

Gelijkstroommotoren: theoretische inleiding

Wegwijzer

Nu we de beschikking hebben over een generator die ons op continue wijze gelijkstroom-energie levert, kan deze gelijkspanningsbron op allerlei soorten verbruikers aangesloten worden. In deel 1A en 1B werden allerlei verbruikerskringen bestudeerd. Verschillende passieve componenten (weerstand, spoelen en condensatoren) werden daar op een gelijkspanningsbron aangesloten. De elektrische verschijnselen werden bestudeerd en de elektrische grootheden berekend.

Een 'speciaal' type van verbruiker is de gelijkstroombmotor. De motor, die elektrische energie omzet in mechanische energie, zal tijdens zijn werking met wisselende belasting voor het voedingsnet een verbruiker betekenen met veranderlijke belastingseigenschappen.

In de volgende leereenheid trachten we het gedrag van een motor te analyseren zowel bij het aanlopen als tijdens de werking.

We weten dat de gelijkstroomgenerator als voedingsbron steeds minder wordt gebruikt, door de ontwikkeling van de gelijkrichtingstechniek. De gelijkstroombmotor verloor in de naoorlogse periode, door het ter beschikking zijnde wisselstroomnet, aan belang voor veel praktische toepassingen. De moderne toepassingen die de automatisering (robotisering) meebrengen én de evolutie in de gelijkrichtingstechnologie hebben het gebruik van gelijkstroommotoren de laatste jaren echter opnieuw doen toenemen. Dat maakt een studie van de theorie van de gelijkstroommotoren noodzakelijk. Een groot voordeel van gelijkstroommotoren is alvast de mogelijke soepele snelheidsregeling.

In deze leereenheid onderzoeken we het gedrag van de gelijkstroombmotor in het algemeen. Bij de bespreking van de verschillende motortypes (leereenheid 4) zal deze algemene theorie worden toegepast op de onderscheiden motortypes.

Bij de studie van de motor zullen we merken dat de samenstellende delen van een motor identiek zijn aan de samenstellende delen van een generator. Dat maakt het praktisch mogelijk om een generator als motor en een motor als generator te gebruiken.

9999

ENKEL VOOR KLASGEBRUIK

3.1 Bepaling

Doelstelling

- De bepaling van een gelijkstroommotor geven.

Een gelijkstroommotor is een roterende machine die elektrische energie omzet in mechanische energie.

3.2 Werkingsprincipe

Doelstellingen

- Het verschijnsel waarop de principewerking van de elektromotor berust, toelichten.
- Aan de hand van een schets de zin en de grootte van de lorentzkracht bepalen.

3.2.1 Lorentzkracht

Het werkingsprincipe van de elektromotor werd in 1B - 17.3.1 al verklaard. De principewerking berust op de krachtwerking (lorentzkracht) die een stroomvoerende geleider ondervindt als hij zich in een magnetisch veld bevindt.

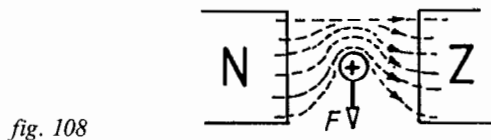


fig. 108



fig. 109

3.2.2 De zin van de lorentzkracht

De zin van de lorentzkracht vinden we door de linkerhandregel toe te passen (1B - 17.1.2).

3.2.3 De grootte van de lorentzkracht

Als de stroomvoerende geleider zich loodrecht op de veldlijnen van een magnetisch veld bevindt, dan is

$$F = B \cdot l \cdot I \quad (\text{N})$$

waarin

F : lorentzkracht in newton

B : inductie van het hoofdveld in Wb/m^2

l : lengte van de geleider in het magnetisch veld in meter

I : stroomsterkte in ampère

3.3 Ontstaan van een koppel

Doelstellingen

- Aan de hand van een figuur het ontstaan van een krachtenkoppel toelichten.
- De functie van de commutator bij de motorwerking verduidelijken.

Om een werkkoppel te ontwikkelen dat oorzaak is van een beweging, plaatst men een winding op een trommel van magnetisch materiaal tussen radiaal uitgesneden polen.

De trommel is draaibaar rond haar as opgesteld. De figuren 110, 111 en 112 geven de toestand met de trommel in verschillende standen weer.

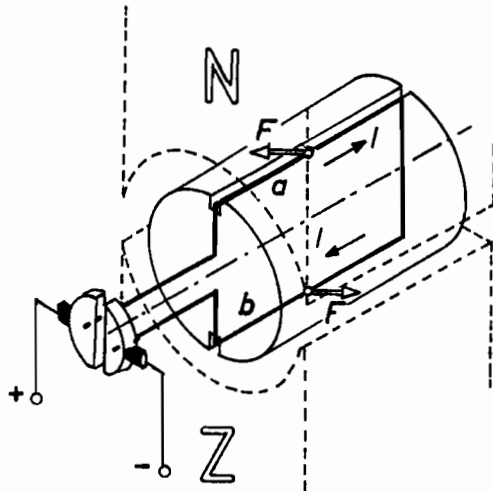


fig. 110

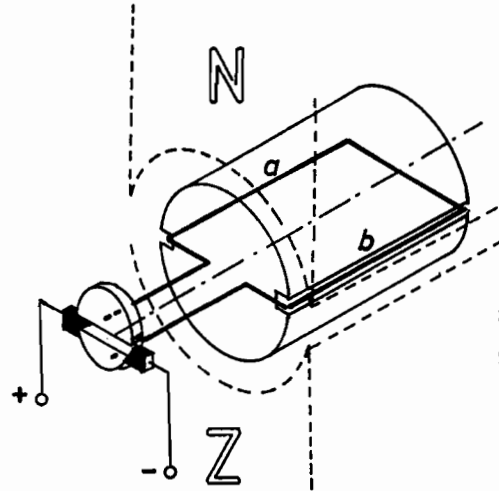


fig. 111

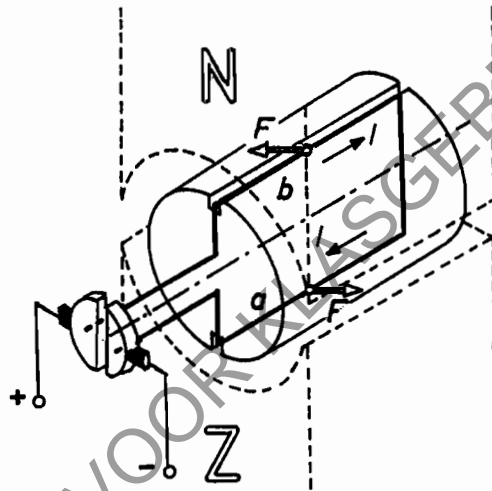


fig. 112

Op elk van de geleiders a en b werkt de lorentzkracht ' F ' in (fig. 110). Beide krachten zijn evenwijdig gericht, tegengesteld van zin en even groot. Op de winding (trommel) ontstaat een koppel met moment $T = F \cdot l$.

Bij verdraaien van de trommel over 180° (figuur 112) stellen we vast dat de stroomzin in de geleiders a en b via de commutator omgekeerd is. Deze toestand geeft aanleiding tot behoud van het koppel in dezelfde zin.

De draaibeweging van de trommel, die een gevolg is van het moment, lijkt verzekerd indien de krachten die op de winding ingrijpen voldoende groot zijn.

Om tot een voortdurende en voldoende krachtige draaibeweging te komen plaatsen we meerdere windingen, gelijkmatig verdeeld over de ankeromtrek en via de commutator aangesloten, op het voedingsnet. Op alle geleiders (fig. 113) werkt nu de lorentzkracht in. Al deze krachten samen vormen nu het aandrijvende koppel van de motor. De trommel zal bewegen zodra het aandrijvende koppel het weerstandskoppel overwint.

3.4 Draaizin van de motor en draaizinomkering

Doelstellingen

- De factoren die de draaizin van de motor bepalen, toelichten.
- De motor en generatorwerking onderling vergelijken wat de draaizin betreft.

3.4.1 Draaizin

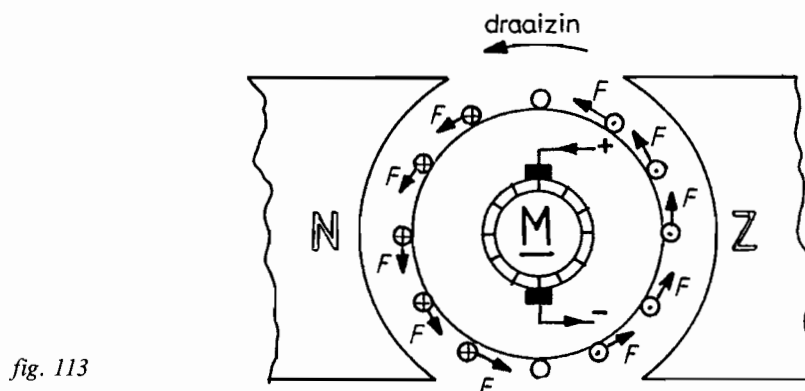


fig. 113

In fig. 113 is een prinseschema van een motor voorgesteld. Met de borstels in de neutrale lijn zullen alle werkzame geleiders in eenzelfde poolgebied de stroom in dezelfde zin voeren. Op elke geleider werkt de lorentzkracht F in. Al die lorentzkrachten samen ontwikkelen een resulterend draaimoment dat we het *werkkoppel* van de motor noemen. De motor beweegt zich in de draaizin zoals op fig. 113 is aangegeven.

3.4.2 Draaizinomkering

Zoals opgemerkt bepaalt de zin van de lorentzkracht de draaizin van de motor. De draaizin omkeren, houdt in dat de zin van de lorentzkracht ($F = B \cdot l \cdot I$) wordt omgekeerd. Daartoe volstaat het om:

- ofwel de stroomzin door de ankerwikkelingen om te keren;
- ofwel de zin van de hoofdflux (B) om te keren.

Bij omkeren van de stroomzin in de ankerwikkeling en van de polariteit van de magneetpolen zal de draaizin niet wijzigen. Ga dat na door toepassing van de linkerhandregel.

3.4.3 Vergelijking van de motor- en generatorwerking wat de draaizin betreft

In fig. 114 en 115 zijn de prinseschema's van een motor en een generator zodanig getekend dat de polariteit van de magneetpolen en de stroomzin door de ankergeleiders gelijk zijn.

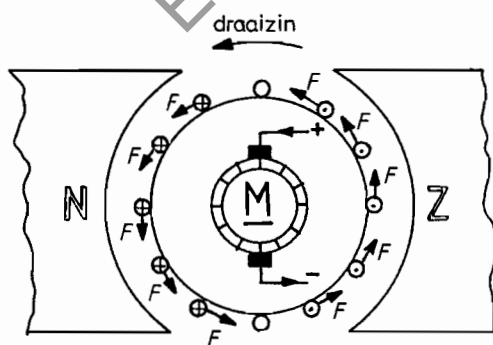


fig. 114

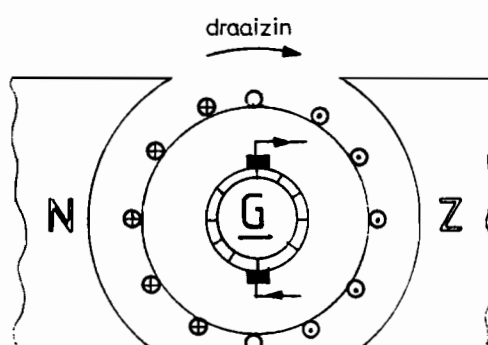


fig. 115

Deze toestand is enkel mogelijk als de draaizin van de generator (rechterhandregel) tegengesteld is aan de draaizin van de motor (linkerhandregel).

Deze vaststelling is nogmaals een bevestiging van de reeds eerder aangehaalde bewering dat het *BII*- en *BIV*-effect elkaar bekampen wanneer ze gelijktijdig optreden. Bij de generator ontstaat een tegenwerkend koppel, bij de motor een tegenspanning.

3.5 Tegenspanning E_t en klemspanning U

Doelstellingen

- Het verschijnsel tegenspanning bij motorwerking toelichten en in verband brengen met de aangelegde voedingsspanning.
- De grootte van de tegenspanning berekenen.
- De hoofdfomule van de motorwerking opstellen door toepassing van de spanningswet van Kirchhoff.

3.5.1 Ontstaan van een tegenspanning

De draaiende motor uit fig. 113 bezit alle elementen die nodig zijn om een spanning te genereren: we hebben werkzame geleiders die zich bewegen in een magnetisch veld. Er wordt bijgevolg een spanning gegenereerd, tegengesteld aan de aangelegde spanning van de bron (toepassing rechterhandregel). Daarom wordt die opgewekte spanning de 'tegenspanning' van de motor genoemd.

Bij stilstand van het motoranker is die tegenspanning nul. Naarmate de motor op snelheid komt zal de tegenspanning toenemen tot het bereiken van zijn nominale snelheid. Dat verschijnsel zal bij het aanlopen en het normaal bedrijf van de motor een belangrijke rol spelen.

3.5.2 Grootte van de tegenspanning

De grootte van de tegenspanning berekenen we zoals we bij de generator de gegenereerde spanning berekenden:

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

of $E_t = k \cdot \phi \cdot n$

met

N : aantal windingen

k : machineconstante

ϕ : flux per pool (Wb)

n : rotatiefrequentie (s^{-1})

De tegenspanning hangt enkel af van de fluxdichtheid en de rotatiefrequentie van de motor.

3.5.3 Spanningswet van Kirchhoff

Toepassing van de spanningswet (1A - 10.2.2) van Kirchhoff op de gesloten ankerketen (fig. 116) van een motor levert de volgende vergelijking op:

$$U - E_t = (R_a + R_b + R_c)I_a = U_{vi}$$

Vermits U_{vi} klein is, mogen we stellen dat $U \approx E_t$ bij normaal bedrijf.

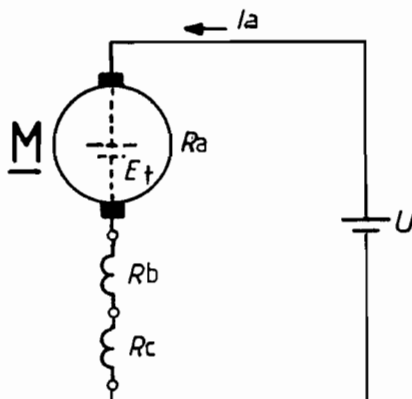


fig. 116

- U : klemspanning (netspanning)
 I_a : ankerstroom
 E_t : tegenspanning
 R_a : ankerweerstand
 R_b : weerstand hulppoolwikkeling
 R_c : weerstand compensatiewikkeling
 U_{vi} : inwendig spanningsverlies

3.6 Rotatiefrequentie van een motor

Doelstellingen

- Aan de hand van een formule het verband bepalen tussen de factoren die de rotatiefrequentie van de motor beïnvloeden.
- De invloed die elektrische grootheden op de rotatiefrequentie van de motor hebben, toelichten.
- De generator- en motorwerking onderling vergelijken wat de rotatiefrequentie betreft.

3.6.1 Verband tussen de factoren die de rotatiefrequentie beïnvloeden

De grootte van de rotatiefrequentie leiden we af uit de formule $E_t = k \cdot \phi \cdot n$

Hierin is E_t de tegenspanning die bij motorwerking optreedt.

De rotatiefrequentie van de motor bedraagt:

$$n = \frac{E_t}{k \cdot \phi}$$

of

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_b + R_c)}{k \cdot \phi}$$

Aangezien de inwendige spanningsval $I_a(R_a + R_b + R_c)$ klein is t.o.v. de klemspanning U mogen we bij benadering stellen dat:

$$n \approx \frac{U}{k \cdot \phi}$$

met

U : motorklemspanning

ϕ : flux per pool (Wb)

k : $\frac{P}{a} \cdot N = \text{machineconstante}$

3.6.2 Rotatiefrequentieregeling van een motor

Uit de formule $n \approx \frac{U}{k \cdot \phi}$ blijkt dat de rotatiefrequentie:

- recht evenredig is met de klemspanning van de motor,
- omgekeerd evenredig is met de flux per pool.

M.a.w. de rotatiefrequentie stijgt bij toenemende klemspanning en daalt bij toenemende flux.

Beide methoden om de rotatiefrequentie te regelen komen in praktische toepassingen voor. Ook het gelijktijdig inwerken op beide factoren (U en ϕ) komt voor. Bij de behandeling van de verschillende motortypes (leereenheid 4) zal telkens dieper worden ingegaan op de toegepaste snelheidsregelmethode voor elk motortype. Bij moderne aandrijftechnieken wordt de rotatiefrequentie van gelijkstroombmotoren elektronisch geregeld.

3.6.3 Vergelijking van motor- en generatorwerking wat de rotatiefrequentie betreft

Bij motorwerking is

$$n_M = \frac{E_t}{k \cdot \phi} = \frac{U - I_a(R_a + R_b + R_c)}{k \cdot \phi}$$

Bij generatorwerking is

$$n_G = \frac{E}{k \cdot \phi} = \frac{U + I_a(R_a + R_b + R_c)}{k \cdot \phi}$$

Willen we zowel bij motor- als bij generatorwerking dezelfde klemspanning U , ankerstroom I_a en hoofdflux ϕ bekomen, dan moet volgens beide formules, de rotatiefrequentie n_G waarmee de generator wordt aangedreven groter zijn dan de rotatiefrequentie van de motor n_M .

3.7 Aanzetten van de gelijkstroombmotor

3.7.1 Grootte van de ankerstroom tijdens het aanzetten van de motor

Doelstellingen

- De factoren die de ankerstroom beïnvloeden met een formule in onderling verband brengen.
- Aan de hand van een formule aantonen dat de stroomsterkte bij het aanlopen van de motor zeer groot is.
- De gevolgen van de hoge aanloopstroom opsommen.

Uit de formule

$$E_t = U - R_i I_a$$

met

$$R_i = R_a + R_b + R_c$$

volgt de ankerstroom bij normaal bedrijf

$$I_a = \frac{U - E_t}{R_i}$$

of

$$I_a = \frac{U - k \cdot \phi \cdot n}{R_i}$$

In deze formule stellen we vast dat bij normaal bedrijf de ankerstroom beperkt wordt door de tegenspanning E_t .

Bij het aanlopen staat de motor stil, $n = 0$; tevens is $E_t = 0$ en $I_a = \frac{U - 0}{R_i} = \frac{U}{R_i}$

Aangezien R_i klein is, zal de stroom bij inschakelen veel te groot zijn (20 tot 50 maal de nominale stroomsterkte).

De gevolgen van deze te hoge aanzetstroom zijn: een te hoog joule-effect in de ankerketen, een ontoelaatbaar hoge stroomstoot op het voedingsnet en een dynamisch-mechanische schok.

3.7.2 Het beperken van de ankerstroom bij het aanzetten

Doelstelling

- De middelen om de hoge aanzetstroom te beperken, opsommen en toelichten.

Om de hoge aanzetstroom te beperken, schakelen we een aanzetweerstand R_{ra} in serie met het anker (fig. 117). De ankerstroom wordt hierdoor beperkt tot de waarde

$$I_a = \frac{U}{R_i + R_{ra}}$$

Naarmate de motor op snelheid komt wordt die aanzetweerstand geleidelijk aan uitgeschakeld.

Het uitschakelen mag niet te vlug gebeuren. Door het versnellen van de motor neemt de tegenspanning ($E_t = k \cdot \phi \cdot n$) geleidelijk aan toe en vermindert aldus de ankerstroom. Het uitschakelen mag ook niet te traag gebeuren want dan zouden de aanloopweerstand en de motor gedurende een te lange tijd een vrij grote stroom voeren. De capaciteit van deze weerstand is daarop niet berekend (joule-effect).

Een ander middel is een aanzet op verlaagde spanning. Dat vraagt echter een regelbare voedingsbron met meestal groot vermogen.

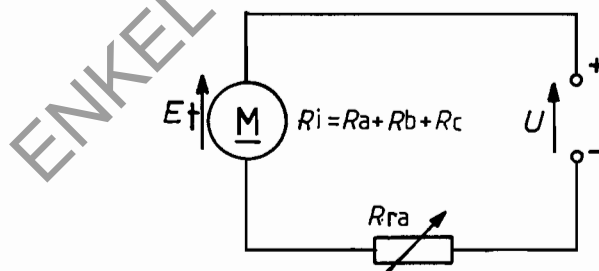


fig. 117

3.7.3 Het berekenen van de waarde van de aanzetweerstand

Doelstellingen

- De factoren die de grootte van de aanzetweerstand bepalen, opsommen en uitleggen.
- De waarde van de aanzetweerstand berekenen.
- De manier van uitschakelen van een aanzetweerstand tijdens de aanloopperiode toelichten.

De grootte van de aanzetweerstand wordt vooral bepaald door de aanzetstroomstoot die men op het voedingsnet toelaat. Voor gelijkstroommotoren zijn die maximum toegelaten stroomstoten bepaald door een verhoudingsfactor

$$k = \frac{I_{\max}}{I_{\text{nom}}}$$

De verhoudingsfactor k wordt kleiner naarmate het opgenomen nominaal vermogen van de motor groter wordt.

In onderstaande tabel zijn de gebruikelijke verhoudingsfactoren in functie van het opgenomen nominaal vermogen weergegeven.

Opgenomen nominaal vermogen in kW	$k = \frac{I_{\max}}{I_{\text{nom}}}$
tot 0,25 kW	5
van 0,25 kW tot 0,75 kW	3
van 0,75 kW tot 1,50 kW	2,5
van 1,50 kW tot 10 kW	2
boven 10 kW	1,5

fig. 118

De maximum toegelaten stroomstoot

$$I_{\max} = k \cdot I_{\text{nom}} = \frac{U}{R_i + R_{ra}} \quad (\text{fig. 117})$$

Daaruit volgt:

$$R_{ra} \approx \frac{U}{I_{\max}} - R_i$$

Aangezien R_i meestal klein is, mogen we stellen dat

$$R_{ra} \approx \frac{U}{I_{\max}}$$

Zodra de rotor begint te draaien en de rotatiefrequentie toeneemt, daalt de opgenomen stroom omdat de tegenspanning stijgt. Op een bepaald moment wordt er een evenwicht bereikt tussen het aandrijvend en het tegenwerkend koppel. De rotor zal niet meer versnellen. De rotatiefrequentie is dan nog vrij laag omdat het anker nog niet op volle netspanning staat. We schakelen nu een gedeelte van de aanzetweerstand uit zodat de stroom weer zijn maximum toegelaten waarde bereikt. De snelheid en de tegenspanning van de rotor nemen opnieuw toe en opnieuw stelt er zich een evenwicht in. Nu schakelen we weer een gedeelte van de aanzetweerstand uit en dit totdat het anker op de volle netspanning komt. De motor is nu in bedrijf.

3.7.4 De overgangsverschijnselen bij het aanlopen van een gelijkstroommotor

Doelstelling

- De overgangsverschijnselen die zich voordoen tijdens de aanlooperperiode toelichten en uit die verschijnselen het stroom-tijddiagram opstellen.

Algemeen

Bij het schakelen van de netspanning op de motorklemmen doen zich de volgende twee verschijnselen voor:

- De spanningsloze ankerkring van de motor wordt plots op het net aangesloten en veroorzaakt de inschakelstroom (fig. 119).
- De aanloop neemt een start en de nominale rotatiefrequentie wordt slechts na de aanlooperperiode bereikt. Tijdens de aanlooperperiode neemt de tegenspanning toe van nul tot maximum ($E_t \approx U$) (fig. 120).

Inschakelstroom

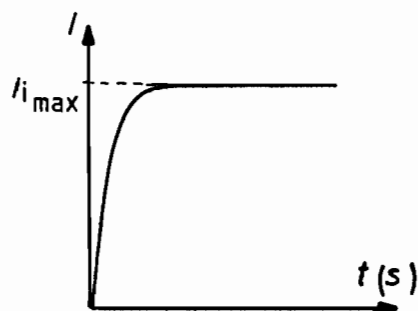


fig. 119

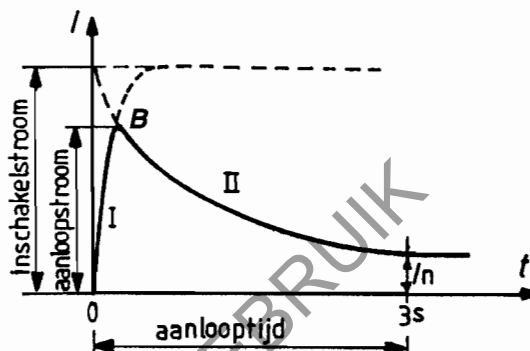


fig. 120

De maximum stroom I_{imax} ('inschakelstroom') bij het aansluiten van de spanning op de ankerketen van de motor wordt bepaald door de aangelegde spanning U en de ohmse weerstand van de keten

$$I_{imax} = \frac{U}{R_a + R_b + R_c}$$

Deze hoge inschakelstroom kan niet plots bereikt worden door de zelfinductiecoëfficiënt van de ankerketen. De zelfinductie vertraagt de aangroei van de stroom. De waarde I_{imax} kan enkel bereikt worden als het motoranker geblokkeerd wordt (fig. 119).

Aanloopstroom

De grootste waarde van de uit het net opgenomen stroom bij het starten van een niet-geblokkeerde motor wordt aanloopstroom I_a genoemd.

Als het door de motor ontwikkelde koppel T_m groter is dan het weerstandbiedende koppel T_w , zal de rotor beginnen te versnellen. Er wordt een tegenspanning gegenereerd die recht evenredig is met de snelheidsaangroei.

Kromme I (fig. 120) stelt de stroomtoename in het motoranker voor, bij geblokkeerde rotor, vanaf het tijdstip ($t = 0$) dat het anker onder spanning komt.

Kromme II stelt de stroom-tijdkarakteristiek voor van een bij tijdstip $t = 0$ onder spanning staande en geblokkeerde motor na het vrijgeven van de rotor ($t = 0$). Bij een normaal aanlopende motor zorgen beide verschijnselen voor een beperking van de inschakelstroom. Bij punt B treedt de maximale stroomwaarde op die men de aanloopstroom noemt.

De aanloopstroom en aanlooptijd zijn afhankelijk van de motorbelasting, omdat het momentoverschot $T_m - T_w$ en het traagheidsmoment van de bewegende delen de mate van versnelling van de rotor bepalen; dus ook de helling van kromme II en de ligging van punt B. De stroomsterkte zal dalen tot

$$I_{nom} = \frac{U - E_t}{R_i}$$

3.8 Koppel van de gelijkstroombmotor

Doelstelling

- Door redenering de formule opbouwen die het elektromechanisch koppel van een gelijkstroombmotor oplevert.

Het werkkoppel van de motor ontstaat door de krachten ' F ' die op de stroomvoerende werkzame geleiders van het anker inwerken (fig. 121a).

Als een werkzame geleider over l meter in een magnetisch veld met inductie B ligt en een stroom van I ampère voert (fig. 121b), dan werkt op die draad een kracht (lorentzkracht F_1)

$$F_1 = B \cdot l \cdot I \quad (\text{N})$$

met

I : de stroom door één ankerdraad

Als I_a de ankerstroom is en $2a$ het aantal ankertakken, dan is

$$I = \frac{I_a}{2a} \quad (\text{A})$$

en

$$F_1 = B \cdot l \cdot \frac{I_a}{2a}$$

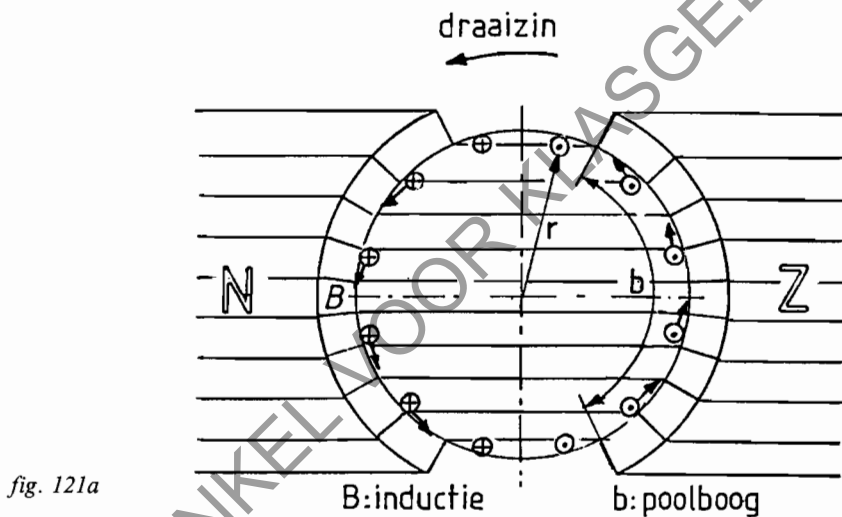


fig. 121a

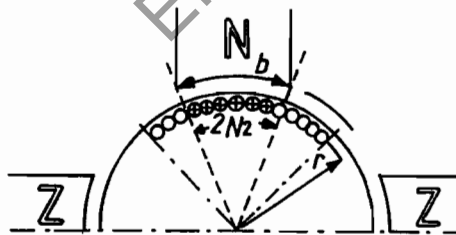


fig. 121b

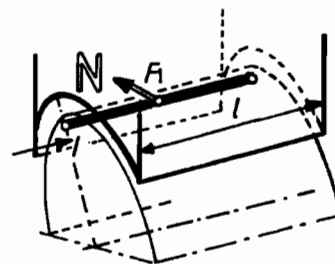


fig. 121c

We stellen dat er rond het anker in totaal $2N$ geleiders op de ankeromtrek aanwezig zijn. Per eenheidslengte liggen dan

$$2N_1 = \frac{2N}{2\pi r} = \frac{N}{\pi r}$$

geleiders, met r de afstand van de actieve ankergeleiders tot de rotoras.

Is nu b de poolboog (lengte van 1 pool gemeten in meter volgens de omtrek) en $2p$ het aantal polen van de motor, dan bedraagt de totale poolomtrek $2p \cdot b$

Het aantal actieve ankergeleiders $2N_2$ dat zich dan onder de poolbogen bevindt (fig. 121c) (max. inductie) is

$$2N_2 = 2N_1 \cdot 2p \cdot b = \frac{N}{\pi \cdot r} \cdot 2p \cdot b = \frac{2N \cdot p \cdot b}{\pi \cdot r}$$

De totale kracht die aan de ankeromtrek werkt, vinden we door de kracht op één geleider te vermenigvuldigen met het aantal actieve geleiders ($2N_2$).

$$F = F_1 \cdot 2N_2 = B \cdot l \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{2N \cdot p \cdot b}{\pi r} \quad (\text{N})$$

of

$$F = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{\pi} \cdot \frac{B \cdot l \cdot b \cdot I_a}{r} \quad (\text{N})$$

Met $\phi = B \cdot l \cdot b$ (flux per pool) wordt

$$F = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{\pi} \cdot \phi \cdot \frac{I_a}{r} \quad (\text{N})$$

Het elektromagnetisch moment M_{em} , tevens werkkoppel T_{em} , bedraagt:

$$M_{em} = T_{em} = F \cdot r \quad (\text{Nm})$$

of

$$T_{em} = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{\pi} \cdot \phi \cdot I_a$$

met

$2p$: het aantal polen

$2a$: het aantal ankertakken

ϕ : flux per pool in Wb

$2N$: totaal aantal ankerdraden

I_a : totale ankerstroom in A

Aangezien p , a en N constante waarden zijn voor een bepaalde machine is

$$T_{em} = k \cdot \phi \cdot I_a$$

met $k = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{\pi}$

3.9 Vermogen van de gelijkstroommotor

Doelstellingen

- Het theoretisch verband tussen mechanisch, elektromechanisch en inwendig elektrisch vermogen toelichten.
- Het praktisch verband tussen het nuttig mechanisch en het inwendig elektrisch vermogen verduidelijken.
- Het toegevoerd elektrisch vermogen van een gelijkstroommotor in formulevorm brengen.

3.9.1 Mechanisch en elektromechanisch vermogen

Het mechanisch vermogen dat op de as van een motor ter beschikking komt, wordt berekend volgens een formule uit de mechanica:

$$P = \omega \cdot T = 2\pi n \cdot T \quad (\text{W})$$

waarin

P : het vermogen op de as in watt

ω : hoeksnelheid in rad/s

T : het moment van het werkkoppel in Nm

n : rotatiefrequentie in s^{-1}

Vermits
$$T = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{\pi} \cdot \phi \cdot I_a$$

is
$$P = 2\pi n \cdot \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{\pi} \cdot \phi \cdot I_a$$

of
$$P = 2 \frac{p}{a} \cdot N \cdot \phi \cdot n \cdot I_a$$

of
$$P = k \cdot \phi \cdot n \cdot I_a \text{ en vermits } k \cdot \phi \cdot n = E_t$$

wordt
$$P = E_t \cdot I_a$$

We kunnen uit deze laatste formule besluiten dat het vermogen op de as (mechanisch vermogen) theoretisch gelijk is aan het inwendig elektrisch vermogen.

Besluit

Het inwendig elektrisch vermogen is het gedeelte van het toegevoerd elektrisch vermogen van de motor dat wordt omgezet in mechanisch vermogen. We noemen $E_t \cdot I_a$ dan ook het elektromechanisch vermogen.

3.9.2 Toelichting

a Verliezen

In de praktijk ontstaan er mechanische verliezen en ijzerverliezen zodat het vermogen dat op de as van de motor beschikbaar komt, altijd kleiner is dan het inwendig elektrisch vermogen.

b Toegevoerd elektrisch vermogen

Het toegevoerd elektrisch vermogen aan de ankerserieketen van de motor is $P_t = U \cdot I_a$

3.10 Rendement van de gelijkstroommotor

Doelstellingen

- De onderscheiden vermogenverliezen opsommen en in verband brengen met de grootheden: toegevoerd vermogen, nuttig mechanisch vermogen, en elektromechanisch vermogen.
- De begrippen totaal rendement en elektromechanisch rendement toelichten aan de hand van formules.
- Het begrip toegevoerd vermogen in de onderscheiden motortypes omschrijven.
- Het meten van P_n en P_t door rechtstreekse en onrechtstreekse methode toelichten.

We weten dat $U = E_t + I_a(R_a + R_b + R_c)$.

Beide leden vermenigvuldigen met I_a geeft ons

$$U \cdot I_a = E_t \cdot I_a + I_a^2(R_a + R_b + R_c)$$

of
$$P_t = P_{em} + P_{Cu} \quad (1)$$

In woorden: het toegevoerd vermogen aan de ankerserieketen (P_t) is gelijk aan de som van het vermogen door de rotor opgenomen (P_{em}) met het joule-effect in de rotor-, hulp- en compensatiewikkeling.

Door het optreden van ijzer- en wrijvingsverliezen is het nuttig mechanisch vermogen dat op de motoras beschikbaar komt iets kleiner dan het elektromechanisch vermogen ($E_t \cdot I_a$)

$$P_n = P_{em} - P_m - P_{Fe}$$

of
$$P_{em} = P_n + P_m + P_{Fe} \quad (2)$$

Vervangen we deze waarde van P_{em} in formule 1 dan bekomen we:

$$P_t = P_n + P_m + P_{Fe} + P_{Cu}$$

met

P_t : het toegevoerd elektrisch vermogen aan de ankerserieketen

P_n : het nuttig mechanisch vermogen op de motoras

P_m : de som van de mechanische verliezen zoals wrijvingsverliezen in de lagers, ventilatie verliezen en wrijving van de borstels over de collector

P_{Fe} : de som van de hysteresis- en wervelstroomverliezen

P_{Cu} : de som van de jouleverliezen in de stroomvoerende wikkelingen

Schematisch voorgesteld geeft dat het volgende:

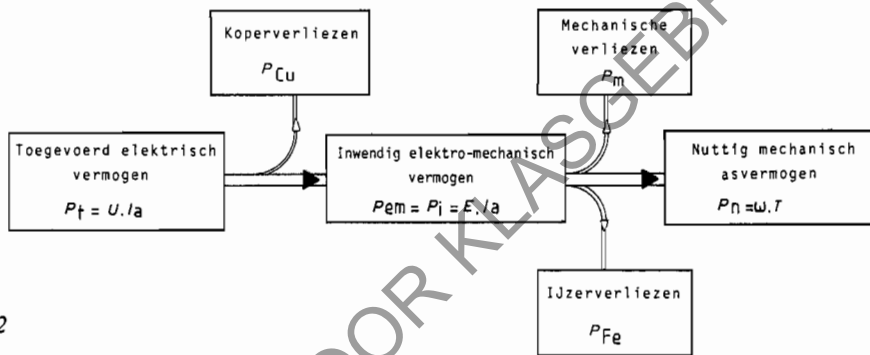


fig. 122

Het totaal rendement

$$\eta_t = \frac{P_n}{P_t} = \frac{P_n - P_v}{P_t}$$

Het elektromechanisch rendement

$$\eta_{em} = \frac{P_{em}}{P_t} = \frac{P_i}{P_t}$$

Toelichtingen

a Totaal toegevoerd elektrisch vermogen

Voor een onafhankelijk bekrachtigde motor bestaat het toegevoerd vermogen uit twee delen:

- het vermogen toegevoerd aan de ankerserieketen
- het vermogen toegevoerd aan de bekrachtigingsketen.

In formulevorm:

$$P_t = U \cdot I_a + U_f \cdot I_f$$

Voor de shunt-, serie- en compoundmotor is het toegevoerd vermogen

$$P_t = U \cdot I$$

b Meten van P_n en P_t

- Rechtstreekse meting:
Het toegevoerd vermogen van een gelijkstroommotor is steeds eenvoudig te meten (V- en A-meter).
Het nuttig vermogen meten komt neer op het meten van een mechanisch vermogen en dat is niet zo eenvoudig. Om dit vermogen te meten beschikken we over:
 - rem van Prony
 - Foucaultrem
 - remdynamo
 - geijkte generator
- Onrechtstreekse meting:
Hier zijn methoden ontwikkeld waarmee we de onderscheiden verliezen meten. Het nuttig vermogen $P_n = P_t - P_v$. Verdere studie hoort thuis bij het leervak Laboratorium.

3.11 Ankerreactie en commutatie

Doelstellingen

- De verschijnselen ankerreactie en commutatie bij gelijkstroommotoren toelichten en vergelijken met dezelfde verschijnselen bij de gelijkstroomgeneratoren.
- De gebruikte middelen om de nadelige invloed van de ankerreactie en commutatie op te heffen weergeven en het onderscheid met gelijkstroomgeneratoren benadrukken.

3.11.1 Verschijnsel en gevolgen

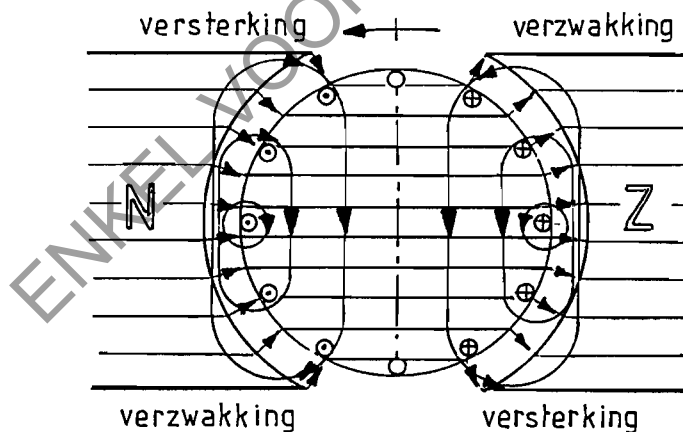


fig. 123

Bij de gelijkstroommotor (fig. 123) doet zich een soortgelijk verschijnsel voor als bij de gelijkstroomgenerator. De ankerflux die hier ontstaat versterkt de hoofdflux onder de intredende poolspitsen en verzwakt de hoofdflux onder de uittredende poolspitsen. Bij de gelijkstroomgenerator was dat precies omgekeerd. Dat betekent praktisch dat de neutrale lijn bij de gelijkstroommotor *tegen de draaizin* in wordt verplaatst.

Uit de studie van de ankerreactie bij gelijkstroomgeneratoren onthielden we dat de resulterende hoofdflux kleiner is dan de oorspronkelijke statorflux. Dat heeft hier tot gevolg:

- een daling van de tegenspanning ($E_t = k \cdot \phi \cdot n$);
- een daling van het elektromechanisch koppel ($T = k' \cdot \phi \cdot I_a$);
- een toename van de rotatiefrequentie: $\left(n \approx \frac{U}{k \cdot \phi} \right)$.

Het commutatieverschijnsel is, zoals bij de generatoren, oorzaak van bijkomende moeilijkheden.

3.11.2 Middelen om de nadelige invloed van de ankerreactie en commutatie op te heffen

De toegepaste middelen zijn identiek aan de middelen toegepast bij gelijkstroomgeneratoren. Voor machines met klein vermogen worden hulppolen tussen de hoofdpolen geplaatst. Voor machines met groot vermogen brengt men in de poolschoenen compensatiewikkelingen aan.

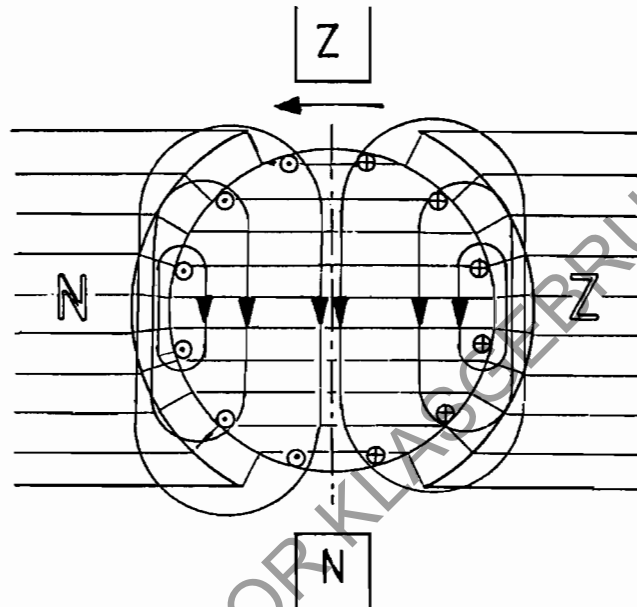


fig. 124

Uit fig. 124 blijkt duidelijk dat er, in de draaizin gezien, op een hoofd-Z-pool een hulp-Z-pool volgt en op een hoofd-N-pool een hulp-N-pool.

3.12 Voorbeelden

Vooraf:

In de reeks toepassingen van leereenheid 3 beschouwen we steeds onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommotoren.

- 1 Een tweepolige gelijkstroommotor heeft twee ankertakken en bevat 600 werkzame geleiders op het anker.
Bereken het koppel als de motor een ankerstroom opneemt van 50 A terwijl de flux per pool 0,006 Wb bedraagt.

Oplossing

$$T = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{\pi} \cdot \phi \cdot I_a = \frac{1}{1} \cdot \frac{300}{\pi} \cdot 0,006 \cdot 50 = 28,648 \text{ Nm}$$

- 2 Een gelijkstroommotor neemt 5500 W uit een voedingsnet met 110 V klemspanning. De tegenspanning bedraagt 102,5 V.
Bereken de inwendige weerstand van de motor ($R_i = R_a + R_b + R_c$).

Oplossing

$$I_a = \frac{P_1}{U} = \frac{5500}{110} = 50 \text{ A}$$

$$U - E_t = R_i \cdot I_a$$

$$\text{waaruit } R_i = \frac{U - E_t}{I_a} = \frac{110 - 102,5}{50} = 0,15 \Omega$$

- 3 Een motor met afzonderlijke bekrachtiging neemt bij vollast een stroom uit het net van 20 A. De klemspanning is 220 V. Het totaal rendement is 0,82 bij vollast. Bereken het nuttig vermogen in kW.

Oplossing

$$P_t = U \cdot I_a = 220 \cdot 20 = 4400 \text{ W}$$

$$P_n = P_t \cdot \eta = 4400 \cdot 0,82 = 3608 \text{ W}$$

- 4 Een vierpolige motor is aangesloten op een net met 210 V klemspanning. De stroom uit het net opgenomen is 30 A. De ankerwikkeling is uitgevoerd met 4 ankertakken, bevat 100 werkzame geleiders per tak en de flux per pool is 0,03 Wb. Bereken de rotatiefrequentie en de tegenspanning als men weet dat $R_a + R_b + R_c = 0,3 \Omega$.

Oplossing

$$E_t = U - (R_a + R_b + R_c)I_a = 210 - 0,3 \cdot 30 = 201 \text{ V}$$

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

$$\text{waaruit } n = \frac{2E_t \cdot a}{p \cdot N \cdot \phi} = \frac{2 \cdot 201 \cdot 2}{2 \cdot 200 \cdot 0,03} = 16,75 \text{ s}^{-1}$$

- 5 Van een gelijkstroombmotor is de inwendige weerstand $R_a + R_b + R_c = 0,3 \Omega$. Bij een klemspanning van 300 V neemt de motor een stroom op van 22 A. De tachometer duidt 2000 omw./min aan. Het totaal rendement is 0,8. Bereken het nuttig ontwikkeld koppel op de as van de rotor en de tegenspanning.

Oplossing

$$P_t = U \cdot I_a = 300 \cdot 22 = 6600 \text{ W}$$

$$P_n = P_t \cdot \eta = 6600 \cdot 0,8 = 5280 \text{ W}$$

$$E_t = U - R_i \cdot I_a = 300 - 0,3 \cdot 22 = 293,4 \text{ V}$$

$$P_n = \omega \cdot T$$

$$\text{waaruit } T = \frac{P_n}{\omega} = \frac{5280 \cdot 60}{2\pi \cdot 2000} = 25,21 \text{ Nm}$$

3.13 Toepassingen

- 1 Een vierpolige motor met 2 ankertakken bezit in totaal 260 windingen. De flux per pool bedraagt 20 mWb en de opgenomen stroomsterkte is 25 A. Bereken het ontwikkelde koppel.
- 2 Een gelijkstroombmotor neemt 8250 W op uit een voedingsnet met 220 V klemspanning. De inwendige weerstand van de motor is $0,2 \Omega$. Bereken de grootte van de tegenspanning.
- 3 De ankerserieketen van een onafhankelijk bekrachtigde motor neemt 2,2 kW op bij vollast. De klemspanning is 220 V; de ankerweerstand $R_a = 0,8 \Omega$; de hulppoolwikkeling $R_b = 0,4 \Omega$ en $R_c = 0,2 \Omega$. Bereken de waarde van de aanzetweerstand; de spanning over de ankerwikkeling en over de aanzetweerstand bij het aanlopen; de tegenspanning bij vollast.

- 4 Bepaal het nuttig koppel en het rendement van een gelijkstroommotor die 2 kW mechanisch vermogen ter beschikking stelt. De voedingsbron heeft een klemspanning van 100 V en levert 25 A. De tachometer duidt 1400 omw./min aan.
- 5 Bereken de waarde van de aanzetweerstand van een motor met de volgende gegevens: $U = 400 \text{ V}$; $I_a = 50 \text{ A}$; $R_i = 0,2 \Omega$.

3.14 Diagnostische toets

Zie Toetsenboekje.

3.15 Herhalingstaken – Basis

- 1 Hoe groot is het moment van het koppel van een motor als hij een nuttig vermogen van 7 kW ontwikkelt bij een rotatiefrequentie 50 s^{-1} ?
- 2 Een gelijkstroommotor met een totaal rendement van 0,87 geeft een nominaal nuttig vermogen van 6 kW. Bij een klemspanning van 200 V neemt de motor een aanloopstroom van 120 A uit het net op. Klopt dat? Verklaar je antwoord.
- 3 Op het kenplaatje van een gelijkstroommotor staat te lezen: $P_n = 5 \text{ kW}$ en 1500 omw./min. Hoe groot is het moment van het koppel dat die motor zal ontwikkelen?
- 4 Een gelijkstroommotor ontwikkelt een koppel van 20 Nm bij 1000 omw./min. Als de motor bij een klemspanning van 120 V een stroom van 30 A opneemt, wat is dan het rendement?
- 5 Een gelijkstroommotor neemt bij vollast een klemspanning van 400 V en een stroom op van 150 A. Het nuttig vermogen is 56 kW en de weerstand van de ankerseriekring is $0,25 \Omega$. Bereken de waarde van de aanzetweerstand.

3.16 Verrijkingsopdrachten

- 1 De veldwikkeling van een motor met afzonderlijke bekrachtiging is geschakeld op een spanningsbron met 200 V klemspanning. Achtereenvolgens wordt de ankerserieketen op drie verschillende voedingsbronnen aangesloten. In de drie gevallen bedraagt de tegenspanning respectievelijk 400, 200 en 100 V. Bij het geval met tegenspanning 400 V, meten we 1000 omwentelingen per minuut. Hoe groot zal de rotatiefrequentie zijn voor de gevallen waar de tegenspanning respectievelijk 200 en 100 V bedraagt?
- 2 Bij een vierpolige gelijkstroommotor bestaat de ankerwikkeling uit 360 windingen, verdeeld over vier ankertakken. De rotor is 24 cm lang en heeft 18 cm diameter. De lengte van een poolboog is 10 cm en de inductie $0,5 \text{ Wb/m}^2$. Bij een klemspanning van 220 V vloeit er door elke ankertak een stroomsterkte van 20 A en is de tegenspanning 215 V. Het totaal rendement is 0,8.
Bereken het elektromechanisch koppel, de rotatiefrequentie, het nuttig koppel en het afgegeven mechanisch vermogen.
- 3 Een gelijkstroommotor heeft als inwendige weerstand $R_i = R_a + R_b + R_c = 0,24 \Omega$.
Als de motor op nullast draait, noteren we de volgende grootheden: $U = 130 \text{ V}$, $I_a = 3 \text{ A}$ bij 1400 omw./min. We belasten de motor en zien de ankerstroom stijgen tot 30 A. Bereken de rotatiefrequentie bij belasting, het inwendig of elektromechanisch vermogen en het jouleverlies in de ankerkring.

- 4 Als we in het vorige vraagstuk de flux herleiden tot de helft van de flux bij nullast, dan neemt de stroomsterkte toe tot 45 A. Bepaal de rotatiefrequentie in dat geval.
- 5 Het anker van een vierpolige gelijkstroommotor bevat 640 werkzame geleiders, verdeeld over 4 ankertakken. De lengte en diameter van de rotor zijn respectievelijk 20 en 26 cm. De poolschoenen bedekken 75 % van het rotoroppervlak, terwijl de fluxdichtheid in de luchtspleet 1 Wb/m^2 bedraagt.
Bereken de lorentzkracht op één stroomvoerende geleider als die zich onder de pool bevindt. De stroom door elke ankertak is 30 A.
Bereken eveneens het elektromechanisch koppel.

ENKEL VOOR KLASGEBRUIK

SYNTHESE

Gelijkstroombmotoren: theoretische inleiding

Een gelijkstroombmotor is een roterende machine die elektrische energie omzet in mechanische energie (= bewegingsenergie).

Principe van de motorwerking

Op een stroomvoerende geleider in een magnetisch veld werkt de lorentzkracht.

De grootte van de kracht $F = B \cdot l \cdot I$ (N)

De zin van de kracht wordt bepaald met de linkerhandregel.

Van een stroomvoerende geleider naar de motorwerking

Een rechte stroomvoerende geleider wordt uit het magnetisch veld verdreven indien de kracht voldoende groot is.

Om een voortdurende krachtwerking te bekomen, gekoppeld aan een blijvend roterende beweging, plaatsen we een reeks windingen, onderling verbonden via een commutator (omkeren stroomzin) op een magnetische trommel tussen radiaal uitgesneden polen.

De draaiende motor bevat alle elementen die gelijktijdig de generatorwerking toelaten. Er wordt, als gevolg van de draaiende motorbeweging, een *tegenspanning* E_t gegenereerd. Die *tegenspanning* vormt een wezenlijk element bij de motorwerking.

Hoofdeigenschappen

De grootte van de *tegenspanning*

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

De rotatiefrequentie van de motor

$$n = \frac{E_t}{k \cdot \phi} \approx \frac{U}{k \cdot \phi} \quad (\text{s}^{-1})$$

De aanzetweerstand

Bij het aanschakelen van de motor op het net ontstaat een ontoelaatbare stroomstoot. Die moet men tot de maximum toelaatbare waarde (I_{max}) beperken door een aanzetweerstand in serie met het anker te plaatsen.

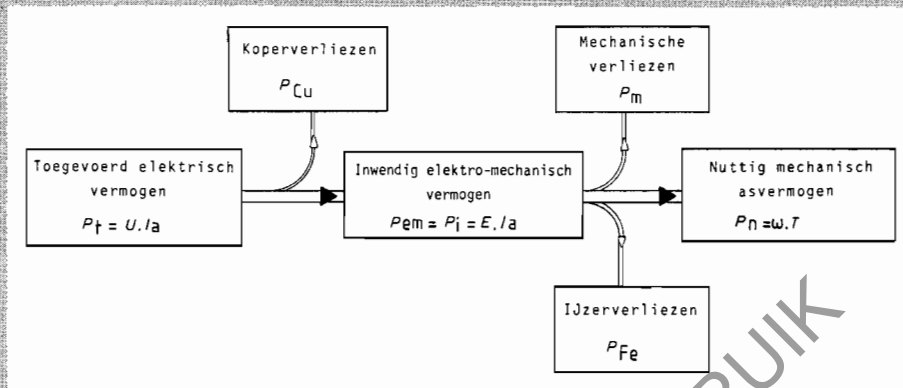
grootte aanzetweerstand $R_{ra} = \frac{U}{I_{max}} - R_i$ of $R_{ra} \approx \frac{U}{I_{max}}$

Het *werkkoppel* van de motor

$$T_{em} = k \cdot \phi \cdot I$$

Het elektromechanisch vermogen $P = \omega \cdot T$ is in theorie gelijk aan het inwendig elektrisch vermogen $P = E_t \cdot I_a$

Rendement



Het totaalrendement $\eta_t = \frac{P_n}{P_t} = \frac{P_t - P_v}{P_t}$

Zoals bij gelijkstroomgeneratoren spelen ook hier de ankerreactie en de commutatie hun rol. Om de nadelige effecten uit te schakelen passen we dezelfde middelen toe als bij de gelijkstroomgeneratoren.

Toepassingsgebied

De gelijkstroommotor heeft als belangrijke eigenschap dat de rotatiefrequentie op een eenvoudige en elegante wijze kan worden veranderd. Die eigenschap maakt de gelijkstroommotor geschikt voor regelbare elektrische aandrijvingen in alle takken van de techniek. Compacte uitvoeringen komen frequent voor in apparatenbouw, machinebouw, medische apparatuur, instrumenten, verkoopsautomaten, printers enz.