermindert.

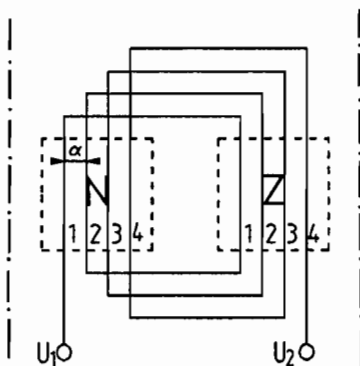


fig. 21

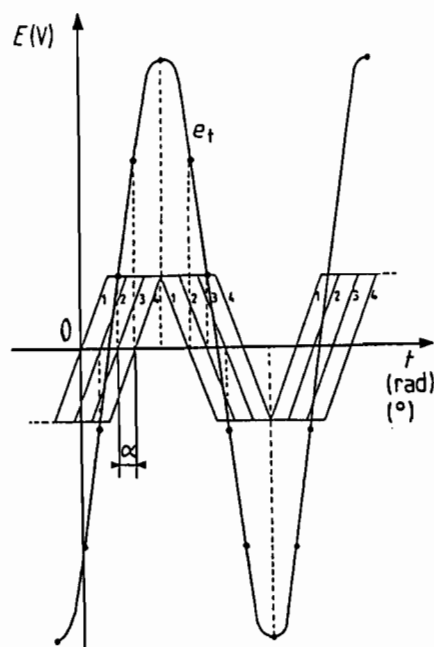


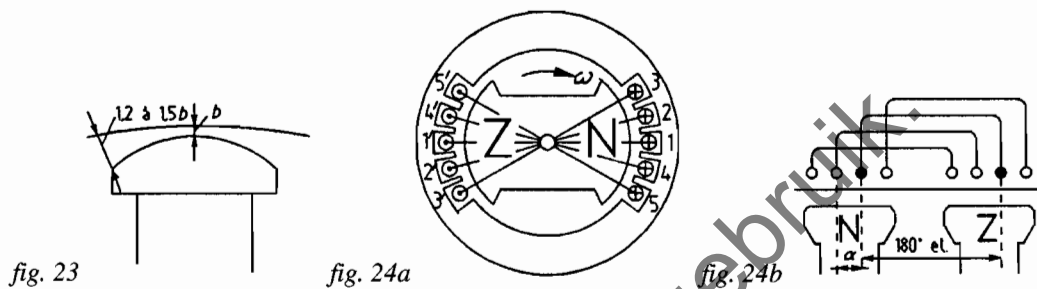
fig. 22

1.4.2 Vorm van de luchtspleet

Doelstellingen

- De invloed van de vorm van de luchtspleet op de verkregen spanningsvorm omschrijven.
- De grootte van de gegenereerde spanning van een elementaire wikkeling vectorieel bepalen.

Als de inductie in de luchtspleet sinusvormig was, dan zouden de vier spanningen uit fig. 22, én dus de resulterende spanning, ook sinusvormig zijn. In de praktische uitvoering wordt de luchtspleet aan de uiteinden van de polen 1,5- à 2-maal breder gemaakt dan op de poolaslijn (fig. 23). Op deze manier zal het inductieverloop de sinusvorm nog meer benaderen.



In de veronderstelling dat de verkregen spanningen in de elementaire wikkelementen van fig. 24a en 24b sinusvormig zijn, kunnen we de totale spanning van de tweepolige generator vectorieel samenstellen volgens fig. 25.

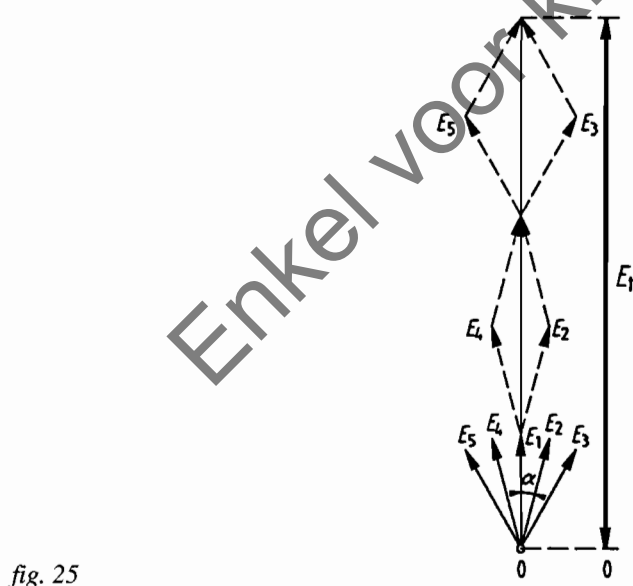


fig. 25

Wiskundig: $E_t = E + 2(E \cos \alpha) + 2(E \cos 2\alpha)$.

Logischerwijze is er constructief een grens aan de verbreding van de spoelzijden.

1.4.3 Verkorten van de wikkelspoed

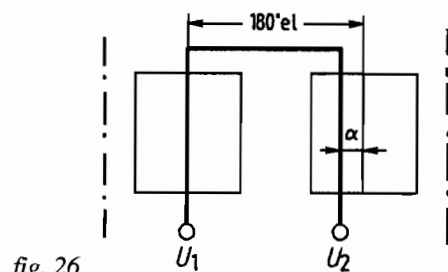


fig. 26

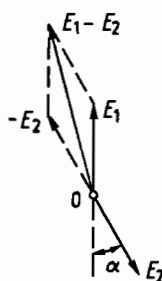


fig. 27

Het verkorten van de wikkelspoed van fig. 26 heeft tot gevolg dat de spanningen in beide spoelzijden niet meer 180° verschoven zijn. De totale spanning wordt verkregen door de vectoriële som van beide spanningen:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 - \vec{E}_2 \quad (\text{fig. 27})$$

Deze spanning is kleiner dan bij een wikkelspoed van 180° . In de praktijk is de wikkelspoedverkorting altijd kleiner dan 30° waardoor de spanningsvermindering onbeduidend wordt. Daartegenover staan echter twee belangrijke voordelen:

- 1 De ideale sinusvormige spanning wordt nog meer benaderd.
- 2 De spoelkoppen worden kleiner, waardoor de gelijkstroomweerstand, de inductieve reactantie en het koperverbruik verminderen.

1.5 Elektrische grootheden

1.5.1 Frequentie van de opgewekte spanning

Doelstelling

- Van een synchrone generator de formule afleiden voor het bepalen van de frequentie overeenkomstig de rotatiefrequentie en het polenaantal.

Omdat een cyclus van de gegenereerde spanning overeenstemt met de doorgang van één poolpaar voorbij één wikkelementzijde, kunnen we stellen dat bij een $2p$ -polige machine 'p' (aantal poolparen) cyclussen per volledige omwenteling van de rotor beschreven worden.

Vermits de rotatiefrequentie (omwentelingen per seconde) van de rotor 'n' is, besluiten we dat het aantal cyclussen per seconde of de frequentie van de gegenereerde spanning gelijk is aan

$$f = p \cdot n$$

Toelichting

Gebruikelijke frequenties

De frequentie vastgelegd voor de distributie van elektrische energie in Europa is 50 Hz; in Amerika is dit 60 Hz. Voor het voeden van eenfasige wisselstroommotoren bij elektrische tractie past men de frequentie $16\frac{2}{3}$ Hz toe.

1.5.2 Grootte van de gegenereerde spanning per fasewikkeling

Doelstellingen

- De formule voor het berekenen van de gegenereerde spanning van een synchrone generator opstellen.
- Uit de formule van de gegenereerde spanning de factoren afleiden die in aanmerking komen om de spanning te regelen.

Voor het berekenen van de gegenereerde spanning gaan we uit van een tweepolige eenfasige synchrone generator. Voor een driefasige synchrone generator is deze berekening identiek, omdat de grootte van de gegenereerde spanning per fase bepaald wordt. Om de berekening mogelijk te maken gaan we ervan uit dat:

- de flux in de luchtspleet een sinusvormig verloop heeft;
- de spanningen in alle geleiders van een ankerwikkeling in fase zijn. (Ze liggen allemaal in één gleuf).

In de tijd van een vierde omwenteling van de rotor zal de omsloten flux van de fasewikkeling sinusvormig veranderen van het maximum (d.i. ϕ , de flux per pool) naar nul. De gemiddelde gegenereerde spanning in de wikkeling is dan volgens par. 18.1.4 van deel 1B:

$$E_{\text{gem}} = -N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (\text{V})$$

met

Δt : tijd waarin de fluxverandering plaatsheeft, d.i. een vierde periode: $\frac{T}{4}$

Het minteken wijst op de zin van de spanning (Wet van Lenz). We laten dit voor de volgende afleiding zonder meer weg:

$$E_{\text{gem}} = N \cdot \frac{\phi}{\frac{T}{4}} = \frac{4N \cdot \phi}{T} = 4N \cdot \phi \cdot f$$

De effectieve waarde

$$E_{\text{gem}} = \frac{2}{\pi} E_m = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \cdot E \quad (\text{deel 2, par. 1.3.3 en 1.3.4})$$

waaruit

$$E = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot E_{\text{gem}}$$

of

$$E = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot 4N \cdot \phi \cdot f = 4,44N \cdot f \cdot \phi$$

$$E = 4,44 N \cdot f \cdot \phi$$

met

N : het aantal windingen van de fasewikkeling

f : de frequentie van de opgewekte spanning ($f = p \cdot n$)

ϕ : de magnetische flux per pool

E : de effectieve waarde van de gegenereerde spanning per fase

In werkelijkheid verloopt de magnetische flux in de luchtspleet niet sinusoidaal, zijn de elementzijden van de wikkelementen over meer gleuven verdeeld en is de wikkelspoed iets kleiner dan 180° el. Het gevolg daarvan is dat de verkregen spanning in werkelijkheid kleiner zal zijn.

In de praktijk zullen we dan de theoretisch berekende spanning vermenigvuldigen met een factor k' die kleiner is dan de eenheid. Deze factor houdt dan rekening met de praktische schikkingen van de wikkeling (wikkelfactor f_w) en met het feit dat de flux in de lichtspleet niet sinusoidaal verloopt (vormfactor f_v)

In werkelijkheid is

$$E = k' \cdot 4,44N \cdot f \cdot \phi$$

of

$$E = K \cdot \phi \cdot N \cdot f$$

met

K : de factor van Kapp of machinefactor. De waarde varieert tussen 3,73 en 4,26 naar gelang van de constructie van de generator.

– Spanningsregeling bij synchrone generatoren

Uit de formule $E = K \cdot \phi \cdot N \cdot f$ blijkt duidelijk dat bij constante netfrequentie maar één factor in aanmerking komt om de opgewekte spanning te regelen, nl. de magnetische flux ϕ .

Omdat volgens de wet van Hopkinson

$$\phi = \frac{N \cdot I_f}{R_m}$$

kan de flux enkel met de bekrachtigingsstroom van de polen geregeld worden.

– Rotatiefrequentieregeling bij synchrone generatoren

Omdat $f = p \cdot n$ kan de formule ook als volgt geschreven worden:

$$E = K \cdot \phi \cdot N \cdot p \cdot n \quad (\text{V})$$

Bij opdrijven van de rotatiefrequentie zal de spanning toenemen. Tegelijkertijd zal ook de frequentie van de gegenereerde spanning toenemen, wat meestal ongewenst is. Omwille van de ongewenste frequentievariatie komt rotatiefrequentieregeling praktisch niet voor als spanningsregelaar.

Toelichting

Doelstelling

- De invloed van de wikkelfactor (f_w) op de totale gegenereerde spanning illustreren aan de hand van een tabel.

De wikkelfactor houdt rekening met het verkorten van de wikkelspoed en het verbreden van de spoelzijden. De onderstaande tabel geeft een idee van de invloed van de wikkelfactor op de grootte van de spanning.

Aard van de wikkeling	Aantal gaats						
	1	2	3	4	6	8	10
Eenfasewikkeling	1	0,707	0,67	0,653	0,644	0,641	0,639
Driefasewikkeling	1	0,966	0,96	0,958	0,956	0,956	0,955

1.6 Gedrag van de synchrone generator bij belasting

1.6.1 Ankerreactie

Doelstellingen

- Het begrip *ankerreactie* verduidelijken.
- De invloed van de ankerreactie op de gegenereerde spanning toelichten bij een ohms, inductief of capacitef belaste synchrone generator.

We gaan uit van een eenfasige synchrone generator. Voor de driefasige synchrone generator is de redenering identiek omdat deze wezenlijk bestaat uit drie eenfasige generatoren. De ankerreactie van een synchrone generator is de beïnvloeding van de nullastflux ϕ_0 door de flux voortgebracht door de belastingsstroom in de ankerwikkeling ϕ_A . Aangezien het een wisselspanningsgenerator betreft, bekijken we vier typische belastingsgevallen, namelijk de ohmse, de zuiver inductieve, de zuiver capaciteve en de willekeurige belasting.

a Ohmse belasting

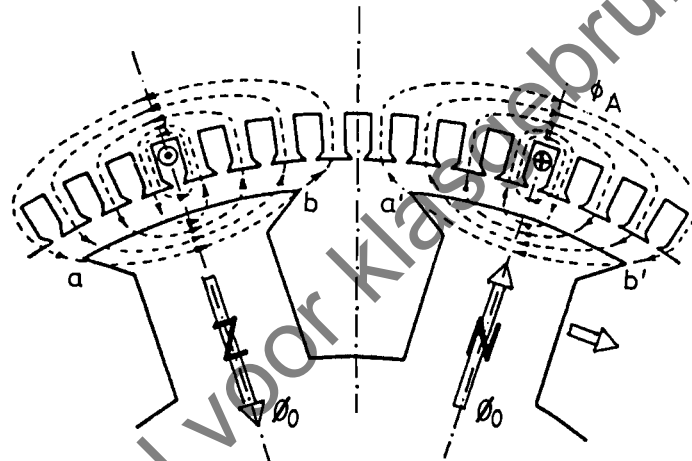


fig. 28

Bij de ohmse belasting zijn ankerstroom en generatorklemspanning in fase. We stellen hier dat, op het ogenblik dat de gegenereerde spanning maximaal is, ook de ankerstroom maximaal is. (We verwaarlozen alle inwendige spanningsverliezen.)

In fig. 28 zal de aslijn van de pool dan samenvallen met de aslijn van de beschouwde elementzijde. De zin van de gegenereerde spanning wordt gegeven door de rechterhandregel en is aangegeven in fig. 28.

We stellen vast dat de flux bij nullast ϕ_0 versterkt wordt in de zones *a* en *a'* terwijl in de zones *b* en *b'* een verzwakking van de flux in de luchtspleet optreedt. De resulterende flux ' ϕ_t ' zal in waarde iets afnemen als men met de nullastflux in het begin van de verzadiging werkt. (De verzwakking zal dan groter zijn dan de versterking.) Werkt men in het lineaire gebied van de magnetisatiekromme, dan is de verzwakking gelijk aan de versterking en zal de resulterende flux constant blijven.

De flux ϕ_A , veroorzaakt door de ankerstroom, staat daarenboven loodrecht op de nullastflux ϕ_0 . Deze flux ϕ_A noemen we *dwarsflux*. Het gevolg van de dwarsflux is dat de resulterende hoofdflex iets verdraait tegen de draaizin in. De spanning in de ankergeleiders zal dus iets later maximaal zijn. (De hartlijn van de hoofdpool is dan al gepasseerd.) We kunnen bijgevolg besluiten dat de ankerstroom op de hoofdflex van de rotor bij een ohmse belasting een verwaarloosbare invloed heeft op de resulterende flux en bijgevolg ook op de verkregen gegenereerde spanning $E = K \cdot \phi \cdot N \cdot f$.

Bij toenemende ohmse belasting zal de gegenereerde spanning nagenoeg constant blijven.

b Zuiver inductieve belasting

Bij een zuiver inductieve belasting ijlt de belastingsstroom 90° na op de generatorklemspanning. Mits verwaarlozing van de inwendige spanningsverliezen kunnen we stellen dat de N-pool uit fig. 28 in dit geval 90° verder staat en dat op dit moment de stroom door de ankergeleider maximaal is in dezelfde zin. Deze toestand wordt voorgesteld in fig. 29.

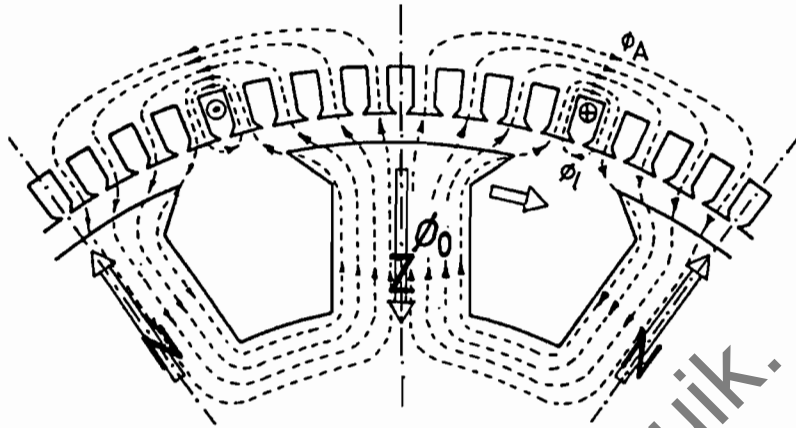


fig. 29

Uit fig. 29 blijkt dat de ankerflux ϕ_A de hoofdflux bij nullast (ϕ_0) in de luchtspleet in al zijn punten verzwakt. De ankerflux valt samen met de richting van de hoofdflux; we noemen hem daarom *langsflux*.

Gevolg daarvan is, dat bij toenemende belastingsstroom de gegenereerde spanning $E = K \cdot \phi \cdot N \cdot f$ zal verminderen.

c Zuiver capacatieve belasting

Bij een zuiver capacatieve belasting ijlt de belastingsstroom 90° voor op de generatorklemspanning. Mits verwaarlozen van de inwendige spanningsvallen kunnen we stellen dat de N-pool uit fig. 28 90° in de tegengestelde zin van de draaizin verschoven is en dat op dit moment de stroom door de ankergeleider maximaal is in dezelfde zin. Deze toestand wordt voorgesteld in fig. 30.

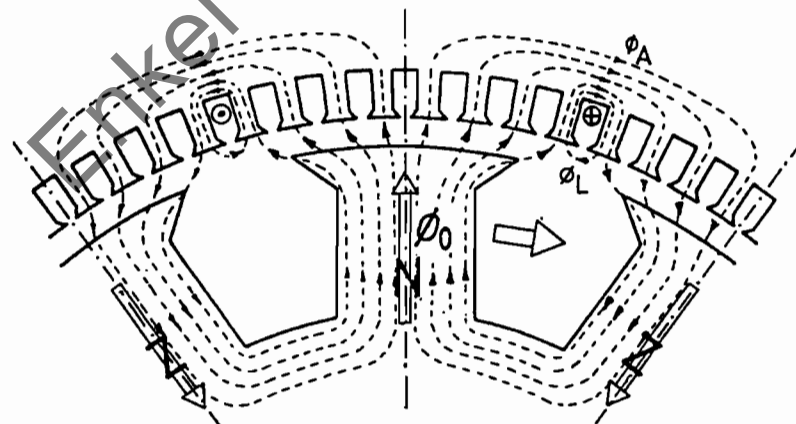


fig. 30

Uit deze figuur blijkt dat de ankerflux (ϕ_A), als gevolg van de belastingsstroom, de flux bij nullast (ϕ_0) in de luchtspleet in al zijn punten versterkt. Het is, zoals bij de inductieve belasting, een *langsflux*. Deze *langsflux* zal bij toenemende belastingsstroom de gegenereerde spanning doen toenemen.

d Willekeurige belasting

Alle willekeurige belastingen zullen zich situeren tussen de voorgestelde typebelastingsgevallen en dit naar gelang van de verschuivingshoek tussen gegenereerde spanning en de belastingsstroom die door de aangesloten verbruiker veroorzaakt wordt.

1.6.2 Equivalente keten

Doelstellingen

- De invloed van lekflux ϕ_L , ankerflux ϕ_A en gelijkstroomweerstand R_A op het inwendige spanningsverlies van een synchrone generator verklaren.
- Het elektrische vervangschema of de equivalente keten van een synchrone generator opstellen en de spanningsvergelijking afleiden.
- De invloed van de lekreactantie op de kortsluitstroom van de wisselstroom-generator toelichten.

a Weerstandselementen van de ankerwikkeling

Voor het opstellen van de equivalente keten van een synchrone generator gaan we vooraf de invloed na van de onderscheiden grootheden die de klemspanning van een generator beïnvloeden, namelijk de ankerweerstand, de lekflux en de ankerflux.

– Ankerweerstand R_A

Bij het belasten vloeit de belastingsstroom door de ankerwikkeling en ondervindt daar gelijkstroomweerstand die een spanningsval $R_A \cdot I$ veroorzaakt.

– Lekflux ϕ_L

In de fig. 28, 29 en 30 merken we dat niet alle veldlijnen zich sluiten via de rotorpolen. Enkele veldlijnen sluiten zich rond de ankergeleiders en vormen de zogenaamde lekflux ϕ_L . Deze lekflux veroorzaakt een inductieve spanningsval. In verdere diagrammen zullen we de invloed van de lekflux terugvinden in de vorm van een inductieve lekreactantie $X_L = \omega \cdot L_L$, die in serie geschakeld is met de gelijkstroomweerstand van de ankerwikkeling R_A en een spanningsval veroorzaakt:

$$E_L = X_L \cdot I$$

– Ankerflux ϕ_A

We verwaarlozen de invloed van hysteresis- en wervelstromen zodat we mogen stellen dat de ankerflux ϕ_A in fase is met de ankerstroom I .

Zoals uit het voorgaande blijkt, zal deze ankerflux een spanning induceren die de nul-lastspanning (E_0) versterkt of verzwakt, zodat de werkelijke spanning (E) niet meer gelijk is aan de spanning bij nullast (E_0).

De gegenereerde spanning ten gevolge van de ankerflux ϕ_A stellen we gelijk aan het product van de stroomsterkte I met een fictieve reactantie X_A van de ankerwikkeling:

$$E_A = X_A \cdot I$$

b Equivalent schema

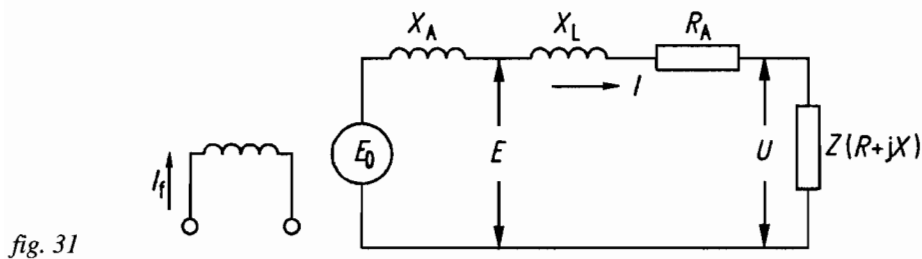


fig. 31

In het schema van fig. 31 is E_0 de nullastspanning die opgewekt wordt door de synchrone generator als er geen belasting op aangesloten is.

Bij aansluiten van een belasting Z zal de ankerstroom I enerzijds een ankerflux ϕ_A en een lekflux ϕ_L tot gevolg hebben; die veroorzaken beide een inductieve spanningsval $X_A \cdot I + X_L \cdot I$. Anderzijds is er de gelijkstroomweerstand van de ankerspoel R_A die een ohmse spanningsval $R_A \cdot I$ veroorzaakt.

Aan de klemmen van de synchrone generator vinden we dan de klemspanning U terug. Vectorieel kunnen we schrijven:

$$\vec{U} = \vec{E}_0 - \vec{X}_A \cdot \vec{I} - \vec{X}_L \cdot \vec{I} - \vec{R}_A \cdot \vec{I}$$

Deze equivalente keten kan vereenvoudigd worden voorgesteld door fig. 32.

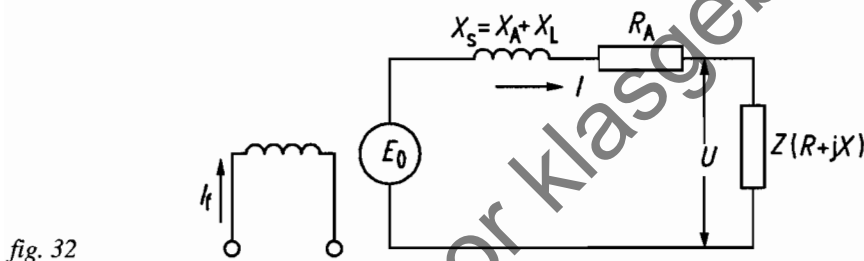


fig. 32

met

$X_s = X_A + X_L$: de synchrone reactantie

$Z_s = \sqrt{X_s^2 + R_A^2}$: de synchrone impedantie van de synchrone generator

Uit de keten van fig. 32 berekenen we de stroomsterkte:

$$I = \frac{E_0}{R_A + R + j(X_A + X_L + X)}$$

Verder kan men ook alle berekeningen uitvoeren zoals gezien in deel 2.

Toelichting

Ohmse spanningsval

In vergelijking met de spanningsval veroorzaakt door de lekflux ϕ_L heeft de spanningsval over de weerstand een ongeveer 10-maal kleinere waarde. Bij benaderende berekeningen wordt de ohmse spanningsval daarom verwaarloosd.

Kortsluitstromen

De lekreactantie veroorzaakt een relatief grote spanningsval (10 à 20 % van de nominale spanning). Deze spanningsval is in normale werkomstandigheden een nadeel. Bij het optreden van kortsluiting zal deze lekreactantie, samen met R_A , nochtans optreden als automatische stroombegrenzer. Op deze manier worden de dan optredende elektrodynamische krachten beperkt.

1.6.3 Opbouw van het vectordiagram

Doelstelling

- Vertrekkende van de nullastflux het vectordiagram bij inductieve en capacatieve belasting van een synchrone generator opstellen.

a Inductieve belasting

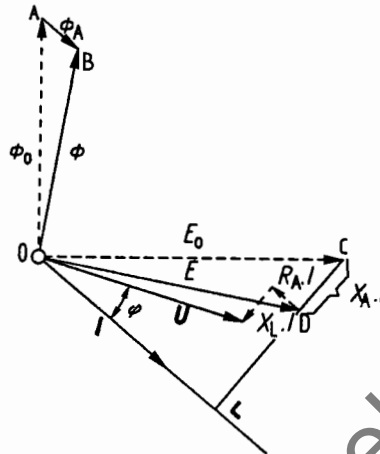


fig. 33

Bij nullast zal de flux ϕ_0 een spanning E_0 genereren die 90° naijlt op deze flux. We veronderstellen een naijlende stroom I die bepaald wordt door de aangesloten verbruiker. De belastingsstroom veroorzaakt een ankerflux ϕ_A die in fase is met de belastingsstroom. Samentelling van ϕ_0 en ϕ_A levert ons de werkelijke flux ϕ . Deze flux ϕ zal een spanning genereren die 90° naijlt op ϕ en waarvan de grootte bepaald wordt door de constructie van een gelijkvormige driehoek OCD; de spanningen (ΔOCD) zijn evenredig met de fluxen (ΔOAB).

De zijde CD zal dus een maat zijn van de spanningsval veroorzaakt door de ankerflux. Willen we nu nog de klemspanning krijgen, dan dienen we nog de inductieve spanningsval ($X_L \cdot I$) en de ohmse spanningsval ($R_A \cdot I$) van de werkelijke E af te trekken, m.a.w.

$$\vec{U} = \vec{E} - X_L \vec{I} - R_A \vec{I}$$

b Capacatieve belasting

Hiervoor geldt een identieke redenering.

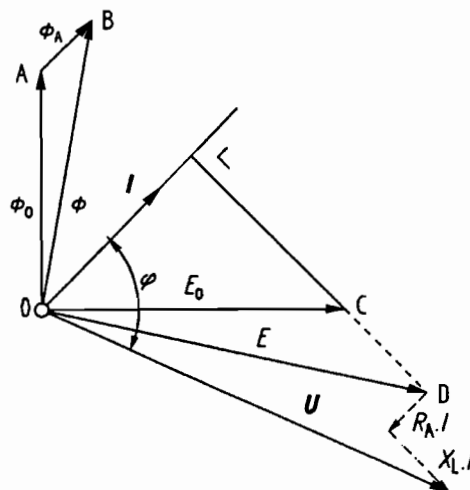


fig. 34

Uit beide diagrammen herkennen we duidelijk een toepassing op de equivalente keten:

$$\vec{U} = \vec{E}_0 - \vec{X}_A \vec{I} - \vec{X}_L \vec{I} - \vec{R}_A \vec{I}$$

Ook stellen we uit de grafische constructie vast dat de klemspanning bij inductieve belasting afneemt, terwijl de klemspanning bij capacatieve belasting toeneemt.

1.6.4 Spanningsdiagrammen

Doelstelling

- Uitgaande van een bepaalde belasting (ohms, inductief of capacatief) het spanningsvectordiagram van een synchrone generator opbouwen.

Bij toepassingen zijn het vooral de spanningsdiagrammen die onze aandacht opeisen. De fluxen worden meestal niet getekend.

a Ohmse belasting

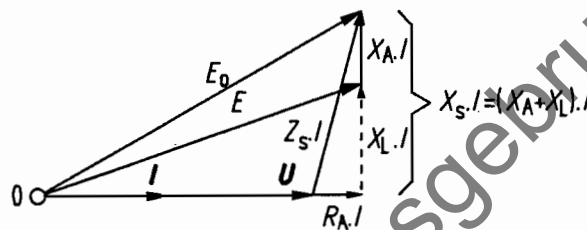


fig. 35

$$\vec{E}_0 = \vec{U} + \vec{R}_A \vec{I} + \vec{X}_L \vec{I} + \vec{X}_A \vec{I}$$

We stellen in fig. 35 vast dat $U \approx E$.

b Inductieve belasting

$$\vec{E}_0 = \vec{U} + \vec{R}_A \vec{I} + \vec{X}_L \vec{I} + \vec{X}_A \vec{I}$$

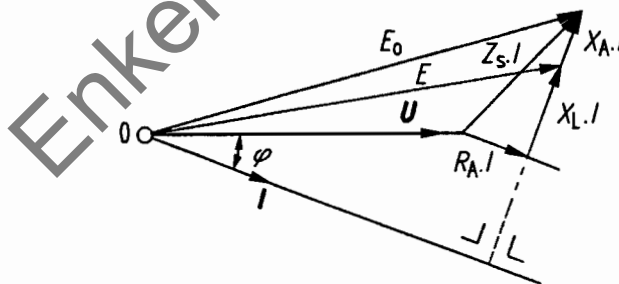


fig. 36

We stellen in fig. 36 vast dat U werkelijk kleiner is dan E .

c Capacitieve belasting

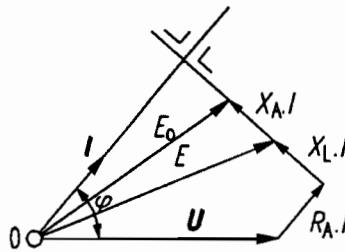


fig. 37

Uit het vectordiagram blijkt dat de klemspanning U groter kan zijn dan de werkelijk gegenereerde spanning E .

1.7 Karakteristieken van een synchrone generator

Doelstelling

- Van een synchrone generator de nullast-, uitwendige, kortsluit- en regelkarakteristiek opnemen en het verloop verklaren.

1.7.1 Nullastkarakteristiek (magnetische karakteristiek)

$$E_0 = f(I_f)$$

met

$n = \text{constant}$

$I = 0$

De nullastkarakteristiek geeft het verband aan tussen de opgewekte spanning E_0 en de magnetisatie- of bekrachtigingsstroom I_f . De rotatiefrequentie moet constant worden gehouden en de ankerstroom is nul. Deze karakteristiek kunnen we opnemen met de opstelling van fig. 38.

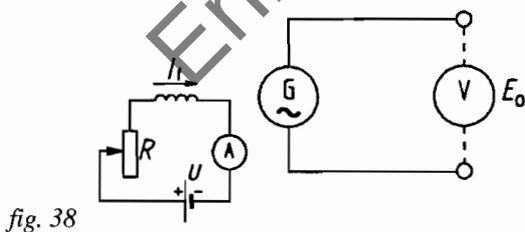


fig. 38

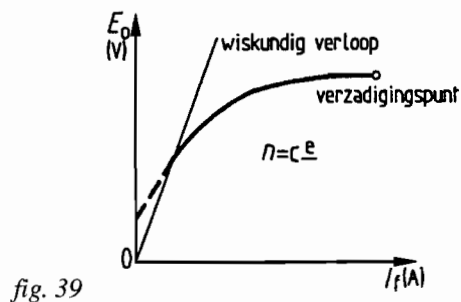


fig. 39

Met een A-meter meten we de te regelen stroomsterkte I_f ; de voltmeter geeft de gegenereerde spanning E_0 aan. Er wordt geen belasting aangesloten omdat I gelijk aan nul moet zijn. Bij elke waarde van I_f (stijgend van 0 naar $I_{f\max}$) noteren we de overeenstemmende waarde van E_0 . Dit levert ons de karakteristieke kromme van fig. 39 op.

Bij een synchrone generator die nog niet gemagnetiseerd werd, vertrekt de kromme vanuit het nulpunt. Bij een machine met remanent magnetisme zal er al een spanning gegenereerd worden met een bekrachtigingsstroom $I_f = 0$.

Zolang de polen niet verzadigd zijn, neemt de spanning lineair toe met de bekrachtigingsstroom. Zodra het verzadigingsverschijnsel optreedt, zal ook de spanning niet meer lineair toenemen. In het verzadigingsgebied zal de spanning bij toenemende stroom-

sterkte constant blijven. Deze karakteristiek heeft een verloop dat gelijkvormig is met de nullastkarakteristiek van gelijkspanningsgeneratoren.

Wiskundige benadering:

Uit de formule

$$E = K \cdot \phi \cdot N \cdot p \cdot n$$

leiden we af dat K , N , p en n constant zijn (dus ook de frequentie $f = p \cdot n$). De spanning is dan bepaald door de formule

$$E_0 = K' \cdot \phi = K' \cdot \frac{N_{\text{rotor}} \cdot I_f}{R_m}$$

$$E_0 = K'' \cdot I_f$$

met

N_{rotor} : het aantal windingen van de bekrachtigingswikkeling

I_f : de bekrachtigingsstroom

R_m : de reluctantie

Wiskundig kan dit voorgesteld worden als een rechte door de oorsprong.

1.7.2 Uitwendige karakteristiek

$$U = f(I)$$

Bij deze karakteristiek gaan we na hoe de klemspanning van een generator verandert overeenkomstig de belastingsstroom bij constant gehouden rotatiefrequentie, bekrachtigingsstroom I_f en arbeidsfactor $\cos \varphi$.

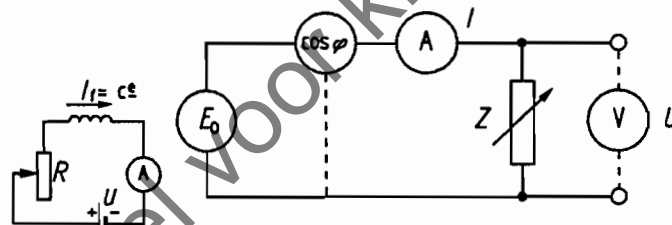


fig. 40

We nemen de opstelling van fig. 40. We regelen de belasting zodanig dat bij elke belasting de $\cos \varphi$ constant blijft. Dit vraagt een continu regelbare inductantie of capacitantie. Bij constant blijvende rotatiefrequentie, bekrachtigingsstroom en $\cos \varphi$ meten we de klemspanning bij toenemende belastingsstroom. De verkregen resultaten zijn in fig. 41 weergegeven.

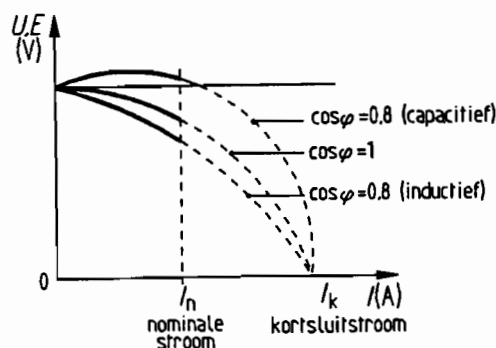


fig. 41

Uit wat voorafging (par. 1.6.4), weten we al dat bij ohmse en inductieve belasting de klemspanning U daalt, terwijl bij capacatieve belasting de klemspanning toeneemt bij stijgende belastingsstroom.

1.7.3 Kortsluitkarakteristiek

$$I_k = f(I_f)$$

met

$n = \text{constant}$

$U = 0$

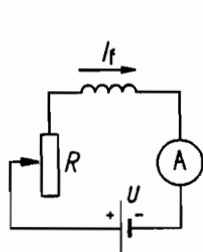


fig. 42

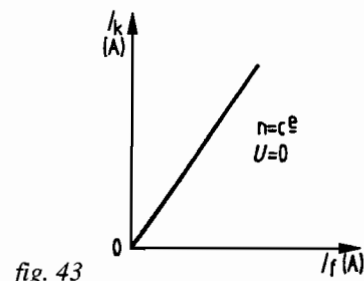
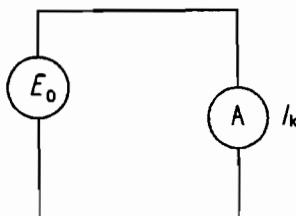


fig. 43

Fig. 42 geeft het schema voor het opnemen van de kortsluitkarakteristiek. Hier moet de belastingsstroom (I_k) beneden de nominaal toegelaten stroomsterkte blijven. De bekrachtigingsstroom blijft hier klein omdat de synchrone impedantie van de generator klein is ($Z_s = \sqrt{X_s^2 + R_A^2}$) en omdat de stroomsterkte zeer snel zal toenemen. De rotorpolen zijn hier ver van verzadigd, met als gevolg dat de kortsluitstroomsterkte recht evenredig is met de bekrachtigingsstroom I_f . In fig. 43 is het verloop weergegeven.

1.7.4 Regelkarakteristiek

$$I_f = f(I)$$

met

$U = \text{constant}$

$\cos \varphi = \text{constant}$

$n = \text{constant}$

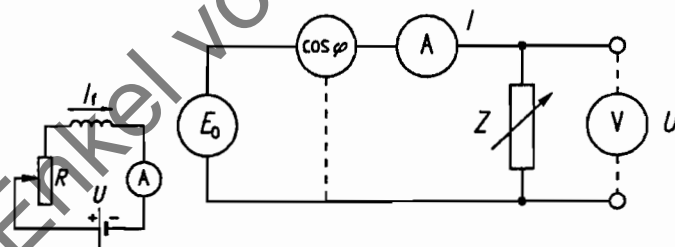


fig. 44

We maken een opstelling volgens fig. 44. We drijven de generator aan op nominale rotatiefrequentie en houden die constant. We regelen de bekrachtigingsstroom zodanig tot we bij nullast de gewenste (bv. nominale) spanning krijgen. We belasten de generator geleidelijk (ohms, inductief en capacitief) en regelen bij elke meting de spanning op de ingestelde waarde met behulp van bekrachtigingsstroom I_f . Het resultaat is weergegeven in fig. 45.

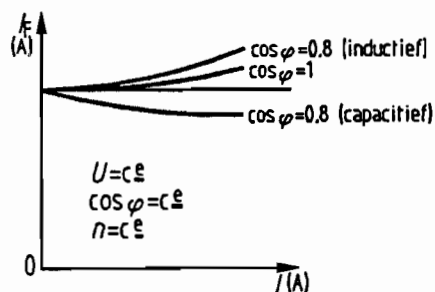


fig. 45

Bij ohmse en inductieve belasting moet de bekrachtigingsstroom stijgen als I toeneemt, dit om de spanningsdaling door anker- en lekflux te compenseren. Bij capacatieve belasting moet men de bekrachtigingsstroom verminderen als de belastingsstroom stijgt, dit om de spanningstoename ten gevolge van de anker- en lekflux te compenseren.

1.8 Vermogen en rendement van wisselstroomgeneratoren

1.8.1 Vermogen

Doelstelling

- Het verband tussen schijnbaar en actief vermogen van een een- en driefasige synchrone generator toelichten.

De gegevens uit deel 2, leereenheid 10 zijn hier integraal toepasselijk. We maken een onderscheid voor eenfasige en driefasige generatoren. Voor driefasige generatoren beschouwen we daarbij een symmetrische en een asymmetrische belasting.

Schijnbaar vermogen S

Een wisselstroomgenerator wordt vooral gekenmerkt door zijn schijnbaar vermogen S omdat dit vermogen de afmetingen van de machine bepaalt (thermisch gedrag).

Voor een eenfasige generator is het schijnbare vermogen $S = U \cdot I$ in (k)VA.

Voor een driefasige generator (symmetrisch belast) is het schijnbare vermogen $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$ in (k)VA met U en I respectievelijk lijnspanning en lijnstroom.

Bij asymmetrische belasting is het totale schijnbare vermogen gelijk aan de som van de schijnbare vermogens van elke fase.

Werkelijk of actief vermogen P

Voor een eenfasige generator is het actieve vermogen $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ in (k)W.

Voor een driefasige generator (symmetrisch belast) is het actieve vermogen $P = \sqrt{3} U \cdot I \cdot \cos \varphi$ in (k of MW) met U en I respectievelijk lijnspanning en lijnstroom.

Bij asymmetrische belasting is het totale actieve vermogen gelijk aan de som van de actieve vermogens van elke fase.

Toelichting

Een synchrone generator met een schijnbaar vermogen van 200 000 kVA kan een maximaal actief vermogen leveren van 200 000 kW als de belasting zuiver ohms is ($\cos \varphi = 1$). Heeft men een belasting met $\cos \varphi = 0,75$, dan zal de machine al vol belast zijn bij een actief vermogen van 150 000 kW.

1.8.2 Rendement

Doelstellingen

- Het rendement van een synchrone generator bepalen.
- De deelverliezen van een synchrone generator opsommen en de herkomst ervan toelichten.
- De invloed van de arbeidsfactor op het rendement van een synchrone generator verduidelijken.

We beschouwen een driefasige synchrone generator symmetrisch belast.
De algemene formule is

$$\eta = \frac{P_n}{P_t} = \frac{P_n}{P_n + P_v} = \frac{P_t - P_v}{P_t}$$

met

P_n : het nuttige elektrische vermogen $P_n = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$

P_t : het toegevoerde mechanische vermogen

P_v : de som van de vermogenverliezen

De verschillende verliezen die optreden, zijn:

1 Mechanische verliezen P_m

De mechanische verliezen bestaan uit verliezen door wrijving in de lagers en ventilatieverliezen. Omdat de rotatiefrequentie van wisselstroomgeneratoren praktisch altijd constant wordt gehouden (vereiste constante frequentie) zijn deze verliezen ook constant.

2 IJzerverliezen (magnetische verliezen) P_{Fe}

Dit zijn de verliezen veroorzaakt door wervelstromen en hysteresis in het ferromagnetische materiaal van de magnetische kring (stator en rotor). Deze verliezen zijn nagenoeg evenredig met het kwadraat van de fluxdichtheid B , dus ook met het kwadraat van de gegenereerde spanning E .

3 Koperverliezen of jouleverliezen P_{Cu}

Deze verliezen komen voor in de anker- en bekrachtigingswikkeling.

In het anker :

$$P_{Cu} = 3 R \cdot I^2 \quad (R: \text{wisselstroomweerstand})$$

In de bekrachtigingswikkeling:

$$P_{Cu} = R_f \cdot I_f^2$$

Invloed van de arbeidsfactor $\cos \varphi$

De grootte van het rendement wordt beïnvloed door de arbeidsfactor. Als de faseverschuiving tussen U en I φ° is, dan is

$$P_n = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

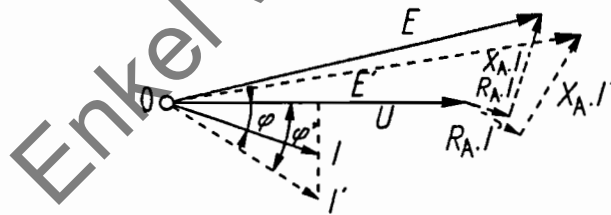


fig. 46

Moet er nu, bij dezelfde klemspanning U , hetzelfde vermogen geleverd worden met een verschuivingshoek φ'° , dan zal de stroomsterkte toenemen tot I' . (De actieve component blijft gelijk.) Hierdoor zullen de ohmse ($R_A I'$) en inductieve ($X_A I'$) spanningsvallen toenemen (fig. 46). Daardoor moet de nullastspanning gevoelig opgedreven worden (E' i.p.v. E). De bekrachtigingsstroom moet dus ook toenemen. Uit deze vaststellingen volgt dat bij toenemende faseverschuiving (kleinere arbeidsfactor) de jouleverliezen in de rotor- en statorwikkeling toenemen. Door de grotere ankerflux zullen ook de ijzerverliezen toenemen.

Bij een capacatieve belasting treedt voor de bekrachtigungsverliezen het omgekeerde effect op; hier vermindert het joule-effect in de bekrachtigingswikkeling.

Het rendement van een synchrone generator daalt als de arbeidsfactor kleiner wordt. Als algemene rendementsformule kunnen we schrijven:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_v} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi + 3 R I^2 + R_f \cdot I_f^2 + P_m + P_{Fe}}$$

In fig. 47 zien we het algemeen verloop van een aantal rendementskrommen van een synchrone generator voor verschillende arbeidsfactoren.

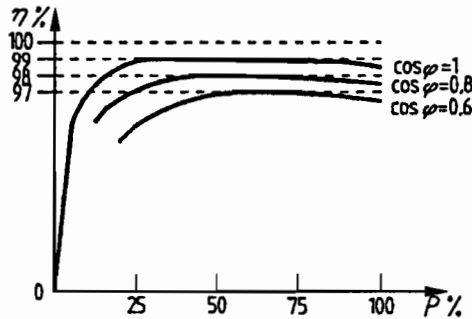


fig. 47

Over het algemeen worden generatoren vervaardigd voor zeer grote vermogens waarvan het rendement zeer hoog ligt (97 à 99 %).

Toelichting

Effectieve weerstand

Om de jouleverliezen (koperverliezen) P_{Cu} van de statorwikkelingen te berekenen volstaat het niet met de gelijkstroomweerstandswaarde te rekenen. Aangezien het hier wisselstroom betreft en het stroomverdringingseffect een rol speelt, moeten we rekenen met de effectieve weerstand die aanzienlijk groter is dan de gelijkstroomweerstand. De waarde van de effectieve weerstand berekenen we als volgt:

$$R = \frac{P_{Cu}}{3I^2} (\Omega)$$

1.9 Parallel schakelen van synchrone generatoren

Doelstelling

- De praktische noodzaak van parallelwerking van synchrone generatoren toelichten.

Om op elk ogenblik aan de vraag van de aangesloten verbruikers te kunnen voldoen en om het rendement van de elektrische centrales hoog te houden, gebruikt men generatoren die continu op vollast in werking zijn (om de basisenergie te leveren). Op momenten dat de vraag toeneemt, zal men generatoren met kleiner vermogen parallel schakelen. Tegenwoordig staan praktisch alle generatoren van de verschillende elektriciteitscentrales onderling in parallel; op deze manier kan het overschot aan energie van de ene centrale het tekort van de andere centrale compenseren.

1.9.1 Parallel schakelen van eenfasige synchrone generatoren

Doelstellingen

- De voorwaarden toelichten om twee eenfasige synchrone generatoren parallel te schakelen.
- De middelen illustreren om de synchronisatievoorwaarden na te gaan.
- De helderschakeling van de donkerschakeling onderscheiden wat schakeling en lampspanning betreft.

Bij het in parallel schakelen van gelijkstroomgeneratoren moeten beide generatoren dezelfde spanning hebben. Ook moeten de polen met dezelfde polariteit met elkaar worden verbonden. Bij synchrone generatoren verandert de momentele waarde van de spanning en polariteit voortdurend. Om deze generatoren parallel te schakelen, is het nodig dat op elk moment de spanning en polariteit dezelfde zijn. Dit maakt het in parallel schakelen van wisselstroomgeneratoren wel iets moeilijker dan het in parallel schakelen van gelijkstroomgeneratoren.

Om twee eenfasige wisselstroomgeneratoren in parallel te schakelen moet er aan de volgende voorwaarden voldaan worden:

- Beide spanningen moeten gelijke maximumwaarden en dus ook gelijke effectieve waarden hebben.
- Ze moeten gelijke frequenties hebben.
- Ze moeten onderling in fase zijn.

Het regelen van de bij te schakelen synchrone generator, zodat hij voldoet aan de voorwaarden om parallel te schakelen, wordt *synchroniseren* genoemd.

De synchronisatievoorwaarden worden als volgt gecontroleerd:

a Gelijkheid van spanning

De gelijkheid van spanning wordt gecontroleerd met een V-meter, eventueel een dubbele V-meter om beide spanningen goed te kunnen vergelijken.

b Gelijkheid van frequentie

De gelijkheid van frequentie controleert men met twee frequentiemeters of met een dubbele frequentiemeter; dit om een goede vergelijking mogelijk te maken.

c Onderling in fase

Het controleren van het onderling in fase zijn kan op verschillende manieren nagegaan worden, bv. met een lampensynchronoscoop.

Twee lampen in donkerschakeling (fig. 48)

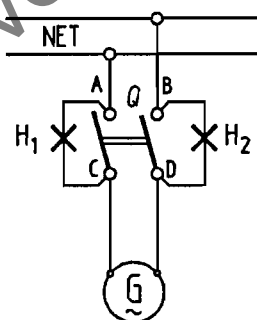


fig. 48

Als beide spanningen in fase zijn, is er tussen A en C en tussen B en D geen potentiaalverschil. De lampen zijn gedoofd. Ook is dan voldaan aan de voorwaarde van gelijke spanningen.

Als de frequenties ongelijk zijn, zullen beide lampen gelijktijdig aan- en uitgaan. De frequentie waarmee de lampen oplichten, is een maat voor het frequentieverschil.

We merken op dat met een lampensynchronoscoop de drie genoemde voorwaarden kunnen worden nagegaan als een generator al in dienst is. Met een V-meter gaan we de grootte van de spanning na.

Om de tijd te hebben voor het sluiten van de schakelaar bij het in parallel schakelen, regelen we de frequentie van de bij te schakelen generator zodanig dat de lampen langzaam oplichten en doven. Dan is het frequentieverschil zeer klein en kunnen we bij ge-

doofde lampen in parallel schakelen. In plaats van gloeilampen gebruiken we beter een nulvoltmeter die kan weerstaan aan het dubbele van de fasespanning. (Beide spanningen zijn dan in tegenfase.)

Op deze nulvoltmeter kunnen we dan het juiste schakelmoment beter aflezen.

Twee lampen in helderschakeling (fig. 49)

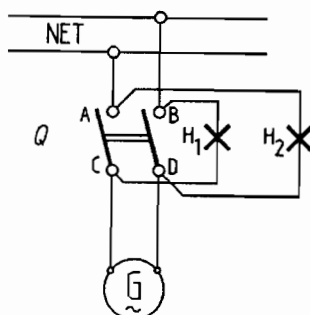


fig. 49

Bij het in fase zijn van beide spanningen worden de beide generatoren via de lampen H₁ en H₂ in serie geschakeld. De spanningen zijn in fase als de lampen het helderst branden. Zijn beide spanningen in tegenfase, dan zijn beide lampen gedoofd.

De lampen zijn elk geschikt voor een spanning die gelijk is aan de netspanning.

1.9.2 Parallel schakelen van driefasige synchrone generatoren

Doelstellingen

- De voorwaarden opsommen om twee driefasige synchrone generatoren in parallel te schakelen.
- De middelen toelichten om de synchronisatievoorwaarden na te gaan.
- De donkerschakeling van de helderschakeling onderscheiden wat schakeling en lampspanning betreft.
- De optredende verschijnselen bij helder- en donkerschakeling beschrijven voor het geval de fasevolgorde juist is.

a Principewerking

Om twee driefasige generatoren in parallel te schakelen, is het nodig dat voor elke overeenstemmende fase de twee gegenereerde spanningen op elk moment dezelfde momentele waarden hebben.

Er moet bijgevolg voldaan zijn aan vier voorwaarden:

- De fasespanningen moeten even groot zijn.
- De frequenties moeten gelijk zijn.
- De spanningen moeten onderling in fase zijn.
- De faseopvolging van beide generatoren moet dezelfde zijn.

Controle van de gelijkheid van spanningen

Dit gebeurt door middel van twee V-meters of een dubbele V-meter, zoals bij eenfasige generatoren.

Controle van de gelijkheid van frequenties

Dit gebeurt, zoals bij eenfasige generatoren, door middel van twee frequentiemeters of een dubbele frequentiemeter. De lampensynchronoscoop zal ons precies informeren over de verschilfrequentie van beide generatoren.

Controle van de faseopvolging en het in fase zijn van de spanningen

– Donkerschakeling (fig. 50)

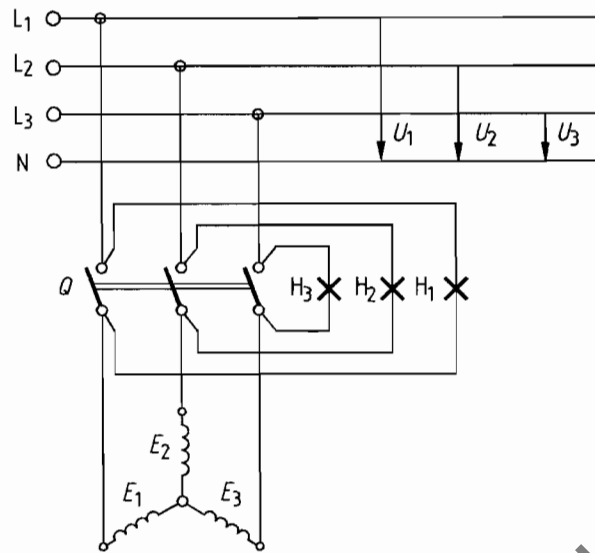


fig. 50

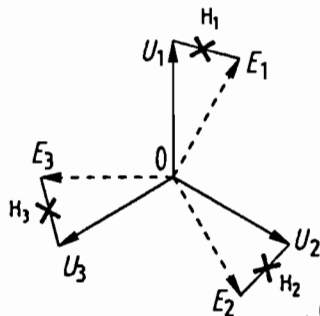


fig. 51

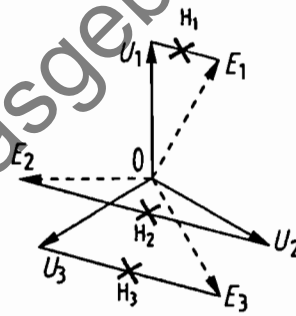


fig. 52

Per fase moeten gelijke momentele waarden van de fasespanningen aanwezig zijn. Uit fig. 51 blijkt dat, als de fasevolgorde van beide generatoren gelijk is, de potentiaalverschillen tussen de overeenkomstige fasen ($U_1 - E_1$; $U_2 - E_2$; $U_3 - E_3$) gelijktijdig en in dezelfde mate veranderen. De lampen H_1 , H_2 en H_3 gaan gelijktijdig aan en uit.

We noemen dit een *slaand* licht.

Zijn de spanningen van beide generatoren in fase, dan heerst er over de schakelaar geen potentiaalverschil: de lampen zijn gedoofd, vandaar de benaming *donkerschakeling*.

Is de fasevolgorde niet dezelfde voor beide generatoren, dan krijgen we de indruk van een *draaiend* licht, tenminste als we de lampen in driehoek opstellen volgens fig. 53. Om dat te verhelpen moeten twee fasen van de bij te schakelen generator verwisseld worden.

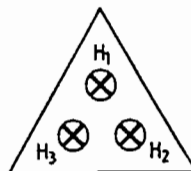


fig. 53

In het vectordiagram van fig. 52 is de toestand bij verkeerde fasevolgorde voorgesteld. Bij frequentieverschil zullen de lampen achtereenvolgens doven en oplichten. Dit verschijnsel wekt de indruk dat het licht ronddraait. (Ga dit zelf na!)

– Hielderschakeling

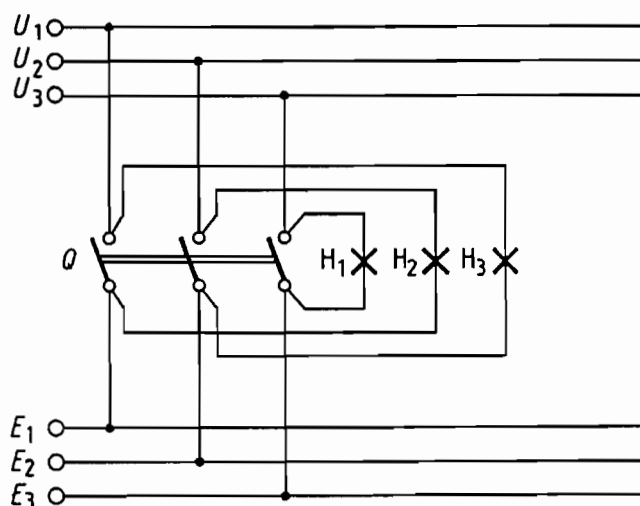


fig. 54

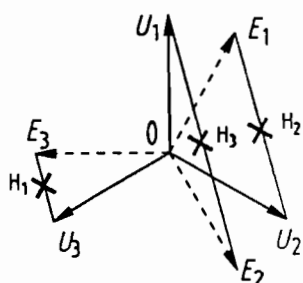


fig. 55

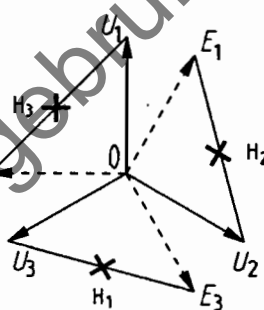


fig. 56

De lampen worden nu geschakeld zoals aangegeven in fig. 54. Bij juiste fasevolgorde ontstaat een draaiend licht. De spanningen zijn in fase als H_1 gedoofd is en H_2 en H_3 even helder branden (fig. 55). De schakelaar kan dan gesloten worden. Bij verkeerde fasevolgorde ontstaat er slaand licht en moeten twee fasen van de bij te schakelen generator verwisseld worden (fig. 56).

De frequentie waarmee het licht slaat of draait, geeft de maat van de verschilfrequentie tussen beide generatoren. Afhankelijk van de draaizin van het draaiend licht kan men bepalen of de bij te schakelen synchrone generator te snel of te traag draait. In de praktijk laten we de bij te schakelen generator liefst iets 'te snel' draaien. Het evenwicht zal zich automatisch instellen. (Zie stabiliteit.) De lampen moeten kunnen weerstaan aan de dubbele waarde van de fasespanning van de generator.

Toelichting

Controle van de faseopeenvolging

De faseopeenvolging kan, zoals al gezien, gebeuren met een lampensynchronoscoop. Het is ook mogelijk ze te controleren met behulp van een draaiveldzinaanwijzer met neonlampjes of met behulp van een draaiveldzinaanwijzer met inductieschijf of asynchrone motor.

De verdere studie van de genoemde toestellen wordt hier achterwege gelaten.

Daarvoor kan worden verwezen naar de cursus elektrische metingen of laboratorium.

Controle van het in fase zijn

De controle van het in fase zijn kan, zoals al gezien, gebeuren met een lampensynchroscoop. Er bestaat ook een motorsynchroscoop die ons het juiste tijdstip van in fase zijn aangeeft.

Moderne elektrische centrales

Bij moderne elektrische centrales gebeurt het bijschakelen van generatoren op het voedingsnet tegenwoordig automatisch, na het indrukken van een commandoschakelaar.

Nulvoltmeter

Door het feit dat een gewone gloeilamp niet zichtbaar oplicht voor een spanning onder 25 à 30 % van de nominale waarde, is het moeilijk vast te stellen of de spanning aan de klemmen van de lamp in donkerschakeling werkelijk nul is of niet. Om die reden kan men deze lamp beter vervangen door een nulvoltmeter die aan de dubbele waarde van de fasespanning kan weerstaan.

Hoogspanning

In hoogspanningsinstallaties worden dezelfde meetinstrumenten toegepast. Men moet ze echter aansluiten via meettransformatoren.

b Het praktisch uitvoeren van de synchronisatie

Doelstelling

- Aan de hand van een principieschema de opeenvolgende handelingen beschrijven die nodig zijn om twee synchrone generatoren in parallel te schakelen.

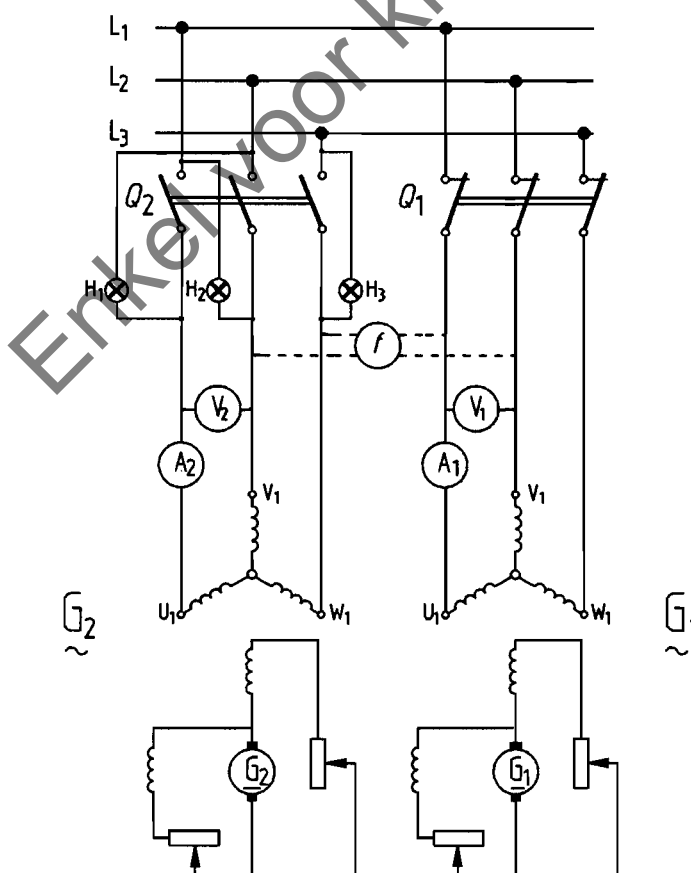


fig. 57

- 1 Generator G_1 levert aan het net een bepaald vermogen. In het vooruitzicht van een toename van de belasting wenst men generator G_2 bij te schakelen.
 - 2 Men drijft G_2 aan tot zijn nominale rotatiefrequentie. Men regelt zijn snelheid zodat zijn frequentie gelijk wordt aan die van generator G_1 .
 - 3 Men regelt de bekrachtiging van G_2 zodat zijn opgewekte spanning gelijk wordt aan die van G_1 . Te controleren m.b.v. de voltmeters V_1 en V_2 ; $E_{02} = U_{\text{net}}$.
 - 4 Controle van de juiste faseopvolging.
Men moet een draaiend licht krijgen. Is dit niet het geval, dan verwisselen we twee netdraden van G_2 .
 - 5 Het in fase brengen.
Men regelt de rotatiefrequentie van G_2 zodanig dat het oplichten en doven van de lampen zeer traag verloopt. Op het ogenblik dat lamp H_3 gedoofd is, mag men de netschakelaar Q_2 sluiten. De generatoren zijn nu gesynchroniseerd. Bij moderne installaties gebeuren de synchronisatiehandelingen volledig automatisch. De generator G_2 levert echter, na de synchronisatiehandelingen, nog geen vermogen aan het net. Om de generator G_2 vermogen aan het net te laten leveren, zijn verdere ingrepen noodzakelijk. (Zie d.)
- c *Stabiliteit van de parallelwerking en verdeling van de belasting over de in parallel geschakelde generatoren*

Doelstelling

- Aan de hand van vectordiagrammen de stabiliteit van de parallelwerking aantonen.

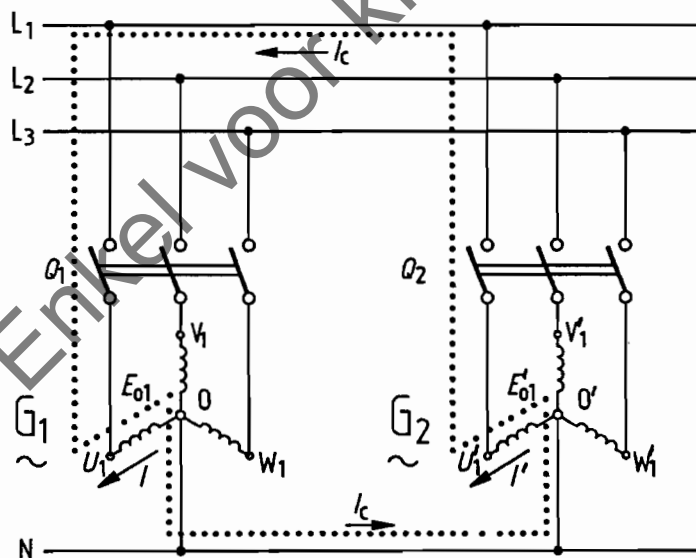


fig. 58

Onderstel twee identieke synchrone generatoren die in parallel (Q_1 en Q_2 gesloten) geschakeld zijn. Ze leveren beide de helft van het totale vermogen, gevraagd door de verbruikers. Aangezien een driefasige synchrone generator te beschouwen is als drie eenfasige generatoren, bekijken we het vectordiagram van één fase. Bij een evenwichtige belasting zal het vectordiagram voor de andere fasen identiek zijn.

Bekijken we een evenwichtige belasting die per fase een stroomsterkte I opneemt en φ graden verschoven is t.o.v. U . De gegenereerde spanning van bv. fase OU_1 is dan:

$$\vec{E}_{01} = \vec{U}_1 + \vec{I} \cdot \vec{R}_A + \vec{I} \cdot \vec{X}_s$$

met

R_A : de effectieve weerstand per fase

X_s : de synchrone reactantie

U_1 : de faseklemspanning of uitwendige fasespanning van de generator

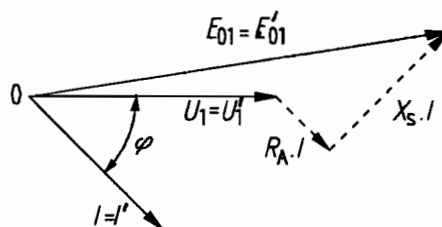


fig. 59

Het vectordiagram van fase $O'U'_1$ is identiek aan en in fase met dat van fase OU_1 (fig. 59). In normale werkomstandigheden vallen beide vectordiagrammen samen en overlappen ze elkaar volledig. Om na te gaan of de parallelwerking stabiel is, veronderstellen we een onevenwicht en gaan na of er neiging bestaat om de oorspronkelijke toestand opnieuw in te nemen. We stellen verder voorop dat de klemspanning per fase U is en dat ze dat ook moet blijven.

Generator G_2 versnelt

Een gevolg van het iets sneller draaien is, dat de frequentie $f_2 = p \cdot n_2$ iets groter wordt en dat de gegenereerde spanning $E'_{01} = K \cdot \phi \cdot N \cdot f_2$ toeneemt. Dit resulteert in het vectordiagram van fig. 60.

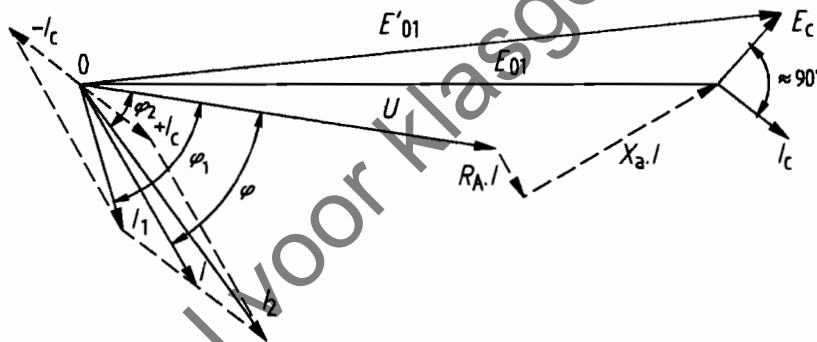


fig. 60

Door het vergroten en het voorrijlen van E'_{01} , ontstaat er in kring $OU_1U'_1O'_N$ een verschilspanning E_c . Deze verschilspanning heeft een circulatiestroom I_c die bijna 90° najlt op E_c tot gevolg. Deze circulatiestroom zal generator G_2 meer ($I' + I_c$) en G_1 minder ($I' - I_c$) belasten. Op het vectordiagram resulteert dit in een stroom I_2 voor G_2 en I_1 voor G_1 .

Het actieve geleverde vermogen van G_2

$$P_{G2} = 3 U \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$$

is groter dan het oorspronkelijk geleverde vermogen dat gelijk was aan $P_{G2} = 3 U \cdot I \cdot \cos \varphi$

Het actieve geleverde vermogen van G_1

$$P_{G1} = 3 U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

is kleiner dan het oorspronkelijk geleverde vermogen dat gelijk was aan $P_{G1} = 3 U \cdot I \cdot \cos \varphi$

De versnellende generator G_2 wordt dus meer belast, terwijl G_1 ontlast wordt. G_2 zal hierdoor vertragen en G_1 versnellen, zodat er opnieuw een evenwicht ontstaat op de synchrone rotatiefrequentie. Er bestaat dus een natuurlijke neiging om tot de oorspronkelijke werkvoorwaarden terug te komen. We noemen de werking stabiel.

Generator G_2 genereert een hogere spanning

Door een toename van de bekrachtigingsstroom van generator G_2 (of een afname van de bekrachtigingsstroom van generator G_1) zal een situatie ontstaan die tot gevolg heeft dat generator G_2 een hogere spanning genereert dan generator G_1 . In fig. 61 zien we het optredende verschijnsel vectorieel voorgesteld.

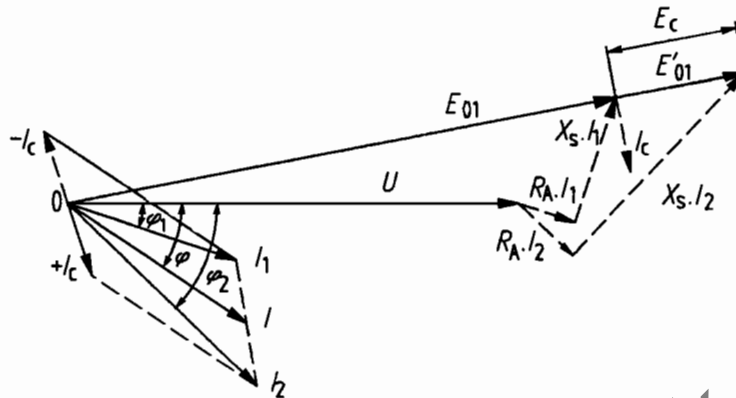


fig. 61

Aangezien de heersende klemspanning U constant blijft, is het gevolg van deze 'storing' dat er een verschilspanning E_c ontstaat die een circulatiestroom I_c (90° naijlend) doet vloeien. Deze circulatiestroom I_c zal, samen met de oorspronkelijke stroom I de generator G_2 meer belasten (het actieve vermogen neemt toe) en generator G_1 deels ontlasten. Een direct gevolg van deze toestand is dat generator G_2 omwille van zijn bijkomende belasting iets zal vertragen en dat generator G_1 omwille van zijn ontlasting iets zal versnellen. Door deze verandering in rotatiefrequentie zal er tussen E_{01} en E'_{01} toch een faseverschuiving ontstaan. De spanning E'_{01} gaat iets nauwelijks t.o.v. E_{01} . Vectorieel stellen we deze situatie voor in fig. 62.

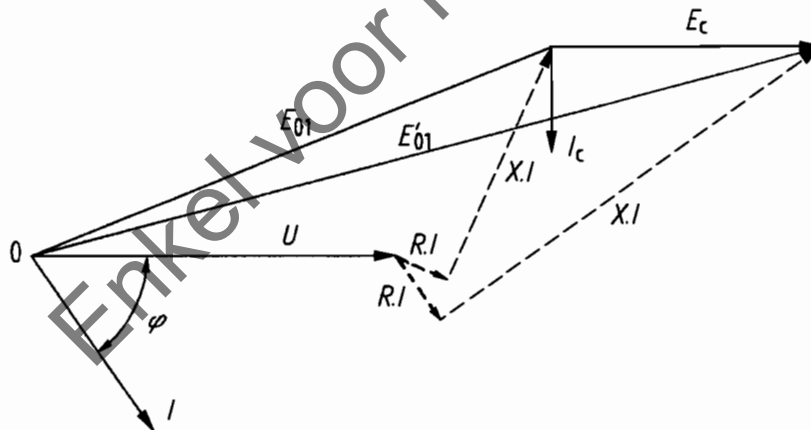


fig. 62

In het vectordiagram van fig. 62 merken we dat de verschilspanningsfactor, samen met de circulatiestroom, in vergelijking met fig. 61 in de wijzerzin verdraait. Vanaf het ogenblik dat de stroom I_c loodrecht op de klemspanning U staat, is er een nieuw evenwicht bereikt. De afgeleverde actieve vermogens van beide generatoren G_1 en G_2 zijn weer aan elkaar gelijk. We stellen echter vast dat de geleverde reactieve vermogens van beide generatoren niet meer aan elkaar gelijk zijn en dat er een circulatiestroom blijft vloeien. De verdere stroomlevering aan het net door beide generatoren is echter verzekerd.

d Verdeling van het vermogen

Doelstelling

- De werkwijze voor het verdelen van het actieve en het reactieve vermogen over twee in parallel geschakelde generatoren toelichten.

Willen we generator G_2 meer actief vermogen laten leveren dan G_1 , dan is het noodzakelijk het toegevoerde vermogen naar G_1 te verminderen en het toegevoerde vermogen naar G_2 te vermeerderen. Door uitsluitend de bekrachtigingsstroom te veranderen, is het niet mogelijk een actieve vermogenverdeling te realiseren. Er ontstaat enkel een circulatiestroom die het reactieve vermogen van beide generatoren wijzigt. Het wijzigen van de bekrachtigingsstroom zal worden toegepast om het totale blinde vermogen van het net te verdelen over beide in parallel werkende generatoren.

1.10 Spanningsregeling van synchrone generatoren

1.10.1 Algemeenheden

Doelstelling

- De algemene theorie voor de automatische spanningsregeling toelichten.

Uit de uitwendige karakteristiek van een synchrone generator weten we dat de klemspanning wijzigt bij veranderlijke belasting terwijl de bekrachtigingsstroom constant is. Een synchrone generator moet in de praktijk omwille van zijn constante frequentie een constante rotatiefrequentie behouden. De klemspanningsverandering is dan enkel een gevolg van de ankerreactie en de ohmse spanningsval in de ankerwikkeling. Om een constante klemspanning te krijgen zullen we, bij veranderlijke belasting, voortdurend op de bekrachtigingsstroom moeten inwerken.

Deze bekrachtigingsstroom voor de bekrachtigingswikkeling van de synchrone generator wordt dikwijls geleverd door een gelijkstroomgenerator met shuntbekräftiging of door een gelijkspanningsgenerator (hoofdgenerator) die afzonderlijk wordt bekräftigd door een shuntgenerator (hulpgenerator). Deze gelijkspanningsgeneratoren zijn gekoppeld op de as van de synchrone generator. In fig. 63 en 64 treffen we een principeopstellingsschema van beide uitvoeringen aan.

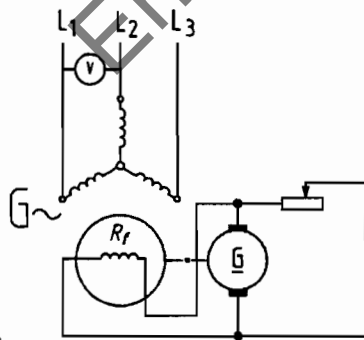


fig. 63

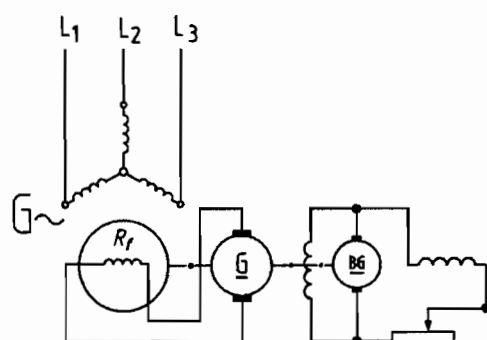


fig. 64

De bekräftigingsstroom wordt meestal via de slepringen naar de bekräftigingswikkeling gevoerd. De gelijkstroomhoofdgenerator kan ook vervangen worden door een synchrone generator waarvan de spanning wordt gelijkgericht.

Bij buitenpoolmachines worden op de draaiende rotor buiten de ankerwikkeling ook de meedraaiende siliciumdioden gemonteerd. De gelijkstroom kan nu rechtstreeks (eventueel via een holle as) naar de bekräftigingswikkeling van de synchrone generator wor-

den gevoerd. In dit geval zijn sleepringen en borstels overbodig. In fig. 65 is een opstellingsschema schematisch weergegeven.

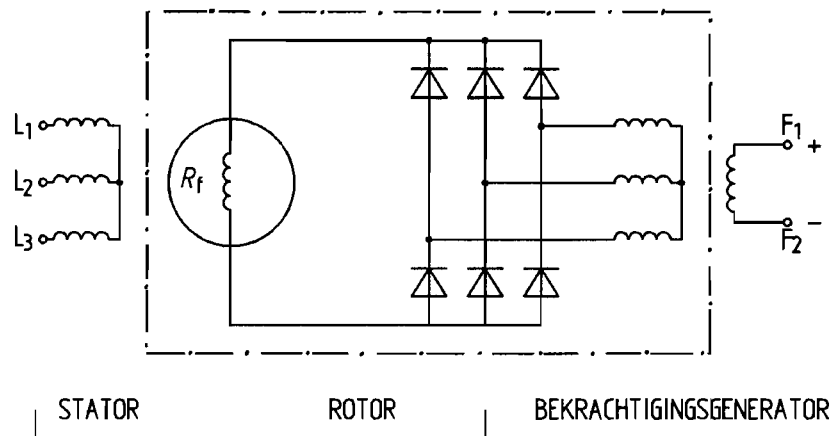


fig. 65

Tegenwoordig worden alsmaar meer thyristoren toegepast in de bekrachtigingsketen voor synchrone generatoren. Er worden systemen geconstrueerd voor zelfbekracting. De elektrische energie van de bekrachtigingsketen is dan afkomstig van de synchrone generator zelf. De wisselstroomenergie wordt dan via een gestuurde gelijkrichter (thyristorschakeling) naar de bekrachtigingswikkeling van de synchrone generator gestuurd.

1.10.2 Voorbeeld van automatische spanningsregeling

Doelstelling

- De principewerking van de statische bekracting van een synchrone generator toelichten.

Statische bekracting (fig. 66)

De voornaamste onderdelen zijn:

- het opwekkingssysteem van de bekrachtigingsstroom;
- de referentiecel;
- de faseverschuiver van impulsen (D).

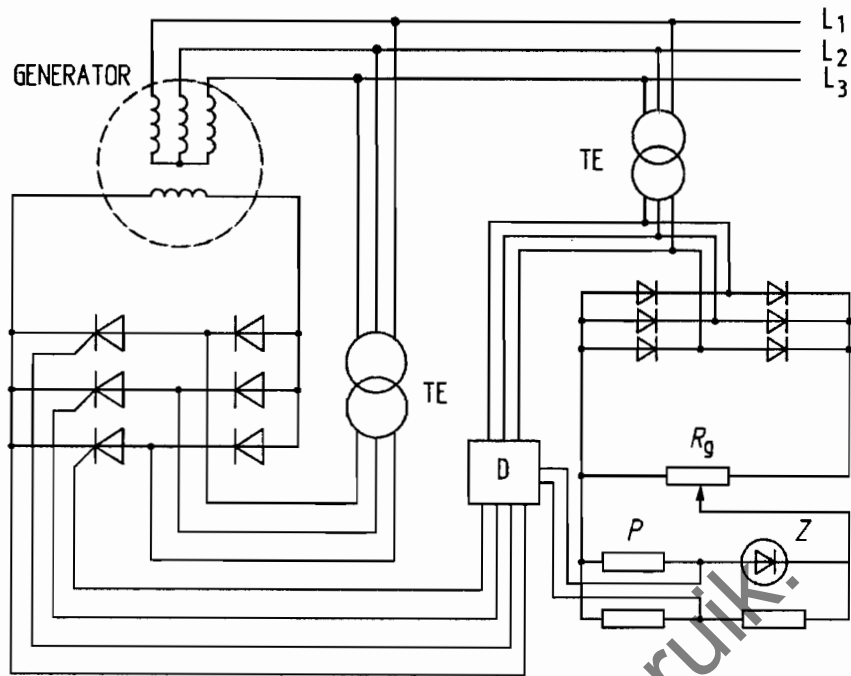


fig. 66

– *Het opwekkingssysteem van de bekrachtigingsstroom*

De bekrachtigingsstroom wordt verkregen door het gelijkrichten van de opgewekte wisselspanning van de generator zelf (zelfbekräftiging). Het systeem bestaat uit een stel van vier of zes gelijkrichters in enkel- of driefasige brugschakeling. De helft van de gelijkrichters zijn stuurbare gelijkrichters of thyristoren. De thyristoren zelf worden gestuurd met impulsen afkomstig van de faseverschuiver van impulsen. De waarde van de bekräftigingsstroom kan veranderen tussen een minimumwaarde (maximale faseverschuiving van de impulsen) en een maximumwaarde (minimale verschuiving van de impulsen).

– *De referentiecel*

Het geheel vormt een brug van Wheatstone. Drie takken ervan worden gevormd door vaste weerstanden, de vierde tak bevat een Zenerdiode. De referentiecel vergelijkt de gelijkgerichte generatorspanning met de constante referentiespanning. De verschilspanning veroorzaakt een stuursignaal. Dit stuursignaal wordt gevoerd naar de faseverschuiver van impulsen.

– *De faseverschuiver van impulsen*

Deze vormt het signaal, afkomstig van de referentiecel, om tot impulsen waarvan de fase t.o.v. de spanning van de wisselstroomgenerator afhankelijk is van de amplitude van de verschilspanning van de referentiecel. Deze impulsen worden toegevoerd naar de *gate* van de thyristoren.

De streefspanning wordt ingesteld door middel van de regelweerstand R_g , opgenomen in de referentiecel. Een drukknopsysteem biedt de mogelijkheid, bij de aanloop van de generator, met behulp van een batterij een stroomimpuls te sturen in de veldwikkeling. Dit is noodzakelijk wanneer het remanent magnetisme onvoldoende of onbestaand zou blijken.

1.11 Koeling van generatoren

Doelstelling

- De middelen toelichten om de ontwikkelde warmte in een synchrone generator af te voeren.

Opvoeren van het vermogen van een generator kan worden bereikt door het vergroten van de afmetingen of de rotatiefrequentie van de machine. Deze zijn echter door tal van factoren beperkt, bv. trillingen optredend tijdens de aanloop of bij het overschrijden van de kritische rotatiefrequentie. (Hoe groter de lengte, hoe lager de kritische snelheid. Men gaat normaal tot tweemaal boven de kritische snelheid!)

Inzake afmetingen en snelheden bereikte men grensvermogens die moeilijk te overschrijden zijn. Een verdere vergroting van het vermogen kon slechts worden bereikt door de relatieve vermindering van de verliezen en vooral door verbetering van de warmteafvoer of koeling.

Als middelen ter verbetering van de warmteafvoer worden gebruikt:

- *ventilatie*: natuurlijk of gedwongen bij vliegwielfgeneratoren met horizontale as; ventilatie in gesloten kring bij vliegwielfgeneratoren met verticale as en bij turbogeneratoren;
- toepassen van *holle koperen geleiders* in de rotor zodat de warmteafvoer rechtstreeks van het koper op het koelmiddel gebeurt;
- toepassen van *groefvormen* of kanalen voor het geleiden van koelmiddelen in de turborotor (zie fig. 67);
- *waterstofgaskoeling*:
Deze manier van koeling biedt zekere voordelen.
 - a De dichtheid van H_2 is 14-maal kleiner dan die van lucht, waardoor men minder ventilatieverlies heeft met verhoging van het rendement tot gevolg.
 - b Waterstof bezit een (7-maal) grotere thermische geleidbaarheid en een (1,3-maal) grotere convectiecoëfficiënt dan lucht. Hierdoor neemt waterstof beter de warmte op.
 - c Waterstof is een zuiver gas, m.a.w. men dient geen rekening te houden met vocht (oxidatie) en met stof: de onderdelen blijven zuiver waardoor de koeling beter is.
 - d Er is geen zuurstof, dus ook geen oxidatie.

Waterstofkoeling vereist echter bijzondere voorzorgen. Waterstof, in een bepaalde verhouding met zuurstof gemengd vormt het bekende *knalgas*. Hierdoor is het noodzakelijk het statorhuis ontploffingsvast te maken.

Het vullen en verwijderen van H_2 gebeurt als volgt:

vullen: eerst de lucht verdrijven met CO_2 , daarna CO_2 verdrijven met H_2 ;

verwijderen: H_2 vervangen door CO_2 , dit laatste vervangen door lucht.

- *vloeistofkoeling*: hierbij wordt tussen stator en rotor een vloeistofdichte scheiding gemaakt, zodat men de hele stator met stromende olie of een ander middel kan koelen.

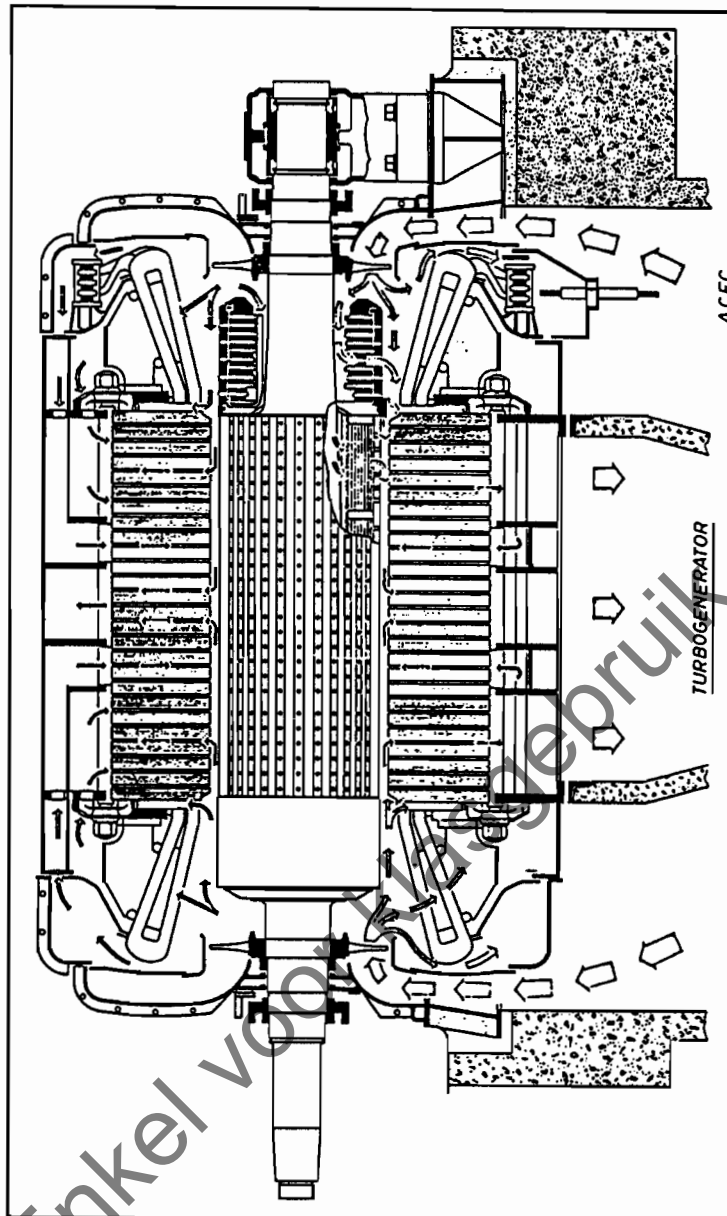


fig. 67

1.12 Voorbeelden

- 1 Een zespolige wisselstroomgenerator moet een spanning opwekken met frequentie 60 Hz. Hoe groot moet de rotatiefrequentie van de machine zijn?

Oplossing

Uit de formule $f = p \cdot n$ volgt: $n = \frac{f}{p} = \frac{60}{3} = 20 \text{ omw/s of } 20 \text{ s}^{-1}$.

- 2 Een eenfasige wisselstroomgenerator is vierpolig uitgevoerd. Per pool zijn er 8 statorgleuven; in elke gleuf worden 20 staven geplaatst. De flux per pool bedraagt 0,016 Wb. De rotatiefrequentie is 25 s^{-1} . Hoe groot is de opgewekte nullastspanning als de machinefactor $K = 4$?

Oplossing

$$E = K \cdot \phi \cdot N \cdot f$$

Het totale aantal staven bedraagt $2p \cdot g \cdot 20$ staven/gleuf $= 4 \cdot 20 \cdot 8 = 640$.

Dit vormt $N = 640 : 2 = 320$ windingen.

De opgewekte spanning bedraagt dan:

$$E = K \cdot \phi \cdot N \cdot p \cdot n$$

$$E = 4 \cdot 0,016 \cdot 320 \cdot 2 \cdot 25 = 1024 \text{ V}$$

- 3 Een zespolige, eenfasige wisselstroomgenerator heeft een stator met 3 gleuven per pool waarbij in elke gleuf 50 draden liggen. De opgewekte spanning is 500 V bij een frequentie van 50 Hz. De wikkelfactor of factor van Kapp is 3,898. Hoe groot is de flux per pool?

Oplossing

Men heeft: $E = K \cdot \phi \cdot N \cdot f$

Het totale aantal geleiders is: $2p \cdot g \cdot 50$ draden/gleuf $= 6 \cdot 3 \cdot 50 = 900$

Dit vormt $N = \frac{900}{2} = 450$ windingen, waaruit:

$$\phi = \frac{E}{K \cdot N \cdot f} = \frac{500}{3,898 \cdot 450 \cdot 50} = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

- 4 Men wenst met een wisselstroomgenerator (eenfasig en tienpolig) een spanning van 1000 V, 50 Hz op te wekken bij een poolflux van $9,3 \cdot 10^{-3}$ Wb en een machinefactor 4,3. De generatorwikkeling omvat 500 windingen. Hoe groot moet de rotatiefrequentie zijn?

Oplossing

Men heeft: $E = K \cdot \phi \cdot N \cdot p \cdot n$

waaruit:

$$n = \frac{E}{K \cdot \phi \cdot N \cdot p} = \frac{1000}{4,3 \cdot 9,3 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \cdot 5} = 10 \text{ s}^{-1}$$

- 5 Een driefasige synchrone generator heeft vier polen en 42 gleuven. In elke gleuf telt men 20 draden. Bereken de lijnspanning bij sterschakeling als je weet dat de rotor 25 omwentelingen maakt per seconde, de flux per pool $4,5 \cdot 10^{-3}$ Wb en de machinefactor 4 is.

Oplossing

Het totale aantal ankerdraden is $42 \cdot 20 = 840$.

Dit vormt $N = \frac{840}{2} = 420$ windingen.

Per fase zijn er $\frac{N}{3} = \frac{420}{3} = 140$ windingen.

De gegenereerde fasespanning

$$E = K \cdot \phi \cdot N \cdot p \cdot n$$

$$= 4 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 140 \cdot 2 \cdot 25 = 126 \text{ V}$$

De lijnspanning

$$E_L = E \cdot \sqrt{3} = 218,2 \text{ V}$$

- 6 Een driefasige wisselstroomgenerator is geconstrueerd voor acht polen en werd daarom 4-gaats gewikkeld. Bereken het aantal statorgleuven en statorspoelen.

Oplossing

Omdat de machine 8-polig is uitgevoerd is $p = 4$; bijgevolg bestaat elke fase uit 4 spoelen. In het totaal zijn er $4 \cdot 3$ (fasen) = 12 spoelen.

4-gaatswikkeling betekent 4 gleuven per spoelzijde. Voor de 12 aanwezige spoelen (24 spoelzijden) betekent dit: $24 \cdot 4 = 96$ statorgleuven.

- 7 Een driefasige wisselstroomgenerator is in ster geschakeld en voert een stroom naar de verbruiker van 150 A. De arbeidsfactor is 0,76604 en de lijnspanning aan de klemmen van de alternator is 866 V. De synchrone reactantie per fase is $0,8 \Omega$; de effectieve weerstand van elke fase is $0,08 \Omega$. Bereken de gegenereerde spanning per fase.

Oplossing

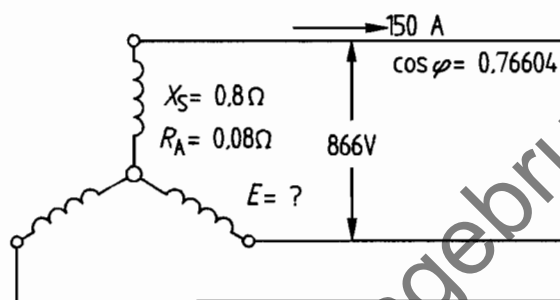


fig. 68

$$U_R = R_A \cdot I = 0,08 \cdot 150 = 12 \text{ V}$$

$$U_{Xs} = X_s \cdot I = 0,8 \cdot 150 = 120 \text{ V}$$

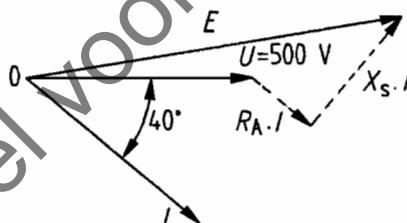


fig. 69

$$\begin{aligned} E &= U \angle 0^\circ + R_A \cdot I \angle -40^\circ + X_s \cdot I \angle 50^\circ \\ &= 500 + j0 + 9,1925 - j7,713 + 77,134 + j91,925 \\ &= 586,326 + j84,21 \\ &= 592,34 \angle 8^\circ 10' 23'' \end{aligned}$$

1.13 Toepassingen

- 1 Bereken het aantal polen van een wisselstroomgenerator zodat bij een rotatiefrequentie 50 s^{-1} een spanning met frequentie 50 Hz wordt opgewekt.
- 2 Een zespolige, eenfasige generator heeft een wikkeling bestaande uit 300 staven. De wikkeling werd 5-gaats uitgevoerd. Bereken het aantal staven per pool en per gleuf.
- 3 Een eenfasige, vierpolige wisselstroomgenerator heeft een stator met 9 gleuven per pool. Elke gleuf bevat 20 staven. De poolflux per pool bedraagt $18 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$. De rotor heeft een rotatiefrequentie van 50 s^{-1} . Hoe groot is de opgewekte nullastspanning als de machinefactor 3,8 bedraagt?

- 4 Als bij de vorige opgave een in ster geschakelde, driefasige generator gebruikt wordt, hoe groot zijn dan, bij dezelfde gegevens, de fase- en de lijnspanning?
- 5 Een eenfasige wisselstroomgenerator wekt een spanning op van 380 V, 50 Hz bij een omwentelingssnelheid van 1500 omwentelingen per minuut. De flux per pool bedraagt $2 \cdot 10^{-3}$ Wb. De wikkelfactor is 4,1. Hoe groot is het aantal polen en het aantal statorgeleiders?
- 6 Bij een eenfasige wisselstroomgenerator is de bekrachtigingsstroom 2 A; elke pool bevat 400 windingen en de poolflux bedraagt $4 \cdot 10^{-2}$ Wb. Hoe groot is de magnetische reluctantie van de magnetische kring?
- 7 Een eenfasige wisselstroomgenerator levert een wisselstroom van 100 A bij 500 V en 50 Hz. De generatorwikkeling heeft een gelijkstroomweerstand van $0,1 \Omega$ en de coëfficiënt van zelfinductie is $1,27 \cdot 10^{-3}$ H. De faseverschuiving tussen spanning en stroom bedraagt 30° el. Hoe groot zijn het inductieve en ohmse spanningsverlies in de wikkelsweerstand? Hoe groot is tevens de opgewekte spanning?
- 8 Een tweepolige driefasige synchrone generator is in ster geschakeld. De effectieve weerstand per fase $R_A = 0,1 \Omega$ en de synchrone reactantie $X_s = 0,8 \Omega$. Het schijnbare vermogen van de generator is 100 kVA. De aangesloten verbruiker veroorzaakt een arbeidsfactor van 0,8 en de lijnspanning (belast) meet 1732 V. Het vermogen opgenomen door de bekrachtigingsketen is 1000 W en $P_{Fe} + P_{mechanisch} = 800$ W. Bereken de gegenereerde spanning van elke fasewikkeling, het rendement bij vollast ($\cos \varphi = 0,8$) en de jouleverliezen in de statorwikkelingen.

1.14 Diagnostische toets

Zie Toetsenboekje.

1.15 Herhalingstaken – Basis

- 1 Een eenfasige wisselstroomgenerator draait met een snelheid van 1410 omwentelingen per minuut. Het aantal polen bedraagt 4. Hoe groot is de frequentie van de opgewekte spanning? Met welke rotatiefrequentie moet de machine draaien om een frequentie van 50 Hz te krijgen?
- 2 Een driefasige wisselstroomgenerator heeft de volgende kenmerken:
4-polige uitvoering; 42 statorgleuven met in elke gleuf 10 staven.
Poolflux: $4 \cdot 10^{-2}$ Wb;
 $n = 25 \text{ s}^{-1}$; machinefactor: 4,1.
Bereken de lijnspanning bij sterschakeling en nullast.
- 3 Een turbine met een opgenomen vermogen van 2000 kW bij een rendement van 0,85 drijft een eenfasige wisselstroomgenerator met rendement 0,9 aan. Deze levert aan een belasting een stroom van 300 A bij een lijnspanning van 10 kV. Hoe groot is de arbeidsfactor van de belasting?
- 4 Bij een eenfasige wisselstroomgenerator is het toegevoegde vermogen 1000 kW bij een rendement van 0,76. De klemspanning is 3000 V. Het jouleverlies in de statorwikkeling bedraagt 50 kW bij een arbeidsfactor 1.
Bereken: – het nuttige vermogen;
– de totale verliezen in de generator;
– de totale mechanische en ijzerverliezen;
– de statorstroom;
– de effectieve weerstand van de statorwikkeling.
- 5 De effectieve weerstand van een fasewikkeling van een in ster geschakelde wisselstroomgenerator is $0,03 \Omega$. De synchrone reactantie is $0,25 \Omega$. Bij een arbeidsfactor

van 0,8 levert de generator een vermogen van 100 MW. De lijnspanning is 14,722 kV. Hoe groot is de gegenereerde spanning per fase?

1.16 Verrijkingsopdrachten

- 1 Een eenfasige wisselstroomgenerator ($\eta = 0,85$) wordt aangedreven door een gelijkstroommotor. Deze motor slurpt een vermogen op van 750 kW bij een rendement van 0,79. De klemspanning van de generator bedraagt 1500 V; $\cos \varphi = 1$. Het koperverlies van de generator is 35 kW.
Hoe groot zijn de ijzer- en mechanische verliezen van de generator? Bereken tevens de effectieve weerstand van de statorwikkeling.
- 2 Een driefasige generator doet 300 omwentelingen per minuut. De generator is in ster geschakeld en levert bij nullast een spanning van 10 000 V, 50 Hz. De statorwikkeling is 4-gaats uitgevoerd met 12 geleiders per gleuf.
Bereken het aantal polen, het totale aantal statorgleuven en statorgeleiders, de opgewekte fasespanning en de poolflux. De machinefactor is 4.
- 3 Een tweepolige driefasige wisselstroomgenerator, in ster geschakeld, levert een schijnbaar vermogen van 10 MVA, 50 Hz; $\cos \varphi = 0,8$ bij 6600 V lijnspanning. De ijzer- en mechanische verliezen bedragen 150 kW. Het bekrachtigingsvermogen is 80 kW bij een lijnspanning van 400 V. De effectieve weerstand van de statorwikkeling is $0,05 \Omega$, de synchrone reactantie bedraagt 1Ω .
Bereken: het nuttige actieve vermogen, de statorstroomsterkte, het jouleverlies in de statorwikkeling, het totaal toe te voeren vermogen, het rendement bij een arbeidsfactor 0,8, het ohmse en inductieve spanningsverlies in de stator, de klemspanning per fase, de geïnduceerde spanning in elke fasewikkeling en de bekrachtigingsstroom.
- 4 Bij een opstelling motor-wisselstroomgenerator (eenfasig) worden de volgende metingswaarden genoteerd:
 - Nullastwerking van de onbekrachtigde generator: opgeslorpt vermogen van de aandrijvende motor 150 kW. De motor heeft een constant verondersteld rendement van 0,87.
 - Nullastwerking van de generator met nominale bekrachtiging: opgeslorpt vermogen 200 kW.
 - Kortsluitbedrijf van de generator met verminderde bekrachtiging tot het verkrijgen van de nominale statorstroom $I_{\text{stator}} = 175 \text{ A}$. Het opgeslorpte vermogen door de motor bedraagt dan 350 kW. De ijzerverliezen mogen wegens de kleine bekrachtigingswaarde verwaarloosd worden.
 - De klemspanning van de generator bij vollastbedrijf en $\cos \varphi = 0,8$ bedraagt 9800 V.
 Bereken:
 - het mechanische verlies, het ijzer- en koperverlies;
 - het nullastvermogen;
 - het nuttige en totale vollastvermogen van de generator bij $\cos \varphi = 0,8$;
 - het rendement bij vollast en $\cos \varphi = 0,8$.
- 5 Een driefasige synchrone generator, in ster geschakeld, heeft per fase een gelijkstroomweerstand van $0,028 \Omega$ en een synchrone reactantie van $0,3 \Omega$. De belasting neemt een actief vermogen op van 300 MW bij $\cos \varphi = 0,93969$ en lijnspanning 20 784,6 V. De bekrachtigingswikkeling neemt een stroom op van 4000 A onder een spanning van 400 V. De mechanische en ijzerverliezen samen bedragen 3 MW.
Bereken de gegenereerde spanning per fase en het totale rendement van de wisselstroomgenerator.

SYNTHESE

Synchrone wisselstroomgeneratoren

Definitie

Een synchrone wisselstroomgenerator is een elektrische machine die mechanische energie omzet in een- of meerfasige wisselstroomenergie.

'Synchroon' slaat op het fenomeen dat er een vast verband is tussen de rotatiefrequentie van de rotor en de frequentie van de gegenereerde spanning.

Principewerking

Een winding die met een constante hoeksnelheid binnen een uniform magnetisch veld rond haar as draait, genereert een sinusoidale wisselspanning met waarde:

$$e = E_m \cdot \sin \omega t$$

Naar gelang van de praktische uitvoering onderscheiden we:

- buitenpoolmachines;
- binnenpoolmachines.

De *ankerwikkeling* is altijd de wikkeling waarin de spanning gegenereerd wordt, ongeacht het feit dat die zich op de stator of de rotor bevindt.

Voor de *rotor* onderscheiden we twee constructievormen:

- de rotor met lichamelijke polen voor traag draaiende generatoren;
- de rotor met constante lengte van de luchtspleet voor snel draaiende generatoren.

De ankerwikkeling kan eenfasig of driefasig uitgevoerd worden.

Bij een driefasige ankerwikkeling kunnen de fasewikkelingen in ster of in driehoek geschakeld worden.

Een driefasige wikkeling is economisch voordeliger dan een eenfasige wikkeling.

Elektrische grootheden

De *frequentie* van de gegenereerde spanning

$$f = p \cdot n \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

met p : het aantal paar polen
 n : de rotatiefrequentie in s^{-1}

De *gegenereerde spanning* per fasewikkeling

$$E = K \cdot \phi \cdot N \cdot f \text{ (V)}$$

met K : de factor van Kapp of machinefactor
 N : het aantal windingen van de fasewikkeling
 f : de frequentie van de gegenereerde spanning
 ϕ : de magnetische flux per pool
 E : de effectieve waarde van de gegenereerde spanning per fasewikkeling

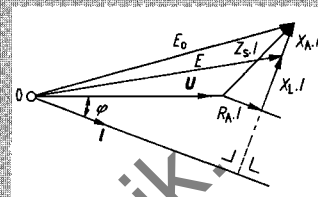
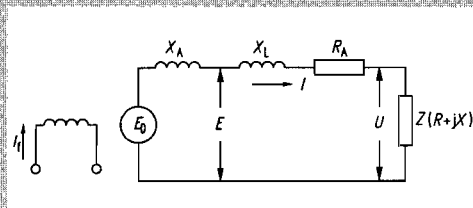
Uit de formule blijkt dat spanningsregeling bij synchrone generatoren praktisch enkel mogelijk is door het regelen van de poolflux ϕ .

Gedrag van de synchrone generator bij belasting

Naar gelang van het type van belasting zal de waarde van de gegenereerde spanning wijzigen. Zo zal bij een toenemende

- ohmse belasting de gegenereerde spanning nagenoeg constant blijven;
- inductieve belasting de gegenereerde spanning verminderen;
- capacatieve belasting de gegenereerde spanning toenemen.

Voor het berekenen van de elektrische grootheden hebben we steeds de equivalenten keten van een wisselstroomgenerator ter beschikking. Op basis van de equivalenten keten is het dan mogelijk om de spanningsdiagrammen per type belasting af te leiden.



Karakteristieken van een synchrone generator

Als voornaamste karakteristieken vermelden we:

- de nullastkarakteristiek $E_0 = f(I_f)$ met $n = \text{constant}$ en $I = 0$
- de uitwendige karakteristiek $U = f(I)$ met n, I_f en $\cos \varphi = \text{constant}$
- de kortsluitkarakteristiek $I_k = f(I_f)$ met $n = \text{constant}$ en $U = 0$
- de regelkarakteristiek $I_f = f(I)$ met n, U en $\cos \varphi = \text{constant}$

Vermogen en rendement van wisselstroomgeneratoren

Vermogen

Het meest kenmerkende vermogen van een wisselstroomgenerator is het schijnbare vermogen S omdat dit vermogen het thermische gedrag van de machine bepaalt.

Het actieve vermogen van een generator P wordt bepaald door de arbeidsfactor van de aangesloten verbruiker.

Algemeen kan gesteld worden dat $P = S \cdot \cos \varphi$

Rendement

$$\eta = \frac{P_n}{P_t} = \frac{P_n}{P_n + P_v} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi + 3R \cdot I^2 + R_f \cdot I_f^2 + P_m + P_{Fe}}$$

Parallel schakelen van synchrone generatoren

Om op elk ogenblik de gevraagde elektrische energie te kunnen leveren worden wisselstroomgeneratoren in parallel geschakeld.

Voorwaarden voor eenfasige wisselstroomgeneratoren zijn:

- gelijke effectieve waarden van beide spanningen;
- gelijke frequenties;
- spanningen onderling in fase.

Voor *driefasige* generatoren zijn de voorwaarden identiek. Er moet daarenboven wel vermeld worden dat voor driefasige generatoren de fasevolgorde van beide generatoren dezelfde moet zijn.

Aan de hand van vectordiagrammen kan men aantonen dat de parallelwerking van twee wisselstroomgeneratoren stabiel is.

Verdeling van de belasting over beide in parallel geschakelde wisselstroomgeneratoren

- Wijziging van de bekrachtigingstroom veroorzaakt enkel verandering van het reactieve (blinde) vermogen.
- Wijziging van het toegevoerde vermogen van de aandrijvende machines van beide wisselstroomgeneratoren veroorzaakt een verandering van het geleverde actieve vermogen per generator.

Spanningsregeling van synchrone generatoren

Het veelvuldig voorkomen van wisselstroomgeneratoren maakt dat de spanningsregeling van wisselstroomgeneratoren veelal automatisch gebeurt. De nieuwe technologieën maken dat er momenteel heel wat regelsystemen in de praktijk voorkomen. Alle regelsystemen komen er echter op neer dat de bekrachtigingsstroom van de generator overeenkomstig zijn afgeleverde spanning op een of andere manier beïnvloed wordt.

Enkel voor klasgebruik