

Gelijkstroomgeneratoren: theoretische inleiding

Wegwijzer

Het woord 'generator' is afgeleid van het Latijnse woord *generare* = voortbrengen. Het is een apparaat dat elektrische energie aflevert die op niet-elektrochemische wijze wordt verkregen. De roterende generator zet mechanische energie om in elektrische energie en stelt op een continue wijze een groot vermogen ter beschikking van de verbruikers.

Voordat de generator was uitgevonden, bouwde Faraday de eerste elektromotor. Zijn krachtbron, de batterij van Volta, was echter te zwak en van te korte levensduur om van een groot succes te kunnen spreken. Zijn opzoekingswerk resulteerde in 1831 in een krachtige spanningsbron die ononderbroken elektrische stroom kon leveren. Hij had de *dynamo* (verouderde benaming voor generator) uitgevonden: een mijlpaal in de technologische evolutie en nog altijd het vitale element in de stroomvoorziening.

De evolutie in de moderne technologie heeft de gelijkstroomgenerator in vele toepassingen (denk aan de aggregaten die vroeger in elke garage aanwezig waren) verdrongen. De aggregaten werden vervangen door gelijkrichterelementen die goedkoper zijn, minder lawaaiig en een beter rendement opleveren. Nochtans is de studie van gelijkstroomgeneratoren noodzakelijk, omdat die generatoren in hun constructie identiek zijn aan de gelijkstroommotoren die in de moderne toepassingen (automatisering) worden aangewend. In een aantal bijzondere aggregaten vinden we de gelijkstroomgenerator evenwel nog terug.

Voor de lezer die de essentiële grondbeginselen van het elektromagnetisme onvoldoende beheerst, is vooraf de studie van leereenheid 18 van deel 1B aangewezen.

ENKEL VOOR KLASGEBRUIK

1.1 Bepaling

Doelstelling

- De bepaling geven van een gelijkstroomgenerator.

Een gelijkstroomgenerator (dynamo) is een elektrische machine die mechanische energie omzet in gelijkstroomenergie.

1.2 Werkingsprincipe

Het werkingsprincipe van de generator werd reeds behandeld in deel 1B (18.4) en in deel 2 (1.2). In het kort wordt hier het werkingsprincipe herhaald.

1.2.1 Het genereren van een spanning

Doelstellingen

- De wetten waarop het genereren is gebaseerd onder formulevorm weergeven en het toepassingsgebied toelichten.
- In de onderscheiden gevallen, aan de hand van een vuistregel, de zin van de gegenereerde spanning bepalen.

We benaderen het principe vanuit twee invalshoeken:

- a een geleider die veldlijnen snijdt
- b het veranderen van de omsloten flux in een winding

a Een geleider die veldlijnen snijdt

Als een geleider veldlijnen snijdt onder een hoek α t.o.v. de richting van de veldlijnen, wordt een spanning gegenereerd waarvan de grootte gelijk is aan:

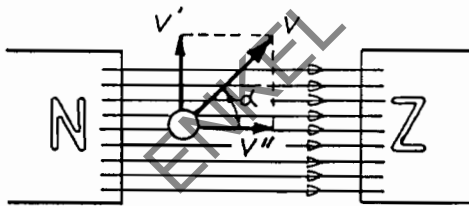


fig. 1

$$E = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha \quad (\text{V})$$

waarin

- E : gegenereerde spanning in volt
- B : fluxdichtheid van het magnetisch veld in Wb/m^2
- v : snelheid waarmee de geleider veldlijnen snijdt in m/s
- l : lengte van de geleider in het magnetisch veld in meter
- α : hoek van de vector t.o.v. de veldrichting

b Veranderen van de omsloten flux Φ van een winding

Bewegen we de winding uit figuur 2 in de zin van de aangegeven pijl 'v' dan zal in de winding een spanning gegenereerd worden zodra de omsloten flux van de winding verandert.

De grootte van de spanning
$$E = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (\text{V})$$

waarin

- E : gegenereerde spanning
- N : aantal windingen
- $\Delta \Phi$: grootte van de omsloten fluxverandering (Wb)
- Δt : tijd waarin de omsloten fluxverandering gebeurt (s)

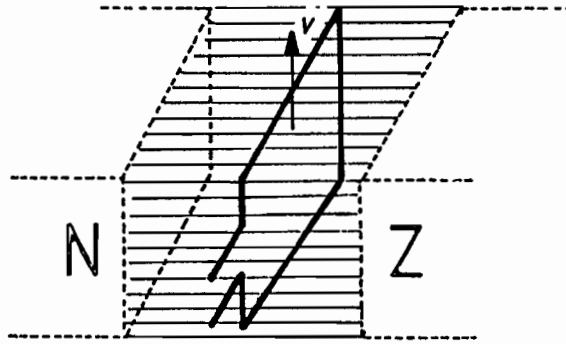


fig. 2

De grootte en de vorm van de spanning zullen afhangen van de snelheid waarmee de omsloten flux verandert.

Volgens de wet van Lenz is de zin van de opgewekte spanning in beide voornoemde gevallen zodanig gericht dat de oorzaak van ontstaan wordt tegengewerkt.

Om de zin van de gegenereerde spanning te bepalen, beschikken we over de regel van de kurkentrekker of de rechterhandregel.

1.2.2 Opbouw tot een praktisch bruikbare generator

a Principiële opbouw

Doelstellingen

- Een systeem tekenen om op een continue wijze spanning te genereren.
- De vorm van de verkregen spanning verklaren.

Met de samenstelling van de machine volgens fig. 1 en fig. 2 zou de spanning verdwijnen zodra de geleider of winding buiten het veld van de polen komt. Om voortdurend een gegenereerde spanning te krijgen, neemt men een winding die om haar as draait tussen de polen van een magnetisch veld (fig. 3).

Begin en einde van de winding worden verbonden met een slepring. Op elke slepring rust een koolborstel met als functie de gegenereerde spanning (in het draaiende deel) over te brengen naar een stilstaande belasting R .

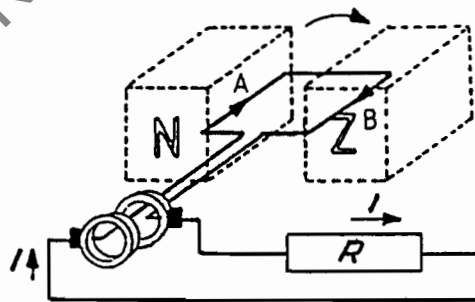


fig. 3

De geleiders A en B snijden nu praktisch voortdurend veldlijnen. Ook de omsloten flux verandert voortdurend, zodat tussen de uitlopers (slepringen) van de winding een blijvende spanning ontstaat.

Uit deel 1B-18.4 en deel 2-1.2 onthielden we verder dat bij constante hoeksnelheid ω van de winding en op voorwaarde dat het magnetisch veld tussen de polen homogeen is, de gegenereerde spanning sinusvormig verloopt.

Volledigheidshalve geven we in fig. 4 het verloop weer van de gegenereerde spanning, de omsloten flux ϕ en de snelheid van de omsloten fluxverandering $\Delta\phi$.

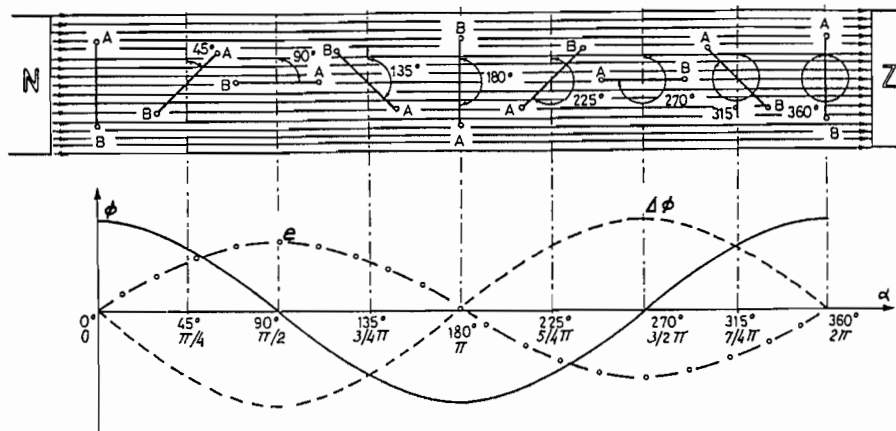


fig. 4

b Opdrijven van de gegenereerde spanning in een winding

Doelstellingen

- De maatregelen om tot een praktisch bruikbare generator te komen, toelichten.
- De verschillende factoren die de waarde van de gegenereerde spanning vergroten, opsommen.
- De praktische mogelijkheden van de constructieaanpassing toelichten.
- De gevolgen van de praktische constructiebijzonderheden op het magnetisch veld rond het anker toelichten.
- De vorm van de gegenereerde spanning verklaren.
- Het begrip *neutrale lijn* verduidelijken.

Uit de formule

$$E = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha$$

leiden we af dat de gegenereerde spanning groter zal zijn naarmate B , l , v en $\sin \alpha$ groter zijn. Bij de bouw van een generator tracht men de factoren B , l , v en $\sin \alpha$ zo groot mogelijk te maken.

Het vergroten van de factor B

Om de factor B zo groot mogelijk te maken, kunnen we de permanente magneten (beperkte sterkte) door elektromagneten (spoelen rond poolkernen) vervangen en de magnetische reluctantie (R_m) van de magnetische keten verkleinen door:

- de draaiende winding te plaatsen aan de omtrek van een trommel T uit magnetisch materiaal (fig. 5);
- het verkleinen van de luchtspleet: we snijden hiertoe de poolschoenen radiaal uit;
- het toepassen van een juk J , in magnetisch materiaal, ter verbinding van de N- en Z-polen (fig. 5).

De factoren l , v en $\sin \alpha$

De factoren l en v kunnen niet willekeurig groot genomen worden. Deze waarden zullen vooral bepaald worden door de aard van de aandrijvende machine en door de beperktheden van de mechanische constructie en vormgeving.

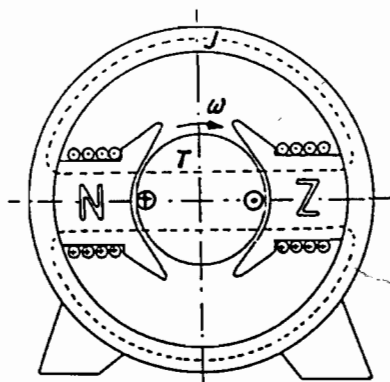


fig. 5

Het plaatsen van de windingen op een trommel van magnetisch materiaal (het anker) én het radiaal uitsnijden van de poolschoenen (fig. 5) hebben twee belangrijke gevolgen:

- het magnetisch veld is niet meer homogeen;
- de klassieke hoekwaarden waaronder de geleiders de veldlijnen snijden, worden gewijzigd.

Fig. 6a en 6b geven een beeld van het fluxverloop bij respectievelijk vlakke en radiaal uitgesneden poolschoenen.

In fig. 6a is de trommel van magnetisch materiaal niet aanwezig.

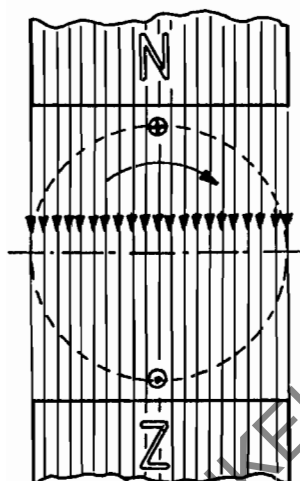


fig. 6a
Homogeen veld

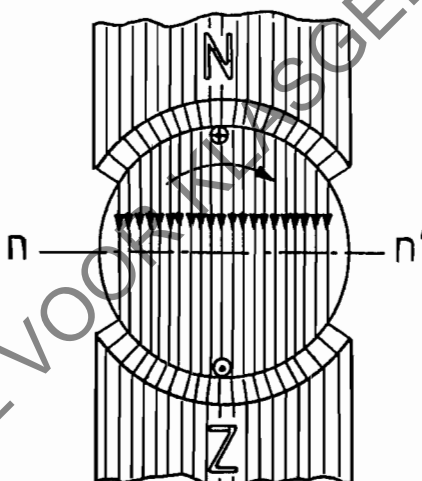


fig. 6b
Niet-homogeen veld

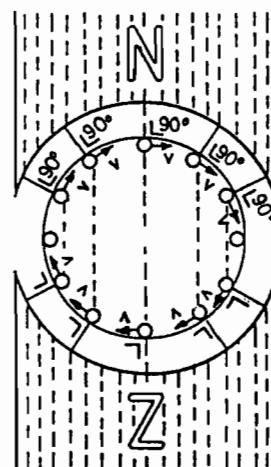


fig. 6c

Fig. 6c verduidelijkt het gevolg van het radiaal uitsnijden van de polen. Men merkt dat de geleiders (onder de poolboog) de veldlijnen steeds onder een hoek van 90° snijden, zodat $\sin \alpha = \sin 90^\circ = 1$.

Vergelijken we nu de grootte van de gegenereerde spanning bij respectievelijk een homogeen veld en een veld met radiaal uitgesneden poolschoenen.

Bij een met constante hoeksnelheid draaiend raam binnen een homogeen veld was de gegenereerde spanning:

$$E = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha = k \cdot \sin \alpha \quad (B, l \text{ en } v \text{ zijn constant})$$

Het verloop van de gegenereerde spanning is bijgevolg gelijkvormig met $\sin \alpha$.

Is hetzelfde raam geplaatst binnen een radiaal veld, zoals in fig. 6b en 6c, dan wordt bovendien $\sin \alpha = 1$, zodat de gegenereerde spanning wordt:

$$E = B \cdot l \cdot v = k \cdot B \quad (l \text{ en } v \text{ zijn constant})$$

Het verloop van de gegenereerde spanning is bijgevolg gelijkvormig met de inductie B , d.w.z. maximaal en constant onder de poolboog.

Fig. 7 geeft respectievelijk het geïdealiseerd en het werkelijk verloop van de inductie en de gegenereerde spanning bij een draaiend raam met uitgesneden polen.

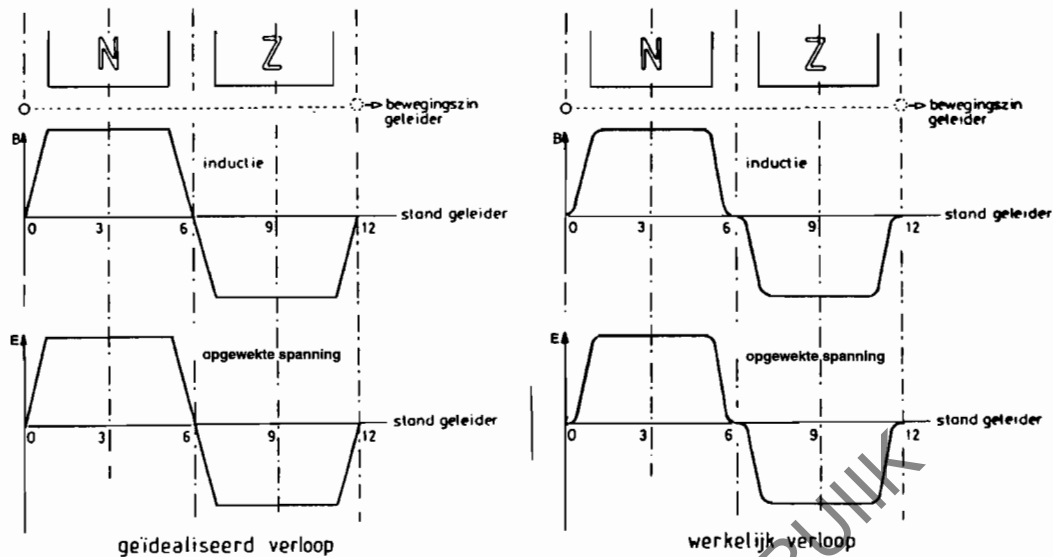


fig. 7

De neutrale lijn

Uit fig. 7 volgt dat in het raam, in de standen 0 en 6, geen spanning wordt gegenereerd. Op dat ogenblik snijden de geleiders immers geen veldlijnen. De in fig. 8 weergegeven lijn nn' , loodrecht op de poolhartlijn, noemt men *neutrale lijn*.

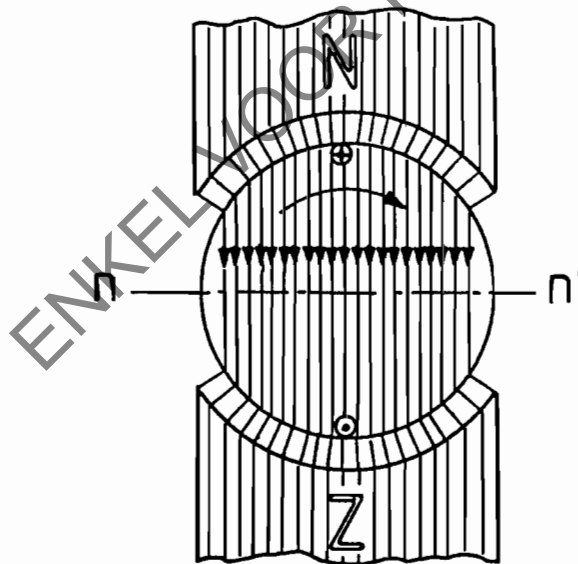


fig. 8

c Benutten van het hele ankerijzer

Doelstellingen

- De maatregelen om het ankerijzer beter te benutten, toelichten.
- De spanning, verkregen door het in serie schakelen van alle geleiders in eenzelfde poolgebied, berekenen.
- De uiteindelijke vorm van de resulterende spanning toelichten.

Omdat in de beschreven constructie het anker weinig wordt benut, plaatsen we verscheidene windingen gelijkmatig over de volledige ankeromtrek verdeeld: de ankerwikkeling. Fig. 9 geeft een principiële voorstelling van een anker met zes windingen.

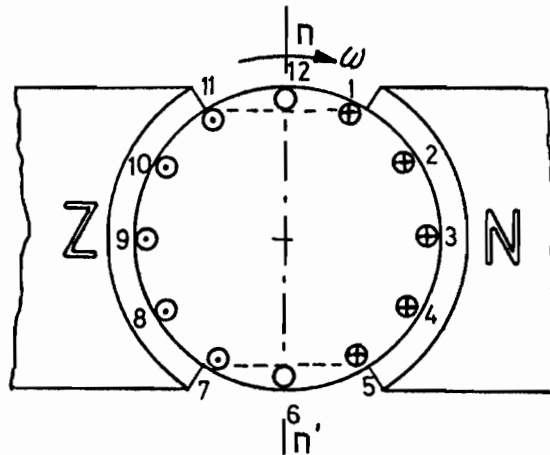


fig. 9

De wikkeling is dan zodanig uitgevoerd dat de 'actieve geleiders' met elkaar verbonden worden. Dat verbinden gebeurt volgens bepaalde wetmatigheden die bij de theorie over het wikkelen zullen worden toegelicht.

Hoe groter het aantal in serie geschakelde geleiders is, des te groter zal de totale spanning zijn die de generator opwekt.

De geleiders die zich in eenzelfde poolgebied bevinden, genereren spanningen met dezelfde grootte en dezelfde zin (N-pool $\otimes$, Z-pool $\ominus$).

Als we de spanningen van eenzelfde poolgebied in serie schakelen, ontstaan twee resulterende spanningen met gelijke grootte maar tegengesteld teken (de theorie van het wikkelen zal dat verder verduidelijken). Beide 'spanningsbronnen' worden hierna parallel geschakeld.

Fig. 10 geeft weer hoe de grootte van de spanning, gegenereerd in één geleider op de ankeromtrek, verloopt.

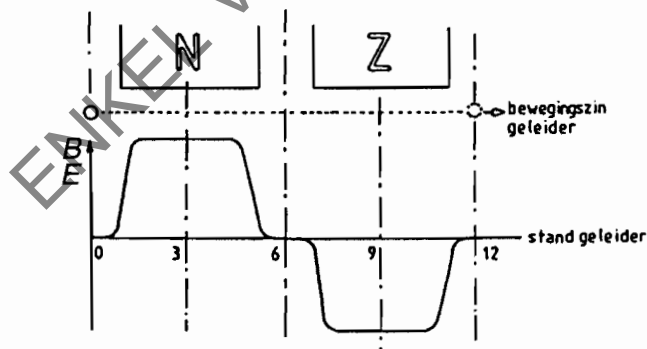


fig. 10

Verloop spanning (1 geleider)

De geleiders onder de pool genereren maximum spanning.

Voor de geleiders in de neutrale lijn is de spanning nul, de overblijvende geleiders bevinden zich in een overgangstoestand tussen e_m en nul.

Fig. 11a, b en c tonen het verloop van de gegenereerde spanningen in de geleiders bij verschillende standen van het anker.

Op fig. 11a, de beginstand, zien we dat:

$$e_1 = e_{12} = 0$$

$$e_2 = e_3 = e_4 = e_5 = e_6 = e_8 = e_9 = e_{10} = e_{11} = e_{12} = e_m$$

De totale spanning van de in parallel geschakelde takken is:

$$e = e_2 + e_3 + e_4 + e_5 + e_6 + e_8 + e_9 + e_{10} + e_{11} + e_{12} = 5e_m$$

Bij verplaatsing van het anker over 1/24ste omwenteling krijgen we de toestand van fig. 11b:

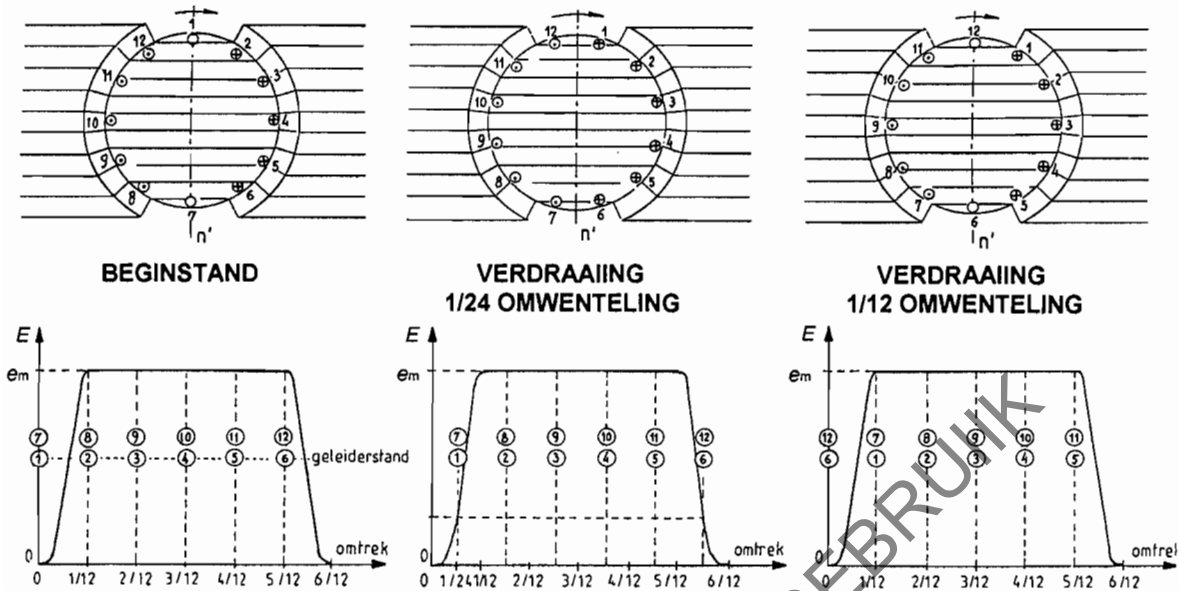


fig. 11a, b en c
Verloop spanningen (6 windingen)

$$e_1 = e_6 = e_7 = e_{12} = \pm 1/8 e_m$$

$$e_2 = e_3 = e_4 = e_5 = e_8 = e_9 = e_{10} = e_{11} = e_m$$

De totale spanning bedraagt nu:

$$e = \underbrace{e_2 + e_3 + e_4 + e_5 + e_8 + e_9 + e_{10} + e_{11}}_{4 \times e_m} + e_1 + e_6$$

$$e = 4 \times e_m + 2 \times 1/8 e_m = 4 \frac{1}{4} e_m$$

Bij verdraaiing over 1/12de omwenteling (fig. 11c) doet zich een identieke toestand voor als bij de beginstand. Enkel de geleiders zijn onderling verplaatst: geleider 1 neemt de plaats in van geleider 2, 2 van 3 enz.

De totale spanning is opnieuw $5 e_m$.

Bij het rondraaien van het anker zal de verkregen spanning schommelen tussen de waarden $4 \frac{1}{4} e_m$ en $5 e_m$, zoals in fig. 12 is weergegeven.

We verkrijgen een gelijkspanning die een kleine waardeverandering ondergaat. Door verscheidene geleiders te plaatsen die onderling dichter bij elkaar liggen, zullen de waardeveranderingen kleiner worden en benaderen we de constante gelijkspanning.

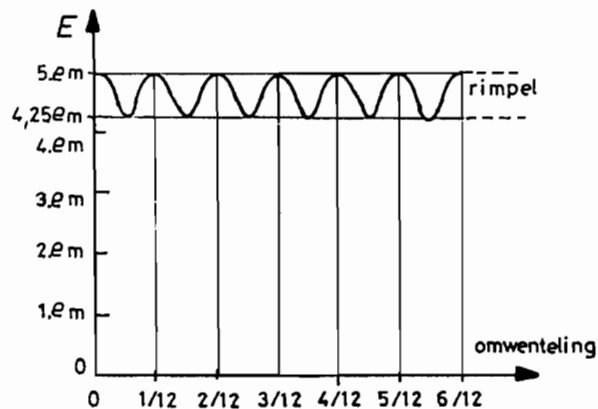


fig. 12

d Vergroten van de gegenereerde spanning door het gebruik van wikkelementen

Doelstelling

- De praktische maatregel voor het bekomen van een hogere gegenereerde spanning verduidelijken.

Om de waarde van de gegenereerde spanning op te drijven, vervangen we de draaiende windingen door draaiende wikkelementen (spoelen) die N windingen bevatten (fig. 13).

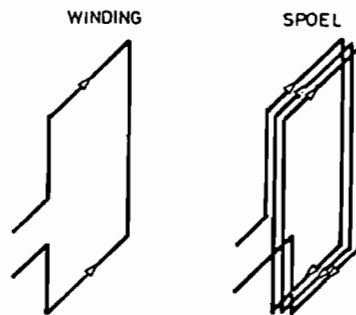


fig. 13

1.3 Het omvormen van de wisselende spanning tot een gelijkspanning met een collector-commutator

Doelstellingen

- De principewerking van de collector-commutator toelichten.
- Het veelvoudig doel van de collector-commutator toelichten.

Uit wat voorafging, weten we dat in een draaiende winding (of spoel) een periodiek wisselende spanning wordt gegenereerd. Om gelijkspanning te verkrijgen is het gebruik van een collector-commutator noodzakelijk.

Indien we de twee slepringen van fig. 14a vervangen door twee van elkaar geïsoleerde halve ringen (collectorsegmenten of -lamellen genoemd) bekomen we een collector-commutator (verzamelaar-wisselaar) in zijn meest elementaire uitvoering (fig. 14b).

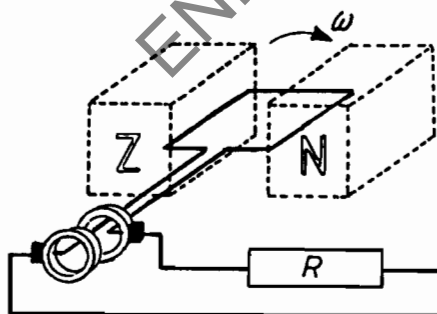


fig. 14a

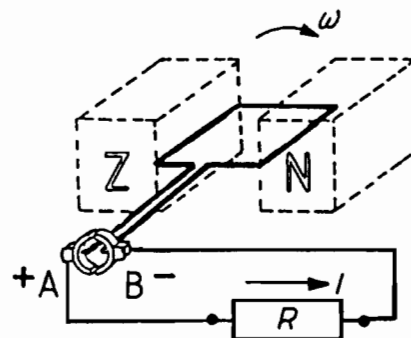


fig. 14b

De borstels die de stroom naar de verbruiker voeren en weer afvoeren, staan diametraal tegenover elkaar.

Fig. 15a, 15b en 15c verduidelijken de gelijkrichtende functie (wisselaar) van de collector-commutator.

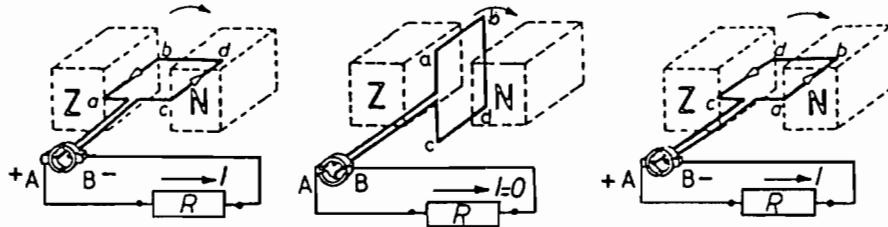


fig. 15a, b en c

In de getekende stand van fig. 15a is de gegenereerde spanning in de geleiders ab en cd maximaal; de polariteit is zo dat borstel A de positieve pool (de stroom komt daar uit de generator) en borstel B de negatieve pool vormt.

Op het ogenblik dat de winding voorbij de verticale stand komt, is de gegenereerde spanning in beide geleiders nul. De borstels sluiten beide collectorsegmenten kort, m.a.w. de draaiende winding is nu kortgesloten. Dat heeft geen verdere gevolgen aangezien de gegenereerde spanning op dat moment nul is. Wanneer de winding eenmaal voorbij de verticale stand (neutraal vlak) is, komt geleider ab in het N-poolgebied en geleider cd in het Z-poolgebied.

De zin van de gegenereerde spanning in beide geleiders verandert. Ondertussen zijn echter ook de collectorlamellen A en B met de andere borstels in contact gekomen. Dat heeft tot gevolg dat de stroomzin in de buitenketen dezelfde blijft.

De commutator voert automatisch de nodige herschakeling uit, zodat door de verbruiker een pulserende gelijkstroom vloeit (fig. 16); het woord commutator of stroomwisselaar is hier dus betekenisvol.

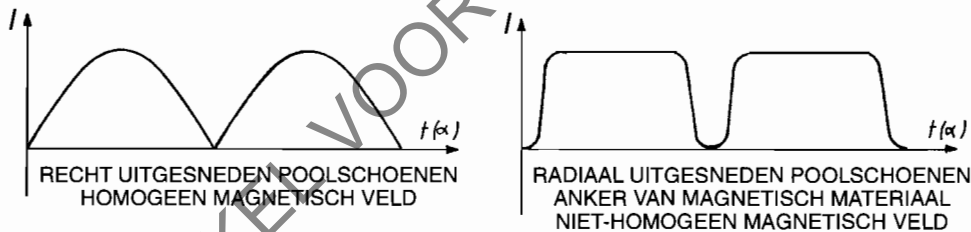


fig. 16

Om tot een praktisch constante gelijkspanning te komen plaatsen we meerdere windingen, symmetrisch verdeeld over de hele ankeromtrek. De verbindingen van verscheidene windingen moeten zo worden uitgevoerd dat de geleiders een serieparallelschakeling (ankerwikkeling) vormen. Het verdelen van de commutator in meerdere segmenten (lamellen) wordt hierbij noodzakelijk. Aangezien de uiteinden (uitlopers) van de onderscheiden windingen via de segmenten moeten verbonden worden, is de commutator terzelfder tijd een collector (verzamelaar) (fig. 17). De benaming collector-commutator omschrijft uitstekend beide functies.

1.4 Ankerwikkelingen

In deze paragraaf bespreken we:

- een praktisch voorbeeld van een ankerwikkeling;
- enkele specifieke benamingen;
- de algemene voorwaarden voor het uitvoeren van een ankerwikkeling.

1.4.1 Praktisch voorbeeld van een ankerwikkeling bestaande uit vier spoelen

Doelstellingen

- Aan de hand van een uitgeslagen wikkelschema de schakeling van de windingen tot een ankerwikkeling uitleggen.
- De specifieke benamingen die bij het wikkelen worden gebruikt, verduidelijken.

Dit voorbeeld (fig. 17-18), waarbij per gleuf 1 geleider wordt geplaatst, toont aan hoe in de praktijk de werkzame geleiders van een generator onderling verbonden worden. Het zal ons bovendien helpen om de specifieke benamingen toe te lichten die bij het wikkelen worden gebruikt.

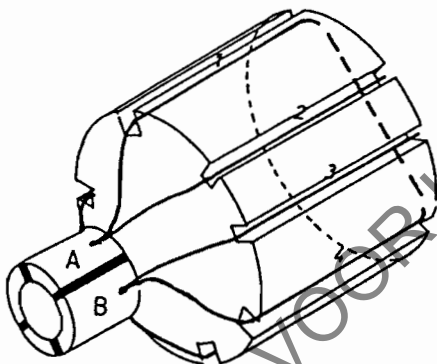


fig. 17
Ruimtelijke voorstelling ankerwikkeling

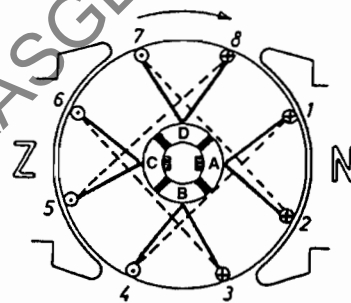


fig. 18

In het stroomkringschema (fig. 19) zien we duidelijk dat de generatorspanning wordt bepaald door de som van de deelspanningen in de werkzame geleiders van één ankertak, nl. 1, 4, 3 en 6 of 2, 7, 8 en 5.

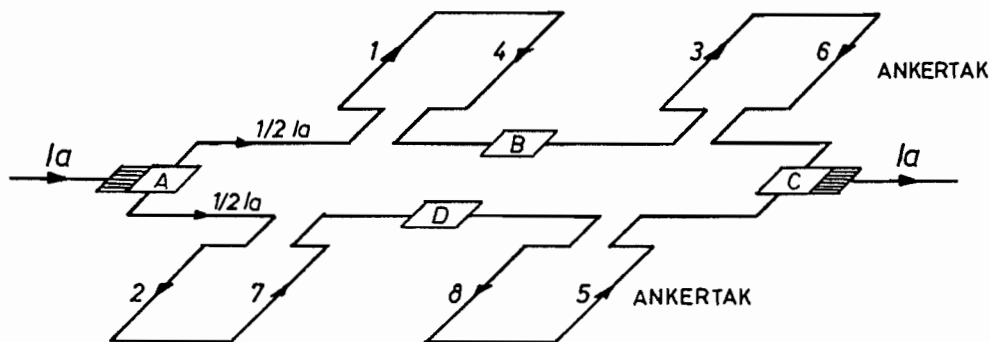


fig. 19

De spanning per tak is en moet even groot zijn.

Om beter te illustreren hoe de werkzame geleiders onderling verbonden worden, is het uitgeslagen wikkelschema voorgesteld (fig. 20).

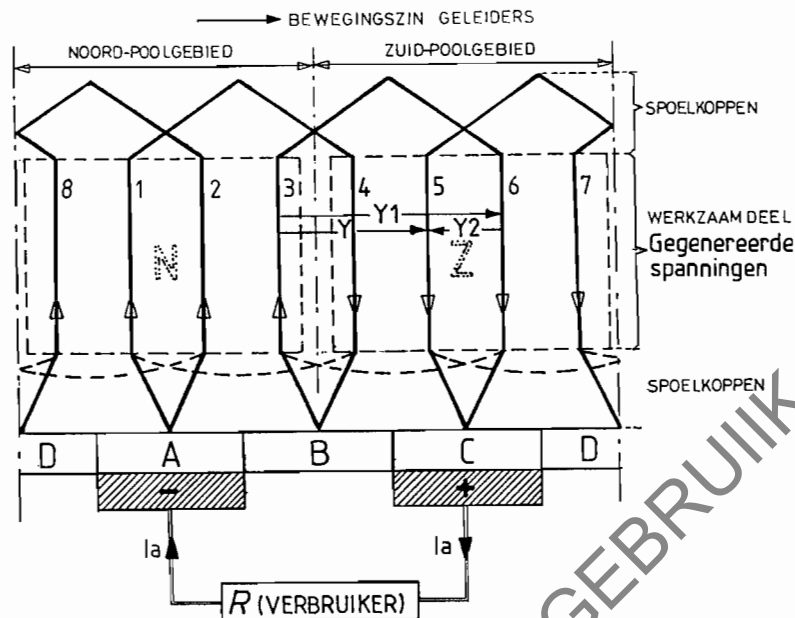


fig. 20

In de voorgestelde wikkeling zien we duidelijk dat het verbinden niet willekeurig gebeurt. De theorie van het wikkelen zal ons enkele wetmatigheden opleveren om, naar gelang van de omstandigheden, een wikkelschema te ontwerpen.

De pijltjes op het uitgeslagen wikkelschema duiden de zin van de gegenereerde spanning aan. Die zin is in de getekende stand ook de stroomzin. De pijl boven het schema duidt de bewegingszin van de geleiders t.o.v. de polen aan. Met de rechterhandregel kan dan de zin van de spanning worden bepaald.

Alle onderlinge verbindingen van de werkzame geleiders gebeuren via de collectorlamellen. De borstels worden zodanig geplaatst dat de spanningen van de werkzame geleiders in serie werken. Op fig. 18 en 19 is te zien dat de stroom in het anker via twee wegen van de min-borstel terug naar de plus-borstel vloeit. Elk van die twee wegen noemt men een ankertak (aangeduid door 2a).

Elke winding van fig. 19 kan schakeltechnisch vervangen worden door een wikkelement met twee uitlopers die dan in gleuven worden geplaatst. De spanning wordt gegenereerd in de 'werkzame geleiders' die de evenwijdige lange zijde van de spoel uitmaken. De bovenste en onderste delen van de spoelen noemt men de spoelkoppen. Het begin en einde van de spoel zijn de uitlopers (fig. 21); die worden op collectorlamellen aangesloten.

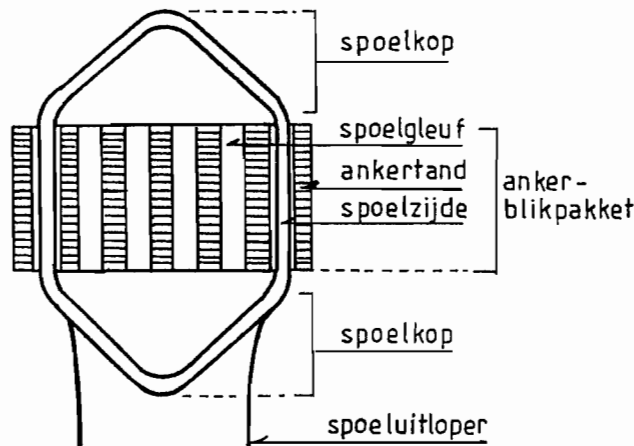


fig. 21

Toelichtingen

a Vooraf gewikkelde spoelen

Wanneer we het uitgeslagen wikkelschema bekijken, stellen we vast dat de wikkelementen (spoelen) eenzelfde vorm hebben. Daarom worden de wikkelementen meestal vooraf machinaal vervaardigd, zodat ze eenvoudig en snel kunnen worden aangebracht.

b Grote stroomsterkte

Bij grote stroomsterkte wordt de doorsnede van de geleiders zo groot dat de soepelheid bij het bewerken van de wikkelementen erg afneemt. Om dat te verhelpen gebruikt men dunne, goed plooibare draad en schakelt die onderling in parallel tot de gewenste doorsnede is bereikt.

c Aantal polen

Tot nu toe werd er enkel gesproken over tweepolige machines. Voor machines met een vermogen van meer dan één kW wordt meer dan één poolpaar gebruikt. Dat brengt een gevoelige materiaalbesparing mee. Machines met een vermogen van minder dan 100 kW en een stroomsterkte van minder dan 800 A zijn gewoonlijk vierpolig. Is de stroomsterkte zeer hoog, dan zal men de generator zespolig uitvoeren om de stroomsterkte per aftakpunt op de collector (borstelpen) beperkt te houden.

1.4.2 Enkele specifieke benamingen

Doelstellingen

- De typische termen, gebruikt bij het wikkelen, verduidelijken.
- Het onderling verband tussen de gebruikte termen toelichten.

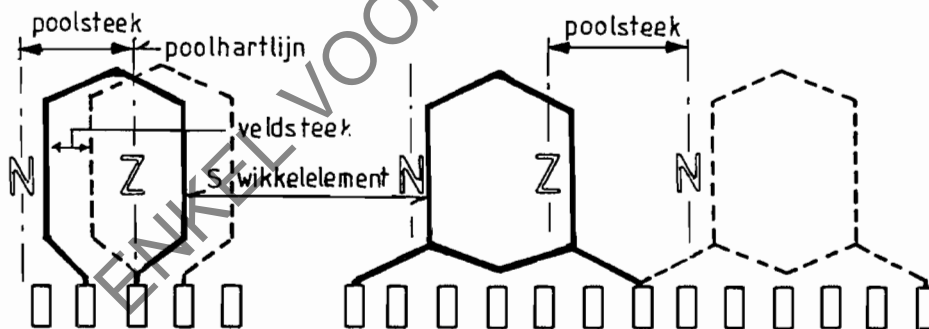


fig. 22

fig. 23

a Wikkelement S

Dit is het deel van een ankerwikkeling, geschakeld in de wikkelzin tussen twee opeenvolgende collectorlamellen. Die opeenvolgende collectorlamellen liggen niet noodzakelijk naast elkaar, zoals uit fig. 22 en 23 blijkt. Elk wikkelement heeft twee elementzijden met werkzame geleiders. De werkzame geleiders genereren de spanningen. Het aantal wikkelementen duiden we aan door de hoofdletter S ; het aantal elementzijden bedraagt dus $2S$.

b Veldsteek

Hieronder verstaat men de afstand tussen naburige elementzijden, gemeten op het uitgeslagen wikkelschema (fig. 22). Vermits een ankerwikkeling ' $2S$ ' elementzijden bevat en de afstand tussen twee naburige elementzijden de veldsteek is, is de ankeromtrek uit te drukken in $2S$ veldsteken. De veldsteek is de rekeneenheid om de wikkel-, schakel- en totale spoed aan te geven.

c Wikkelspoed Y_1

De wikkelspoed of spoelwijdte is het aantal veldsteken begrepen tussen de twee zijden van een wikkelement (fig. 24 en 25). Op fig. 20 is $Y_1 = 3$.

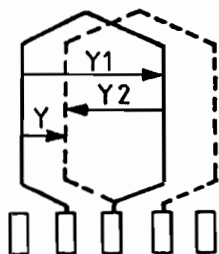


fig. 24

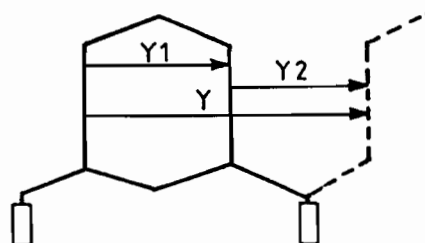


fig. 25

d Schakelspoed Y_2

De schakelspoed is het aantal veldsteken begrepen tussen de laatste wikkelzijde van een element en de eerste daarop aangesloten wikkelzijde van het volgende element (fig. 24 en 25). Op fig. 20 is $Y_2 = 1$.

e Totale spoed Y

De totale spoed van een wikkeling is het aantal veldsteken tussen overeenkomstige elementzijden van twee opeenvolgende wikkelementen.

Voor de luswikkeling is $Y = Y_1 - Y_2$; voor de golfwikkeling is $Y = Y_1 + Y_2$.

f Ankertak 2a

Dat is elke reeks elementzijden van een ankerwikkeling die op een bepaald ogenblik in serie geschakeld zijn tussen de borstels van tegengesteld teken (zie fig. 19).

g Luswikkeling of parallelwikkeling (fig. 24)

Bij de luswikkeling hebben wikkelspoed Y_1 en schakelspoed Y_2 een tegengesteld teken. De zin is, beschouwd t.o.v. de wikkelzin, rechts- of linksomwikkeling. Indien $Y_1 > Y_2$ krijgen we een rechtsomwikkeling. Als $Y_1 < Y_2$ krijgen we een linksomwikkeling.

Bij een eenvoudige parallelwikkeling is het aantal polen gelijk aan het aantal ankertakken ($2a = 2p$).

h Golfwikkeling of seriewikkeling (fig. 25)

De wikkel- en schakelspoed hebben hetzelfde teken. De seriewikkeling heeft altijd maar twee ankertakken ($2a = 2$).

i Poolsteek τ (fig. 26)

Onder poolsteek τ verstaat men het aantal veldsteken begrepen tussen twee opeenvolgende poolhartlijnen. Op het anker kan men de poolsteek bepalen door de middelpunts-hoek begrepen tussen twee opeenvolgende poolhartlijnen.

Het deel van de poolsteek bedekt door de poolschoenen noemt men *poolbedekking*. De verhouding van de poolboog tot de poolsteek is meestal begrepen tussen 0,6 en 0,75.

Het deel van de ankeromtrek dat niet bedekt is door de poolschoen, noemt men *pool-opening*. Per poolsteek neemt men minstens 8 en maximum 18 gleuven.

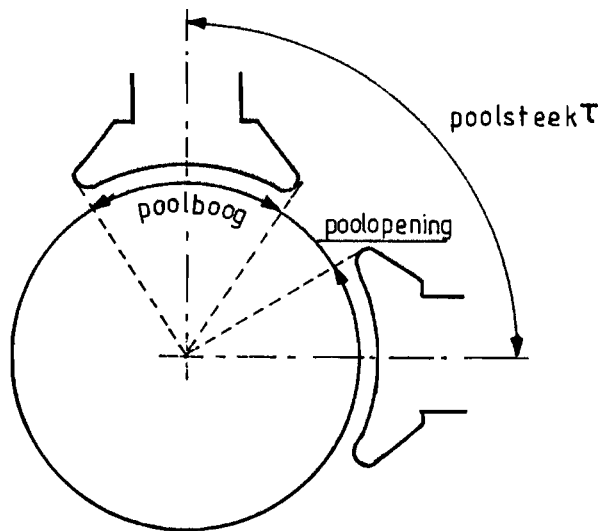


fig. 26

Toelichting

Het is niet de bedoeling een diepgaande studie van de ankerwikkeling voor gelijkstroommachines te maken. Een inzicht in het schakelprincipe volstaat voor de verdere studie in dit boek. We beperken ons tot enkele eenvoudige, praktische voorbeelden. De veelvoudige parallelwikkeling, de serieparallelwikkeling, de combinatiewikkeling (zowel lus- als golfwikkeling), en de wikkelingen met twee of meer elementzijden per gleuf komen hier dus niet aan bod.

1.4.3 Algemene voorwaarden voor het uitvoeren van ankerwikkelingen

Doelstellingen

- De algemene voorwaarden voor het uitvoeren van een ankerwikkeling verduidelijken.
- De eigenschappen en formules gebruikt bij de lus- en golfwikkeling toepassen.
- Aan de hand van de benodigde gegevens, een wikkelschema en wikkeltabel van een ankerwikkeling opstellen.

Opdat de gegenereerde spanningen in de werkzame gedeelten van de wikkelementen zouden worden opgeteld, is het nodig dat de elementzijden van eenzelfde wikkelement zich respectievelijk onder een N-pool en een Z-pool bevinden ($Y_1 = \tau$).

De schakeling van de wikkelementen van een ankerwikkeling verloopt volgens de verder aangehaalde golf- of luswikkelijze.

De borstels worden zodanig op de collector geplaatst dat de wikkelementzijden die zich in de neutrale lijn bevinden ermee worden verbonden. Als de verbindingen van de uitlopers met de elementzijden symmetrisch zijn (fig. 27), dan zullen de borstels diametraal tegenover elkaar staan en wel in de poolhartlijn.

Op fig. 18 is dat eveneens waar te nemen.

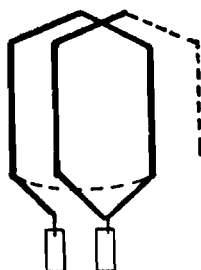


fig. 27
Symmetrisch

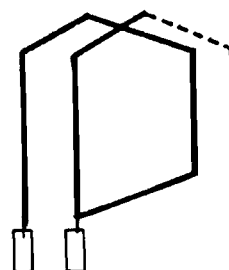


fig. 28
Asymmetrisch

Als de uitlopers niet symmetrisch zijn (dikwijls bij handwikkeling bij zwaardere machines), zoals fig. 28 aangeeft, dan bevinden de borstels zich in de neutrale lijn (loodrecht op de poollijn). In elk geval is dat de enige plaats op de collector die de maximumspanning geeft. Die plaats kan proefondervindelijk worden bepaald door een V-meter op de borstels te plaatsen en de borstels te verdraaien met de borstelbrug tot de V-meter een maximum spanningswaarde aangeeft.

Bij de enkelvoudige parallelwikkeling ($2a = 2p$) gebruikt men in regel zoveel borstels als de machine polen telt. Bij de seriewikkeling zijn er slechts twee borstels aanwezig ($2a = 2$). Bij de praktische voorbeelden van wikkelen zullen we gebruikmaken van enkele algemene wetten, die in dit boek niet worden bewezen.

Voorbeeld van een luswikkeling

Teken een enkelvoudige parallelwikkeling met de volgende gegevens:

aantal wikkelementen $S = 16$

aantal polen $2p = 4$

aantal ankertakken $2a = 2p = 4$

Voorwaarden waaraan deze luswikkeling moet voldoen:

- 1 De wikkelspoed Y_1 is ongeveer gelijk aan de poolsteek, dus

$$Y_1 = \frac{2S}{2p} = \frac{2 \times 16}{4} = 8 \text{ veldsteken} = \tau$$

Opdat alle elementzijden in de ankerwikkeling zouden worden opgenomen, moet Y_1 oneven zijn.

We kiezen $Y_1 = 9 \approx \tau$.

- 2 De totale spoed $Y = Y_1 - Y_2$ moet een even getal zijn.

$$Y = Y_1 - Y_2 = \pm \frac{2a}{p}$$

Vermits hier $a = p$ is $Y = \pm 2$ (+ voor rechtsonwikkeling en – voor linksonwikkeling).

We kiezen de rechtsonwikkeling dus $Y = +2$

- 3 De schakelspoed: $Y_2 = Y_1 - Y = 9 - 2 = 7$ veldsteken.

- 4 Opdat de wikkeling slechts gesloten zou zijn nadat alle elementen zijn geplaatst,

mogen S en $\frac{Y_1 - Y_2}{2}$ geen gemene deler hebben.

Controle: $S = 16$

$$\frac{Y_1 - Y_2}{2} = \frac{9 - 7}{2} = 1$$

Hier is er geen gemene deler; de wikkeling zal dus pas later gesloten zijn na het schakelen van alle elementen.

5 Aantal collectorlamellen

Aan elke lamel zijn twee uitlopers verbonden. Er is dus nood aan

$$\frac{2S}{2} = \frac{16 \times 2}{2} = 16 \text{ lamellen.}$$

Met de gegevens uit de vorige berekeningen zijn we nu in staat deze wikkeling te tekenen. Omwille van de overzichtelijkheid en de eenvoud van het tekenwerk, tekenen we het uitgeslagen wikkelschema (fig. 29).

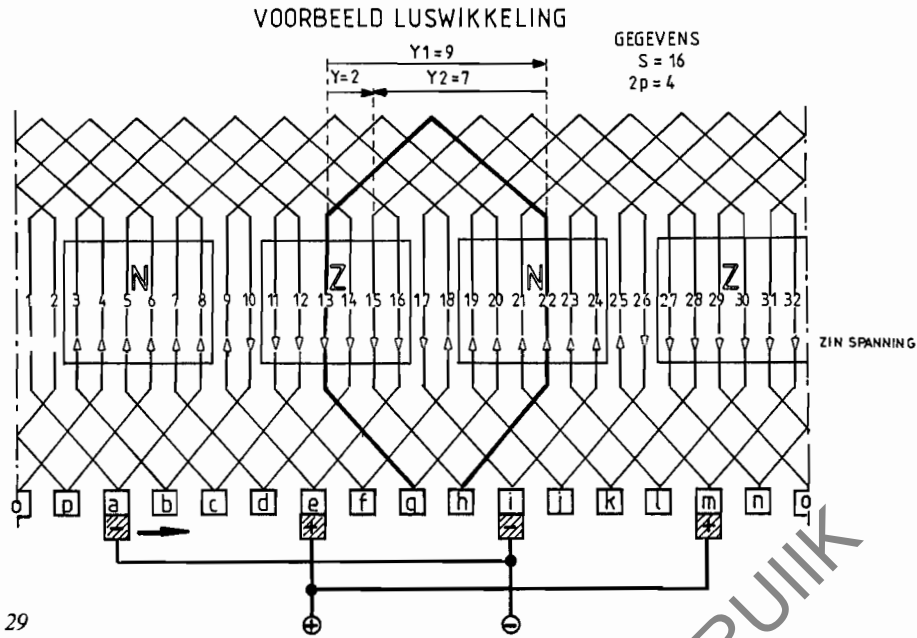


fig. 29
Uitgeslagen wikkelschema

De borstels worden zodanig geplaatst dat de gegenereerde spanning tussen de klemmen van de generator maximaal is. Om de ankerwikkeling nog meer te schematiseren, tekenen we fig. 30.

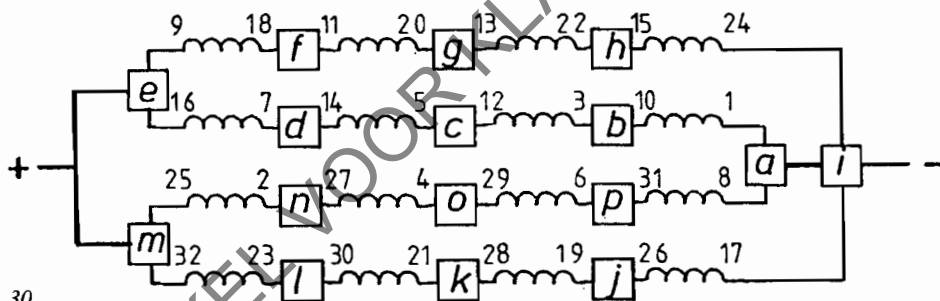


fig. 30
Parallele ankertakken

Hier zien we duidelijk hoe de verbruikersstroom zich in het anker in vier wegen vertakt. De doorsnede van de wikkeldraad mag dus berekend worden op het vierde van de totale stroomsterkte door de verbruiker.

Een goed overzicht van de ankerwikkeling verkrijgen we ook door het opstellen van een wikkeltabel. Die bestaat uit een aantal horizontale lijnen, gelijk aan het aantal spoelen of het aantal collectorlamellen. Elke horizontale lijn toont aan op welke collectorlamellen de uitlopers van iedere spoel moeten worden aangesloten. De wikkeltabel voor de getekende ankerwikkeling vinden we hieronder (fig. 31).

WIKKELTABEL				
-borstel	a	-	1	- 10 - b
	b	-	3	- 12 - c
	c	-	5	- 14 - d
	d	-	7	- 16 - e + borstel
+borstel	e	-	9	- 18 - f
	f	-	11	- 20 - g
	g	-	13	- 22 - h
	h	-	15	- 24 - i - borstel
-borstel	i	-	17	- 26 - j
	j	-	19	- 28 - k
	k	-	21	- 30 - l
	l	-	23	- 32 - m + borstel
+borstel	m	-	25	- 2 - n
	n	-	27	- 4 - o
	o	-	29	- 6 - p
	p	-	31	- 8 - a - borstel

fig. 31

Voorbeeld van een golfwikkeling

Teken een golfwikkeling (seriewikkeling) met de volgende gegevens:

aantal wikkelementen $S = 14$

aantal polen $= 2p = 6$

aantal parallelle takken $2a = 2$ (eigen aan seriewikkeling)

Voorwaarden waaraan deze golfwikkeling moet voldoen:

- 1 Volgens de wetten op het wikkelen is de totale spoed

$$Y = Y_1 + Y_2 = \frac{2S \pm 2a}{p} = \frac{28 \pm 2}{3} = 10 \text{ veldsteken.}$$

De totale spoed moet even zijn.

- 2 De wikkelspoed Y_1 en de schakelspoed Y_2 neemt men gewoonlijk gelijk aan elkaar en ongeveer gelijk aan de poolsteek, dus:

$$Y_1 = Y_2 \approx \frac{2S}{2p} = \frac{28}{6} = 4,66$$

Opdat alle wikkelementen in de ankerwikkeling zouden zijn opgenomen, moeten Y_1 en Y_2 oneven zijn. We kiezen hier $Y_1 = Y_2 = 5$ veldsteken.

- 3 Opdat de ankerwikkeling slechts gesloten zou zijn nadat alle elementen geplaatst zijn, mogen S en $\frac{Y_1 + Y_2}{2}$ geen gemene deler hebben.

VOORBEELD GOLFVWIKKELING

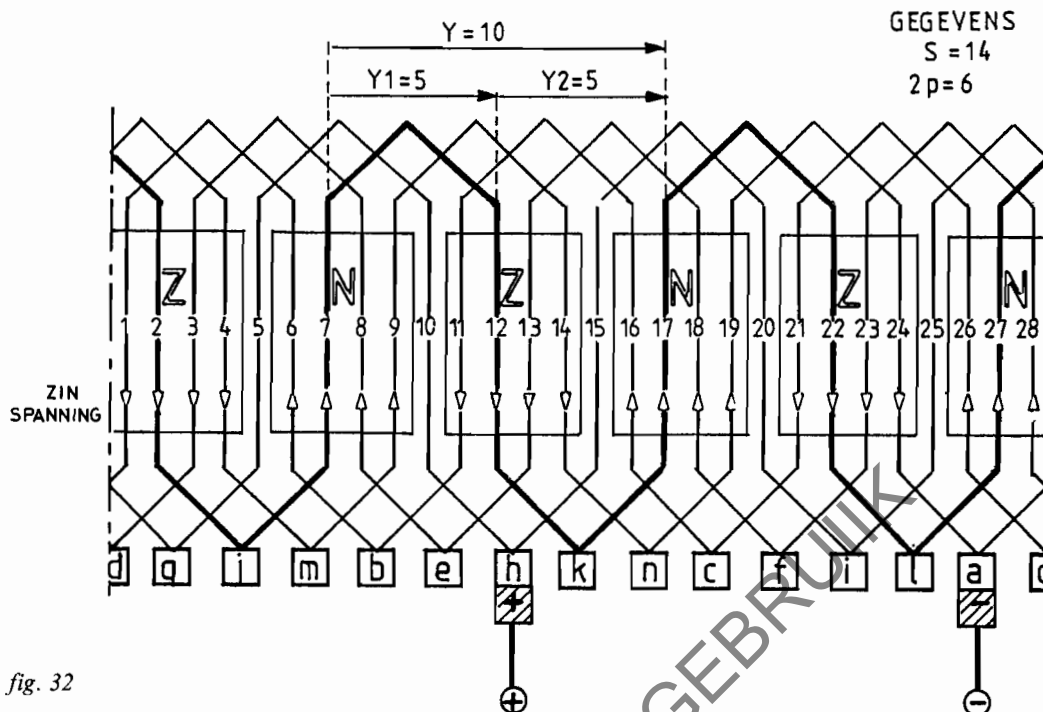


fig. 32

Controle: $S = 14$

$$\frac{Y_1 + Y_2}{2} = \frac{10}{2} = 5$$

Beide getallen zijn onderling ondeelbaar.

4 Aantal collectorlamellen

Aan elke lamel zijn twee uitlopers verbonden. Er dienen dus $\frac{2S}{2} = \frac{28}{2} = 14$ lamellen aanwezig te zijn.

Bovenstaande berekeningen leveren ons voldoende gegevens op om deze ankerwikkeling te tekenen (fig. 32).

De borstels worden zodanig geplaatst dat tussen de klemmen van de generator de maximumspanning heerst. Om de ankerwikkeling nog meer te schematiseren tekenen we fig. 33.

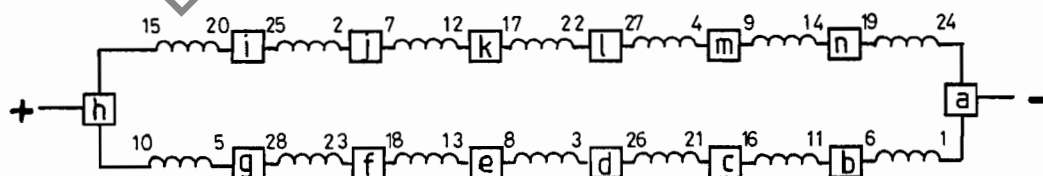


fig. 33

Parallele ankertakken

Hier zien we duidelijk dat de hoofdstroom in het anker over twee wegen (ankertakken) wordt verdeeld. Een maximum aan gegenereerde geleiders staat in serie, hetgeen dus een maximumspanning op de klemmen van de generator zal opleveren. We geven hieronder ook nog de overeenstemmende wikkeltabel.

WIKKELTABEL				
- borstel	a	- 1	- 6	- b
	b	- 11	- 16	- c
	c	- 21	- 26	- d
	d	- 3	- 8	- e
	e	- 13	- 18	- f
	f	- 23	- 28	- g
	g	- 5	- 10	- h
+ borstel	h	- 15	- 20	- i
	i	- 25	- 2	- j
	j	- 7	- 12	- k
	k	- 17	- 22	- l
	l	- 27	- 4	- m
	m	- 9	- 14	- n
	n	- 19	- 24	- a
				- borstel

fig. 34

Toelichting

a Axiale plaatsing van de borstels t.o.v. elkaar

Zorg er bij de plaatsing van de borstels op de borstelpennen voor dat de borstels axiaal over ongeveer een halve borsteltengte worden verschoven, zodat de collector gelijkmatig afslijt. Een kleine speling van de as in de lengterichting is ook nuttig.

b Keuze van de wikkeling

- Voor hoge spanningen en kleine vermogens gebruikt men de seriewikkeling (golfwikkeling).
- Voor grote stroomsterkten gebruikt men de parallelwikkeling (luswikkeling).
- Voor de keuze van wikkeling moet men ook rekening houden met de snelheid van de aandrijfmachine. Men zal bv. de golfwikkeling toepassen bij machines met lage rotatiefrequentie, waar relatief hoge spanningen moeten worden opgewekt (hydraulische centrales).
- Men moet het aantal ankertakken eveneens kiezen in functie van de stroom per ankertak. Die stroomsterkte mag bv. de 150 à 200 A niet overschrijden. Bij machines met hulppolen gaat men tot 300 A per ankertak.

c Spanning tussen naburige collectorlamellen

De spanning tussen naburige collectorlamellen mag een bepaalde waarde niet overschrijden. Die waarde wordt bepaald door de constructie van de collector.

Voor collectoren met mica- of micanietisolatie beperkt men bv. de spanning tussen naburige collectorlamellen tot 30 V.

1.5 Berekening van de grootte van de opgewekte spanning

Doelstelling

- Aan de hand van de kenmerkende grootheden van een generator de formule afleiden die ons toelaat de spanning, gegenereerd door de ankerwikkeling, te berekenen.

We berekenen vervolgens de opgewekte spanning:

- in een geleider;
- in een winding;
- in een ankerwikkeling.

- *Opgewekte spanning in een draaiende geleider gelegen in het poolgebied*

We weten dat de spanning, opgewekt in één draaiende geleider, gelijk is aan

$$E_1 = B \cdot l \cdot v \quad (1)$$

waarin de fluxdichtheid of inductie B in dit geval gelijk is aan de totale poolflux gedeeld door de oppervlakte van het anker waarop de ankerwikkelingen (geleiders) gelegen zijn.

$$B = \frac{\phi_t}{A} = \frac{2p \cdot \phi}{\pi \cdot d \cdot l} \quad \left(\frac{W_b}{m^2} \right)$$

De snelheid waarmee de geleider veldlijnen snijdt (omtreksnelheid), is

$$v = \pi \cdot d \cdot n \quad (m/s)$$

Vervanging van B en v in de formule (1) geeft de spanning in één geleider:

$$E_1 = B \cdot l \cdot v = \frac{2p \cdot \phi}{\pi \cdot d \cdot l} \cdot \pi \cdot d \cdot n \cdot l = 2p \cdot \phi \cdot n \quad (V)$$

- *Opgewekte spanning in een draaiende winding*

Hierbij staan twee geleiders in serie zodat de opgewekte spanning dubbel zo groot wordt en dus gelijk is aan $2 \cdot E_1$

- *Opgewekte spanning in een ankerwikkeling van een generator*

De generator is als volgt samengesteld:

- aantal geleiders op de trommelomtrek: $2N$ (N = aantal windingen);
- aantal polen $2p$;
- aantal ankertakken $2a$;
- flux per pool ϕ ;
- rotatiefrequentie n uitgedrukt in s^{-1} ;
- trommeldiameter d ;
- trommellengte = nuttige lengte van de geleiders l .

De ankerwikkeling bevat in totaal $2N$ geleiders verdeeld over $2a$ ankertakken. De spanning per tak (eveneens de generatorspanning) is dan:

$$E = 2p \cdot \phi \cdot n \cdot \frac{2N}{2a} \quad (V)$$

of

$$E = 2 \frac{p}{a} \cdot N \cdot \phi \cdot n \quad (V)$$

Vermits p , a en N voor een bepaalde machine constante grootheden zijn, mogen we stellen dat in het algemeen

$$E = k \cdot \phi \cdot n$$

met k (de machineconstante) $= 2 \frac{p}{a} \cdot N$

Deze formule is een van de hoofdformules die bij de studie van gelijkstroomgeneratoren en -motoren regelmatig zal terugkomen.

– *Berekening van de gegenereerde spanning uitgaande van de omsloten fluxverandering*

De voorgaande formule is eveneens af te leiden indien we vertrekken van de formule van de gegenereerde spanning, uitgaande van de omsloten fluxverandering.

De gegenereerde spanning per winding is:

$$E = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Met 'N' windingen op de ankeromtrek zijn er per ankertak $\frac{N}{2a}$ windingen in serie geschakeld.

Bij een 2-polige machine verandert de omsloten flux per winding van maximumwaarde naar nulwaarde in de tijd van 1/4 omwenteling.

Voor een 2p-polige machine verandert de omsloten flux van maximum naar nul in een tijd van $\frac{1}{4p}$ omwenteling.

Berekenen we de tijd voor $\frac{1}{4p}$ omwenteling (Δt) bij rotatiefrequentie n.

1 omwenteling per $\frac{1}{n}$ (s) $\rightarrow$ $\frac{1}{4p}$ omwentelingen per $\frac{1}{n \cdot 4p}$ (s)

De gegenereerde spanning per winding is dus:

$$E = \frac{\Delta\phi}{\frac{1}{n} \cdot 4 \cdot p} = \Delta\phi \cdot 4 \cdot p \cdot n$$

Voor N windingen en 2a ankertakken geldt dan:

$$E = \frac{N}{2a} \Delta\phi \cdot 4 \cdot p \cdot n = 2 \frac{p}{a} \cdot N \cdot \phi \cdot n$$

met

ϕ : de flux per pool (hier ook $\Delta\phi$)

Vermits p, a en N van een bepaalde machine constante gegevens zijn, kunnen we schrijven dat:

$$E = k \cdot \phi \cdot n \quad (V)$$

met

ϕ : flux per pool (Wb)

k : machineconstante

n : rotatiefrequentie (s^{-1})

hetgeen identiek is aan de voorgaande formule.

1.6 Tegenwerkend koppel in een generator

Doelstellingen

- Het ontstaan van een tegenwerkend koppel aantonen.
- De grootte van het koppel berekenen aan de hand van een gegeven formule.

In figuur 35a is een onbelaste generator voorgesteld. Het aandrijvende (nullast)koppel T_a is beperkt. De generator genereert spanning waarvan de zin aangegeven is.

Zodra de generator elektrische energie levert aan een verbruiker, vloeit er een elektrische stroom door de ankerwikkelingen (fig. 35b). De stroomvoerende geleiders bevinden zich in het hoofdveld van de generator en ondergaan de lorentzkracht die de aandrijvende kracht van de generator zal tegenwerken (dit verschijnsel werd in deel 1B-18.3 reeds toegelicht).

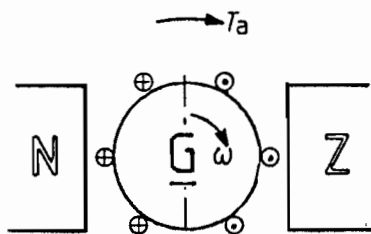


fig. 35a
onbelaste generator

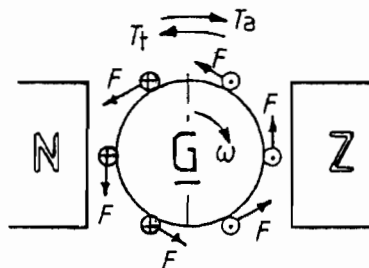


fig. 35b
belaste generator

Er ontstaat een tegenwerkend koppel

$$T_t = k \cdot \phi \cdot I$$

met

k : machineconstante = $\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{\pi}$ met N = aantal windingen

ϕ : flux per pool

I : generatorhoofdstroom

De herkomst van deze formule zullen we toelichten bij de behandeling van de gelijkstroommotoren.

Dit tegenwerkend koppel (T_t), dat toeneemt met de stroomsterkte, zal continu door de aandrijvende machine (T_a) overwonnen moeten worden en dit ten koste van de toegevoerde energie van de aandrijvende machine.

1.7 Ankerreactie

We bespreken achtereenvolgens:

- het verschijnsel;
- de gevolgen van de ankerreactie;
- de middelen om de nadelige gevolgen van de ankerreactie te verminderen.

1.7.1 Verschijnsel

Doelstellingen

- Het begrip *ankerreactie* omschrijven.
- Aan de hand van een schets het ontstaan van een ankerveld toelichten.
- Aan de hand van een schets de invloed van het ankerveld op het hoofdveld verduidelijken.
- Aan de hand van krommen het resulterend inductieverloop rond de ankeromtrek uitleggen.

Als een generator een verbruiker voedt, vloeit er een stroom door de ankerwikkelingen. Gevolg daarvan is dat er, buiten het bestaande hoofdveld ϕ_H , een ankerveld ϕ_D ontstaat dat op het hoofdveld zal inwerken. Dit verschijnsel noemen we de ankerreactie.

Als een generator geen stroom levert, is enkel de flux van de hoofdpolen (ϕ_H) aanwezig (hoofdflux). De hoofdflux is, zoals we al weten, afkomstig van de bekrachtigingswikkeling rond de poolkernen.

In fig. 36 is deze hoofdflux weergegeven. De punten en kruisjes wijzen enkel op de zin van de gegenereerde spanning.

Naarmate de magnetisatie-stroomsterkte (stroom door de bekrachtigingsspoel op de poolkernen) toeneemt, zal ook de inductie toenemen. Dat verschijnsel werd behandeld in deel 1B par. 16.2.3. Het leidde tot het begrip *magnetisatiekromme* $B = f(H)$: zie fig. 37. Het normale werkingpunt (P) wordt zodanig gekozen dat de inductieschommelingen in de luchtspleet zo klein mogelijk worden. Dat zal dan ook kleinere spanningsschommelingen meebrengen.

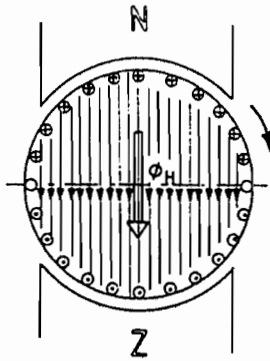


fig. 36
hoofdveld

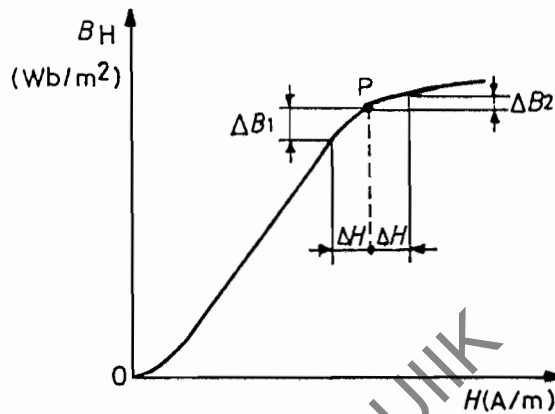


fig. 37

In het lineaire gebied zou de inductiewijziging in functie van de magnetomotorische kracht (NI) groot zijn, wat onstabiele generatorwerking tot gevolg zou hebben. In het verzadigingsgebied is de werking wel stabiel, maar dit ten koste van een te hoge magnetomotorische kracht.

Met het werkingpunt P stemt hoofdflux ϕ_H overeen. Bij het belasten van de generator zal er dan door de ankerwikkeling een stroom vloeien; die zal op zijn beurt een magnetisch veld (ϕ_D) opwekken. Dat veld, dat we verder *ankerdwarsveld* zullen noemen, is voorgesteld in fig. 38.

Ter wille van de duidelijkheid is de hoofdflux ϕ_H op die figuur niet getekend. De puntjes en kruisjes duiden op de stroomzin die wordt bepaald door de zin van de gegenereerde spanning en de stand van de borstels (hier in de neutrale lijn).

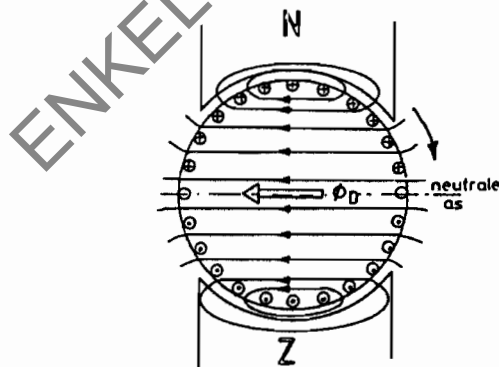


fig. 38
dwarsveld

Op fig. 38 zien we duidelijk dat de veldlijnen van het ankerveld loodrecht op de veldlijnen van de hoofdflux staan. Als de borstels in de neutrale lijn staan, staat het ankerveld loodrecht op het hoofdveld. We noemen het ankerveld daarom *dwarsveld* (ϕ_D). In werkelijkheid zijn echter beide fluxen (ϕ_H en ϕ_D) gelijktijdig aanwezig en zullen ze één resulterend veld ϕ vormen (fig. 39a en b).

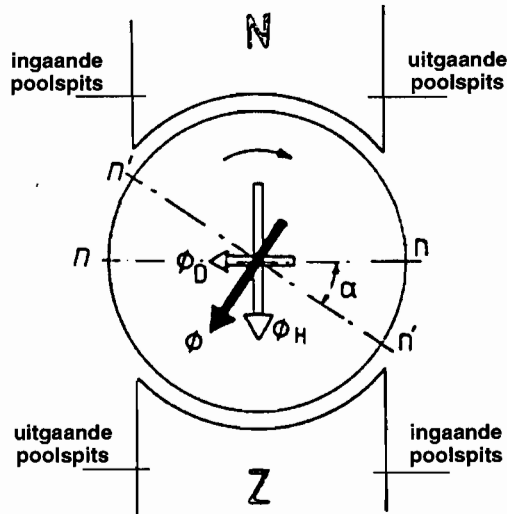


fig. 39a
resultierend veld

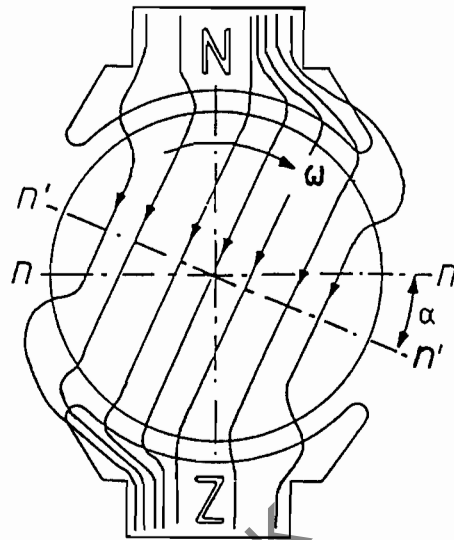


fig. 39b
verdraaiing neutrale lijn

Door de ankerreactie wordt de flux versterkt onder de uitgaande poolspitsen (geleider treedt *uit* poolgebied) en verzwakt onder de ingaande poolspitsen (geleider treedt *in* poolgebied). Aangezien het werkpunt op de magnetisatiekromme niet in het lineaire gebied ligt (fig. 37), is de verzwakking van inductie (ΔB_1) groter dan de toename (ΔB_2). Dat resulteert in een magnetisch veld ϕ dat in zijn totaliteit verzwakt.

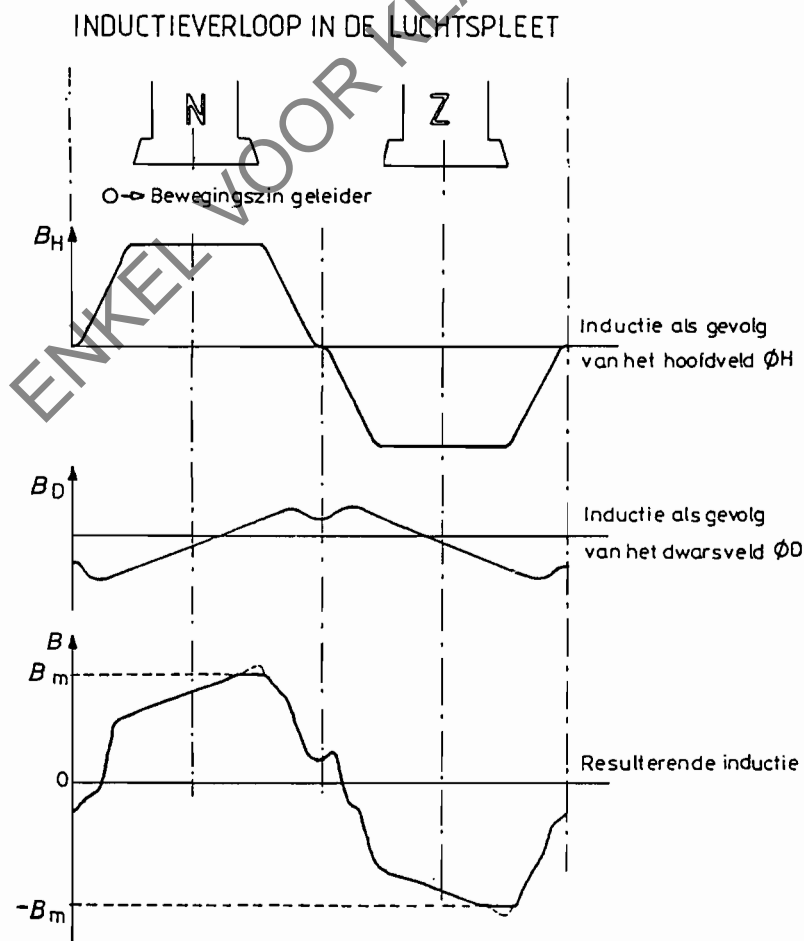


fig. 40

1.7.2 Gevolgen van de ankerreactie

Doelstelling

- De gevolgen van de ankerreactie toelichten.

- 1 Door het verzadigingsverschijnsel zal de resulterende flux ϕ bij belasting kleiner zijn dan bij nullast (ϕ_H). De gegenereerde spanning zal dus lager zijn. Enkele geleiders komen overigens in een ander poolgebied te liggen, waardoor de spanning per tak afneemt.
- 2 In fig. 39a-b zien we dat de neutrale lijn over een hoek α verdraaid is in de draaizin. Gevolg daarvan is dat in de lijn n' geen spanning wordt gegenereerd, terwijl dat nu wel gebeurt in de vroegere neutrale lijn n .
- 3 Door het dwarsveld wordt de noodzakelijke omkering van de stroomzin in de anker-spoulen bij de neutrale lijn bemoeilijkt. Dat verschijnsel wordt nader toegelicht bij het behandelen van het commutatieverschijnsel.

1.7.3 Middelen om de nadelige invloed van de ankerreactie te verminderen

Doelstellingen

- De verschillende middelen om de nadelige invloed van de ankerreactie te verminderen, toelichten.
- De verschillende methoden om de ankerreactie te verminderen, onderling vergelijken.

a Borstels verplaatsen

We zouden de nadelige gevolgen van de ankerreactie kunnen verhelpen door de borstels, mede in functie van de belastingtoename, in de draaizin te verplaatsen. Op die manier staan de borstels altijd in verbinding met het wikkelement in de nieuwe neutrale lijn. De moeilijkheid is dat de hoek α wordt bepaald door de belasting van het anker, zodat de borstels steeds een andere stand dienen in te nemen bij veranderlijke belasting. Bovendien ontstaat een supplementaire flux die de hoofdflux tegenwerkt. In plaats van de gevolgen te neutraliseren, gaan we trachten de oorzaak (het dwarsveld) te bestrijden.

b Plaatsen van hulppolen

De hulppolen moeten het dwarsveld van het anker binnen de neutrale zone bestrijden. Hulppolen zijn kleine, smalle polen die tussen de hoofdpolen worden geplaatst. Ze zijn voorzien van weinig windingen met dikke draad en staan in serie geschakeld met de ankerwikkeling. De flux die ze opwekken moet tegengesteld zijn aan de dwarsflux van de ankerwikkeling. Aldus volgt – gezien in de draaizin – op elke hulppool een gelijknamige hoofdpool. Bij een juiste keuze van het aantal ampèrewindingen zal de ankerdwarsflux grotendeels geneutraliseerd worden binnen het beperkt invloedsgebied van de hulppolen (smalle polen), zoals te zien is op fig. 41 en 42.

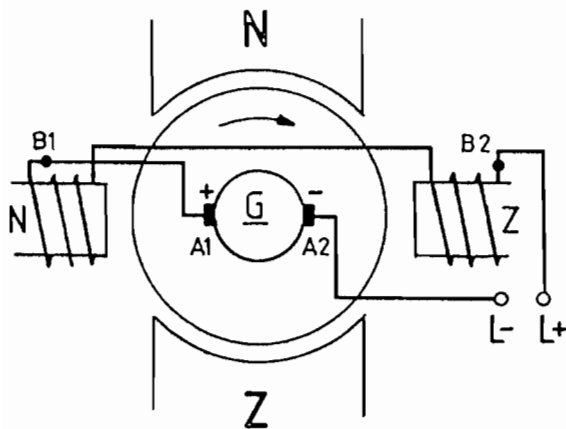


fig. 41a
aansluitwijze

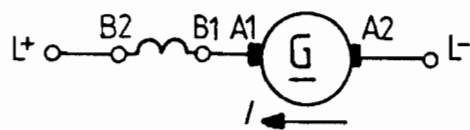


fig. 41b
aansluitschema

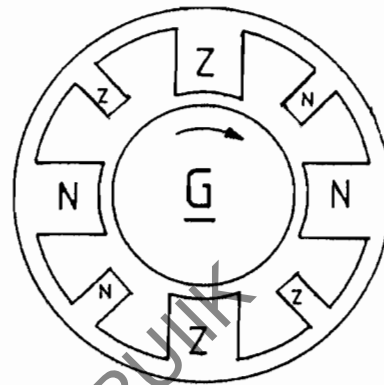


fig. 42
plaatsing hulppolen

Voor machines met klein vermogen volstaat deze oplossing.
Voor machines met een groot vermogen moet daarnaast nog een compensatiewikkeling worden voorzien.

c Plaatsen van een compensatiewikkeling

De compensatiewikkeling zal de rest van het ankerdwaarsveld, dat niet door de hulppolen werd geneutraliseerd, opheffen (fig. 43a-b).

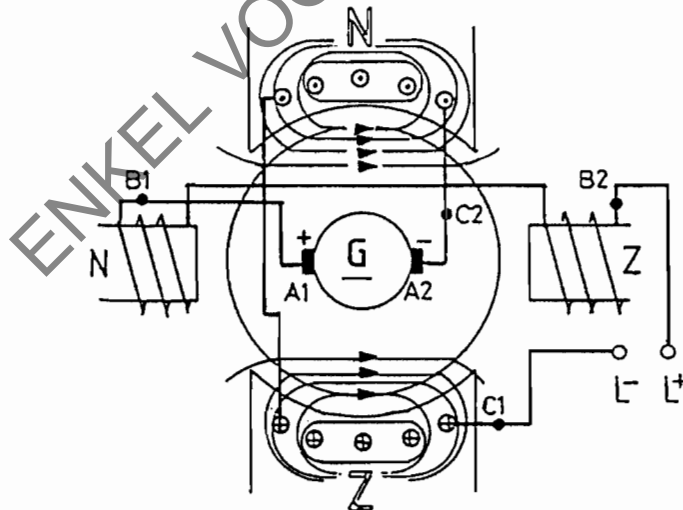


fig. 43a
aansluitwijze

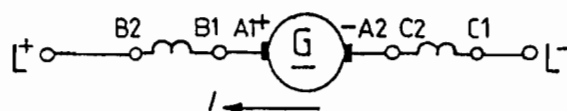


fig. 43b
aansluitschema

De compensatiewikkeling wordt aangebracht in gleuven die in de poolschoenen van de hoofdpolen zijn voorzien. Evenals de hulppoolwikkeling staat de compensatiewikkeling in serie met de ankerwikkeling, waardoor het compensatieveld evenredig wordt met de ankerstroom.

d Vergroten van de magnetische weerstand (reluctantie) voor de dwarsflux ϕ_D

Twee methoden kunnen toegepast worden.

- *Het vergroten van de luchtspleet*
Als de luchtspleet tussen anker en polen vergroot, neemt de dwarsflux af. Maar hier door verzwakt ook de hoofdflux. Om de grootte van de hoofdflux te behouden, is er een grotere magnetomotorische kracht (mmk) nodig.
- *Het aanbrengen van sleuven in de poolschoenen van de hoofdpolen*
Sleuven, aangebracht in de richting van het hoofdveld, verzwakken het hoofdveld praktisch niet terwijl het dwarsveld daarentegen sterk afneemt (fig. 44).

e Sterkere hoofdflux ϕ_H

Wanneer het ijzer van de magnetische kring ver in de verzadiging zit, kan het ankerveld noch versterken, noch verzwakken (zie fig. 37). Men past hiervoor soms een speciale constructievorm van de poolspitsen toe.

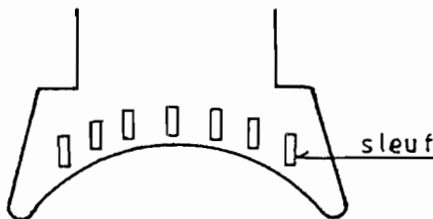


fig. 44

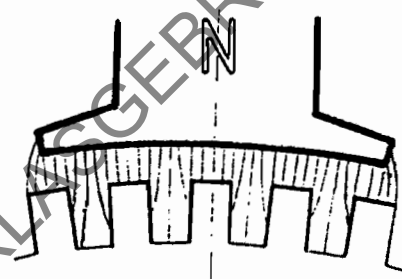


fig. 45

Toelichting

a Flux in de luchtspleet

Bij het tekenen van de fluxen werd nooit rekening gehouden met het feit dat de veldlijnen vanuit de hoofdpool bij voorkeur in de tanden van het ankerijzer zullen treden (fig. 45). We gingen er altijd van uit dat het veld in de luchtspleet homogeen en radiaal gericht is.

b Belast anker

Uit het voorgaande kunnen we besluiten dat het belast anker van een generator zich op magnetisch vlak gedraagt als een spoel waarvan de as gelegen is in de neutrale lijn (zie fig. 46).

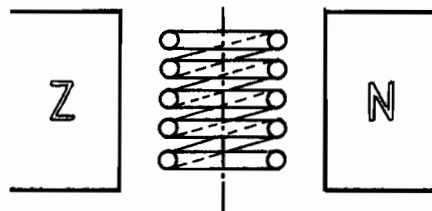


fig. 46

1.8 De commutatie

We bespreken achtereenvolgens:

- het verschijnsel commutatie;
- de gevolgen van de commutatie;
- de middelen om de nadelige gevolgen van de commutatie te verminderen.

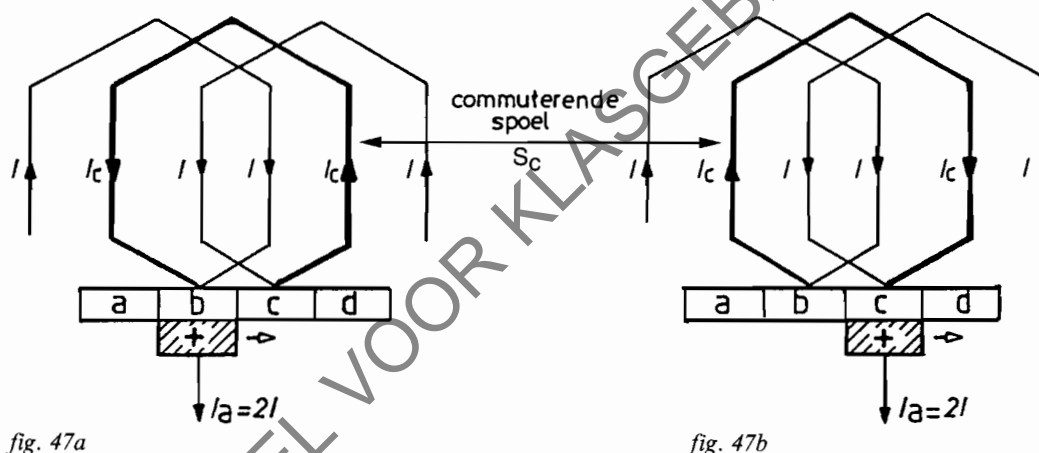
1.8.1 Verschijnsel

Doelstellingen

- De verschijnselen *commutatie* en *commuterend wikkelement* omschrijven.
- Aan de hand van enkele schema's het commutatieverschijnsel toelichten.

Onder commutatie verstaat men het omkeren van de stroomzin in het wikkelement dat van het ene poolgebied in een ander poolgebied terechtkomt.

Anders gezegd, voortdurend worden wikkelementen van de ene naar de andere parallelle tak overgeschakeld. In fig. 47a en b stellen we het gebeuren schematisch voor.



We herkennen hier een luswikkeling.

In fig. 47b zal de zin van de stroomsterkte door de spoel S_c omgekeerd zijn t.o.v. de stroomzin in fig. 47a. De tijd waarin die stroomzinomkering gebeurt, is de tijd die het anker nodig heeft om over één lamel te verdraaien. Die tijd is uiterst kort. Vermits het wikkelement omgeven is met ferromagnetisch materiaal, vormt het wikkelement een inductieve stroomkring ($L = \frac{N^2}{R_m}$; zie 1B-19.1). Treedt in dat wikkelement een stroomverandering op, dan zal dat gepaard gaan met een spanning van zelfinductie

$$e_L = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

die zodanig gericht is dat de ontstaansoorzaak (stroomverandering) wordt tegengewerkt. Zij zal in dit geval de stroomomkering tegenwerken, met alle gevolgen van dien.

De figuren 48a, b en c stellen de ankerwikkeling vereenvoudigd voor; we volgen wikkellelement II dat in commutatie verkeert.

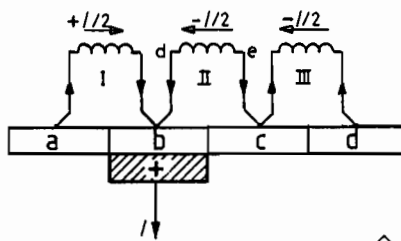


fig. 48a

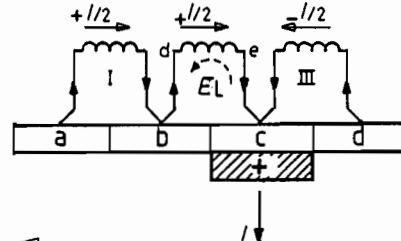


fig. 48c

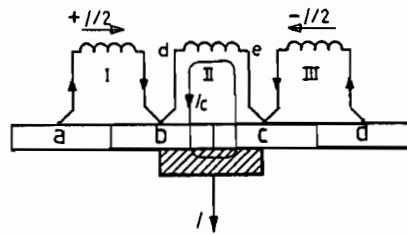


fig. 48b

In fig. 48a zien we de stroom I via lamel b en de + borstel het anker verlaten. De stroom in spoel II ($\frac{I}{2}$) is gericht van e naar d. In fig. 48b sluit de borstel spoel II kort en de borstel krijgt zijn stroom via lamel b ($+\frac{I}{2}$) en lamel c ($-\frac{I}{2}$).

In spoel II zou de stroom ($-\frac{I}{2}$) nul moeten worden. Dat kan echter niet om de volgende redenen:

- Door het ankerdwarsveld blijft het wikkelement in hetzelfde poolgebied (borstels in de theoretische neutrale lijn). Het element zal een spanning genereren die in de kortgesloten wikkeling een stroom stuurt volgens de aanvankelijke zin ($-I_c$).
- Omdat de stroom ($-\frac{I}{2}$) eerst nul en vervolgens zelfs $+\frac{I}{2}$ moet worden en de zelfinductiespanning zich daartegen verzet, blijft de stroom in dezelfde zin verder vloeien. In fig. 48b gebeurt dat onder vorm van een circuliërestroom I_c . Een fractie van een seconde later hebben we de toestand van fig. 48c. De stroom in spoel II moet plots $+\frac{I}{2}$ worden (van d naar e). De hoge zelfinductiespanning zal die plotse stroomstijging opnieuw trachten te beletten. Gevolg daarvan is dat de opgedrongen stroom gedeeltelijk via lamel b naar de + borstel zal 'overspringen' onder de vorm van een vonk. De heersende zelfinductiespanning zal op dat ogenblik de vonkvorming nog versterken.

1.8.2 Gevolgen van de commutatie

Doelstelling

- De schadelijke gevolgen van het commutatieverschijnsel uitleggen.

De commutatie herhaalt zich voortdurend, met het gevolg dat er continu vonken ontstaan tussen borstel en collectorlamellen. Die vonken zullen de collector oververhitten en beschadigen.

1.8.3 Middelen om de nadelige invloed van de commutatie te verminderen

Doelstellingen

- Middelen om de nadelige invloed van de commutatie te verminderen, uitleggen.
- Aan de hand van enkele grafieken het verloop van de inductie, veroorzaakt door de onderscheiden polen, weergeven.

Principe

Om de nadelige gevolgen van de commutatie te bestrijden moet:

- de zelfinductiespanning (als gevolg van de stroomomkering) beperkt worden;
- de storende gegenereerde spanning ten gevolge van het ankerveld vermeden worden.

a De zelfinductiespanning $e_L = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$ beperken

- e_L kunnen we beperkt houden door de commutatietijd (Δt) te vergroten. Dat kan door de borstels op de collector te verbreden.
- De factor $L = \frac{N^2}{R_m}$ kan verkleinen door het wikkelement in brede, ondiepe gleuven te plaatsen en de tanden van het rotorijzer sterk te verzadigen.
We kunnen ook het aantal windingen beperken en de wikkelementen dichter bij elkaar plaatsen.
- De factor ΔI wordt bepaald door de belasting van de generator. De zelfinductiespanning zal dus van de grootte van de belasting afhangen.
- De tijdsconstante van de kortgesloten kring $\tau = \frac{L}{R_m}$ kan verkleinen door de ohmse weerstand van de kring (wikkelement, lamellen en borstel) te vergroten.
Dit moedigt het gebruik van harde koolstofborstels in plaats van metalen borstels aan.

b De gegenereerde spanning ten gevolge van het ankerdwarsveld van de generator beperken

Dit kan door:

- de borstels in de draaizin te verdraaien;
- het gebruik van hulp- of commutatiepolen;
- het gelijktijdig gebruik van hulppolen en compensatiewikkeling;
- het plaatsen van de ankergeleiders in schuine gleuven.

– de borstels in de draaizin verdraaien

De stand van de borstels bepaalt de plaats waar de commutatie zal plaatshebben. Een gevolg van de verplaatsing van de borstels is wel dat er bij de ankerflux een demagnetiserende component ontstaat, zodat bij wisselende belasting de borstelstand moet worden aangepast. De borstels nemen gewoonlijk een 'gemiddelde' stand in. De optimale stand is die waarbij de vonken aan de collector verdwijnen. Die ingreep wordt soms voor kleine machines toegepast.

– hulppolen of commutatiepolen

De borstels staan in dat geval altijd in de oorspronkelijke, neutrale lijn. De hulppolen hebben dezelfde polariteit als de daaropvolgende hoofdpool, in de draaizin gezien (zie fig. 49).

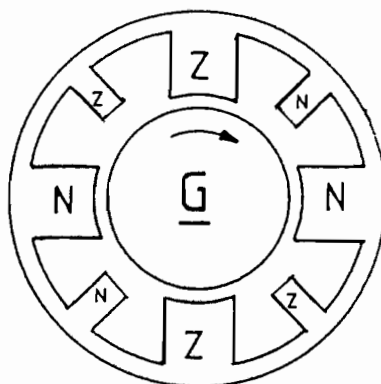


fig. 49
hulp-commutatiepolen

De hulppolen, al gebruikt voor het beperken van de ankerreactie (zie 1.6.3), blijken bovendien een bijkomende taak te kunnen vervullen, met name: een spanning genereren die de commutatie gunstig beïnvloedt. De hulppolen worden bekrachtigd door de belastingsstroom van de generator. De flux verandert dan evenredig met die stroom, op voorwaarde dat de hulppolen niet verzadigd zijn. Het is om die reden dat de luchtspleet onder de hulppolen soms 2 à 3 maal groter wordt genomen dan die onder de hoofdpolen.

– *hulppolen en compensatiewikkeling*

Bij grote machines zijn de hulppolen niet meer in staat om de hoger beschreven functies te vervullen. In dat geval zullen compensatiewikkelingen het ankerdwarsveld moeten compenseren, terwijl hulppolen enkel zorgen voor een gunstige commutatie.

– *ankergeleiders in schuine (t.o.v. de as van het anker) gleuven*

Op die manier gebeurt de overgang naar het andere poolgebied niet zo plots. Het wikkelement zal zich dan al gedeeltelijk in het Z-poolgebied bevinden, terwijl het overblijvende deel nog in het N-poolgebied ligt (fig. 50).



fig. 50
Anker met schuine gleuven

1.9 Vorm van de magnetische velden

Bij wijze van overzicht volgen hier nog de verschillende magnetische velden zoals ze rond de ankeromtrek voorkomen. De waarde van de onderscheiden inducties staat in verhouding tot de flux van de hoofdpolen (fig. 51).

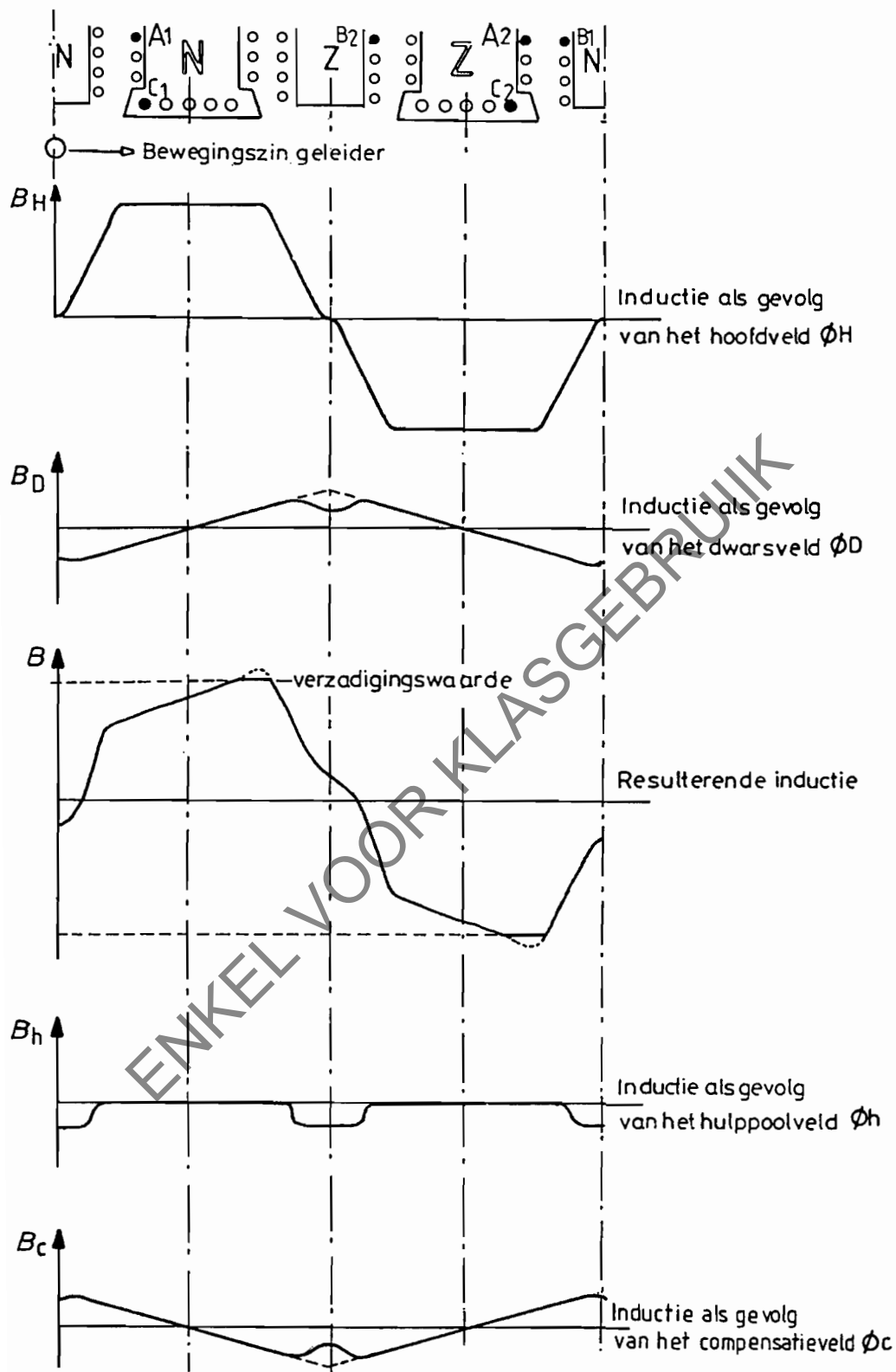


fig. 51

a Hoofdveld ϕ_H

Voor een N-poolgebied tekenen we de fluxzin naar boven gericht, voor een Z-poolgebied naar beneden.

b Ankerdwarsveld ϕ_D

Dat staat loodrecht op het hoofdveld. In de neutrale lijn is het ankerveld zwakker, omdat de luchtspleet daar het grootst is.

c Hulppoolveld ϕ_h

Is een smal magnetisch veld dat hoofdzakelijk in de neutrale zone werkzaam is.

d Compensatieveld ϕ_c

Dat veld moet het spiegelbeeld zijn van het ankerdwarsveld. Beide velden moeten elkaar zoveel mogelijk opheffen.

1.10 Voorbeelden

- 1 Een geleider van 30 cm lang bevindt zich over de hele lengte in een uniform magnetisch veld met fluxdichtheid $B = 1 \text{ Wb/m}^2$. We bewegen de geleider loodrecht op de veldlijnen met een snelheid van 6 m/s. Hoe groot is de gegenereerde spanning? Bereken eveneens de gegenereerde spanning als de geleider zich onder een hoek van 30° met de veldrichting beweegt.

Oplossing

Bij loodrechte beweging:

$$E = B \cdot l \cdot v \\ = 1 \cdot 30 \cdot 10^{-2} \cdot 6 = 1,8 \text{ V}$$

Bij beweging onder een hoek van 30° :

$$E = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha \\ = 1 \cdot 30 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 0,5 = 0,9 \text{ V}$$

- 2 We plaatsen een solenoïde van 20 cm lang met 300 windingen en 3 cm diameter in een homogeen magnetisch veld met veldsterkte 12 000 A/m in de lucht. Het magnetisch veld, door de spoel omsloten, wordt tot nul gebracht in 5/100 seconde. Bereken de gegenereerde spanning in de spoel.

Oplossing

De inductie

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \\ = 4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 12000 = 0,01508 \text{ Wb/m}^2$$

Door de spoel omvatte flux

$$\phi = B \cdot A = B \cdot \pi \cdot r^2 \\ = 0,01508 \cdot 3,14 \cdot (1,5 \cdot 10^{-2})^2 \\ = 10,66 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$$

De gegenereerde spanning

$$E = N \cdot \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \\ = 300 \cdot \frac{10,66 \cdot 10^{-6}}{0,05} = 0,06396 \text{ V}$$

- 3 Een wikkelement bevat 30 windingen en draait met een rotatiefrequentie $n = 16 \frac{2}{3} \text{ s}^{-1}$ in een homogeen tweepolig magnetisch veld. Als het vlak van het wikkelement loodrecht op de veldlijnen staat, is de omsloten flux 5 mWb. Bereken de gemiddelde waarde van de gegenereerde spanning.

Oplossing

De tijd om de omsloten flux van maximum tot nul te brengen, is de tijd nodig om het wikkelement $1/4$ van een omwenteling te verdraaien.

$$\Delta t = \frac{1}{16\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{4} = 0,015 \text{ s}$$

De gemiddelde gegenereerde spanning

$$E = N \cdot \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = 30 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,015} = 10 \text{ V}$$

- 4 De ankerwikkeling van een vierpolige generator heeft in totaal 400 windingen. Ze bevat 4 ankertakken en de flux per pool bedraagt $0,02 \text{ Wb}$. Als de rotatiefrequentie 25 s^{-1} bedraagt, hoe groot is dan de gegenereerde spanning van die generator?

Oplossing

$$E = 2 \frac{p}{a} \cdot N \cdot \phi \cdot n$$

$$E = 2 \frac{2}{2} \cdot 400 \cdot 0,02 \cdot 25 = 400 \text{ V}$$

- 5 Bereken met de gegevens van vorig vraagstuk de totale ankerweerstand, gemeten tussen de + en – pool van het anker. De doorsnede van de wikkeldraad is $0,75 \text{ mm}^2$, de gemiddelde lengte per winding is 60 cm ($\rho = 0,0175 \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$).

Oplossing

De takweerstand (100 wnd) bedraagt:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 0,6}{0,75 \cdot 10^{-6}} = 1,4 \Omega$$

Vermits $2a = 4$, is de totale ankerweerstand

$$R_a = \frac{R}{4} = \frac{1,4}{4} = 0,34 \Omega$$

- 6 In de luchtspleet van een vierpolige generator heerst een fluxdichtheid van $0,3 \text{ Wb/m}^2$. De lengte van de werkzame geleiders is 30 cm , de poolboog meet 20 cm . Het aantal windingen bedraagt 600 en er zijn 4 ankertakken. Als het anker met een rotatiefrequentie $16\frac{2}{3} \text{ s}^{-1}$ draait, hoe groot zal dan de totaal gegenereerde spanning zijn?

Oplossing

1ste methode:

Flux per pool:

$$\phi = B \cdot A = B \cdot l \cdot b$$

$$\phi = 0,3 \cdot 0,3 \cdot 0,2 = 0,018 \text{ Wb}$$

Per ankertak zijn $\frac{600}{4} = 150$ windingen.

De tijd, nodig om de flux van maximum tot nul te variëren, is de tijd van $1/8$ omwenteling (4-polig).

$$\Delta t = \frac{1}{16\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{8} = \frac{1}{133\frac{1}{3}} \text{ s}$$

Spanning per tak:

$$E = N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 150 \cdot \frac{0,018}{\frac{1}{133\frac{1}{3}}} = 360 \text{ V}$$

2de methode:

Spanning per tak:

$$E = 2 \frac{p}{a} \cdot N \cdot \phi \cdot n$$

$$E = 2 \frac{2}{2} \cdot 600 \cdot 0,018 \cdot 16 \frac{2}{3} = 360 \text{ V}$$

1.11 Toepassingen

- 1 De ankerwikkeling van een vierpolige generator heeft in totaal 800 werkzame geleiders. Er zijn vier ankertakken en de flux per pool is 0,025 Wb. Welke spanning zal de ankerwikkeling genereren als de rotatiefrequentie 25 s^{-1} is?
- 2 Men wil met de vorige generator een spanning van 750 V genereren. Welke flux moet men dan per pool opwekken?
- 3 Een generatoranker heeft een enkelvoudige parallelwikkeling. De machine is vierpolig, bevat vier ankertakken en de flux per pool is $4 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$. Hoeveel werkzame geleiders bevat het anker in elke tak, als men weet dat de rotatiefrequentie 25 s^{-1} en de ankerspanning 1000 V bedraagt?
- 4 Een ankerwikkeling (seriegolfwikkeling) van een generator bezit 80 wikkelementen met elk 5 windingen. De gemiddelde lengte van één winding is 70 cm en de doorsnede van de wikkel draad is 5 mm^2 . Bereken de weerstand van de volledige ankerwikkeling. (resistiviteit koper $\rho = 0,0175 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$)
- 5 Een generator met een ankerweerstand van $0,3 \Omega$ levert een stroom van 42 A bij 110 V klemspanning. Bereken de gegenereerde spanning.

1.12 Diagnostische toets

Zie Toetsenboekje.

1.13 Herhalingstaken – Basis

- 1 Een ankerwikkeling van een vierpolige generator heeft in totaal 1000 werkzame geleiders. Er zijn vier ankertakken en de flux per pool is 0,025 Wb. Hoe groot moet de rotatiefrequentie van die generator zijn om een spanning van 700 V te genereren?
- 2 Een generator wekt bij een rotatiefrequentie $n = 25 \text{ s}^{-1}$ een spanning van 1000 V op. De machine is vierpolig uitgevoerd, bezit vier ankertakken en de flux per pool bedraagt $8 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$. Hoeveel windingen bevat deze ankerwikkeling?
- 3 Een achtpolige generator draait met een rotatiefrequentie $n = 20,833 \text{ s}^{-1}$. De poolflux is 0,02 Wb en er zijn 2 ankertakken voorzien. De ankerwikkeling moet gevormd worden met 30 wikkelementen. Hoeveel windingen moet elk wikkelement bevatten om een spanning van 500 V te genereren?

- 4 Hoe groot moet de belastingsweerstand zijn van een generator die een spanning van 250 V genereert en een ankerweerstand van $0,2 \Omega$ heeft? De stroomsterkte in de buitenketen is 20 A. Bereken tevens de klemspanning.

1.14 Verrijksopdrachten

- 1 De ankerwikkeling van een vierpolige generator bevat in totaal 8 wikkelementen met elk 50 windingen. De lengte van de werkzame geleiders is 20 cm; de poolhoogte meet 12,5 cm. Welke spanning zal de ankerwikkeling genereren bij een rotatiefrequentie 20 s^{-1} , als men weet dat er 4 ankertakken zijn en de inductie 1 Wb/m^2 bedraagt?
- 2 Een vierpolige generator met een rotatiefrequentie $n = 13\frac{1}{3} \text{ s}^{-1}$ bezit 360 windingen en 4 ankertakken. De veldsterkte in de luchtspleet is $0,4 \cdot 10^6 \text{ A/m}$ en elke pool heeft een oppervlakte van $0,075 \text{ m}^2$. Hoe groot is de gegenereerde spanning? Hoeveel windingen zou de ankerwikkeling moeten bevatten om met twee ankertakken dezelfde spanning te genereren?
- 3 Een seriegolfwikkeling heeft de volgende kenmerken:
 - 100 wikkelementen met elk 10 windingen;
 - de gemiddelde lengte per winding is 0,8 m;
 - de doorsnede van de wikkeldraad is 4 mm^2 ;
 - de toegelaten stroomdichtheid $J = 4 \text{ A/mm}^2$;
 - $E = 150 \text{ V}$.

Hoe groot wordt de klemspanning van de generator in de veronderstelling dat de maximum stroom wordt afgenomen en de weerstand van de hulppoolwikkelingen te verwaarlozen is? Welk vermogen moet men aan de as toevoegen indien het rendement 80 % bedraagt?
- 4 Een generator levert bij een klemspanning van 150 V een stroomsterkte van 30 A in een buitenketen. De aandrijfmotor heeft een rotatiefrequentie $n = 21\frac{2}{3} \text{ s}^{-1}$ en ontwikkelt een nuttig koppel van 40 Nm. Hoe groot is het rendement van de generator?
- 5 Een rechthoekig wikkelement bevat 200 windingen en draait met een eenparige rotatiefrequentie $n = 16\frac{2}{3} \text{ s}^{-1}$ in een uniform magnetisch veld, waarvan de veldsterkte in elk punt $120\,000 \text{ A/m}$ is. De werkzame geleiders zijn 20 cm lang; de breedte van de wikkelingen is 12 cm. Bereken de topwaarde en de gemiddelde waarde van de gegenereerde spanning.
- 6 Een vierpolige generator bevat 1000 windingen, 4 ankertakken en draait met een rotatiefrequentie $n = 20 \text{ s}^{-1}$. De flux per pool is 0,015 Wb. De stroomsterkte in de buitenketen bedraagt 8 A. De gemiddelde lengte van de gebruikte wikkeldraad is 0,9 m per winding en de doorsnede is $0,3 \text{ mm}^2$, de resistiviteit bedraagt $0,0175 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$. Bereken:
 - de gegenereerde spanning;
 - de klemspanning;
 - de grootte van het tegenwerkend koppel.

SYNTHESE

Gelijkstroomgeneratoren: theoretische inleiding

Een gelijkstroomgenerator zet mechanische energie (bewegingsenergie) om in elektrische energie.

Principe generatorwerking

Wanneer ten gevolge van de beweging de omsloten flux van een winding verandert of wanneer een rechte geleider veldlijnen snijdt, wordt er in die winding of geleider een spanning gegenereerd.

grootte: $E = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ (V)

of: $E = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha$ (V)

Van een genererende winding naar een generator

Om een *voortdurende* spanning te genereren plaatsen we een draaiende winding in een magnetisch veld. Is het magnetisch veld uniform dan ontstaat er in de winding een sinusoidale wisselspanning als de hoeksnelheid ω constant is.

Om de *grootte van de gegenereerde spanning* op te drijven:

- vergroten we de sterkte van het veld (inductie). Dat doen we door de draaiende winding op een massieve trommel van magnetisch materiaal te plaatsen en de weerstand van de magnetische keten (reluctantie) te verkleinen;
- vervangen we de winding door een spoel met meerdere windingen;
- plaatsen we meerdere spoelen, verdeeld over de hele ankeromtrek.

Om de gegenereerde spanning in deze draaiende spoelen maximaal te benutten dienen ze op een 'geordende' wijze met elkaar verbonden te worden. De *wikkeltheorie* bracht ons hier de nodige inzichten.

Naar gelang van de aard van de aandrijvende machine (snel- of traagdraaiend), worden de genererende spoelen onderling op een passende wijze (lus- of golfwikkeling) verbonden. De grootte van de te leveren stroom zal het aantal ankertakken bepalen.

De grootte van de gegenereerde spanning berekenen we met de formule

$$E = k \cdot \phi \cdot n \quad (\text{V})$$

met de machineconstante

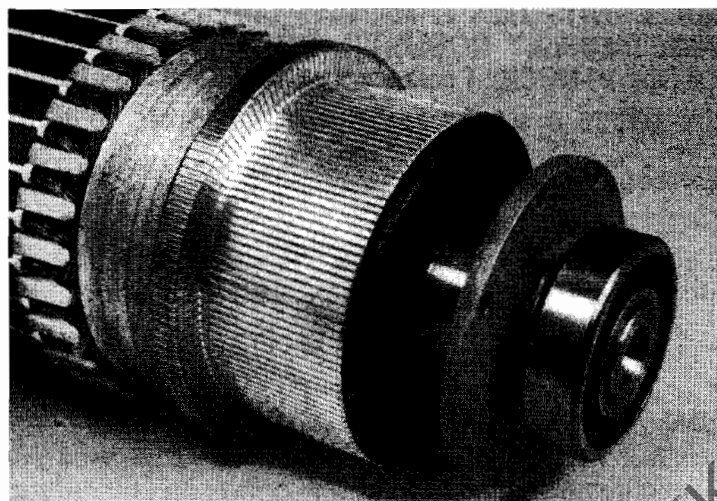
$$k = 2 \cdot \frac{p}{a} \cdot N$$

Collector-commutator

Om een verbinding te maken tussen de draaiende delen van de generator en vaststaande onderdelen van de elektrische stroomketen, en om de gegenereerde wisselspanning om te zetten naar een gelijkspanning dient de **collector-commutator**.

Zodra een wikkelelement in een ander poolgebied terechtkomt dient de stroomzin in dat element om te keren. Hier worden we geconfronteerd met het commutatieverschijnsel. De snelle stroomverandering heeft in de commuterende spoel een inductiespanning $E_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ als gevolg. Het omkeren van de stroomzin wordt

hierdoor extra bemoeilijkt. Er ontstaan vonken aan de collector. Dit verschijnsel beperken vraagt weer enkele ingrepen.



Stroomleverende generator

Zodra de generator stroom levert:

- ontstaat er een ankerveld met nadelige gevolgen op de normale generatorwerking

Dit verschijnsel noemen we **ankerreactie**. Om de nadelige werking van de ankerreactie te neutraliseren moeten er enkele ingrepen plaatsvinden;

- ontstaat er een tegenwerkend koppel $T = k \cdot \phi \cdot I$

met de machineconstante $k = \frac{p \cdot N}{a \cdot n}$

De toegevoerde mechanische energie zal dus op een voortdurende wijze het tegenwerkend koppel moeten overwinnen.

