

INHOUDSOPGAVE

WOORD VOORAF	1
1. NORMALISATIE	1
1.1 INLEIDING	1
1.2 MACHINE-KENPLAATJE	1
1.2.1 NOMINALE GEGEVENS OP EEN MACHINE-KENPLAATJE	2
1.2.2 GEGEVENS OMTRENT DE BOUW VAN DE MACHINE	4
1.3 AFLEIDBARE GEGEVENS VAN EEN KENPLAAT	6
1.3.1 RENDEMENT	6
1.3.2 KOPPEL	8
1.4 OEFENINGEN	11
2. ALGEMENE GRONDSLAGEN	12
2.1 INLEIDING	12
2.2 ONTSTAAN VAN EEN WISSELSPANNING	13
2.3 ONTSTAAN VAN EEN GELIJKSPANNING	14
2.4 ONTSTAAN VAN EEN KOPPEL	16
3. MECHANISCHE CONSTRUCTIE	18
3.1 DE STATOR	18
3.2 HET ANKER	20
3.3 DE COMMUTATOR	21
4. HET TROMMELANKER	25
4.1 SPANNINGSVORM BIJ EEN TROMMELANKER	25

4.2 DE ANKERWIKKELING	30
4.2.1 LUSWIKKELING	30
4.2.2 GOLFWIKKELING	32
4.2.3 KEUZE VAN DE ANKERWIKKELING	33
4.3 OEFENINGEN	38
5. ANKERREACTIE EN COMMUTATIE	39
5.1 HOOFDVELD	39
5.2 ANKERVELD	40
5.3 ANKERREACTIE	41
5.4 COMMUTATIE	42
5.5 COMMUTATIEKARAKTERISTIEK	43
5.6 VERBETERING VAN DE COMMUTATIE	45
5.6.1 BORSTELVERSCHUIVING	45
5.6.2 HULPPOLEN	47
5.6.3 COMPENSATIEWIKKELINGEN	48
5.7 OORZAKEN VAN EEN SLECHTE COMMUTATIE	49
6. BASISVERGELIJKINGEN	50
6.1 SPANNINGSVERGELIJKING	50
6.2 KOPPELVERGELIJKING	53
6.3 ASKOPPEL EN VERLIESKOPPEL	56
6.4 UITGEBREIDE SPANNINGSVERGELIJKING	57
7. ENERGIE-OMZETTING	59
7.1 DE KOPERVERLIEZEN	59
7.2 DE IJZERVERLIEZEN	60

7.3 DE MECHANISCHE VERLIEZEN	60
7.4 VOLGORDE VAN ENERGIE-OMZETTING	61
7.4.1 GENERATORBEDRIJF	61
7.4.2 MOTORBEDRIJF	62
7.4.3 ELEKTRISCH RENDEMENT	64
7.4.4 RENDEMENTSKROMME	65
8. OEFENINGEN	67
9. BEKRACHTIGINGSSYSTEMEN	73
9.1 PERMANENTE MAGNETEN	73
9.2 AFZONDERLIJKE BEKRACHTIGING	75
9.3 EIGEN BEKRACHTIGING	76
9.3.1 SERIEBEKRACHTIGING	76
9.3.2 SHUNTBEKRACHTIGING	77
9.3.3 COMPOUNDBEKRACTIGING	77
10. KLEMAANDUIDING EN AANSLUITSCHEMA	78
10.1 KLEMAANDUIDING	78
10.2 AANSLUITSCHEMA'S	78
11. GELIJKSTROOMGENERATOREN	84

12. GELIJKSTROOMMOTOREN NORMAAL BEDRIJF	85
12.1 BASISVERGELIJKINGEN	85
12.1.1 ANKERSTROOM I_a	85
12.1.2 INWENDIGE SPANNING E	85
12.1.3 MOTORKOPPEL M	86
12.1.4 TOERENTAL n	87
12.2 STABIEL EN INSTABIEL BEDRIJF VAN EEN MOTOR	88
12.3 SHUNTMOTOR	89
12.3.1 SCHEMA	89
12.3.2 KARAKTERISTIEKEN	90
12.4 SERIEMOTOR	94
SCHEMA	94
12.4.2 KARAKTERISTIEKEN	95
12.5 COMPOUNDMOTOR	101
SCHEMA	101
12.5.2 KARAKTERISTIEKEN	102
13. GELIJKSTROOMMOTOREN GESTUURD BEDRIJF	104
13.1 BEGRENZING VAN DE AANLOOPSTROOM	104
13.1.1 AANLOOPWEERSTAND IN DE ANKERKETEN	105
13.1.2 AANLOOPSTROOMBEGRENZING MET EEN GESTUURDE GELIJKRICHTER	108
13.2 REGELING VAN HET TOERENTAL	109
13.2.1 SHUNTMOTOR	110
13.2.2 SERIEMOTOR	121
13.3 AFREMMELEN VAN GELIJKSTROOMMOTOREN	125
13.3.1 SHUNTMOTOR	125
13.3.2 SERIEMOTOR	129

WOORD VOORAF

De energietechniek met de deelgebieden:

- Opwekking van elektrische energie;
- Transport van elektrische energie;
- Gebruik van elektrische energie;

wordt door elektrische machines beheerst.

- Als generatoren dienen machines als omvormers van mechanische in elektrische energie.
- Als transformatoren of omvormers zetten ze de elektrische energie om in een andere elektrische energievorm.
- Als motoren veranderen ze elektrische in mechanische energie.

De elektrische aandrijving kenmerkt zich door het samenwerken en wederzijdse beïnvloeding van de elektrische machine en de gekoppelde werktuigmachine. Het doel van deze cursus is de elektrische gelijkstroommachine op de voorgrond te brengen met het oog op latere gebruiksmogelijkheden.

Met dank aan mijn collega's voor hun nuttige op- en aanmerkingen waarvan ik graag gebruik heb gemaakt.

Tweede herziene druk

1993 - René Peeters

Derde herziene druk

2000 Nico Bartholomevis - Jan Elsen

1.NORMALISATIE

1.1 INLEIDING

Meerdere nationale commissies hebben per land bepaalde richtlijnen opgesteld voor elektrische machines. De bedoeling was dat keuze, in gebruik name, beproeving en identificatie volgens eenduidige criteria zou gebeuren. Enkel dan zou vergelijken van producten van verschillende leveranciers zinvol zijn.

In België is het de CEBEC-commissie (Comité Elektrotechnique Belgique, Belgische Elektrotechnische Commissie) die deze opdracht vervult. De meer algemene NBN-normen worden door deze commissie omgezet in praktische richtlijnen en aanbevelingen voor elektrische apparaten en installaties.

1.2 MACHINE-KENPLAATJE

Dit kenplaatje informeert de gebruiker over de gebruiksvoorwaarden en -grenzen van de voorgestelde machine, het is tevens een soort garantiebewijs vanwege de producent.

Leverancier / Fabrikant		
Typ GM 70 60 / 6		
— Mot	Nr 6 321 543	
800 V	2010 A	
1500 kW	S1	Cos φ
$\leftrightarrow$ 380-1160 t/min		Hz
Erregung : 110V		112 A
I. Kl. F	IP 44	12 t
800 V		

Fig.1.1 Kenplaatje van een onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommotor

1.2.1 NOMINALE GEGEVENS OP EEN MACHINE-KENPLAATJE

De gegevens die het normale bedrijf van de machine kenmerken worden met een index ($_N$) aangeduid. Uit de analyse van het vorige kenplaatje laten zich volgende gegevens afleiden:

Aard van de machine	Generator (Gen)
	Motor (Mot)
Stroomsoort	Gelijkstroom =
	Wisselstroom ~
	Driefasenstroom 3~
Nominale spanning	U_N in V
Nominale stroom	I_N in A
Nominaal nuttig vermogen	P_N in W
Nominale $\cos\phi$	$\cos\phi$
Nominale frequentie	F_N in Hz
Nominaal toerental	n_N in min^{-1}
Uiterste grenzen van het toerental	$n_{N1} \leftarrow \cdots \rightarrow n_{N2}$
Draaizin (Fig.1.2)	→ rechtsloop
	← linksloop
	↔ omkeerbedrijf
Soorten bedrijf (Fig.1.3)	S1 = continu bedrijf
	S2 = kortstondig bedrijf
	S3 = intermitterend bedrijf.

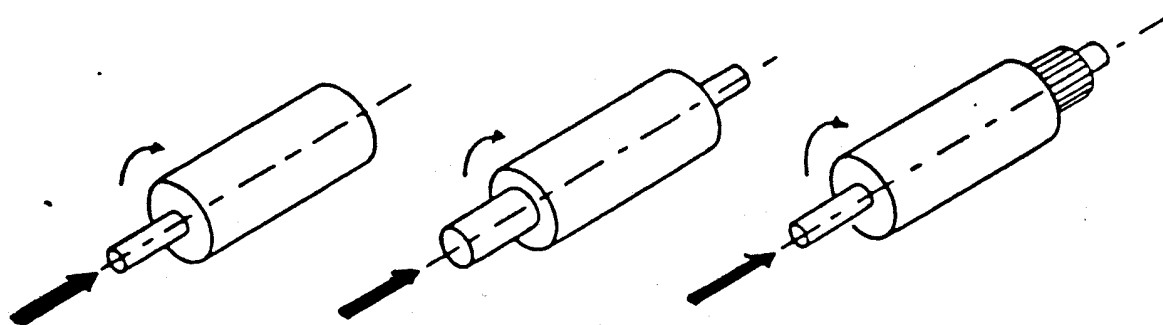


Fig.1.2 Draaizinbepaling bij elektrische machines

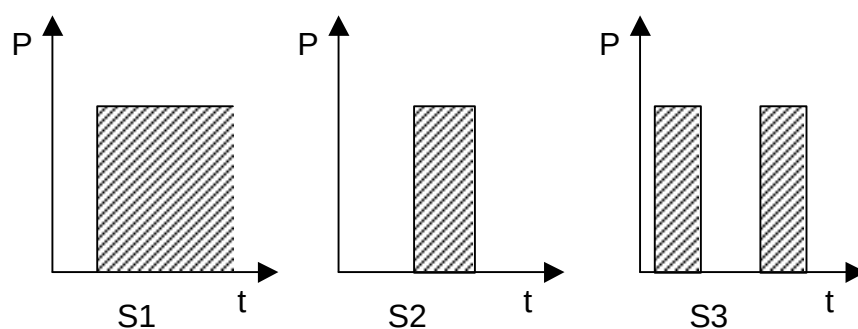


Fig.1.3 Schematische voorstelling van $P = f(t)$
voor drie typische bedrijfsoorten.

1.2.2 GEGEVENS OMTRENT DE BOUW VAN DE MACHINE

*** ISOLATIEKLASSE**

Een indeling met letters geeft de toelaatbare temperatuur aan voor de gebruikte isolatiestof.

Een typische isolatieklasse voor de huidige machines is de klasse F, zie tabel 1.1.

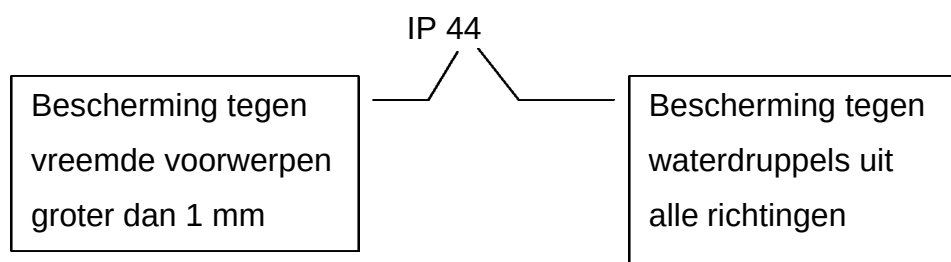
Klasse	Temperatuurgrens
Y	90 °C
A	105 °C
E	120 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C
C	>> 180 °C

Tabel 1.1 Klasse-indeling van isolatiematerialen

*** BESCHERMINGSGRAAD**

De verschillende beschermingsgraden van een elektrische machine zijn aan een code herkenbaar. Deze code bestaat uit de letters IP (International Protection) gevolgd door twee cijfers. Het eerste kengetal geeft de aard van bescherming tegen het indringen van vreemde voorwerpen. Het tweede kengetal geeft de bescherming tegen het indringen van water.

Een veel gebruikte beschermingsgraad tegenwoordig is IP44.



* BOUWVORM

De verschillende bouwvormen zijn eveneens aan een code herkenbaar.

Deze code bestaat uit een letter en een cijfer. De letter geeft aan of we met een horizontale uitvoering (B) te maken hebben of met een verticale uitvoering (V). Het cijfer geeft verdere details aan, zie figuur 1.4.

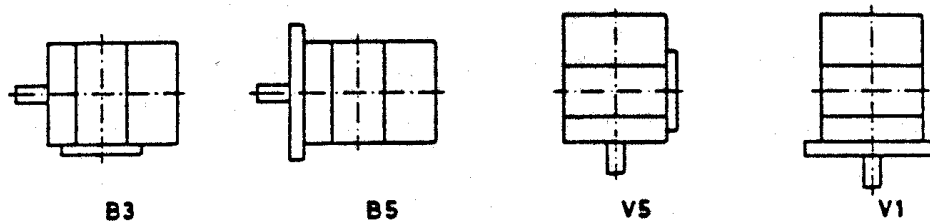


Fig.1.4 Verschillende Bouwvormen

* KOELING

Iedere energie-omzetting is gekenmerkt door verliezen die op hun beurt de machine doen opwarmen. De mate van opwarmen is sterk afhankelijk van de snelheid van de koellucht langsheen de machine, het is dus noodzakelijk de machine te koelen.

We onderscheiden hier vier mogelijkheden:

- De beweging van de koellucht gebeurt door de bewegende machinedelen, er is dus geen ventilator aanwezig.
- De beweging van de koellucht gebeurt door een ventilator aangebracht op de as van de machine.
- De beweging van de koellucht gebeurt door een afzonderlijk aangedreven ventilator onafhankelijk van het toerental van de machine. In dit laatste geval wordt het vereiste luchtdebiet opgegeven.
- De koeling gebeurt met een ander medium dan lucht, bijvoorbeeld water of waterstof.

1.3 AFLEIDBARE GEGEVENS VAN EEN KENPLAAT

1.3.1 RENDEMENT

Wegens de aanwezigheid van onvermijdbare verliezen P_v is het afgegeven of nuttig vermogen P_n steeds kleiner dan het toegevoerde vermogen P_t , zie figuur 1.5.

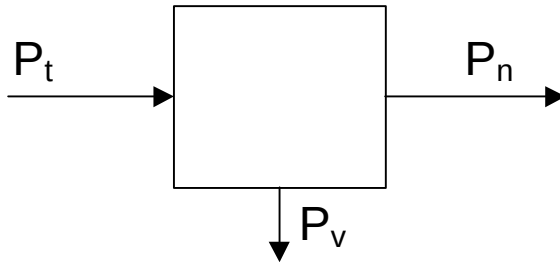


Fig.1.5 Vermogenbalans van een machine

Het rendement is de kenmerkende factor die aangeeft in welke mate het toegevoerde vermogen nuttig gebruikt wordt:

Rendement $\eta = \frac{P_n}{P_t}$ [1.1]

Met: η = rendement
 P_n = nuttig vermogen in W of kW
 P_t = toegevoerd vermogen in W of kW

Hierin is: $P_n = P_t - P_v$ [1.2]

Met: P_v = vermogenverlies in W of kW

Totaal rendement van meerdere gekoppelde machines:

$$\zeta_t = \zeta_1 \cdot \zeta_2 \cdot \zeta_3 \cdot \dots \cdot \zeta_n$$
 [1.3]

Met: $\eta_1 \dots \eta_n$ = afzonderlijk rendement per machine

Tabel 1.2 geeft een overzicht van machinesoorten met hun respectievelijke vermogens.

	P_t	P_n
Motor	Elektrisch	Mechanisch
Generator	Mechanisch	Elektrisch

Tabel 1.2 Vergelijking Motor $\leftrightarrow$ Generator

VOORBEELD 1.1

Een motor heeft een nominaal vermogen $P_N = 100 \text{ kW}$ en een rendement $\eta = 90 \%$. Bereken de totale verliezen P_v .

OPLOSSING

$$P_n = P_N = 100 \text{ kW}$$

$$P_t = \frac{P_n}{\eta} = 111,1 \text{ kW}$$

$$P_v = P_t - P_n = 111,1 - 100 = 11,1 \text{ kW}$$

VOORBEELD 1.2

Een motor (1) drijft een generator (2) aan, beide machines zijn star gekoppeld en hebben hetzelfde rendement $\eta = 0,895$.

Bereken het totale rendement η_t en het opgenomen vermogen van de motor, wanneer het nominaal vermogen van de generator gelijk is aan 400 kW.

OPLOSSING

Omwille van de starre koppeling is het aan de generator toegevoerde vermogen is gelijk aan het nuttige van de aandrijfmotor.

$$\eta_t = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0,895 \cdot 0,895 = 0,8$$

$$\text{Uit } \eta_t = \frac{P_{n(2)}}{P_{t(1)}} \text{ volgt:}$$

$$P_{t(1)} = \frac{P_{n(2)}}{\eta_t} = \frac{400}{0,8} = 500 \text{ kW}$$

1.3.2 KOPPEL

Motoren oefenen op de askoppeling een bepaalde kracht F uit.

Uit het product van de kracht F en de krachttarm (straal r) kan het koppel berekend worden.

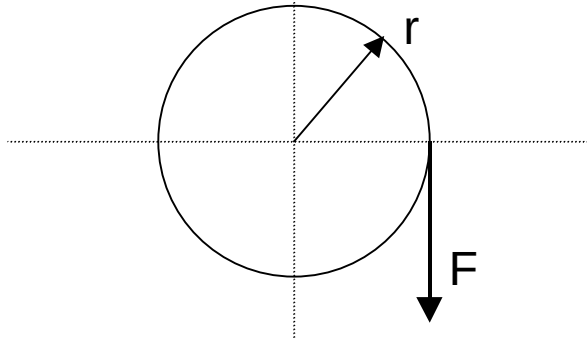


Fig.1.6

Koppel: $M = F \cdot r$ [1.4]

Met: M = askoppel in Nm
 F = kracht in N
 r = straal in m

Het mechanisch vermogen beschikbaar op de as is dan:

$$P = M \cdot \omega \quad [1.5]$$

Met: P = asvermogen in W
 M = askoppel in Nm
 ω = hoeksnelheid in s

Hoeksnelheid: $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$ [1.6]

ω = hoeksnelheid in s^{-1}

n = toerental in min^{-1}

De vermogenformule kan nu verder uitgewerkt worden:

$$P = M \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60}$$

Het askoppel is nu berekenbaar uit het vermogen en het toerental:

Askoppel: $M = 9,55 \cdot \frac{P}{n}$ [1.7]

Met: M = askoppel in Nm
 P = asvermogen in W
 n = toerental in min^{-1}

Meestal is het vermogen P in kW gegeven zodat vergelijking 1.7 een weinig afwijkt van 1.6.

Askoppel: $M = 9550 \cdot \frac{P}{n}$ [1.8]

Met: P = asvermogen in kW

Het aldus berekende koppel is niet alleen een belangrijke grootheid voor sterkteberekeningen, maar staat ook aan de basis van het noodzakelijke bouwvolume van een machine, figuur 1.7.

Bouwvolume: $V \div M$ (is evenredig met) [1.9]

Hierin is: $V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l$ [1.10]

Met: V = bouwvolume in m
 d = rotordiameter machine in m
 l = rotorlengte machine in m

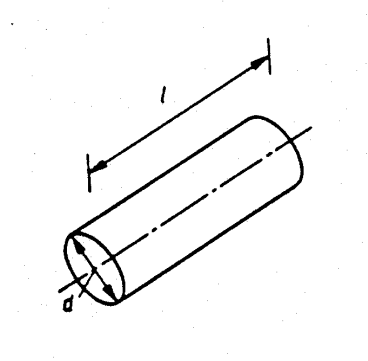


Fig.1.7 Bouwvolume

VOORBEELD 1.3

Twee machines met volgende kenmerken zouden vergeleken moeten worden. Welke machine heeft het grootste bouwvolume?

	machine 1	machine 2
P	1000 kW	800 kW
N	500 min	250 min

OPLOSSING

Uit vergelijking 1.7 kunnen we volgende evenredigheid afleiden:

$$M \propto \frac{P}{n}$$

Aldus:

$$M \propto \frac{1000}{500} = 2 \quad \text{en} \quad M \propto \frac{800}{250} = 3,2$$

Besluit: Machine 2 bezit het grootste bouwvolume.

1.4 OEFENINGEN

1. Bespreek de gegevens van het kenplaatje van figuur 1.1.

2. Een motor met een nominaal vermogen $P_N = 80 \text{ kW}$ en een nominaal rendement $\eta_N = 0,88$ wordt op halve belasting gebracht. Bereken het nieuwe rendement als de verliezen nu nog 25 % bedragen van de nominale verliezen.
($\eta = 93,6 \%$)

3. Bereken het nominaal rendement van de machine met een kenplaatje als figuur 1.1. Let er ook op dat u het bekrachtigingsvermogen in rekening brengt.
($\eta = 0,9257$)

4. Een motor met een nominaal vermogen $P_N = 400 \text{ kW}$ en een nominaal toerental $n_N = 730 \text{ min}^{-1}$ wordt kortstondig 60 % overbelast op het koppel, terwijl gelijktijdig het toerental daalt tot $n' = 700 \text{ min}^{-1}$.
Welk asvermogen P' wordt nu gevraagd?
($P' = 613,7 \text{ Kw}$)

2. ALGEMENE GRONDSLAGEN

2.1 INLEIDING

De algemene naam "elektrische machine" geldt voor elke machine waarin een elektrisch geleidend circuit in beweging is ten opzichte van een magnetisch veld of omgekeerd en waarbij elektrische energie wordt omgezet in mechanische energie of omgekeerd.

Wij zullen ons voor het cursusgedeelte 'gelijkstroommachines' beperken tot de roterende mechanische beweging.

Wanneer een roterende elektrische machine mechanische energie omzet in elektrische energie, dan noemen we deze machine een generator. Zet een roterende elektrische machine, gevoed uit een elektrisch net, elektrische energie om in mechanische energie, dan spreken we van een elektromotor.

Elke roterende elektrische machine bestaat uit een stator, dit is het vaststaand buitendeel en een rotor, dit is een draaiend binnendeel.

Zijn een elektrisch geleidend circuit en een magneetveld ten opzichte van elkaar in beweging, dan wordt er in het elektrisch geleidend circuit een spanning geïnduceerd. In het hoofdstuk "magnetisme" is reeds besproken, dat het ontstaan van een inductiespanning steeds het gevolg is van een fluxverandering. Het gedeelte waarin bij een roterende machine de spanning wordt geïnduceerd, noemt men het anker.

Heeft de spanning een stroom tot gevolg, dan ondervindt de stroomvoerende geleider een kracht, de zogenaamde lorentzkracht.

Elke roterende energie-omzetter kan in het algemeen als generator en als motor werken.

2.2 ONTSTAAN VAN EEN WISSELSpanning

In figuur 2.1 is een winding getekend, waarvan elk uiteinde verbonden is met een koperen ring. Deze zogenaamde *sleepringen* zijn ten opzichte van elkaar en van de as geïsoleerd. Op beide ringen zijn koolborstels aangebracht, die hier zijn voorgesteld als veren.

Op de borstels is een weerstand aangesloten. We noemen deze weerstand de *uitwendige -of belastingsweerstand*.

De draaiende winding en de belastingsweerstand vormen voortdurend een gesloten keten. Denken we ons de winding liggend om een stalen cilinder, het zogenaamde anker, dan is het veld binnen de winding bij benadering homogeen.

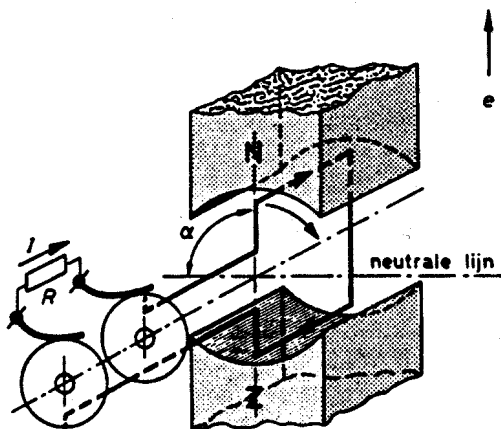


Fig.2.1 Het induceren van een spanning

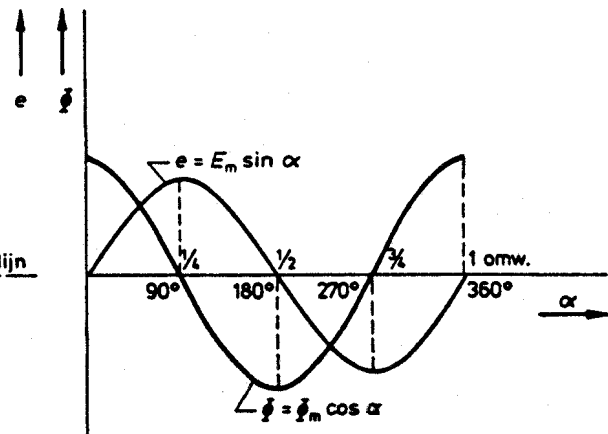


Fig.2.2 Verloop van flux en geïnduceerde spanning

Zoals bekend uit het hoofdstuk "magnetisme" kan de richting van de spanning worden gevonden met de *rechterhandregel*.

Uit figuur 2.1 blijkt:

- In de *neutrale stand*, omvat de winding de maximale flux en is de geïnduceerde spanning = 0.
- Loodrecht op de *neutrale lijn* is de opgewekte spanning maximaal en de omvatte flux = 0.

Uit de wisselstroomtheorie is ons bekend dat wanneer een winding met constante snelheid in een homogeen magnetisch veld roteert, in de winding een sinusvormige spanning wordt geïnduceerd, fig.2.2.

Voor de momentele waarde van deze wisselspanning geldt:

$$e = E_m \cdot \sin \alpha = E_m \cdot \sin (\omega.t) \quad [2.1]$$

Met: E_m = topwaarde wisselspanning in V
 α = doorlopen hoek t.o.v. de neutrale lijn in rad.
 ω = elektrische cirkelfrequentie in s^{-1}
 $\omega = 2.\pi.f$

2.3 ONTSTAAN VAN EEN GELIJKSPANNING

Roteert een winding in een magnetisch veld, dan wordt in de winding een wisselspanning opgewekt. Om aan de borstels een gelijkspanning te krijgen, kunnen we, in plaats van twee sleepringen, gebruik maken van twee halve ringen die ten opzichte van elkaar zijn geïsoleerd, fig.2.3. Deze constructie noemen we *commutator* (= stroomwisselaar) of *collector* (= stroomverzamelaar).

Uit figuur 2.5 a t.e.m d blijkt duidelijk dat, wanneer de richting van de stroom in de winding verandert, tevens de aansluiting met de uitwendige weerstand wisselt. Op deze manier vloeit in de buitenketen de stroom steeds in dezelfde richting. Men noemt dit het principe van generatorwerking.

De borstels moeten zo worden geplaatst dat ze beide ringhelften kortsluiten als in de winding geen spanning en geen stroom wordt opgewekt, zie standen a en c in fig.2.4 en 2.5.

De spanning over de borstels en de stroom in de belastingsweerstand worden met behulp van een commutator of collector gelijkgericht.

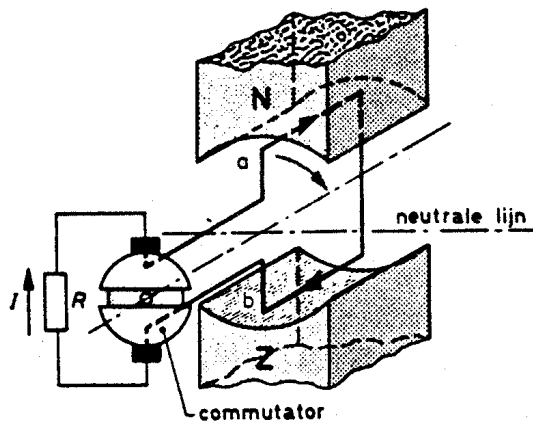


Fig.2.3

Principe van een commutator

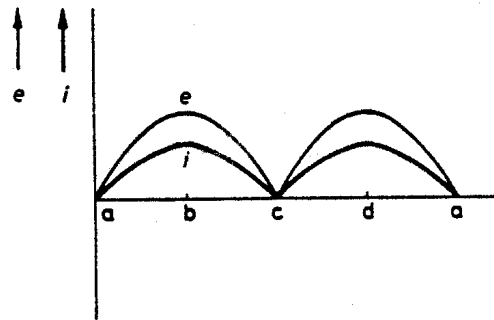


Fig.2.4

Pulserende gelijkspanning en
-stroom in de buitenketen

We spreken hier van een *pulserende gelijkspanning* en *pulserende gelijkstroom*, omdat spanning en stroom wel van grootte, maar niet meer van richting veranderen.

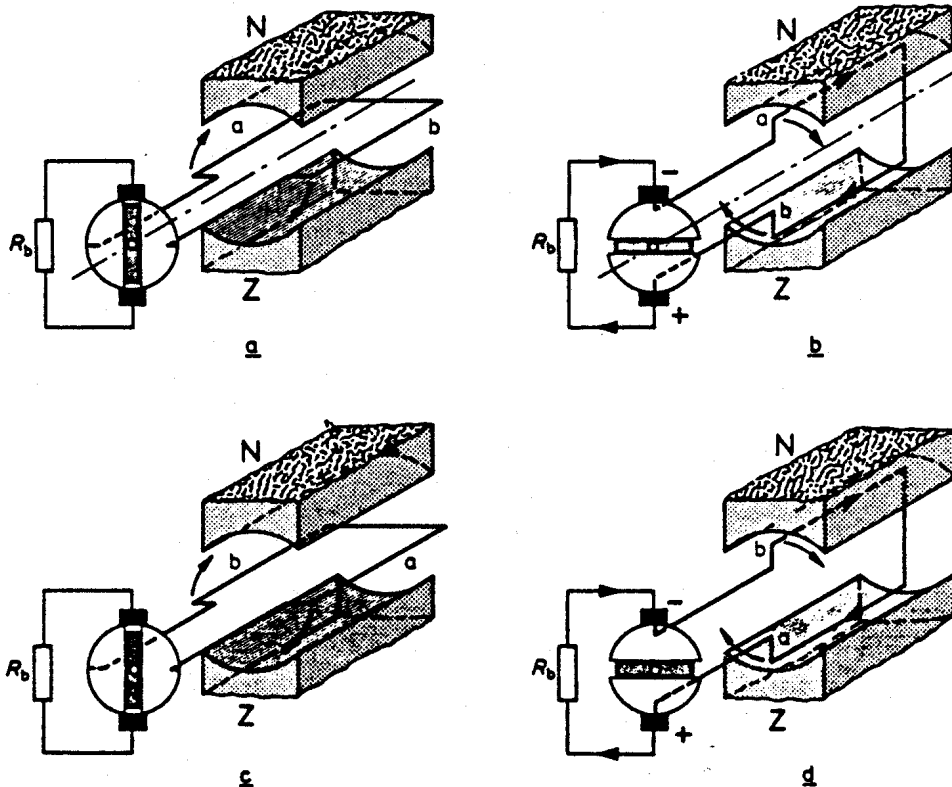


Fig. 2.5

$i = 0$ in stand a en c

$i = \text{max.}$ in stand b en d

2.4 ONTSTAAN VAN EEN KOPPEL

Een stroomvoerende geleider ondervindt in een magnetisch veld een lorentzkracht waarvan de richting volgens de linkerhandregel kan gevonden worden. De grootte van deze kracht is gelijk aan:

$$F = B \cdot I \cdot l$$

[2.2]

Met:

- F = Lorentzkracht in N
- B = Magnetische fluxdichtheid in Wb/m^2
- I = Stroomsterkte in A
- l = Geleiderlengte in het magnetisch veld in m

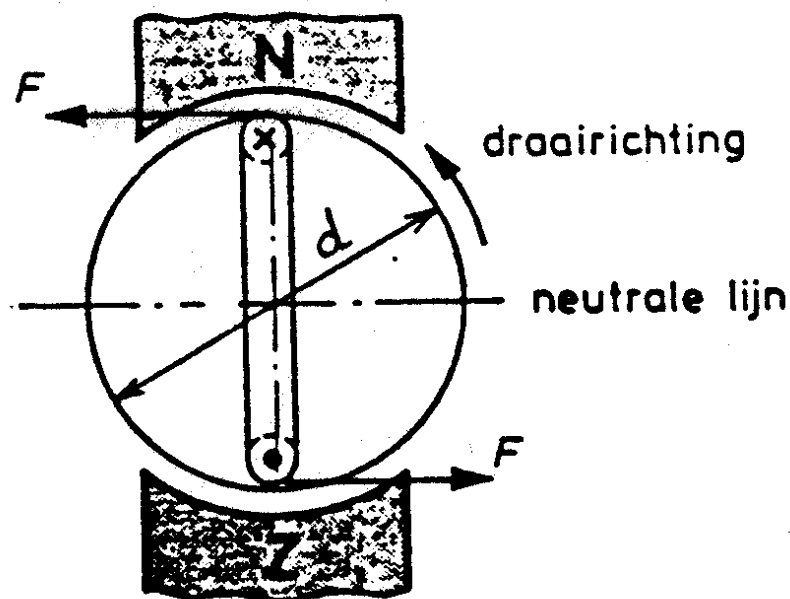


Fig.2.6 Ontstaan van een koppel

Passen we de linkerhandregel toe op de winding in figuur 2.6, dan vinden we twee even grote krachten welke de rotor linksom willen doen draaien. Dit is het principe van *motorwerking*.

Het koppel op de twee geleiders van de winding is dan:

$$M = 2 \cdot F \cdot r = F \cdot d$$

Vervangen we hierin F door [2.2], dan wordt dit:

$$M = B \cdot l \cdot l \cdot d \quad [2.3]$$

Met: M = Koppel op twee geleiders van een winding in Nm
 d = rotor -of ankerdiameter in m

Als de winding de neutrale lijn passeert, moet om de motor dezelfde draairichting te laten behouden, de stroomrichting in de winding worden omgekeerd.

Om een gelijkstroommotor in dezelfde richting te laten draaien is eveneens een commutator nodig, welke op dat moment dienst doet als wisselrichter.

3. MECHANISCHE CONSTRUCTIE

Een gelijkstrooommachine bestaat in principe uit drie delen:

- De stator, als dragend element voor de magnetische polen en de lagerschilden.
- Het anker met zijn wikkelingen, waarin een spanning wordt opgewekt bij generatorwerking of waarop een koppel ontstaat bij motorwerking.
- De commutator welke dienst doet als gelijk -of wisselrichter.

3.1 DE STATOR

De stator, ook wel *magneetgestel* genoemd, bestaat uit het *juk*, de *polen* en de *veldwikkelingen*, fig.3.1. Het *juk* bestaat uit gietstaal of plaatstaal en is op de uiteinden afgedraaid voor bevestiging van de lagerschilden.

Het dient als magnetische verbinding tussen de verschillende polen en moet daarom een zo klein mogelijke magnetische weerstand hebben en dus ook een minimum doorsnede.

In door vermogenselektronica gestuurde motoren kunnen snel variërende ankerstromen optreden, zoals bij veelvuldige draairichtingsomkeer, met als gevolg dat er in het massieve *juk* wervelstromen optreden die op hun beurt extra warmteverlies veroorzaken en bijkomend de snelle stroomveranderingen doen vertragen.

Van deze speciale motoren is het gehele magnetische circuit gelamelleerd uitgevoerd.

Binnenin het *juk* bevinden zich de hoofdpolen welke uit dynamoblik van 0,5 tot 1 mm dikte zijn opgebouwd (= lamelleren). Om de magnetische flux over het gehele anker te verdelen, zijn de hoofdpolen zo uitgevoerd, dat de poolschoen een groter gedeelte van de ankeromtrek omsluit. Bij grotere machines bevinden zich in de vrije ruimte tussen de hoofdpolen de kleinere hulppolen, fig.3.2.

Deze hulppolen verbeteren, zoals we later zullen zien, enkel de bedrijfseigenschappen.

De veldwikkelingen of *bekrachtigingswikkelingen* zitten rond de poolkern en worden zodanig in serie geplaatst dat er achtereenvolgens hoofdpolen met verschillende polariteit ontstaan.

De magnetische flux die hierdoor ontstaat, verloopt via het juk in een gesloten kring, fig.3.1a en b.

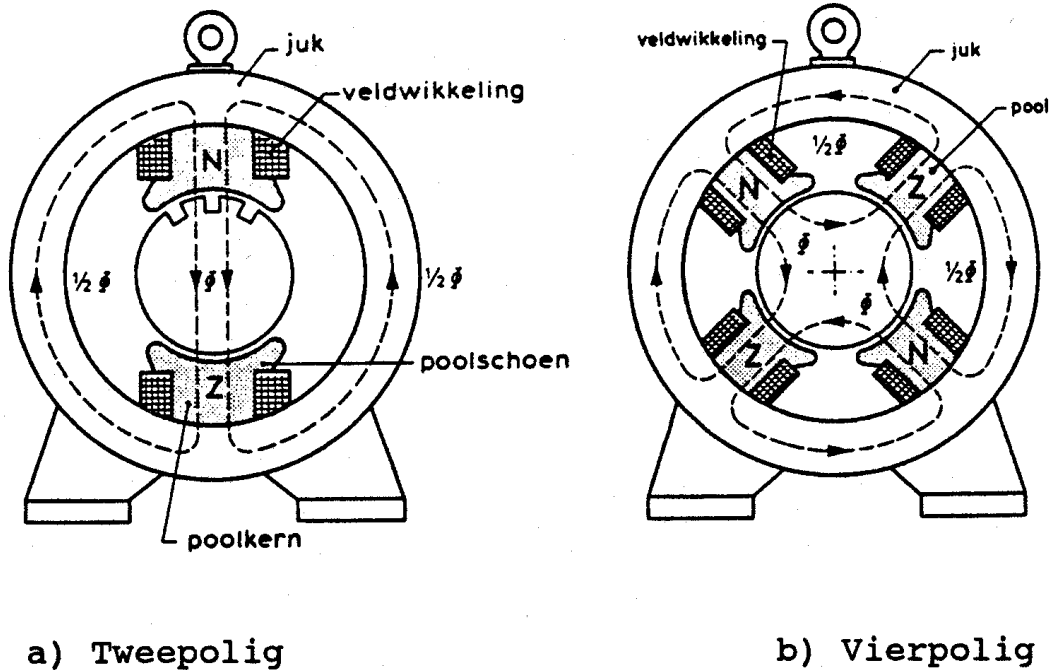


Fig.3.1 Fluxverdeling in een gelijkstroombmachine

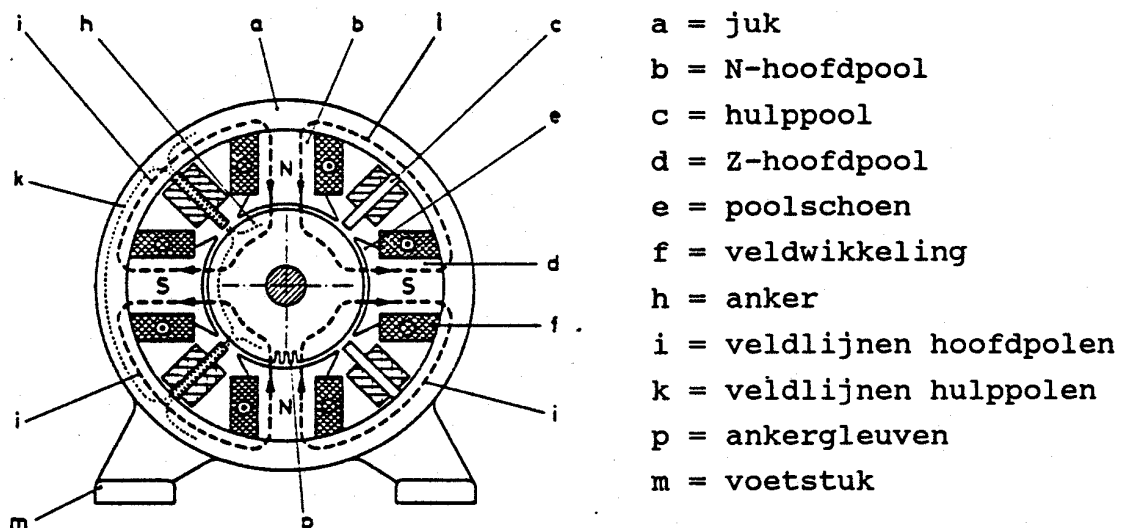


Fig.3.2 Vierpolige gelijkstroombmachine met hulppolen

3.2 HET ANKER

Vrijwel altijd worden in gelijkstroommachines zogenaamde *trommelankers* gebruikt. Een trommelanker heeft aan de omtrek een groot aantal groeven (gleuven) waarin de ankerdraden zijn ondergebracht, fig.3.3. Door de spoelen over de gehele ankeromtrek te verdelen kan een meer gelijkmatige gelijkspanning en -stroom worden verkregen.

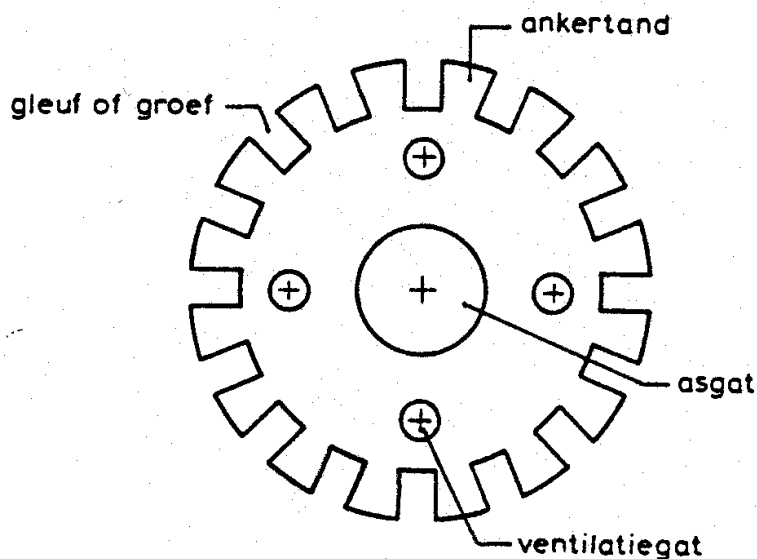


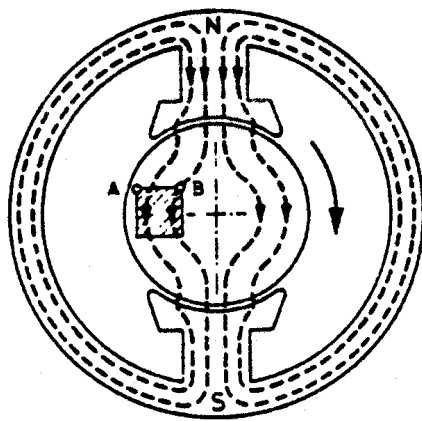
Fig.3.3 ankerblikplaat

Het trommelanker is opgebouwd uit dynamoblik-plaat van 0,35 tot 0,5 mm dikte. De platen zijn door een dun laagje isolatielak van elkaar geïsoleerd, men noemt dit lamelleren.

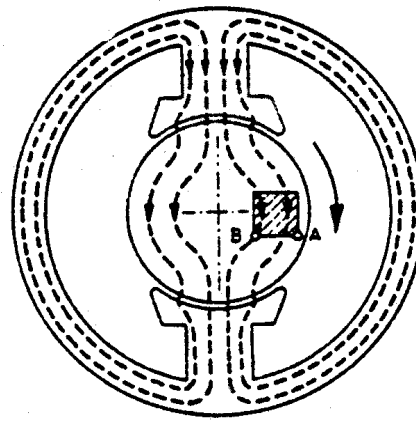
In fig.3.4. is een volume-element getekend om dit duidelijk te maken. In fig.3.4 a treden de veldlijnen via de as A-B in het volume-element. In fig.3.4 b is het anker 180° verder verdraaid, de veldlijnen lopen nu door het volume-element in omgekeerde richting en treden hier via as A-B uit het element.

Het volume-element evenals het ganse anker is dus onderhevig een wisselende magnetisering.

Men dient het anker van een gelijkstroommachine te lamelleren om hysteresis- en wervelstroomverliezen te vermijden.



a) Veldlijnen in het
volume-element



b) Veldlijnen uit het
volume-element

Fig.3.4 Principe van de wisselende flux in het anker

3.3 DE COMMUTATOR

De *collector* of *commutator* is het meest karakteristieke bouwelement van een gelijkstroommachine. Zijn werking werd reeds in par. 2.3 verklaard.

Een *commutator* bestaat uit een groot aantal koperen lamellen met daartussen mica-isolatie. In figuur 3.5 is te zien dat de *commutatorlamellen* een zwaluwstaart hebben.

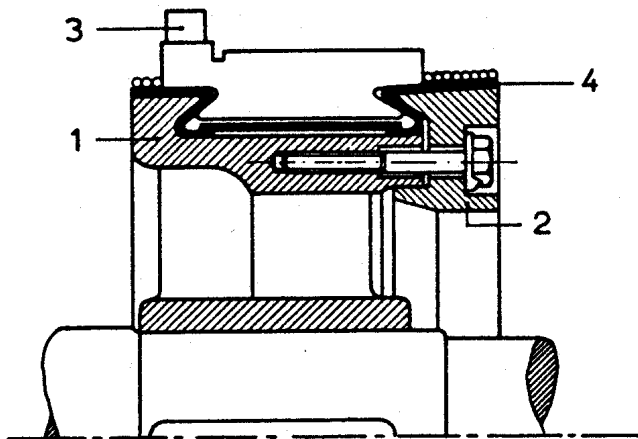
Met behulp van de *commutatorbus* en *-drukkring* worden de lamellen bij elkaar gehouden. De lamellen worden met de uitlopers van de ankerwikkelingen verbonden door *commutatorveren*. Bij kleine machines worden de uitlopers van de ankerwikkelingen rechtstreeks in groeven van de commutatorlamellen aangebracht.

Op de commutator rusten de *koolborstels* voor de toevoer of afname van de gelijkspanning.

De bijbehorende *borstelhouders* dienen om de borstels op hun plaats te houden en om de borstels verend tegen de commutator te drukken.

We onderscheiden in hoofdzaak *radiale* en *reactieborstelhouders*.

Bij de radiale borstelhouders, fig.3.6, staan de borstels loodrecht op de commutator en is de machine geschikt voor twee draairichtingen. Bij het reactietype, fig.3.7, staan de borstels onder een hoek van 60° ten opzichte van de commutator, hetgeen een beter borstelcontact oplevert bij grote snelheden. Het nadeel is dat dit type slechts voor één draairichting geschikt is.



- 1 = commutatorbus
- 2 = drukring
- 3 = commutatorveer
- 4 = isolatie

Fig.3.5 Commutator

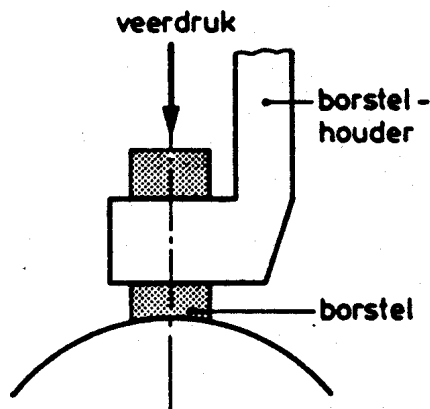


Fig.3.6
Radiale borstelhouder

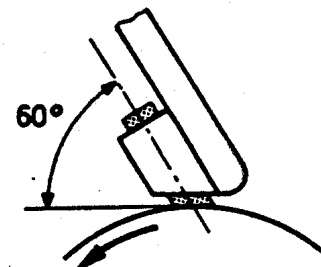


Fig.3.7
Reactieborstelhouder

Fig.3.8 toont een dwars -en langsdoorsnede van een vierpolige machine met de klassieke ronde bouwvorm.

Fig.3.9 toont tenslotte een nieuwe rechthoekige en compactere bouwvorm, eveneens van een vierpolige machine. Deze machine heeft een volledig *gelamelleerde magnetische keten* en is daarom geschikt voor snelle aandrijvingen met behulp van vermogenselektronica.

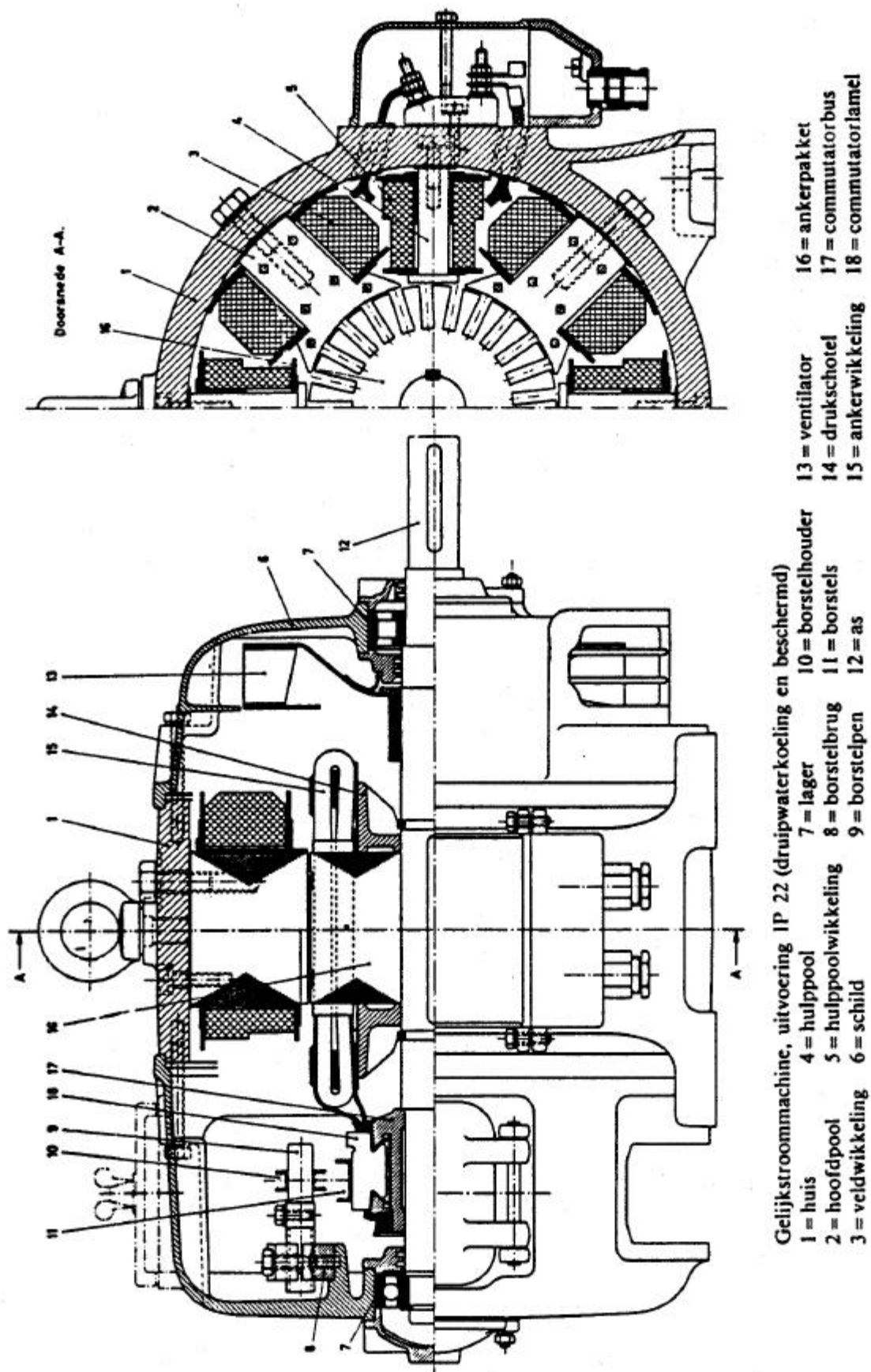


Fig.3.8 Vierpolige gelijkstroommachine, IP22, ronde bouwvorm

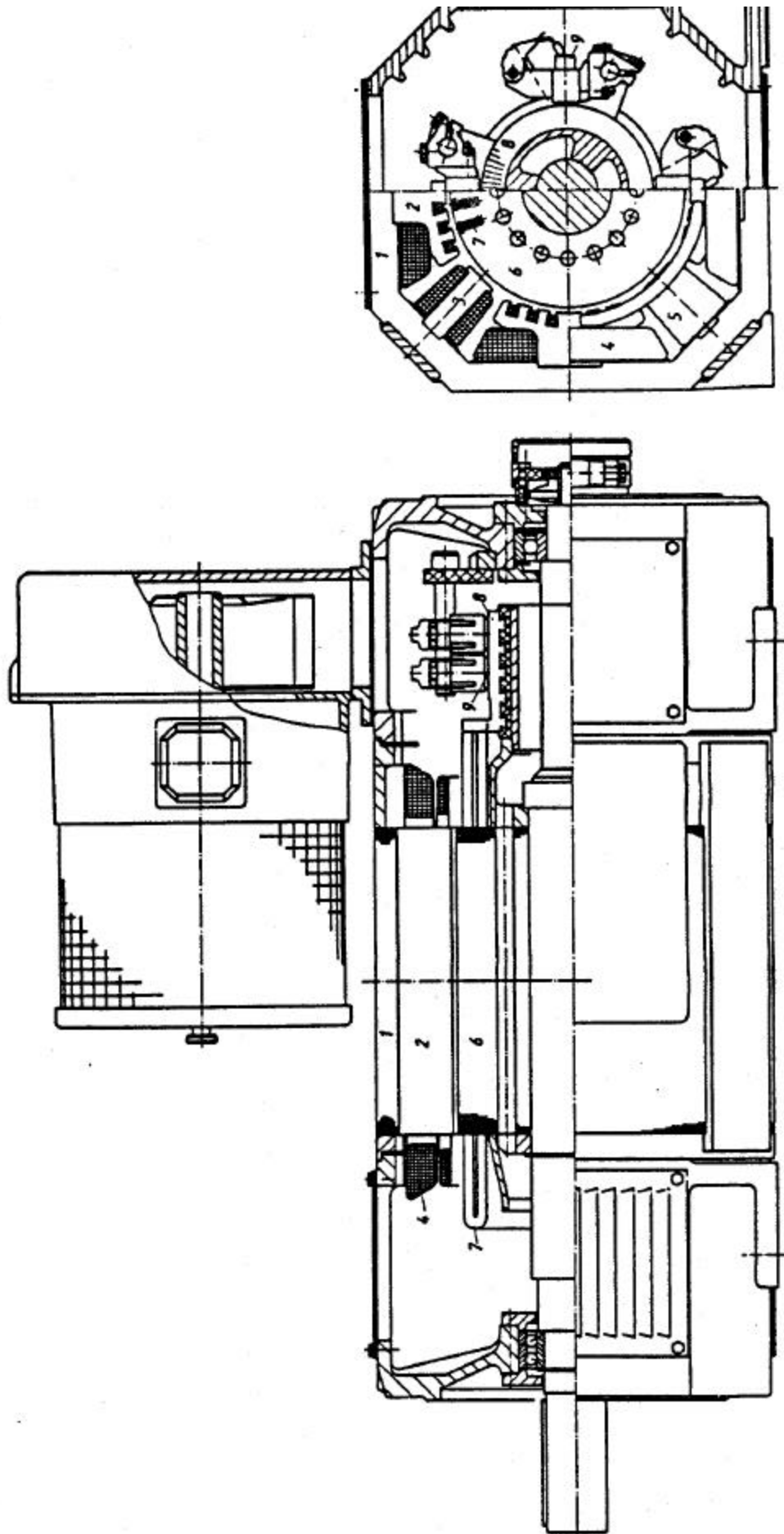


Fig.3.9 Vierpolige gelijkstroombmachine, rechthoekige bouwvorm

4. HET TROMMELANKER

Een trommelanker heeft aan de omtrek een groot aantal groeven waarin de ankerdraden worden ondergebracht, op deze manier wordt de volledige ankeromtrek bedekt met stroomvoerende geleiders.

Figuur 4.1 toont een principiële voorstelling van zo'n trommelanker met de voortlopende ankerdraden.

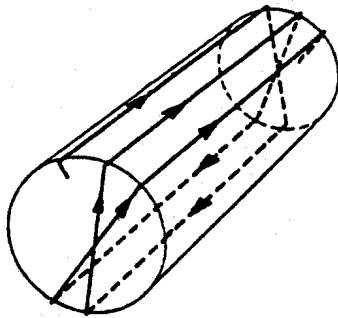


Fig.4.1 Trommelanker met voortlopende ankerdraden

4.1 SPANNINGSVORM BIJ EEN TROMMELANKER

Uit hoofdstuk 2.3 weten we dat een anker voorzien van één winding en een tweedelige commutator een gelijkspanning produceert met twee pulsaties per omwenteling, zie ook fig.2.3 en 2.4.

Leggen we meerdere spoelen gelijkmatig over de ankeromtrek van een trommelanker en bestaat de commutator uit meerdere commutatorlamellen, dan ontstaat een meer constante gelijkspanning.

Anders gezegd, we krijgen een gelijkspanning met een groter aantal kleine pulsaties, zie curve P-Q in fig.4.6.

In fig. 4.2 is een tweepolige ankerwikkeling getekend met 8 spoelen, dus met $2 \cdot 8 = 16$ spoelzijden.

Eenvoudigheidshalve zijn de spoelzijden niet in de gleuven, maar op de ankeromtrek getekend. De spoelzijden zijn genummerd van 1 t.e.m 16. Omwille van de duidelijkheid staan de borstels aan de binnenzijde van de commutator.

De spoelzijden 1 en 8 vormen tezamen spoel 1-8, spoelzijden 3 en 10 vormen spoel 3-10 enz.

Uitgaande van commutatorlamel 1 gaat de wikkeling van spoelzijde 1, vervolgens langs de achterzijde van het anker, in stippellijn getekend, naar spoelzijde 8. Spoelzijde 8 is verbonden met lamel 2. Aan lamel 2 zit tevens het begin van spoelzijde 3. Via spoelzijde 3 en 10 komen we op lamel 3. Zo voortgaande komen we tenslotte aan de laatste spoelzijden 15 naar 6, deze laatste zit weer aan lamel 1. Zie ook de wikkeltabel van fig. 4.3.

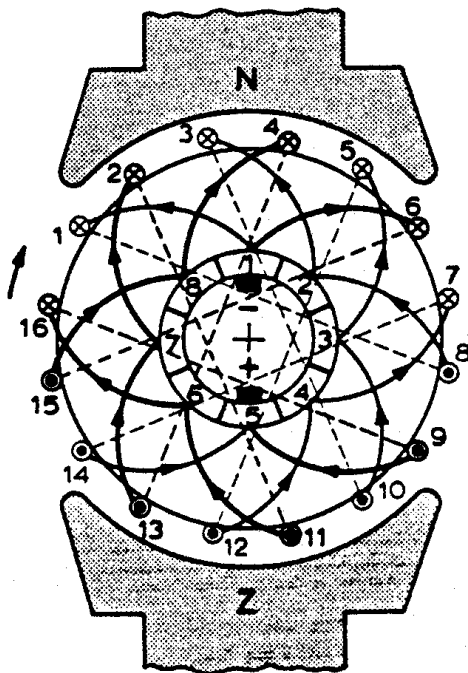


Fig.4.2
Tweepolige ankerwikkeling
generatorwerking

WIKKELTABEL		
spoelzijde	lamel	spoelzijde
1	1	8
3	2	10
5	3	12
7	4	14
9	5	16
11	6	2
13	7	4
15	8	6
1	1	

Fig.4.3
Wikkeltabel

We zien dat de ankerwikkeling een gesloten keten vormt. De in figuur 4.2 getekende pijlen gelden voor de opgewekte spanning bij generatorwerking.

De richting van deze spanningen is bepaald volgens de rechterhandregel, zodat ook de stroomrichtingen bekend zijn.

Beschouwen we deze stroomrichtingen nader, dan zien we dat vanaf het anker twee stromen, van spoelzijden 9 en 14 samen komen op lamel 5, hier bevindt zich de borstel met positieve polariteit.

Dezelfde redenering geldt voor lamel 1, van waaruit twee stromen het anker ingaan via de spoelzijden 1 en 6. De borstel op lamel 1 heeft dus de negatieve polariteit.

Gaan we vanuit de negatieve borstel doorheen het anker naar de positieve borstel, dan kan dit via spoelzijde 1 doorheen het anker om tenslotte de positieve borstel te bereiken via spoelzijde 14.

Een tweede mogelijkheid is via spoelzijde 6 en tenslotte spoelzijde 9. Het resultaat van dit alles staat getekend in fig.4.4.

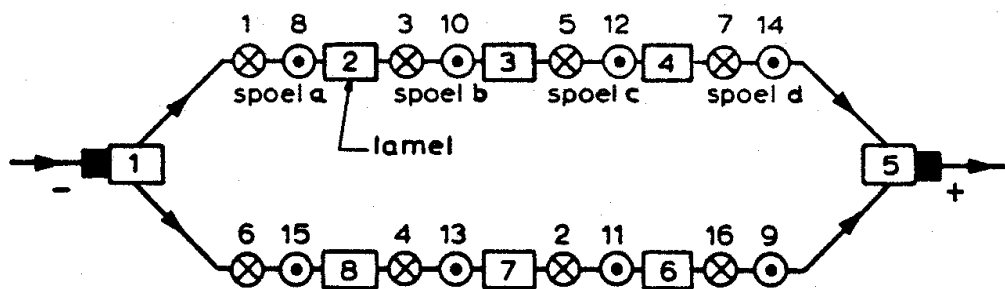


Fig.4.4 Stroomkringschema ankerwikkeling uit fig.4.2

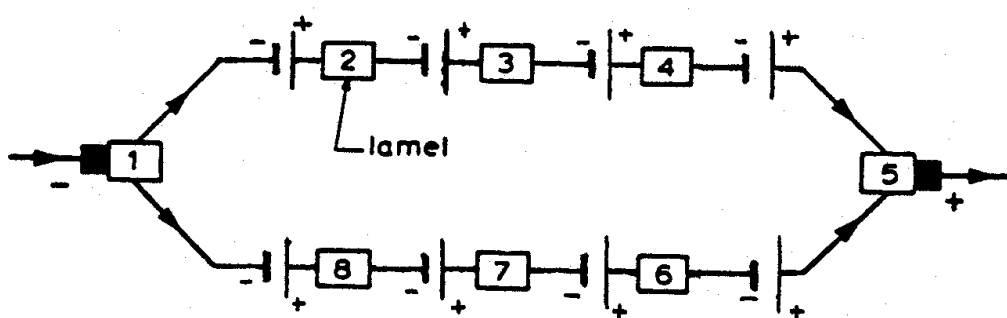


Fig.4.5 Vervangingsschema van het anker

We kunnen deze ankerwikkeling dus beschouwen als twee *parallele takken*, de zogenaamde *ankertakken*. Beide ankertakken hebben elk vier spoelen, welke we door spanningsbronnen kunnen voorstellen, zie fig.4.5.

De ankerspanning wordt bepaald door het aantal spoelen per tak.

Het aantal spoelen per ankerak en de geïnduceerde spanning per spoel bepalen de totale ankerspanning op de borstels.

In de bovenste tak van fig.4.4 zitten de spoelen 1-8, 3-10, 5-12 en 7-14, welke we gemakkelijkshalve met respectievelijk spoel a, b, c en d hebben aangeduid. Spoel b is 45° ($360^\circ/8 = 45^\circ$) verschoven ten opzichte van spoel a, spoel c weer 45° ten opzichte van spoel b enz.

De opgewekte spanningen zullen dus ook 45° ten opzichte van elkaar verschoven zijn, zie figuur 4.6.

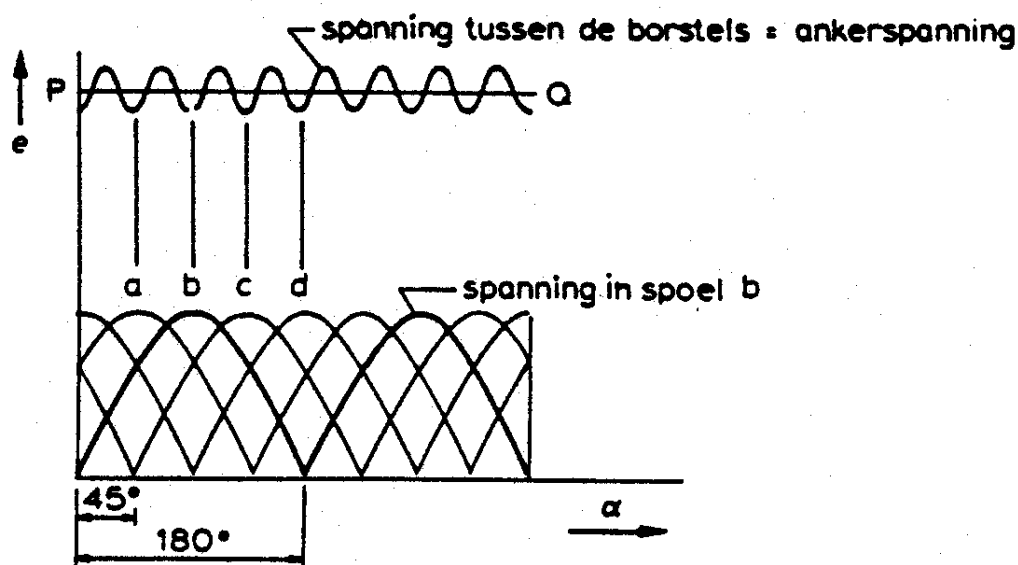


Fig. 4.6 Verloop van de spanningen in spoelen a, b, c en d
Verloop van de ankerspanning (= golflijn P-Q)

Tellen we de vier spanningen, die in de spoelen a tot d worden geïnduceerd, bij elkaar op, dan vinden we de totale opgewekte ankerspanning (= spanning tussen de borstels). Deze ankerspanning is in figuur 4.6 voorgesteld door de golflijn P-Q.

We zien dat door het aanbrengen van meer spoelen een meer constante gelijkspanning wordt verkregen. In dit voorbeeld waren er 8 spoelen en dus ook 8 commutatorlamellen.

In het algemeen geldt: aantal commutatorlamellen = aantal spoelen.

Figuur 4.7 toont de uitslag van de ankerwikkeling van fig.4.2.

Hiertoe is de ankerwikkeling tussen de spoelzijden 14 en 15 opengesneden en in het plat vlak neergeslagen.

De afstand langsheen de ankeromtrek tussen midden N-pool en midden volgende Z-pool noemen we de poolsteek $= \tau_p$.

$$\hat{\theta}_p = \frac{\delta \cdot d}{2 \cdot p} \quad [4.1]$$

Met: τ_p = poolsteek in m
 d = diameter anker in m
 p = aantal poolparen
 $2 \cdot p$ = totaal aantal polen

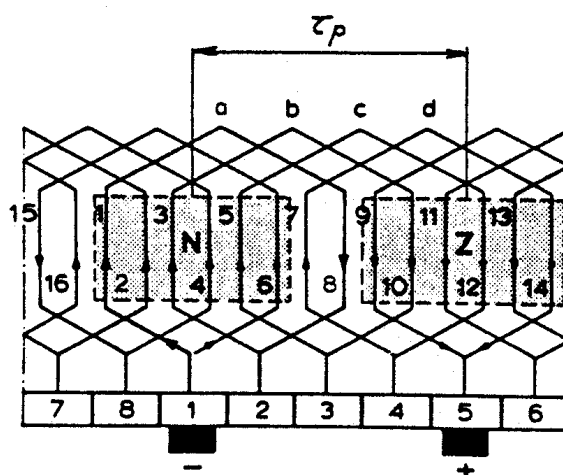


Fig.4.7 Uitslag van ankerwikkeling uit fig.4.2

4.2 DE ANKERWIKKELING

Afhankelijk van de wijze waarop de uitlopers van de ankerspoelen aan de commutatorlamellen worden verbonden, onderscheiden we:

- Luswikkelingen;
- Golfwikkelingen.

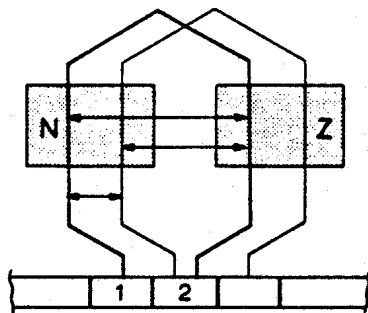


Fig.4.8 Luswikkeling

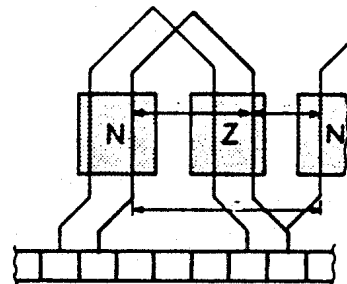


Fig.4.9 Golfwikkeling

4.2.1 LUSWIKKELING

Bij een luswikkeling zijn de uitlopers van de ankerspoelen naar elkaar toegebogen en zitten ze vast aan twee naast elkaar gelegen commutatorlamellen, fig. 4.8.

- Luswikkeling voor meerpolige machines

In figuur 4.10 is het stroomkringschema getekend van een vierpolige luswikkeling met 12 spoelen. We zien dat er hier vier parallelle ankertakken ontstaan.

In totaal zijn er hier vier borstels nodig welke steeds gelijk zijn aan het aantal polen. Fig. 4.11 toont tenslotte de uitslag van dezelfde luswikkeling.

Algemeen:

Bij een luswikkeling is het aantal parallelle ankertakken en het aantal borstels gelijk aan het aantal polen.

Stellen we het aantal parallelle ankertakken op 2.a en het aantal polen op 2.p, dan is $2.a = 2.p$, of:

$a = p$	bij een luswikkeling
---------	----------------------

met: a = totaal aantal parallelle ankertakken
 p = totaal aantal poolparen

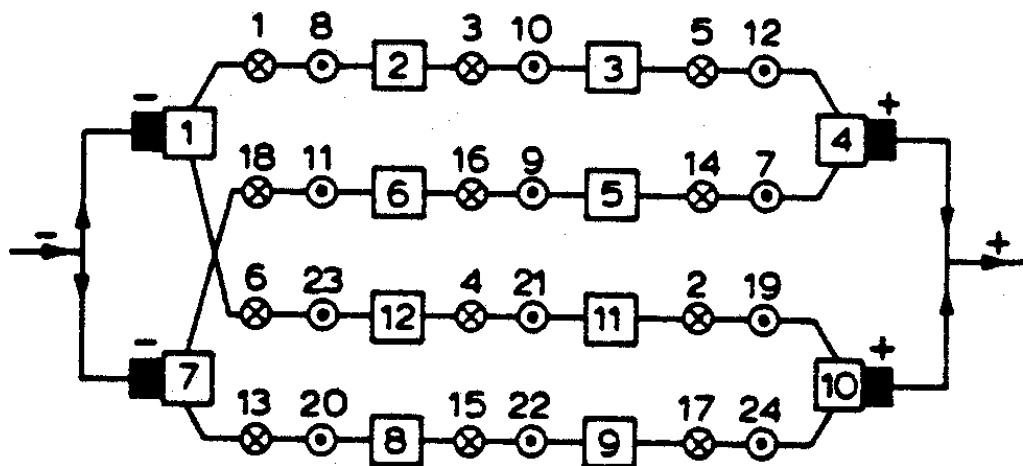


Fig.4.10 Stroomkringschema van een 4-polige luswikkeling

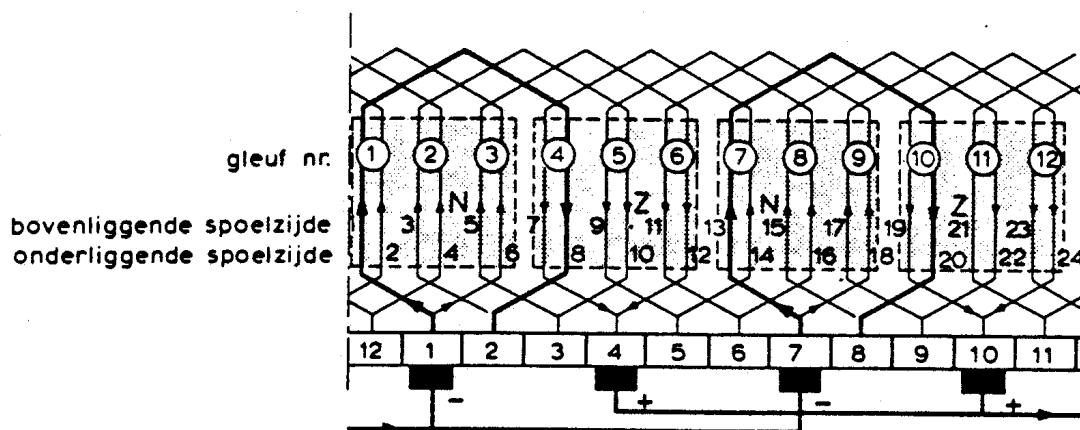


Fig.4.11 Uitslag van een 4-polige luswikkeling

4.2.2 GOLFWIKKELING

Bij een golfwikkeling liggen de spoelen als het ware als een golf over het anker. De uitlopers zijn van elkaar af gebogen en verbonden aan twee lamellen die niet aan elkaar grenzen, fig.4.9.

- Golfwikkeling voor meerpolige machines

In figuur 4.12 is het stroomkringschema getekend van een vierpolige golfwikkeling met 13 spoelen. We zien dat er hier twee parallelle ankertakken ontstaan. Figuur 4.13 toont tenslotte de uitslag van dezelfde golfwikkeling.

Bij een golfwikkeling is het aantal parallelle ankertakken steeds gelijk aan twee.

Stellen we het aantal parallelle ankertakken weer op $2.a$, dan is $2.a = 2$, of:

$a = 1$ bij een golfwikkeling

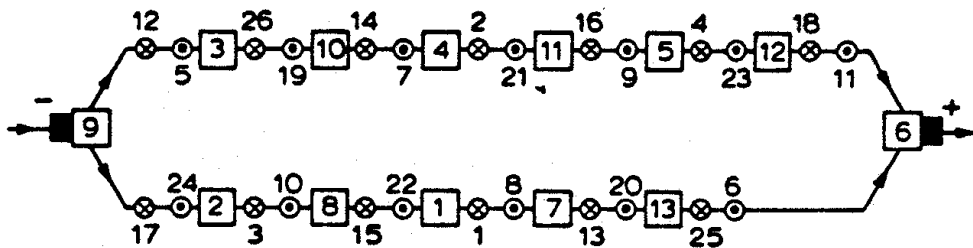


Fig.4.12 Stroomkringschema van een 4-polige golfwikkeling

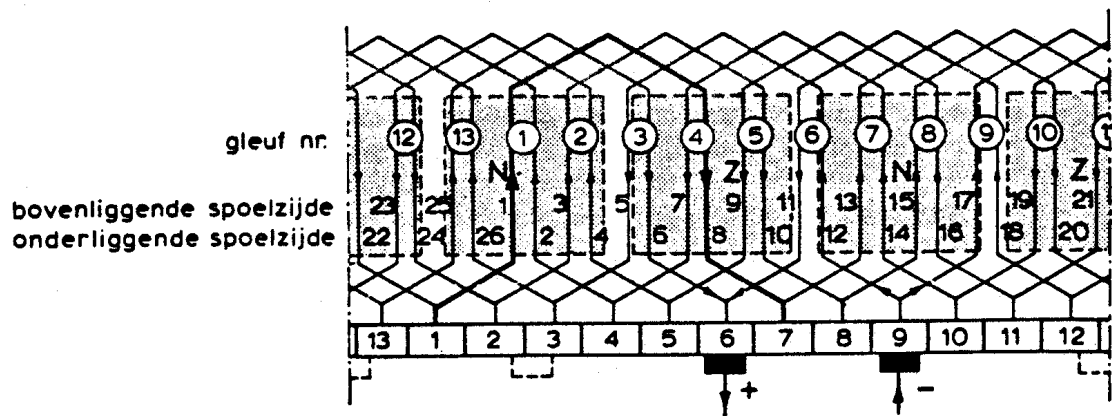


Fig.4.13 Uitslag van een 4-polige golfwikkeling

4.2.3 KEUZE VAN DE ANKERWIKKELING

De toelaatbare stroom in een ankertak wordt bepaald door de koperdoorsnede van een winding en de toelaatbare stroomdichtheid.

$$I_{\text{tak}} = A \cdot J \quad [4.2]$$

Met: I_{tak} = stroom in ankertak in A
 A = draadsectie ankerwinding in mm^2
 J = stroomdichtheid in A/mm^2

De nominale stroom in het anker hangt af van de nominale stroom in één ankertak en het aantal parallelle takken.

$$I_a = I_{\text{tak}} \cdot 2 \cdot a \quad [4.3]$$

Met: I_a = ankerstroom in A
 I_{tak} = stroom in ankertak in A
 $2 \cdot a$ = totaal aantal ankertakken

De totale ankerweerstand is te berekenen als een vervangingsweerstand van een parallelschakeling met dezelfde takweerstand

$$R_a = \frac{R_{tak}}{2.a} \quad [4.4]$$

Met: R_a = totale ankerweerstand in Ω

R_{tak} = weerstand ankertak in Ω

Hierin is de takweerstand te berekenen met een bekende formule:

$$R_a = \frac{\rho.l_{tak}}{A} \quad [4.5]$$

Met: ρ = soortelijke weerstand in $\Omega.mm^2 / m$ of $10^{-6} \Omega.m$

l_{tak} = totale lengte draad ankertak in m

A = doorsnede ankerdraad in mm^2 of m^2

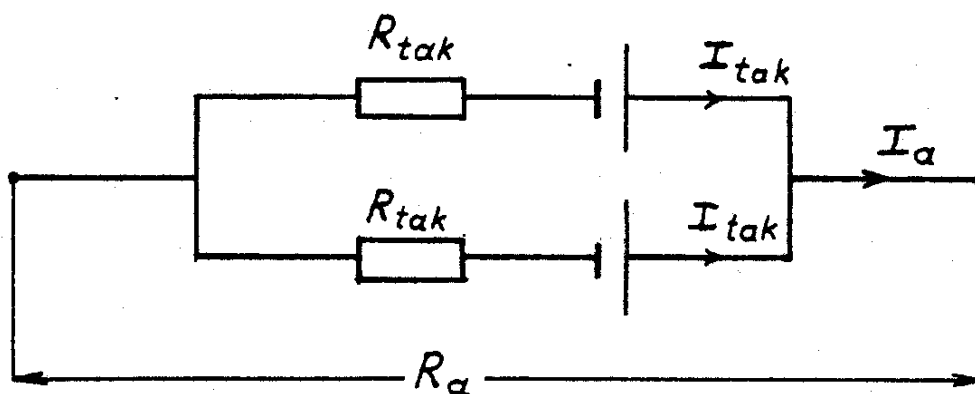


Fig.4.14 Vervangingsschema ankerketen

De ankerspanning van een gelijkstroombmachine wordt bepaald door:

- het aantal spoelen dat per ankertak in serie is geschakeld, en
- de opgewekte spanning per spoel.

GOLFWIKKELING

Aangezien een meerpelige golfwikkeling een groot aantal in serie geschakelde spoelen per ankertak heeft, wordt deze wikkeling voor relatief hoge spanningen toegepast, meestal bij kleine machines.

LUSWIKKELING

Aangezien een meerpelige luswikkeling meerdere parallelle takken heeft, is deze wikkeling bij uitstek geschikt voor grote stromen.

De luswikkeling wordt daarom het meeste toegepast voor grote machines.

VOORBEELD 4.1

Het anker van een vierpolige generator bestaat uit 120 spoelen.

Elke spoel heeft 4 windingen. De doorsnede van een winding is 1 mm^2 . De gemiddelde opgewekte spanning per winding is $0,5 \text{ V}$, terwijl de toelaatbare stroomdichtheid in een ankerdraad 5 A/mm^2 is.

Bereken de in het anker opgewekte spanning en de nominale ankerstroom wanneer wordt toegepast:

- a) een golfwikkeling;
- b) een luswikkeling

OPLOSSING

- a) Er zijn in totaal $120 * 4 = 480$ windingen.

Bij een golfwikkeling zijn er altijd 2 parallelle ankertakken, zodat elke ankertak uit $480 : 2 = 240$ windingen bestaat.

De in het anker opgewekte spanning is dan: $240 * 0,5 \text{ V} = 120 \text{ V}$

De stroom in een ankerdraad, dus ook in een ankertak mag volgens [4.2] maximaal $5 \text{ A/mm}^2 * 1 \text{ mm}^2 = 5 \text{ A}$ bedragen.

De maximale ankerstroom is dan volgens [4.3]:

$$I_a = I_{\text{tak}} * 2a = 5 * 2 = 10 \text{ A}$$

- b) Bij een vierpolige luswikkeling zijn er vier parallelle ankertakken, zodat het aantal windingen per ankertak gelijk is aan $480 : 4 = 120$ windingen.

De in het anker opgewekte spanning is dus $120 * 0,5 \text{ V} = 60 \text{ V}$.

De stroom in een ankertak blijft eveneens maximaal 5 A , zodat de maximale ankerstroom:

$$I_a = I_{\text{tak}} * 2a = 5 * 4 = 20 \text{ A}.$$

VOORBEELD 4.2

Het anker van een achtpolige machine heeft 864 draden aan de omtrek. De ankerwikkeling met $\rho = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ bestaat uit windingen met een gemiddelde lengte van 1m en een doorsnede van $2,5 \text{ mm}^2$. Hoe groot is de ankerweerstand als een luswikkeling en een golfwikkeling worden toegepast?

OPLOSSING

- a) De ankerwikkeling bestaat uit $864 : 2 = 432$ windingen. Bij een achtpolige luswikkeling is het aantal parallelle ankertakken gelijk aan 8 ($2a = 2p = 8$). Het aantal windingen per ankertak is $432 : 8 = 54$, zodat de totale lengte per ankertak:

$$l_{\text{tak}} = 54 \cdot 1 \text{ m} = 54 \text{ m}.$$

De takweerstand is volgens [4.5]:

$$R_a = \frac{\rho \cdot l_{\text{tak}}}{A} = \frac{0,02 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m} \cdot 54 \text{ m}}{2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 0,432 \Omega$$

De ankerweerstand is dan, zie [4.4]:

$$R_a = \frac{R_{\text{tak}}}{2 \cdot a} = \frac{0,432}{8} = 0,054 \Omega$$

- b) Voor een golfwikkeling is $2a = 2$, het aantal windingen per ankertak wordt dan $432 : 2 = 216$ windingen.

$$l_{\text{tak}} = 216 \cdot 1 \text{ m} = 216 \text{ m}$$

$$R_a = \frac{\rho \cdot l_{\text{tak}}}{A} = \frac{0,02 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m} \cdot 216 \text{ m}}{2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,728 \Omega$$

$$R_a = \frac{R_{\text{tak}}}{2 \cdot a} = \frac{1,728}{2} = 0,864 \Omega$$

4.3 OEFENINGEN

1. Een vierpolige generator heeft een anker met 460 geleiders. In elke geleider wordt gemiddeld 2 V opgewekt. De doorsnede van een geleider is 10 mm^2 . De toelaatbare stroomdichtheid is 4 A/mm^2 .

Bereken:

- a) De totale opgewekte ankerspanning voor een luswikkeling;
 - b) De maximale ankerstroom in dat geval;
 - c) De totale opgewekte ankerspanning voor een golfwikkeling;
 - d) De maximale ankerstroom in dat geval.
- (230 V ; 160 A ; 460 V ; 80 A)

2. Van een 6-polige generator heeft een anker 96 gleuven met 10 geleiders per gleuf; de lengte van één winding is 1,1 m en de doorsnede van een geleider 4 mm^2 ; het anker heeft een luswikkeling en $\rho = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega\text{m}$.

Bereken de ankerweerstand.

(0,0733 Ω)

3. Twee gelijkstroommotoren nemen bij nominaal bedrijf hetzelfde elektrisch vermogen op $P = 20 \text{ kW}$. Motor 1, met een ankerspanning van 60 V dient als aandrijfmotor van een batterij-gevoed voertuig.

Motor 2, met een ankerspanning van 260 V, wordt via een gelijkrichter op het wisselstroomnet aangesloten.

- a) Verklaar waarom u een bepaalde ankerwikkeling (lus of golfwikkeling) voor elke motor gaat gebruiken.
- b) Hoe groot zijn de ankertakstromen van beide motoren, als motor 1 met een vierpolige luswikkeling is uitgevoerd en motor 2 met een vierpolige golfwikkeling?

(83 A; 38,5 A)

5. ANKERREACTIE EN COMMUTATIE

5.1 HOOFDVELD

In fig. 5.1a is het magnetisch veld gegeven van een onbelaste tweepolige gelijkstroommachine. Vermits bij een onbelaste machine de ankerstroom zeer klein, of praktisch nul is, werden er geen kruisjes of punten getekend om de stroomzin aan te geven.

Fig. 5.1b geeft het verloop van de fluxdichtheid B_L in de luchtspleet in functie van de uitgeslagen ankeromtrek.

Bij een onbelaste machine hebben we slechts één magnetisch veld, namelijk het veld dat door de polen wordt geleverd. We noemen dit het *hoofdveld* Φ_H .

In de luchtspleet is dit veld radiaal gericht. De neutrale lijn AB staat loodrecht op het hoofdveld. We spreken hier van *oorspronkelijke neutrale lijn*.

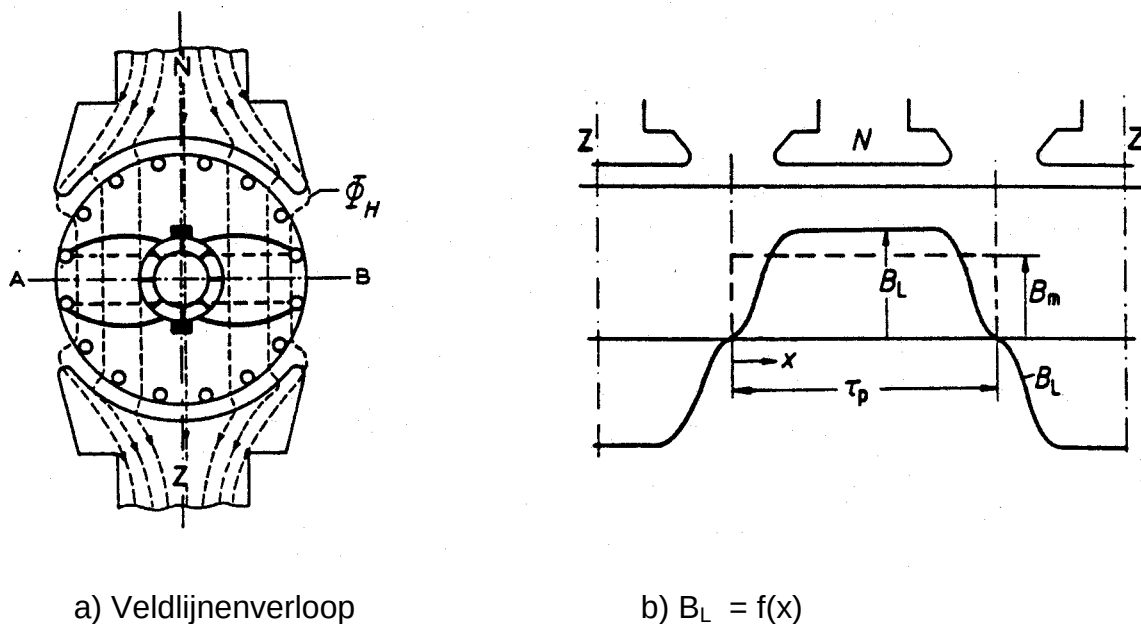
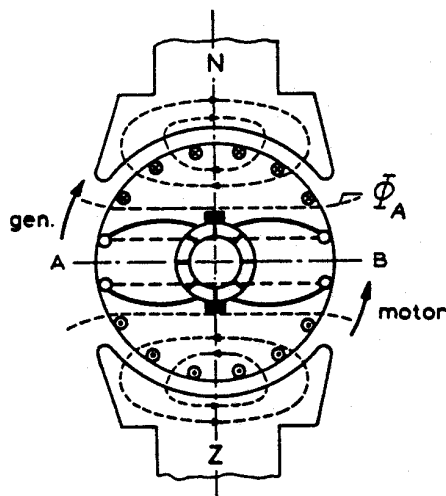


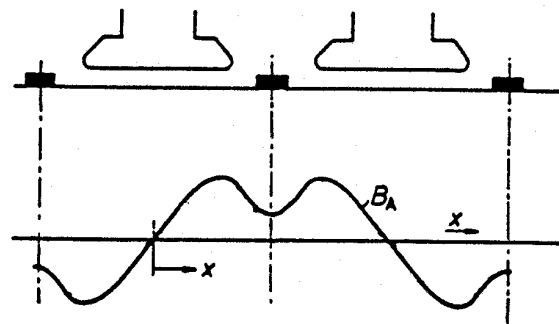
Fig.5.1 Hoofdveld van een gelijkstroommachine bij nullast

5.2 ANKERVELD

Wordt een gelijkstroommachine belast, dan zullen de stroomvoerende ankerdraden eveneens een magnetisch veld veroorzaken, waarvan de richting en sterkte afhankelijk zijn van de ankerstroom. Dit veld heet het *ankerveld* Φ_A , zie fig. 5.2a. De inzinking van de magnetische inductie B_A in de zone van de neutrale lijn, fig.5.2b, heeft te maken met de tijd die nodig is om de stroom in het anker om te keren.



a) Veldlijnenverloop



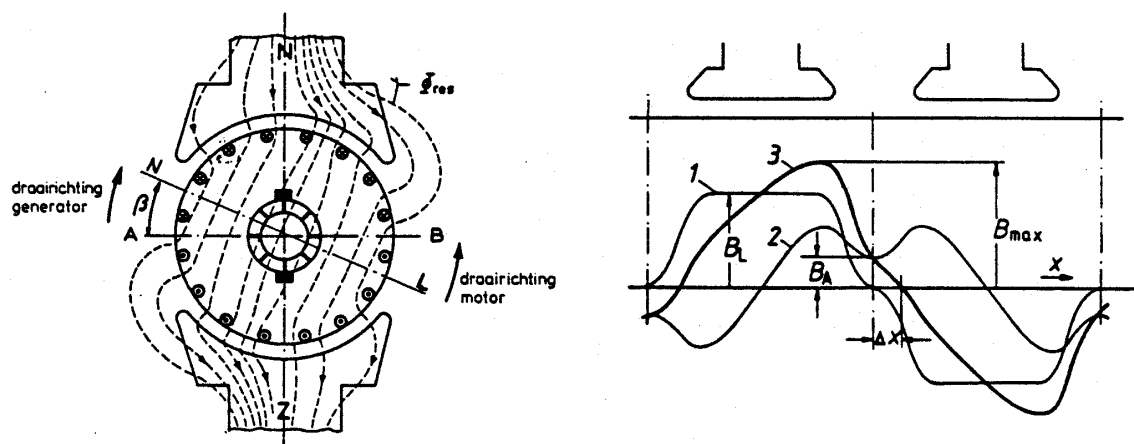
b) $B_A = f(x)$

Fig.5.2 Ankerveld van een belaste gelijkstroommachine

5.3 ANKERREACTIE

In fig.5.3a zien we dat het ankerveld het hoofdveld aan de linkerzijde van de N-pool verzwakt en aan de rechterzijde versterkt. Bij de Z-pool is dit net andersom. In het algemeen zijn de polen verzadigd, zodat men niet zomaar beide velden algebraïsch kan optellen.

De invloed van het ankerveld op het hoofdveld noemt men *ankerreactie*.



a) Veldlijnenverloop

b) $B = f(x)$

Fig.5.3 Resultierend veld van een belaste gelijkstrooommachine

1 = hoofdveld bij nullast

2 = ankerveld

3 = resultierend veld

De ankerreactie heeft volgende uitwerkingen:

- Het hoofdveld (3) wordt zodanig vervormd, met als gevolg dat er in sommige poolspitsen een hogere fluxdichtheid heerst dan bij nullast (1), fig.5.3b. In de andere poolspitsen heerst dan ook een lagere fluxdichtheid dan bij nullast.

$$B_{\max} > B_L$$

- Ten gevolge van de magnetische verzadiging is invloed van de veldverzwakking groter dan de veldversterking. Het resultaat is dat het nieuwe hoofdveld Φ_{res} kleiner is dan het hoofdveld bij nullast.

$$\Phi_{\text{res}} < \Phi_H$$

- De nieuwe neutrale lijn N-L (waarbij $B_L = 0$) is over een hoek β verdraaid ten opzichte van de oorspronkelijke neutrale lijn A-B, zie fig.5.3a.

In de uitslag van de machine wordt deze verschuiving voorgesteld door de afstand ΔX , fig.2.32b.

Bij een belaste generator verschuift de neutrale lijn *in de draairichting*, bij een motor *tegen de draairichting in*.

5.4 COMMUTATIE

Bij de uitleg over de principiële werking van de gelijkstroommachine werd aangetoond dat alle ankergeleiders door dezelfde stroom doorlopen werden in het bereik van een hoofdpool. We weten reeds dat de stroom in een ankerwinding van richting verandert wanneer de spoelzijden de neutrale lijn passeren.

Met commutatie (= omkeren) bedoelt men het omkeren van de stroomzin in een ankerwikkeling, dit gebeurt door het verschuiven van de collectorlamel langsheen de borstel.

In fig.5.4 is een gedeelte van een luswikkeling getekend, vóór, tijdens en na de commutatie. De commutator met de aangesloten wikkelingen bewegen zich hier naar rechts.

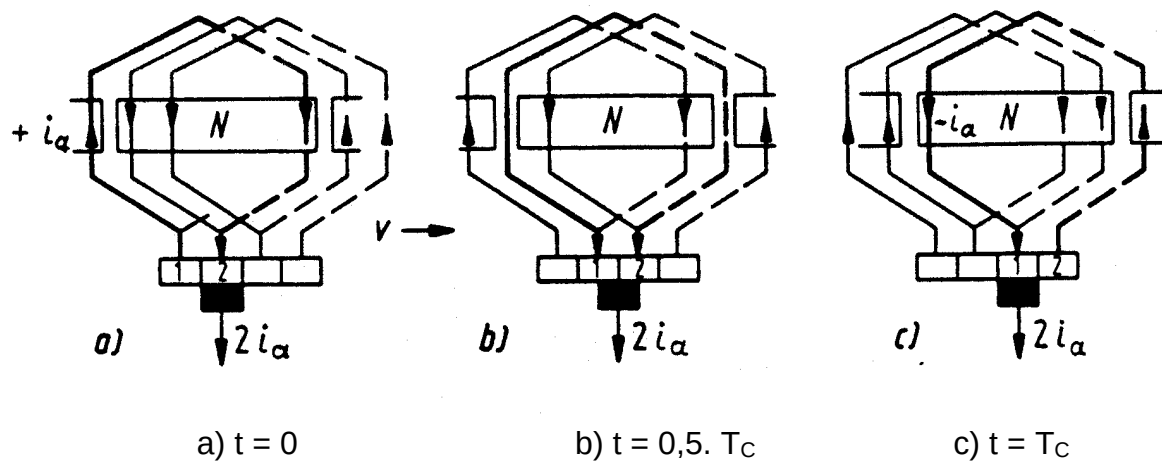


Fig.5.4 Verloop van de commutatie

In figuur a vloeit de stroom $+i_a$ in de dik getekende ankerspoel, op lamel 2 staat de borstel voor afname van de stroom $2 \cdot i_a$.

In figuur b bevinden de spoelzijden zich in de neutrale lijn waardoor er normaal gezien geen spanning kan opgewekt worden, op dit moment zijn twee naast elkaar gelegen lamellen kortgesloten, de ankerwikkeling is daardoor ook kortgesloten.

In figuur c staat de borstel op lamel 1 en is de stroom in de ankerspoel van richting veranderd tot de waarde $-i_a$. De borstel op lamel 1 is nog steeds de positieve borstel met stroomafname $2 \cdot i_a$.

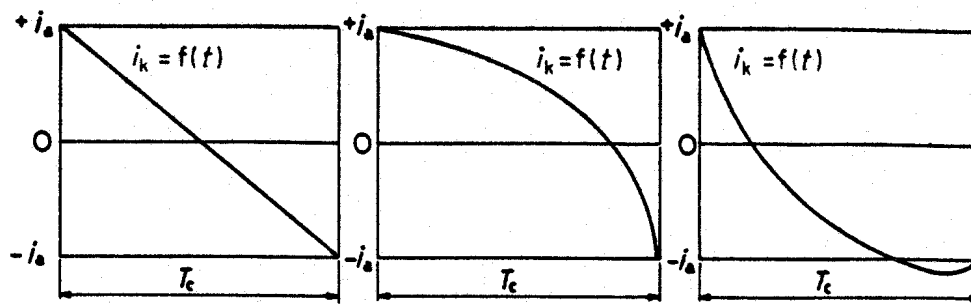
5.5 COMMUTATIEKARAKTERISTIEK

De tijd die nodig is om de stroom in de ankerwikkeling van $+i_a$ naar $-i_a$ te veranderen, noemt men de *commutatietijd* T_c .

Deze commutatietijd wordt kleiner naarmate de borstel smaller en het toerental groter wordt. In het algemeen is T_c in de orde van enkele milliseconden.

De stroom die tijdens de commutatieperiode in de kortgesloten spoel optreedt, noemen we kortsluit- of commutatiestroom i_k .

De grafiek die aangeeft hoe de stroom i_k gedurende de commutatieperiode verandert, heet *commutatiekarakteristiek*, zie fig.5.5.



a) Lineaire commutatie b) Ondercommutatie c) Overcommutatie

Fig.5.5 Commutatiekarakteristiek

De commutatiekarakteristiek kan op een drietal manieren verlopen:

- Lineaire commutatie

Dit is het ideale verloop van de spoelstroom i_k , we zullen echter maatregelen moeten nemen om dit streefdoel te behalen of te behouden.

- Ondercommutatie

Als gevolg van de stroomverandering van $+i_k$ naar $-i_k$ wordt er een zelfinductiespanning opgewekt.

$$e_L = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Volgens de wet van Lenz zal deze spanning de stroomverandering trachten tegen te gaan, zodat deze spanning vertragend op de commutatie werkt.

In hoofdstuk 5.3 hebben we reeds gezien dat door ankerreactie de neutrale lijn verschuift, waardoor de kortgesloten spoel zich nog in een magnetisch veld bevindt, zie fig.5.3a.

Tengevolge van het bewegen van de ankergeleiders in dit magnetisch veld wordt er in de kortgesloten spoel een rotatiespanning geïnduceerd.

$$e_r = B \cdot l \cdot v$$

Heeft deze rotatiespanning dezelfde richting als de zelfinductiespanning, dan wordt de commutatie vertraagd en hebben we te maken met ondercommutatie.

- Overcommutatatie

De rotatiespanning werkt de zelfinductiespanning tegen waardoor de commutatie sneller kan gebeuren, men noemt dit overcommutatatie.

Lineaire commutatie treedt op wanneer de som van alle geïnduceerde spanningen in de kortgesloten spoel nul is. In de praktijk streeft men ernaar de commutatie zoveel mogelijk lineair te laten verlopen.

Wanneer de commutatie niet lineair verloopt treden er vonken op onder de borstels met als gevolg dat de lamellen van de commutator versnelt afslijten.

5.6 VERBETERING VAN DE COMMUTATIE

5.6.1 BORSTELVERSCHUIVING

Bij een onbelaste machine sluiten de borstels windingen kort als deze de oorspronkelijke neutrale lijn passeren. Laten we de borstels in deze stand staan en wordt de machine nu belast, dan sluiten de borstels nu windingen kort waarin een flinke spanning wordt geïnduceerd omdat de werkelijke neutrale lijn is verschoven.

Deze commutatie gaat gepaard met *vonken onder de borstels*, we spreken van een slechte commutatie.

Ter verbetering van de commutatie kunnen we de borstels verschuiven en wel bij een *generator met de draairichting mee* en bij een *motor tegen de draairichting in*.

In figuur 5.6 zijn de borstels verschoven getekend, deze nieuwe borstelstand is zowel voor generator als voor motorwerking geldig.

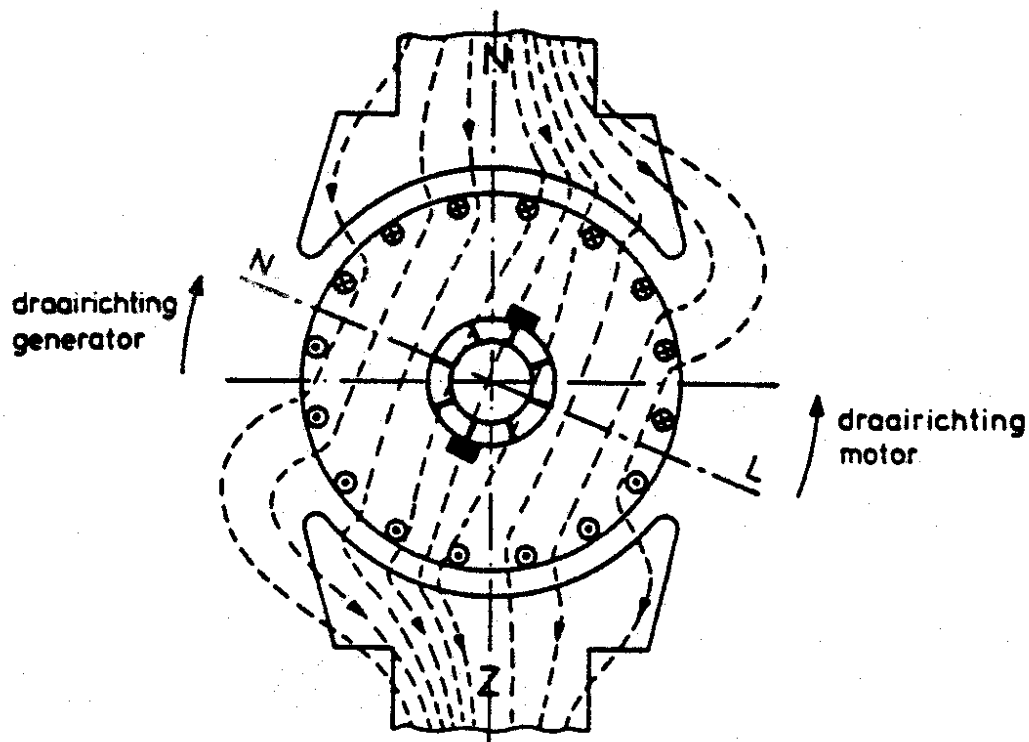


Fig.5.6 Borstelverschuiving

Omdat de borstelstand, evenals de stand van de nieuwe neutrale lijn, afhankelijk is van de belasting, zou men deze omwille van een gunstige commutatie bij elke belasting moeten veranderen.

Meestal wordt de borstelstand éénmaal ingesteld zodanig dat het vonken bij een gemiddelde belasting minimaal is.

Borstelverschuiving past men soms toe bij kleine (< 1 kW) machines.

5.6.2 HULPPOLEN

Figuur 5.7 stelt een gelijkstrooommachine met hulppolen voor. De hulppolen worden in de oorspronkelijke neutrale lijn geplaatst. De hulppoolwikkelingen, gemerkt met de letters B1 - B2, worden in serie geschakeld met het anker.

Bij iedere ankerstroom ontwikkelen de hulppolen een hulppoolveld Φ_H dat in oppositie staat met het ankerveld Φ_A , zodat dit laatste gedeeltelijk wordt opgeheven. Hierdoor kunnen de borstels bij alle belastingen in de oorspronkelijke neutrale lijn blijven staan.

Let ook in fig. 5.7 op de volgorde van hoofd -en hulppolen volgens de draairichting.

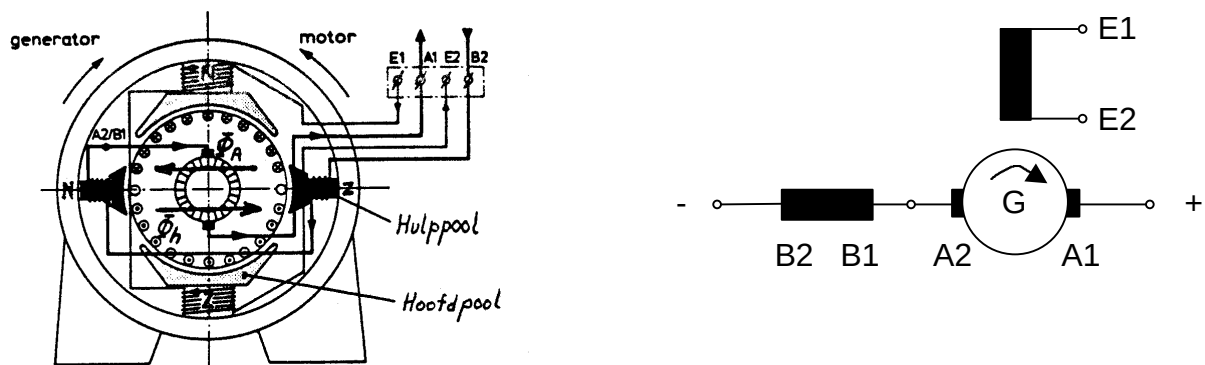


Fig.5.7 Machine met hulppolen

Bij een gelijkstrooommachine met hulppolen kunnen de borstels in de oorspronkelijke neutrale lijn blijven staan.

5.6.3 COMPENSATIEWIKKELINGEN

Als in grote machines ($> 1 \text{ kW}$) flinke stroomstoten optreden, voorzien we de hoofdpolen van zogenaamde *compensatiewikkelingen*. In de poolschoenen zijn dan gleuven aangebracht waarin de geleiders van de compensatiewikkeling zitten, zie fig.5.8.

Compensatiewikkelingen zijn in feite een verlengstuk van de hulppolen, het is daarom ook dat men ze in serie schakelt met de hulppolen en het anker.

Bij iedere belasting wordt de compensatiewikkeling door de ankerstroom doorlopen en zal ze een flux Φ_C kunnen opwekken die evenals de hulppoolflux in oppositie staat met de ankerflux Φ_A .

De schakeling van een hulppool in combinatie met een compensatiewikkeling wordt duidelijk in de uitslag van fig.5.9.

De uiteinden van de compensatiewikkeling worden gemerkt met de letters C1 en C2.

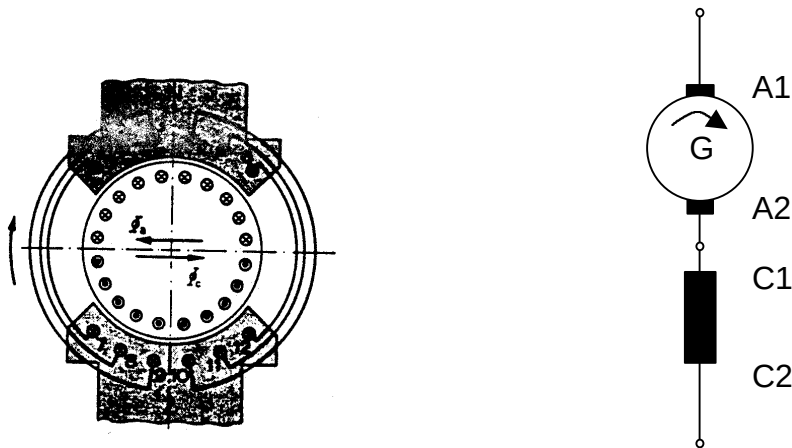
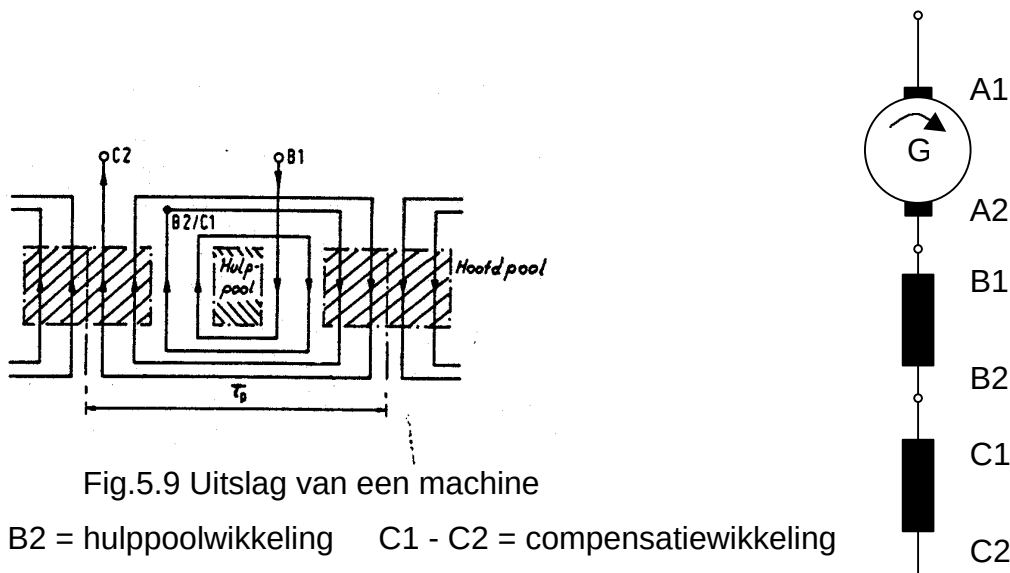


Fig.5.8 Compensatiewikkeling

Compensatiewikkelingen vermijden voornamelijk de verzadigingsverschijnselen in de poolspitsen en komen steeds voor in combinatie met hulppolen.



5.7 OORZAKEN VAN EEN SLECHTE COMMUTATIE

- **Commutatiekarakteristiek**

In het algemeen geven sterke onder -en overcommutatie aanleiding tot vonken onder de borstels. Dit kan extra slijtage van borstels en commutator betekenen. Het verbeteren van de commutatie is erop gericht de som van de geïnduceerde spanningen in de commuterende (kortgesloten) spoel gelijk aan nul te maken. We streven naar een lineaire commutatie.

Meestal past men bij de grotere (> 1 kW) machines hulppolen toe, eventueel in combinatie met compensatiewikkelingen.

Bij kleine machines is de ruimte te beperkt en neemt men zijn toevlucht tot borstelverschuiving.

- **Lamelspanning**

De spanning tussen twee aangrenzende commutatorlamellen wordt lamelspanning genoemd. De ervaring leert ons dat deze spanning in bedrijf niet hoger mag zijn dan 30 ... 35 V.

Is de lamelspanning hoger, dan kan er tengevolge van vuil en koolstof overslag ontstaan tussen aangrenzende lamellen. In het ergste geval kan dit aanleiding geven tot rondvuur waarbij de ganse commutator in kortsluiting staat.

- **Mechanische factoren**

Een groot aantal mechanische factoren hebben invloed om een ongunstige commutatie. We vernoemen er enkele: onronde commutator, mechanische trillingen, onjuiste borsteldruk.

6. BASISVERGELIJKINGEN

6.1 SPANNINGSVERGELIJKING

Uit het hoofdstuk 'magnetisme' weten we nog dat als we een geleider met lengte l bewegen in een magnetisch veld met fluxdichtheid B , er in die geleider een spanning e geïnduceerd wordt:

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

Een ankerwikkeling van een gelijkstroommachine bestaat uit twee actieve geleiders die zich in een luchtspleetveld bewegen met gemiddelde fluxdichtheid B_g , zie fig.6.1. Het gebied voor deze spanningsopwekking, onder één hoofdpool, is de poolsteek τ_p .

De opgewekte spanning in één winding:

$$e = 2 \cdot B_g \cdot l \cdot v \quad (2)$$

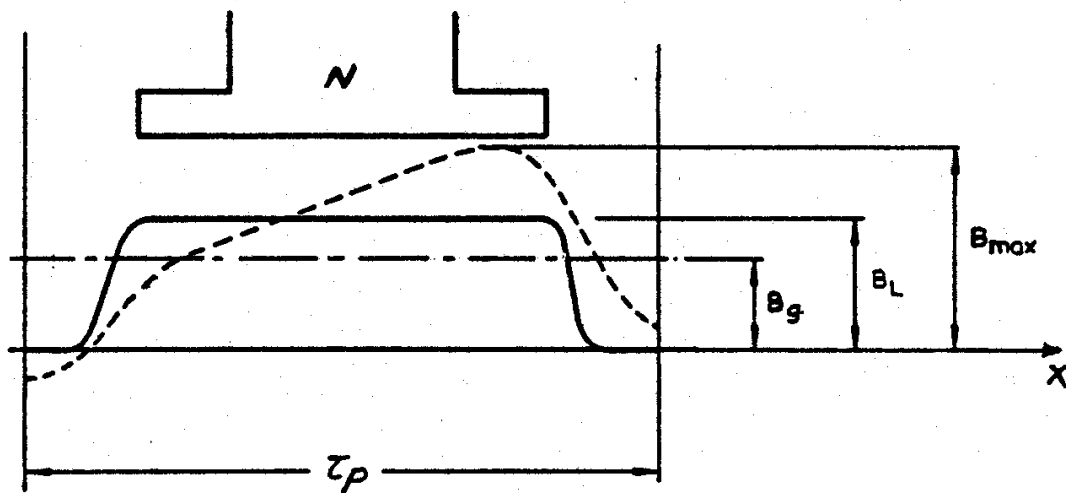


Fig.6.1 Luchtspleetinductie

De snelheid waarmee de winding ronddraait:

$$v = \pi \cdot d \cdot n \quad (3)$$

Met: v = omtrekssnelheid in m/s

d = diameter anker in m

n = toerental anker in s^{-1}

In plaats van de cirkelomtrek $\pi \cdot d$ kunnen we ook de poolsteek τ_p vermenigvuldigen met het totaal aantal polen $2 \cdot p$:

De omtrekssnelheid van de winding wordt nu:

$$v = \tau_p \cdot 2 \cdot p \cdot n \quad (4)$$

(4) in (2) geeft voor de opgewekte spanning in één winding:

$$e = 2 \cdot B_g \cdot l \cdot \tau_p \cdot 2 \cdot p \cdot n \quad (5)$$

Hierin herkennen we de poolflux Φ :

$$\Phi = B \cdot A = B_g \cdot l \cdot \tau_p \quad (6)$$

De spanning in één winding wordt dan:

$$e = 4 \cdot \Phi \cdot p \cdot n \quad (7)$$

Wanneer een machine bestaat uit N ankerwindingen, dan is het aantal windingen per ankertak:

$$z = \frac{N}{2 \cdot a} \quad (8)$$

De opgewekte spanning per ankertak E is ook de borstel- of totale ankerspanning en is afhankelijk van het aantal windingen dat in serie geschakeld is per ankertak:

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

Ofwel:
$$E = \frac{2 \cdot p \cdot N}{a} \cdot \Phi \cdot n$$
 [6.1]

Met:

- E = opgewekte ankerspanning in V
- P = aantal poolparen
- A = aantal paar parallelle takken
- N = aantal ankerwindingen
- 2.N = aantal actieve ankerdraden
- Φ = poolflux in Vs
- n = toerental anker in s^{-1}

Indien het toerental in min^{-1} gegeven is:

$$E = \frac{2 \cdot p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \Phi \cdot n$$
 [6.2]

Met: n = toerental anker in min^{-1}

We kunnen nu nog een machineconstante C_1 invoeren:

$$C_1 = \frac{2 \cdot p \cdot N}{a}$$
 [6.3]

a = 1 voor een golfwikkeling

a = p voor een luswikkeling

De opgewekte ankerspanning:

$$E = C_1 \cdot \Phi \cdot n$$
 [6.4]

Formule 6.4 is geldig voor elk soort anker, ongeacht de soort wikkeling.

VOORBEELD 6.1

Een achtpolige machine bezit een anker dat 864 draden aan de omtrek heeft. De poolflux is 5,546 mWb. Het toerental bedraagt 720 min^{-1} . Bereken de ankerspanning bij:

- a) luswikkeling;
- b) golfwikkeling.

OPLOSSING

- a) achtpolige machine $2.p = 8$ ofwel $p = 4$
luswikkeling $2.a = 2.p = 8$ ofwel $a = 4$
aantal ankerwikkelingen $N = 864 : 2 = 432$

$$E = \frac{2 \cdot p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \Phi \cdot n = \frac{2 \cdot 4 \cdot 432}{60 \cdot 4} \cdot 5,546 \cdot 10^{-3} \cdot 720 = 57,5 \text{ V}$$

- b) golfwikkeling $2.a = 2$ ofwel $a = 1$

$$E = \frac{2 \cdot p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \Phi \cdot n = \frac{2 \cdot 4 \cdot 432}{60 \cdot 1} \cdot 5,546 \cdot 10^{-3} \cdot 720 = 230 \text{ V}$$

6.2 KOPPELVERGELIJKING

Op een stroomvoerende geleider in een magnetisch veld wordt een kracht uitgeoefend, welke men Lorentzkracht noemt en waarvan de richting te vinden is met de linkerhandregel.

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (1)$$

Bij een gelijkstroommachine bevindt deze geleider zich in een luchtspleetveld met een gemiddelde fluxdichtheid B_g en vloeit er door deze geleider dezelfde stroom als door een ankertak, namelijk I_{tak} :

$$F = B_g \cdot I_{\text{tak}} \cdot l \quad (2)$$

Een ankerwikkeling van een gelijkstroommachine bestaat normaal uit twee actieve geleiders, het inwendig koppel M_i uitgeoefend op het trommelanker met diameter d wordt dan, zie ook [2.4]:

$$M_i = F \cdot d = B_g \cdot I_{\text{tak}} \cdot l \cdot d \quad (3)$$

Deze takstroom is volgens [4.3]:

$$I_{\text{tak}} = \frac{I_a}{2 \cdot a} \quad (4)$$

Op een trommelanker liggen N windingen die door een stroom doorlopen worden, het totale koppel is derhalve N maal groter:

$$M_i = N \cdot B_g \cdot \frac{I_a}{2 \cdot a} \cdot l \cdot d \quad (6)$$

Uit vergelijking (6) in de vorige paragraaf kunnen we de gemiddelde fluxdichtheid berekenen :

$$B_g = \frac{\Phi}{l \cdot \tau_p} \quad (7)$$

hierin is de poolsteek τ_p volgens [4.1]:

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot d}{2 \cdot p} \quad (8)$$

(8) en (7) in (6) geeft uiteindelijk het inwendig koppel M :

$$\boxed{M_i = \frac{p \cdot n}{\pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_a} \quad [6.5]$$

Met:

- M_i = inwendig koppel in Nm
- p = aantal poolparen
- a = aantal paar parallelle takken
- N = aantal ankerwindingen
- $2 \cdot N$ = aantal actieve ankerdraden
- Φ = poolflux in Vs
- I_a = ankerstroom in A

Net zoals bij de spanningsvergelijking kunnen we een machineconstante C_2 invoeren:

$$C_2 = \frac{p \cdot N}{\pi \cdot a} \quad [6.6]$$

$a = 1$ voor een golfwikkeling

$a = p$ voor een luswikkeling

Het inwendig koppel:

$$M_i = C_2 \cdot \Phi \cdot I_a \quad [6.7]$$

Formule 6.7 is geldig voor elk soort anker, ongeacht de soort wikkeling.

Het inwendig koppel M van het anker is het theoretisch te verwachten koppel dat door de lorentzkrachten opgewekt wordt.

VOORBEELD 6.2

Een motoranker bestaat uit een vierpolige luswikkeling met 112 spoelen. Elke spoel heeft 4 windingen. De poolflux is 23,91 mWb en de ankerstroom is 40 A. Bereken het inwendig koppel.

OPLOSSING

Er zijn 112 spoelen met elk 4 windingen, dus in totaal $112 \cdot 4 = 448$ windingen.

$$M_i = \frac{p \cdot N}{\pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_a = \frac{2 \cdot 448}{\pi \cdot 2} \cdot 23,91 \cdot 10^{-3} \cdot 40 = 136,4 \text{ Nm}$$

6.3 ASKOPPEL EN VERLIESKOPPEL

Bij een elektrische machine kunnen we nog onderscheid maken tussen het *uitwendige of askoppel* = M_{as} en het *inwendige koppel* = M_i .

Motorbedrijf

Bij een motor zal het askoppel ten gevolge van de wrijvingsverliezen kleiner zijn dan het inwendige koppel. Het verschil tussen beide koppels noemt men het verlieskoppel = M_v .

$$M_{as} = M_i - M_v \quad [6.8]$$

Met: M_{as} = askoppel motor in Nm
 M_i = inwendig koppel in Nm
 M_v = verlieskoppel in Nm

Men kan nu meerdere bedrijfstoestanden bekijken met formule 6.8.

Loopt een motor onbelast, d.w.z. dat de motor geen werktuig aandrijft, dan is het askoppel = 0 en zal het inwendige koppel gelijk zijn aan het verlieskoppel. Anders gezegd; het theoretisch inwendig koppel dat aan de ankeromtrek ontstaat wordt in zijn geheel verbruikt voor het leveren van de mechanische verliezen.

Generatorbedrijf

Bij een generator is alles net andersom. Dit wil zeggen dat het askoppel hier groter is dan het inwendig koppel. Dit laatste is in feite het tegenwerkend koppel dat ontstaat wanneer de stroomvoerende ankergeleiders zich bewegen in een magnetisch veld. Het verlieskoppel dient hier ook weer voor het compenseren van de wrijvingsverliezen.

$$M_{as} = M_i + M_v \quad [6.9]$$

Met: M_{as} = askoppel generator in Nm

6.4 UITGEBREIDE SPANNINGSVERGELIJKING

De geïnduceerde ankerspanning E in een gelijkstroombmachine kennen we reeds van vergelijking [6.4].

$$E = C_1 \cdot \Phi \cdot n$$

Wanneer de machine een stroom voert, dan zal ten gevolge van de ankerweerstand een spanningsval $I_a \cdot (R_a + R_h)$ optreden.

Ook in de borstels treedt een spanningsval op, omdat de overgangsweerstand borstel-commutator stroomafhankelijk is. Als gemiddelde waarde nemen we hier 1 V per borstel ofwel $2 \cdot U_b = 2 \text{ V}$.

We kunnen hieruit besluiten dat er een spanningsverschil zal ontstaan tussen de inwendige spanning E en de klemspanning U .

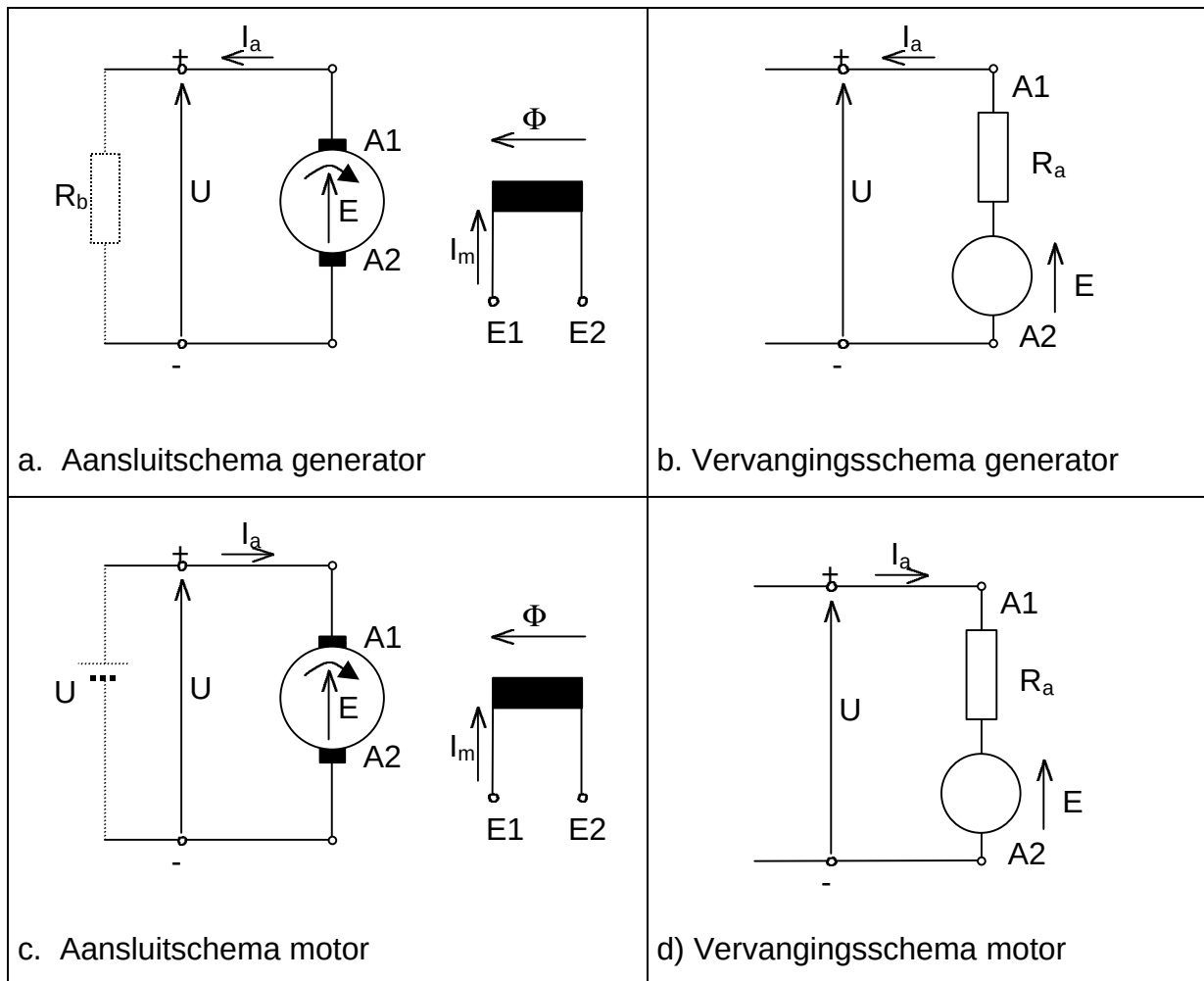


Fig.6.2 Aansluitschema/vervangingschema gelijkstroommachine

Uit de vervangingschema's van fig.6.2 kunnen we met behulp van Kirchhoff volgende vergelijkingen opstellen:

Generator:
$$U = E - I_a \cdot (R_a + R_h) - 2 \cdot U_B \quad [6.10]$$

Motor:
$$U = E + I_a \cdot (R_a + R_h) + 2 \cdot U_B \quad [6.11]$$

7. ENERGIE-OMZETTING

Bij een generator en motor is de omzetting van elektrische energie in mechanische energie of omgekeerd niet volledig. Een klein gedeelte van de aan de machine toegevoerde energie wordt niet omgezet in de verlangde energiesoort doch wordt in hoofdzaak omgezet in thermische energie (= warmte). Hoewel fysisch gezien geen energie verloren kan gaan, noemen we in de praktijk het verschil tussen opgenomen en afgegeven vermogen, de verliezen.

Deze verliezen kunnen we onderverdelen in: koperverliezen, ijzerverliezen en wrijvingsverliezen.

7.1 DE KOPERVERLIEZEN

Koperverliezen of jouleverliezen treden op in het anker, de veldwikkeling, de hulppoolwikkeling en in de eventueel aanwezige compensatiewikkeling.

Het koperverlies is gelijk aan $R_a \cdot I_a^2$ en is dus het vermogen dat in warmte wordt omgezet wanneer er elektrische stroom door een wikkeling vloeit.

De koperverliezen in de shuntwikkeling (zie verder in hoofdstuk 9) zijn onafhankelijk van de belasting. Alle andere koperverliezen zijn afhankelijk van de belastingsstroom I .

Het totale koperverlies is de som van hogergenoemde koperverliezen.

$$P_{cu} = R_a \cdot I_a^2 + \frac{U^2}{R_m} \quad [7.1]$$

Met:

$R_a \cdot I_a^2$ = som van de koperverliezen in de totale ankerketen in W

$\frac{U^2}{R_m}$ = koperverlies in de eventueel aanwezige shuntwikkeling in W

7.2 DE IJZERVERLIEZEN

De ijzerverliezen = P_{Fe} bestaan uit de hysteresis -en wervelstroomverliezen.

*** Hysteresisverliezen**

Deze zijn het gevolg van het beurtelings om-magnetiseren van het ankerijzer, zie fig. 3.4. Hoe sneller het om-magnetiseren gebeurt, des te groter zijn de hysteresisverliezen.

De hysteresisverliezen zijn dus evenredig met het toerental.

*** Wervelstroomverliezen**

Deze verliezen zijn het gevolg van de optredende wervelstromen in het ankerijzer. De spanningen die in het ankerijzer worden geïnduceerd, zijn evenredig met het toerental. Derhalve zijn de wervelstromen ook evenredig met het toerental. Hieruit volgt dat de wervelstroomverliezen ($R \cdot I^2$) evenredig zijn met het toerental in het kwadraat.

Uit het voorgaande volgt dat de ijzerverliezen slechts constant zijn als het toerental en de fluxdichtheid constant blijven.

7.3 DE MECHANISCHE VERLIEZEN

De wrijvingsverliezen P_w treden op:

- in de lagers,
- door borstelwrijving,
- als gevolg van de luchtverplaatsing = ventilatieverliezen.

Bovenvermelde wrijvingsverliezen zijn afhankelijk van het toerental. Dit geldt ook voor de ijzerverliezen. We noemen de ijzer -en wrijvingsverliezen tezamen de *mechanische verliezen*.

De mechanische verliezen ($P_w + P_{Fe}$) zijn afhankelijk van het toerental en in het algemeen onafhankelijk van de belasting.

7.4 VOLGORDE VAN ENERGIE-OMZETTING

7.4.1 GENERATORBEDRIJF

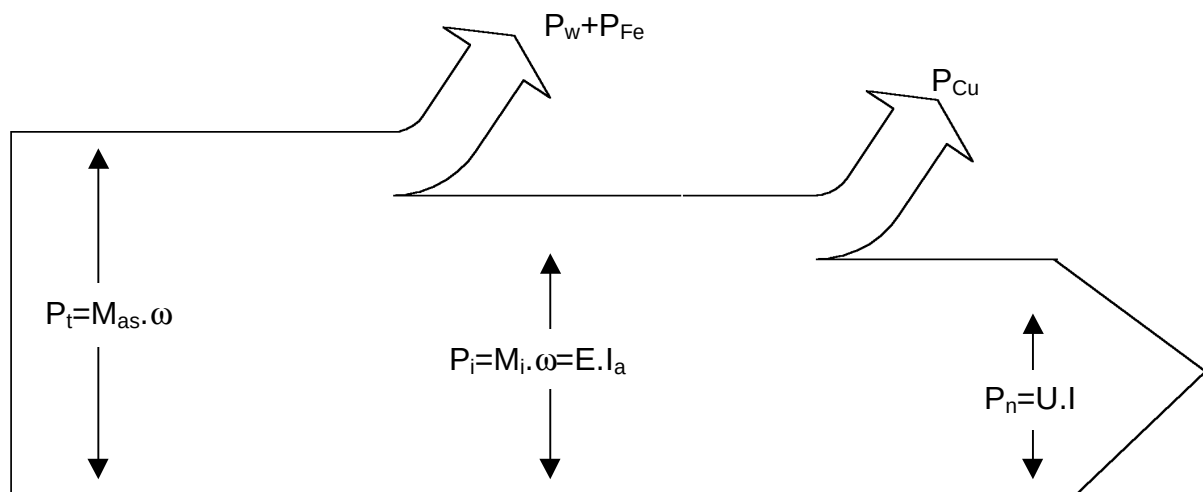
Een gelijkstroommachine werkend als generator krijgt door de aandrijvende motor een mechanisch vermogen = P_t toegevoerd.

Hierdoor gaat het anker draaien en treden als gevolg van deze rotatie de wrijvingsverliezen = P_w en de ijzerverliezen = P_{Fe} op.

Het overblijvende vermogen noemen we het inwendig vermogen = P_i .

Dit is het vermogen dat op het anker beschikbaar is om te worden omgezet in elektrische energie, zonder dit vermogen kan de generator geen elektrisch vermogen afleveren.

Het is ook het enige vermogen dat zowel van mechanische als van elektrische aard is.



Het inwendig vermogen kan dus mechanisch en elektrisch zijn:

$$P_i = M_i \cdot \omega = E \cdot I_a$$

[7.2]

Met:

- P_i = inwendig vermogen in W
- M_i = inwendig koppel in Nm
- ω = mechanische hoeksnelheid in s^{-1}
- I_a = ankerstroom in A

Uit fig.7.1 kunnen we nog op een andere manier het inwendig vermogen bepalen.

$$P_i = P_t - (P_w + P_{Fe}) \quad [7.3]$$

Waarin het toegevoerd mechanisch vermogen gelijk is aan:

$$P_t = M_{as} \cdot \omega \quad [7.4]$$

en de mechanische verliezen:

$$P_w + P_{Fe} = M_v \cdot \omega \quad [7.5]$$

Een deel van de opgewekte elektrische energie wordt ten gevolge van het optredende koperverlies = P_{Cu} in de machine zelf omgezet in warmte. Het afgegeven -of nuttig vermogen = P_n is dus gelijk aan:

$$P_n = P_i - P_{Cu} \quad [7.6]$$

ofwel:

$$P_n = U \cdot I \quad [7.7]$$

7.4.2 MOTORBEDRIJF

Een gelijkstroommachine werkend als motor krijgt een elektrisch vermogen = P_t toegevoerd, fig.7.2.

Vanaf het moment dat er stroom door de machine vloeit, treden er koperverliezen = P_{Cu} op, welke direct worden omgezet in warmte.

Het verschil tussen P_t en P_{Cu} wordt het inwendig vermogen = P_i genoemd en is dus gelijk aan:

$$P_i = P_t - P_{Cu} \quad [7.8]$$

Het inwendig vermogen kan eveneens met vergelijking [7.2] bepaald worden.
 Het toegevoerd elektrisch vermogen van de motor is gelijk aan:

$$P_t = U \cdot I \quad [7.9]$$

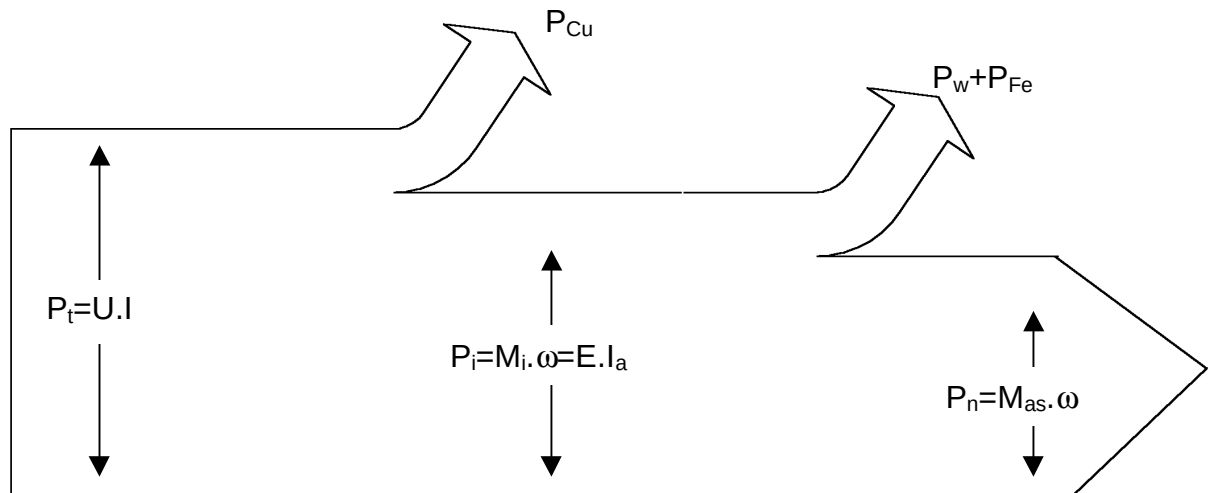


Fig.7.2 Volgorde van energie-omzetting in een motor

Het inwendig koppel M_i dat uit dit inwendig vermogen ontstaat, is dus er oorzaak van dat het anker gaat draaien.

Door het draaien van het anker ontstaan er mechanische verliezen in de vorm van wrijvingsverliezen P_w en ijzerverliezen P_{Fe} . Het nuttig vermogen dat tenslotte beschikbaar is aan de as, is gelijk aan:

$$P_n = P_i - (P_w + P_{Fe}) \quad [7.10]$$

Ofwel:

$$P_n = M_{as} \cdot \omega \quad [7.11]$$

7.5 RENDEMENT

7.5.1 TOTAAL RENDEMENT

Wanneer alle verliezen gekend zijn kan men het totale rendement berekenen als de verhouding van het nuttig tot het toegevoerd vermogen. De gebruikelijke rendementsformule kennen we reeds uit hoofdstuk 1.3.

$$\zeta = \frac{P_n}{P_t} \quad [7.12]$$

Met voor generatorbedrijf: $P_n = U \cdot I$

$$P_t = M_{as} \cdot \omega$$

En voor motorbedrijf: $P_n = M_{as} \cdot \omega$

$$P_t = U \cdot I$$

7.4.3 ELEKTRISCH RENDEMENT

Het elektrisch rendement is de verhouding van het nuttig elektrisch vermogen tot het toegevoerde elektrisch vermogen. In fig.7.1 zien we dat het nuttig en inwendig vermogen van elektrische aard zijn voor generatorbedrijf.

$$\zeta_e = \frac{P_n}{P_t} = \frac{P_n}{P_i} = \frac{U \cdot I}{E \cdot I_a} \quad [7.13]$$

Voor motorbedrijf raadplegen we figuur 7.2.

$$\zeta_e = \frac{P_n}{P_t} = \frac{P_i}{P_t} = \frac{E \cdot I_a}{U \cdot I} \quad [7.14]$$

7.4.4 RENDEMENTSKROMME

Dit is het grafisch verloop van het rendement in functie van de belasting, ofwel $\eta = f(I)$, zie fig.7.3.

Bij het bestuderen van de energie-omzetting in een gelijkstroombusmachine hebben we gemerkt dat hoofdzakelijk de koperverliezen in de ankerketen afhankelijk zijn van I , terwijl de verliezen in de shuntwikkeling en de mechanische verliezen als constant kunnen beschouwd worden.

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

Met:

$$P_v = \left(P_w + P_{Fe} + \frac{U^2}{R_m} \right) + (R \cdot I^2)$$

Constante verliezen
Kwadratische verliezen

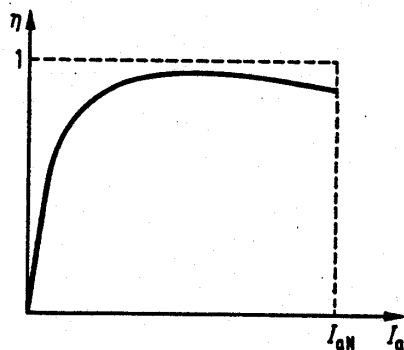


Fig.7.3 Rendementskromme $\eta = f(I)$

Wanneer we de rendementskromme nader bekijken, merken we dat deze een maximum bereikt en wel voor een specifiek punt.

Het rendement van een gelijkstroombusmachine bereikt een maximum wanneer de constante verliezen gelijk zijn aan de kwadratische.

VOORBEELD 7.1

Een generator wekt een inwendige spanning E op van 230 V en voert daarbij een ankerstroom I_a van 52 A. De klemspanning U is 220 V en de netstroom I bedraagt 50 A. De mechanische verliezen zijn 4% van het nuttig vermogen.

Bereken:

- Het inwendig elektrisch vermogen.
- Het afgegeven elektrisch vermogen.
- Het koperverlies.
- Het toegevoerde mechanisch vermogen.
- Het totale rendement.
- Het elektrisch rendement.

oplossing

$$a) P_i = E \cdot I_a = 230 \cdot 52 = 11960 \text{ W}$$

$$b) P_n = U \cdot I = 220 \cdot 50 = 11000 \text{ W}$$

$$c) P_{Cu} = P_i - P_n = 11960 - 11000 = 960 \text{ W}$$

$$d) P_w + P_{Fe} = 0,04 \cdot P_n = 0,04 \cdot 11000 = 440 \text{ W}$$

$$P_t = P_i + (P_w + P_{Fe}) = 11960 + 440 = 12400 \text{ W}$$

$$e) \zeta = \frac{P_n}{P_t} = \frac{11000}{12400} = 0,8871 \text{ of } 88,71\%$$

$$f) \zeta = \frac{P_n}{P_t} = \frac{P_n}{P_i} = \frac{11000}{12400} = 0,9197 \text{ of } 91,97\%$$

8. OEFENINGEN

1. Een spoel met 240 rechthoekige windingen met een lengte van 18 cm en een breedte of diameter van 12 cm draait met een toerental van 600 min^{-1} in een uniform magnetisch veld met veldsterkte $H = 125000 \text{ A/m}$.

Bereken de maximale en gemiddelde waarde van de geïnduceerde spanning in de spoel.

($E_m = 51,16 \text{ V}$; $E_{\text{gem}} = 32,57 \text{ V}$)

2. Op het trommelanker van een tweepolige gelijkstroombmachine liggen 300 ankerdraden regelmatig verdeeld. Op de commutator rusten twee borstels. Elke pool heeft een pooloppervlakte van $0,015 \text{ m}^2$ en de gemiddelde fluxdichtheid in de luchtspleet bedraagt 1,5 T. Als het anker aan 1000 min^{-1} draait, bepaal dan de opgewekte spanning in het anker.

($E = 225 \text{ V}$)

3. Een tweepolige gelijkstroombmachine met 2 ankertakken en 300 ankerwindingen moet een ankerspanning leveren van 230 V. De poolflux bedraagt 0,02 Wb. Welk toerental is vereist?

($n = 1150 \text{ min}^{-1}$)

4. Een achtpolige machine draait aan 600 min^{-1} . De poolflux bedraagt 0,025 Wb en er zijn 2 ankertakken voorzien. De totale ankerwikkeling bestaat uit 145 spoelen. Indien de opgewekte ankerspanning $E = 580 \text{ V}$, hoe groot moet dan het aantal windingen per spoel zijn?

(2 windingen per spoel)

5. Het anker van een vierpolige generator bestaat uit 120 spoelen. Elke spoel heeft 4 windingen. De doorsnede van de gebruikte draad is 1 mm^2 . De gemiddelde opgewekte spanning per winding is 0,5 V.

De stroomdichtheid beperkt men tot 5 A/mm .

Bereken de ankerspanning en -stroom bij een golfwikkeling en een luswikkeling.

($E = 120 \text{ V}$; $I = 10 \text{ A}$; $E = 60 \text{ V}$; $I = 20 \text{ A}$)

6. Het anker van een achtpolige machine heeft 864 geleiders aan de omtrek. Iedere ankerwikkeling bestaat uit windingen koperdraad met $r = 0,02 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$, een gemiddelde lengte $l = 1 \text{ m}$ en een doorsnede van $2,5 \text{ mm}^2$.

Bereken de ankerweerstand voor een golf -en een luswikkeling.

($0,864 \Omega$; $0,054 \Omega$)

7. Een achtpolige generator bezit een trommelanker met 864 draden aan de omtrek. De poolflux $\Phi = 5,546 \text{ mWb}$ en het toerental is 720 min^{-1} . Bereken de ankerspanning E voor een lus -en golfwikkeling.

($57,5 \text{ V}$; 230 V)

8. Een vierpolige generator heeft een trommelanker met een golfwikkeling. Het anker bezit 39 gleuven waarin zich 18 geleiders bevinden per gleuf. Het toerental bedraagt 940 min^{-1} .

Bereken de poolflux Φ als de ankerspanning $E = 440 \text{ V}$.

(20 mWb)

9. De rotor van een vierpolige generator heeft een diameter van 30 cm en een lengte van 25 cm . De magnetische fluxdichtheid in de luchtspleet is $0,09 \text{ Wb/m}^2$ en de poolschoenen beslaan 70% van het rotoroppervlak. Het toerental bedraagt 1200 min^{-1} .

Bereken de opgewekte spanning in één actieve ankergeleider.

Bereken ook de totale ankerspanning als er 2 ankertakken zijn met een totaal van 800 windingen.

($0,424 \text{ V}$; $237,5 \text{ V}$)

10. In de luchtspleet van een vierpolige machine is de fluxdichtheid $B = 0,23 \text{ Wb/m}^2$. De lengte van de actieve geleiders is 32 cm en de poolsteek 18 cm . Er zijn 460 windingen verdeeld over 2 ankertakken. De ankerstroom is 4 A bij een toerental van 600 min^{-1} . Bereken de ankerspanning en het inwendig koppel.

($243,76 \text{ V}$; $15,52 \text{ Nm}$)

11. Een motoranker bestaat uit een vierpolige luswikkeling met 112 spoelen. Elke spoel heeft 4 windingen. De poolflux is 23,91 mWb, de ankerstroom 40 A en het toerental bedraagt 700 min^{-1} .

Bereken het inwendig koppel, het inwendig vermogen en de inwendige tegenspanning E.

(136,4 Nm ; 10 kW ; 250 V)

12. Een zespolige gelijkstroommotor van 15 kW bezit een trommelanker met een golfwikkeling bestaande uit 628 geleiders. Bij vollast is het toerental gelijk aan 500 min^{-1} en bedraagt de ankerstroom 50 A. De poolflux is 20 mWb.

Bereken het inwendig koppel, het inwendig vermogen, de mechanische verliezen, het askoppel en het verlieskoppel.

(299,8 Nm ; 15697 W ; 697 W ; 286,5 Nm ; 13,3 Nm)

13. Van een vierpolige motor is de ankerweerstand $0,15 \Omega$, de klemspanning 125V en de ankerstroom 30 A. Het anker bestaat uit een golfwikkeling met 390 geleiders. De poolflux $\Phi = 7,72 \text{ mWb}$.

Bereken het toerental en het inwendig koppel.

(1200 min^{-1} ; 28,75 Nm)

14. Van een vierpolige motor met klemspanning van 230 V is de totale weerstand van de ankerketen $0,2 \Omega$. Het anker dat uit een luswikkeling bestaat, heeft 130 gleuven, met in iedere gleuf 8 geleiders. Bij een ankerstroom van 60 A is het toerental 1200 min^{-1} . Bereken de poolflux en het inwendig koppel. Hoe groot is het inwendig vermogen?

(10,48 mWb ; 104 Nm ; 13082 W)

15. De klemspanning U van een vierpolige motor is 440 V. De ankerweerstand bedraagt $0,2 \Omega$, de ankerstroom is 100 A en het toerental is 600 min^{-1} .

Bereken het inwendig motorkoppel.

Indien de magnetische flux 25 mWb bedraagt en het anker een golfwikkeling bezit, hoe groot is dan het aantal geleiders aan de ankeromtrek?

(668,45 Nm ; 840 geleiders)

16. Een gelijkstroommotor met een klemspanning van 110 V heeft een ankerweerstand van $0,1\ \Omega$ en een ankerstroom van 100 A. Het toerental bedraagt $1000\ \text{min}^{-1}$ en het verlieskoppel is 4% van het inwendig koppel.

Bereken het askoppel en het asvermogen.

(91,67 Nm ; 9600 W)

17. Een dynamo waarvan de inwendige spanning 115 V, de ankerweerstand $0,5\ \Omega$ en de hulppoolwikkeling $0,05\ \Omega$ is, levert een stroom van 24 A. Bepaal de belastingsweerstand;

(4,24 Ω)

18. Een dynamo zonder hulppoolwikkeling levert 50 A aan een belasting. De inwendige spanning E, bij nullast ingesteld, bedroeg 220 V en de klemspanning U bij belasting bedraagt nu 190 V.

Bereken indien de bekrachtiging constant gebleven is, de vermindering van de inwendige spanning ten gevolge van ankerreactie en commutatie. Hoe groot moet de weerstand van de hulppoolwikkeling zijn om bij dezelfde belastingsstroom de klemspanning U op 200 V te houden door gebruik te maken van hulppolen?

De ankerweerstand bedraagt $0,25\ \Omega$.

(17,5 V ; $0,15\ \Omega$)

19. Een dynamo levert een stroom van 50 A bij een spanning van 110 V. De aandrijfmotor heeft een askoppel van 55 Nm en draait aan een toerental van $1200\ \text{min}^{-1}$. Bepaal het rendement van de dynamo.

(79,5%)

20. Een generator levert een stroom van 50 A. De weerstand van de belasting bedraagt $4,4\ \Omega$. De weerstand van anker en hulppool is $0,16\ \Omega$, terwijl de borstelovergangsspanning 2 V is. Hoe groot is de inwendige spanning E van de generator?

(230 V)

21. Een 10 kW generator heeft een rendement van 0,88. De mechanische verliezen bedragen 500 W. Bereken de koperverliezen.
(863,63 W)

22. Een 110 V seriemotor heeft een veldweerstand van $0,12\ \Omega$ en een ankerweerstand van $0,08\ \Omega$. De motor neemt bij vollast 50 A uit het net op. De mechanische verliezen $P_w + P_{Fe}$ bedragen 500 W. Bereken het rendement bij vollast.
(81,8%)

23. Een 220 V gelijkstroommotor van 10 KW neemt een stroom op van 50 A uit het net. Het koperverlies bedraagt 600 W. Bereken:
a) het rendement,
b) het inwendig vermogen,
c) de ijzer -en wrijvingsverliezen.
(90,9% ; 10400 W ; 400 W)

24. Een 4 kW, 110 V-gelijkstroommotor neemt uit het net een stroom op van 42A. De ankerstroom is 40 A en de opgewekte tegenspanning $E = 106\text{ V}$. Bereken:
a) de mechanische verliezen,
b) de koperverliezen,
c) het rendement.
(240 W ; 380 W ; 86,58%)

25. Een 110 V / 8 kW-motor heeft een totale ankerketenweerstand van $0,2\ \Omega$. Het rendement is 0,84. Bereken:
a) de opgenomen stroom,
b) de koperverliezen,
c) de ijzer- + wrijvingsverliezen.
(86,6 A ; 1500 W ; 23,8 W)

26. Een vierpolige 220 V-shuntmotor heeft 598 windingen aan de ankeromtrek. Het anker heeft een golfwikkeling, de poolflux is 15 mWb. Het askoppel bedraagt 150 Nm, terwijl het verlieskoppel 4% hiervan is. De ankerweerstand is $0,6 \Omega$.

Gevraagd:

- a) de ankerstroom,
- b) het toerental,
- c) de tegenspanning.

(27,32 A ; $340,5 \text{ min}^{-1}$; 203,61 V)

27. Een gelijkstroommotor bezit volgende elektrische gegevens;

$U = 110 \text{ V}$, $I_a = 50 \text{ A}$, $R_a = 0,5 \Omega$

Hoe groot zou de klemspanning zijn als generator voor dezelfde ankerstroom, hetzelfde toerental en dezelfde poolflux.

(60 V)

28. Op het kenplaatje van een gelijkstroomgenerator staan enkele

elektrische gegevens; $U = 115 \text{ V}$, $I_a = 24 \text{ A}$, $R_a = 0,5 \Omega$.

Hoe groot zou de klemspanning moeten zijn om als motor te werken bij dezelfde ankerstroom, hetzelfde toerental en dezelfde poolflux.

(140 V)

29. Een 3,5 kW-seriegenerator met volgende eigenschappen: $I = 30,43 \text{ A}$;

$U = 115 \text{ V}$; $n = 950 \text{ min}^{-1}$; $\eta = 78 \%$ wordt als motor gebruikt. Bepaal het nuttig koppel als motor bij dezelfde netspanning, dezelfde stroom, hetzelfde rendement en hetzelfde toerental.

(27,44 Nm)

9. BEKRACHTIGINGSSYSTEMEN

Afhankelijk van de manier waarop het magnetisch veld voor de gelijkstroommachine wordt geleverd, onderscheiden we:

- machines met permanente magneten,
- machines met afzonderlijke of vreemde bekrachtiging,
- machines met eigen- of zelfbekrachtiging.

9.1 PERMANENTE MAGNETEN

In het onderste vermogenbereik van de gelijkstroommachines worden permanente magneten gebruikt voor de fluxopwekking, we denken hier voornamelijk aan servomotoren voor de aandrijftechniek en alle mogelijke motoren voor de voertuigtechniek. Met de voorbijgaande technische ontwikkelingen zijn thans verschillende magneetvormen beschikbaar, fig.9.1.

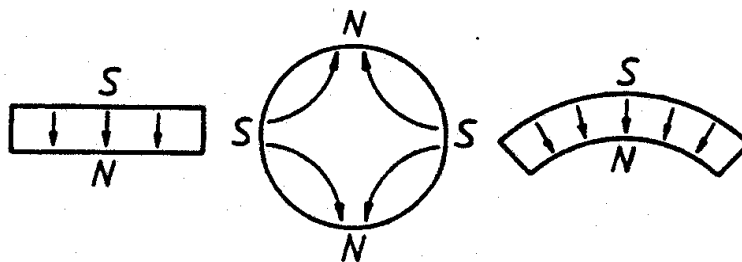


Fig.9.1 Typische bouwvormen van permanente magneten

Fig.9.2 toont links van de aslijn een gelijkstroommotor met veldwikkelingen en rechts van de aslijn dezelfde motor met permanente magneten. De voordelen van de permanente magneten ten opzichte van het gebruik van veldwikkelingen zijn:

- kleinere buitendiameter,
- eenvoudige statorconstructie met minder aansluitklemmen,
- geen verliezen in de veldwikkeling dus een hoger rendement.

Fig.9.3 toont tenslotte een doorsnede van een servomotor volgens het principe van fluxconcentratie, beschikbaar in het bereik van enkele kW asvermogen.

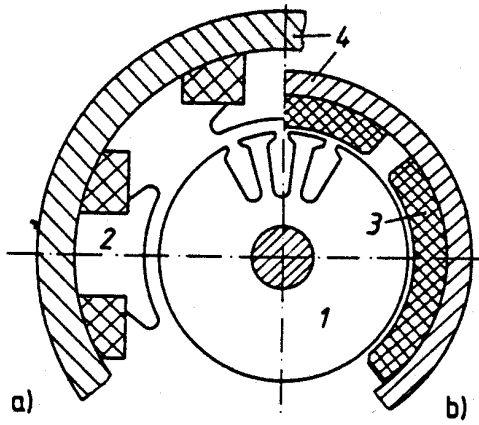


Fig.9.2

Vergelijk tussen machine met veldspolen en permanente magneten

a) elektrische bekrachtiging

b) permanente magneet bekrachtiging

1 = anker

2 = hoofdpool met veldspool

3 = Ferrit-segmentmagneet

4 = statorjuk

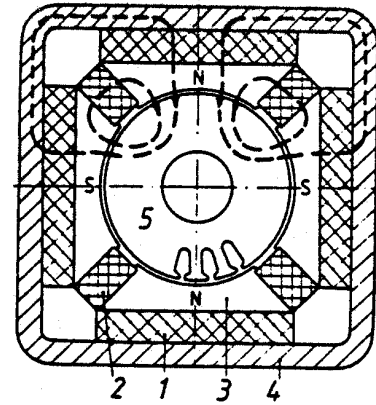


Fig.9.3

Servomotor met permanente magneten volgens het principe van fluxconcentratie

1 = tangential-magneet

2 = radiaal-magneet

3 = poolschoen

4 = statorjuk

5 = anker

9.2 AFZONDERLIJKE BEKRACHTIGING

Bij de afzonderlijke bekrachtiging wordt de fluxopwekking bekomen door een gelijkstroom (= veldstroom) door een wikkeling (= veldspoel) te sturen. De veldstroom wordt hier geleverd door een aparte voedingsbron.

Fig.9.4 toont een doorsnede van een afzonderlijk bekrachtigde generator. De ankerwikkeling is gemerkt met de klemmen A1 en A2, de veldwikkeling met de klemmen F1 en F2.

Het aansluitschema van deze machine is te vinden in fig.9.5.

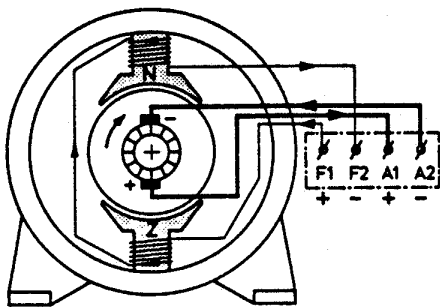


Fig. 9.4 Afzond. bekrachtigde generator

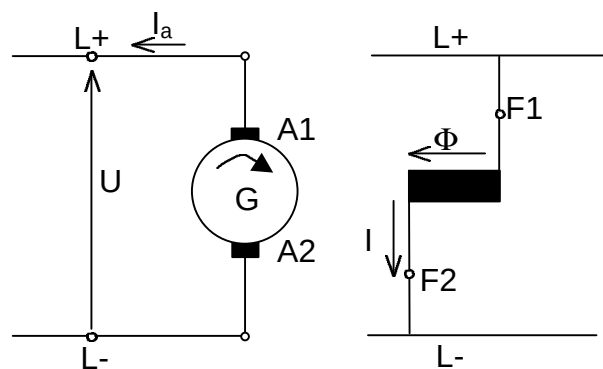


Fig. 9.5 Aansluitschema

9.3 EIGEN BEKRACHTIGING

Bij generatoren met zelfbekrachtiging wordt de veldstroom door de machine zelf geleverd. Bij motoren met zelfbekrachtiging wordt de veldstroom door het net geleverd waarop deze zijn aangesloten.

9.3.1 SERIEBEKRACHTIGING

Bij een seriemachine staat de veldwikkeling in serie met het anker. De serieveldwikkeling is gemerkt met de letters D1 en D2.

Fig. 9.6 stelt een seriegenerator voor in doorsnede en ernaast in fig. 9.7 het aansluitschema.

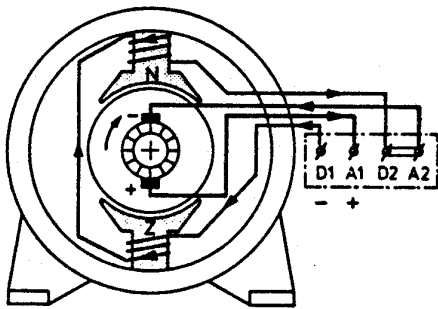


Fig. 9.6 Seriebekrachtiging

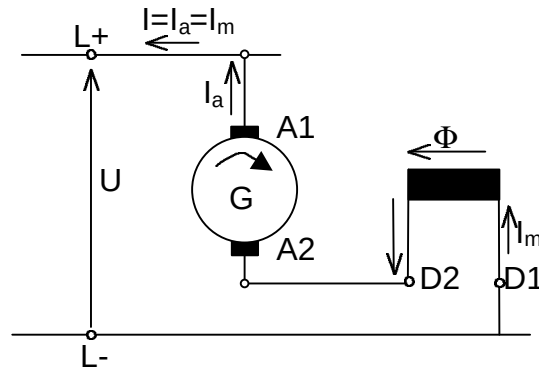


Fig. 9.7 Aansluitschema

Een seriewikkeling bestaat in het algemeen uit weinig windingen van dikke draad, dit in verband met de grote veldstroom welke dezelfde is als de ankerstroom. Om spanningsverliezen te vermijden moet de seriewikkeling laagohmig zijn, hetgeen goed lukt met een constructie uit weinig windingen en dikke draad.

9.3.2 SHUNTBEKRACHTIGING

Bij een shuntmachine staat de veldwikkeling parallel over het anker. De shuntwikkeling wordt gemerkt met E1 en E2. In fig. 9.8 en 9.9 is een shuntgenerator weergegeven. Aangezien de shuntwikkeling op volle spanning staat, wordt ze uitgevoerd met vele windingen van dunne draad. De veldweerstand is dan hoogohmig, zodat het koperverlies wordt beperkt.

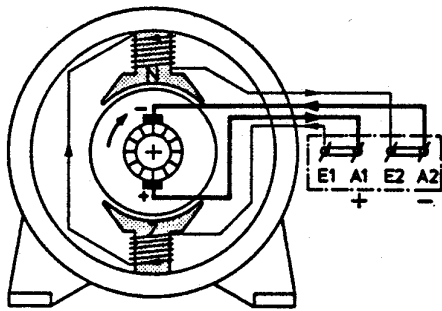


Fig. 9.8 Shuntbetrachtung

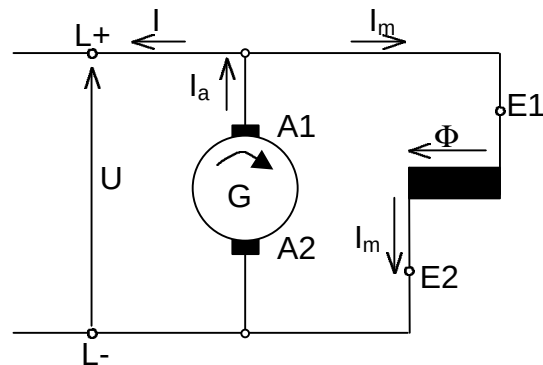


Fig. 9.9 Aansluitschema

9.3.3 COMPOUNDBEKRACTIGING

Deze machine bezit zowel een serie- als een shuntwikkeling, fig. 9.10 en 9.11. Zijn beide wikkelingen zodanig geschakeld dat beide velden elkaar versterken, dan werken deze wikkelingen met elkaar mee. We spreken dan van een compoundmachine. Werken beide velden elkaar tegen, dan noemen we dit een anti-compoundmachine.

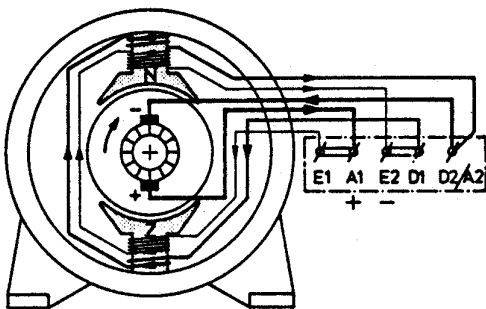


Fig. 9.10 Compoundbetrachtung

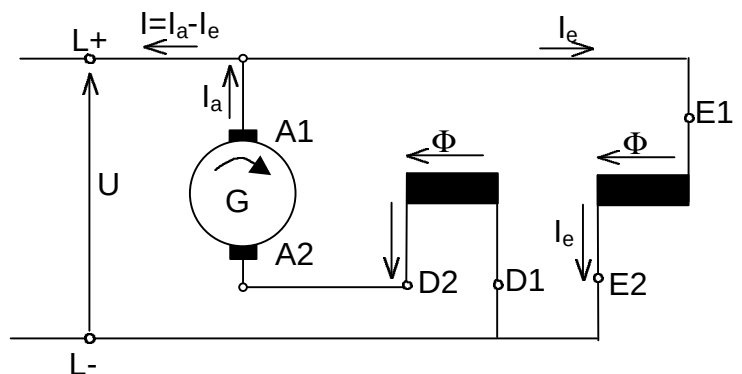


Fig. 9.11 Aansluitschema

10.KLEMAANDUIDING EN AANSLUITSCHEMA

10.1 KLEMAANDUIDING

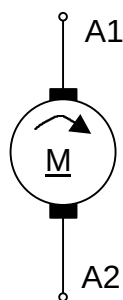
Tabel 10.1 geeft de internationale klemaanduiding voor roterende gelijkstroommachines. Begin en uiteinde van een wikkeling krijgen respectievelijk index 1 en 2, alle bijkomende aftakkingen krijgen een hoger indexcijfer.

Ankerwikkeling	A1-A2
Hulppoolwikkeling	B1- B2
Compensatiewikkeling	C1-C2
Seriewikkeling	D1-D2
Shuntwikkeling	E1-E2
Afz. bekr. Wikkeling	F1-F2

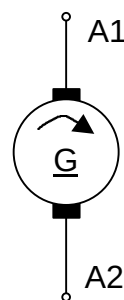
Tabel 10.1 Internationale Klemaanduiding

10.2 AANSLUITSCHEMA'S

De voorstelling van het anker van een gelijkstrooommachine hebben we reeds leren kennen in een van de vorige hoofdstukken. Ter herinnering tonen we in fig. 10.1 nogmaals de symbolische voorstelling van het anker van een motor en een generator.



a) motor



b) generator

Fig. 10.1 Ankersymbool van een gelijkstrooommachine

De eventueel aanwezige hulppool- en compensatiewikkelingen worden als inductanties in serie met het anker getekend. Deze wikkelingen zijn juist geschakeld als de ankerstroom steeds dezelfde indexvolgorde ontmoet. Wanneer we in fig. 10.2a het anker doorlopen bekommen we de indexvolgorde A1-A2-B1-B2-C1-C2, ofwel in fig. 10.2b de volgorde C2-C1-A2-A1-B2-B1.

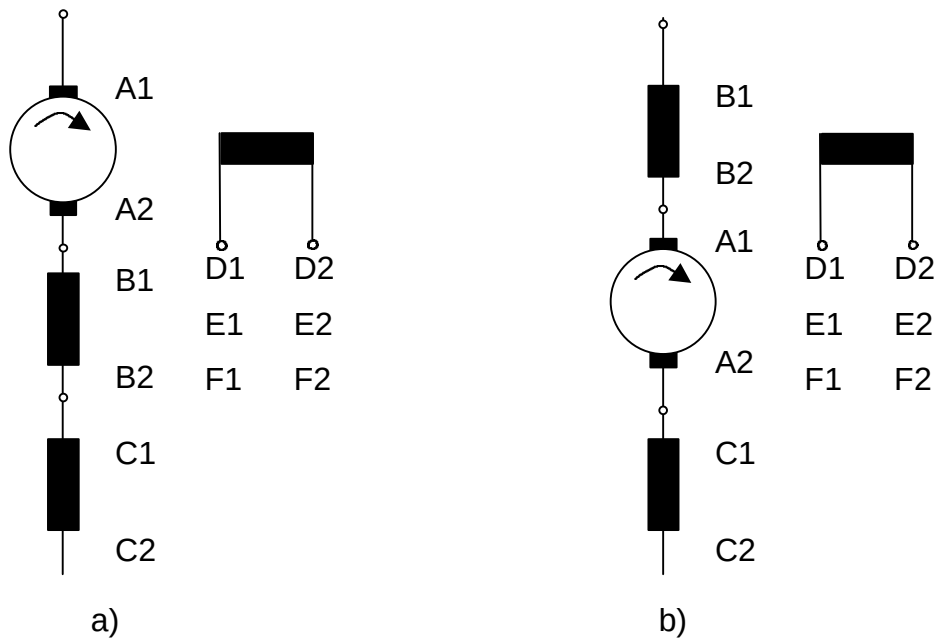


Fig. 10.2 Anker met hulppool- en compensatiewikkeling

De overige veldwikkelingen, zoals serie- en shuntwikkeling, worden eveneens als inductantie voorgesteld en loodrecht op het anker getekend, figuur 10.2.

Voor het verband tussen veldstroom en geïnduceerde flux gelden volgende regels:

- Twee veldwikkelingen wekken gelijkgerichte velden op, wanneer de veldstromen in beide wikkelingen dezelfde indexen ontmoeten.

In fig. 10.3 vloeit de veldstroom door de seriewikkeling van D1 naar D2 en door de shuntwikkeling van E1 naar E2. Beide velden werken dus met elkaar mee.

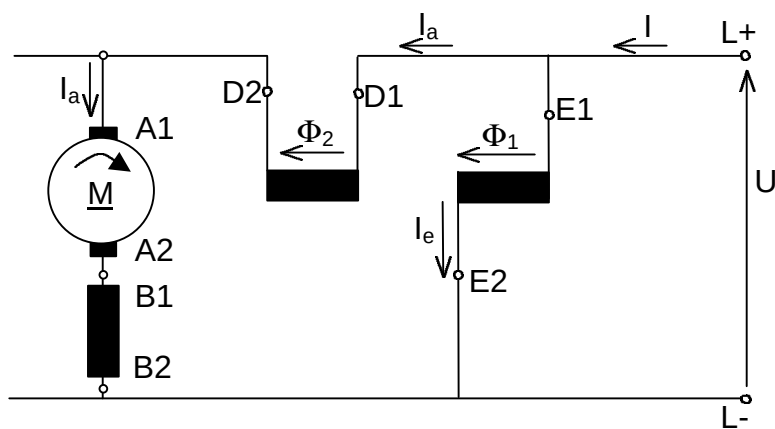


Fig. 10.3 Gelijkstroommachine met hulppoolwikkeling, serie- en shuntwikkeling.

Voor het verband tussen draaizin en polariteit gelden volgende regels:

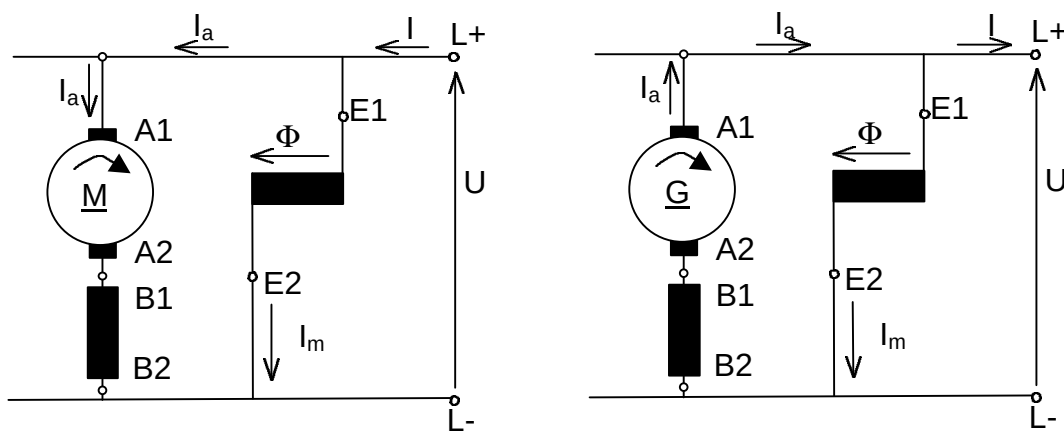
- Een rechtsdraaiende generator heeft een positieve A1-klem van het anker met als gevolg dat de ankerstroom op deze klem vertrekt naar de uitwendige keten, op voorwaarde dat de veldstroom door de bekrachtigingsspoelen van index 1 naar index 2 vloeit.

Voor een seriegenerator zou dit betekenen dat de veldstroom door de seriewikkeling van klem D1 naar D2 vloeit.

Voor een shuntgenerator moet dan de veldstroom door de shuntwikkeling van klem E1 naar E2 vloeien, fig. 10.4b.

- Een rechtsdraaiende motor heeft eveneens een positieve A1-klem van het anker, met het enige verschil dat de ankerstroom van A1 doorheen het anker naar klem A2 vloeit.

De veldstroom door de bekrachtigingsspoelen moet hier ook van index 1 naar index 2 vloeien, fig. 10.4a.



a) Shuntmotor

b) shuntgenerator

Fig. 10.4 Rechtsdraaiende shuntmachine

VOORBEELD 10.1

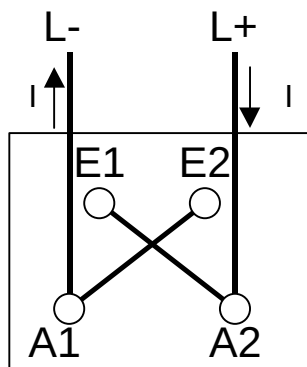
Fig. 10.5 toont een klemmenbord van een shuntmachine.

Opgave:

- Is het een motor of een generator ?
- Bepaal de draaizin.
- Teken het aansluitschema.

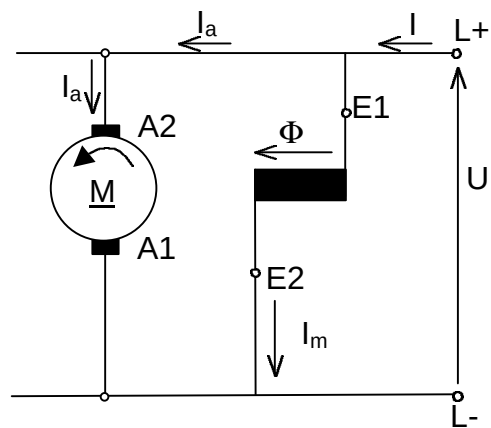
Oplossing:

- en b) linksdraaiende motor
- zie fig. 10.5b



a) Klemmenbord

Fig. 10.5 Shuntmachine



b) Aansluitschema

VOORBEELD 10.2

Fig. 10.6 toont 5 verschillende klemmenborden.

Welk klemmenbord is juist aangesloten voor een rechtsdraaiende seriemotor?

oplossing: klemmenbord nr. 4

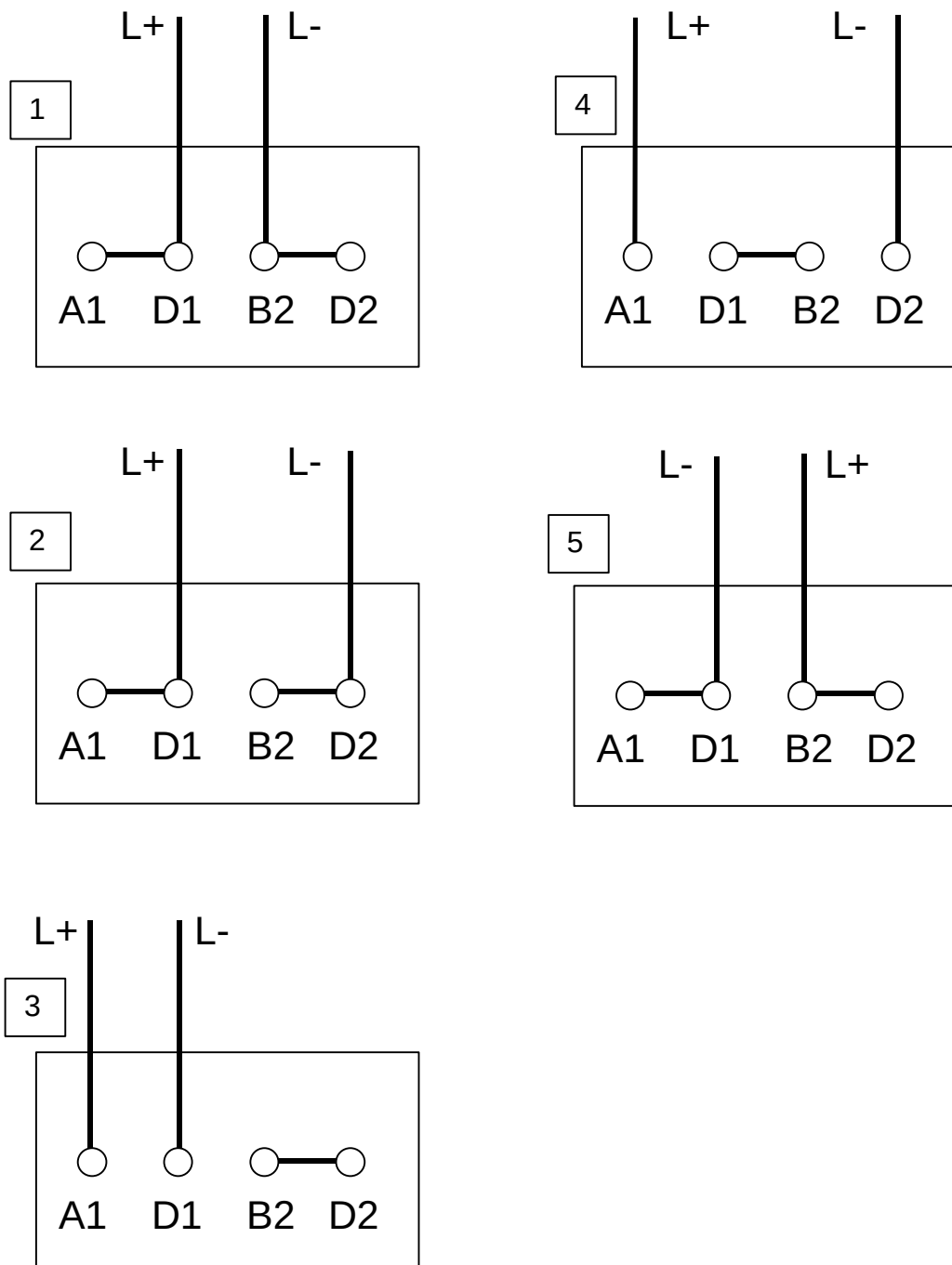


Fig.10.6 Klemmenborden van een seriemotor

11. GELIJKSTROOMGENERATOREN

In het vorige hoofdstuk hebt u aansluitschema's leren kennen die zowel voor motor- als generatorbedrijf geldig kunnen zijn. De gelijkstrooommachine, als generator voor opwekking van elektrische energie, is tegenwoordig volledig vervangen door de vermogenselektronica met thyristoren en transistoren.

In het gebied van de toerentalveranderlijke aandrijvingen neemt de klassieke gelijkstrooommotor nog steeds een belangrijke plaats in als aandrijfmotor. Bij het elektrisch remmen van deze motor gaat de gelijkstrooommachine kortstondig over van motor- naar generatorbedrijf, de machine levert op dat moment elektrische energie aan het distributienet.

Het is dus nog vrijwel uitsluitend in deze laatste toepassingen dat we het gedrag van een gelijkstrooomgenerator moeten bestuderen. We gaan dan ook in dit hoofdstuk niet meer uitvoerig in op het gedrag van de gelijkstrooomgenerator.

Enkel bij het remmen van gelijkstrooommotoren zullen we de noodzakelijke karakteristieken van de gelijkstrooomgenerator aanstippen.

Voor wie toch nog de gelijkstrooomgenerator uitvoerig wil bestuderen, verwijzen we graag naar een oudere uitgave van deze kursustekst.

12. GELIJKSTROOMMOTOREN

NORMAAL BEDRIJF

Reeds bij het bestuderen van bekrachtigingssystemen hebben we gezien dat de veldwikkeling in serie of parallel kan geschakeld worden, met telkens een andere bedrijfskarakteristiek.

Ook bij de gelijkstroommotor zijn deze bekrachtigingssystemen mogelijk. In dit hoofdstuk bestuderen we het gedrag van de motor voor de verschillende bekrachtigingen telkens aan de hand van dezelfde basisvergelijkingen.

12.1 BASISVERGELIJKINGEN

12.1.1 ANKERSTROOM I_a

De ankerstroom veroorzaakt over de ankerweerstand R_a een spanningsval tussen klemspanning U en inwendige spanning E .

De vergelijking hiervoor kennen we reeds van [6.11]. Hierin verwaarlozen we de hulppoolweerstand en de borstelspanning, zodat:

$$U = E + I_a \cdot R_a \quad (\text{Hulpwikkeling verwaarloosd}) \quad (1)$$

De ankerstroom volgt hieruit:

$$I_a = \frac{U - E}{R_a} \quad (2)$$

12.1.2 INWENDIGE SPANNING E

Voor de inwendige spanning geldt vergelijking [6.4]:

$$E = C_1 \cdot \Phi \cdot n \quad (3)$$

Bij nominaal bedrijf van de motor gaat deze vergelijking over in:

$$E_N = C_1 \cdot \Phi_N \cdot n_N \quad (4)$$

Delen we de twee vorige vergelijkingen door elkaar, dan vervalt de machine-constante C_1 :

$$\frac{E}{E_N} = \frac{\Phi}{\Phi_N} \cdot \frac{n}{n_N} \quad [12.1]$$

De inwendige spanning E hangt lineair af van het toerental n en de poolflux Φ .

De nominale grootheden in [12.1] zijn kenplaatgegevens en kunnen dus voor één bepaalde motor als constant beschouwd worden.

12.1.3 MOTORKOPPEL M

Het motorkoppel kenden we reeds van [6.7]

$$M = C_2 \cdot \Phi \cdot I_a \quad (5)$$

Deze vergelijking is ook geldig voor nominaal bedrijf:

$$M_N = C_2 \cdot \Phi_N \cdot I_{aN} \quad (6)$$

We kunnen deze twee vergelijkingen weer door elkaar delen:

$$\frac{M}{M_N} = \frac{\Phi}{\Phi_N} \cdot \frac{I_a}{I_{aN}} \quad [12.2]$$

Het motorkoppel is rechtevenredig met de poolflux Φ en de ankerstroom I_a .

12.1.4 TOERENTAL n

Vergelijkingen [6.11] en [12.1] kunnen gecombineerd worden:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{E}{E_N} \cdot \frac{\Phi_N}{\Phi} \quad (7)$$

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U - I_a \cdot R_a}{E_N} \cdot \frac{\Phi_N}{\Phi} \quad (8)$$

Uit [12.2] leiden we de ankerstroom af:

$$I_a = I_{aN} \cdot \frac{M}{M_N} \cdot \frac{\Phi_N}{\Phi} \quad (9)$$

zodat uiteindelijk de toerentalvergelijking ontstaat:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} \cdot \frac{\Phi_N}{\Phi} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} \cdot \left(\frac{\Phi_N}{\Phi} \right)^2 \quad [12.3]$$

De voor motorbedrijf afgeleide vergelijkingen zijn onafhankelijk van de aard en de schakeling van de bekrachtigingswikkelingen.

In het verder verloop van dit hoofdstuk zullen deze vergelijkingen verregaand vereenvoudigd kunnen worden voor het normaal en gestuurde bedrijf van de motor

12.2 STABIEL EN INSTABIEL BEDRIJF VAN EEN MOTOR

Drijft een motor een machine met een koppelverloop $M_L = f(n)$ aan, dan ontstaat er een bedrijfspunt uit het snijpunt van de motor- en lastcurve. Dit bedrijfspunt is enkel stabiel, wanneer bij een kortstondige toerentalverhoging (verlaging) het lastkoppel M_L sterker toeneemt (afneemt) dan het motorkoppel M_M , fig.12.1 b. In zo'n bedrijfstoestand trekt de last de motor steeds naar het oorspronkelijke bedrijfspunt toe.

Stijgt bij een verhoging van het toerental het motorkoppel M_M sneller dan het lastkoppel M_L , dan zal de motor de last sneller doen draaien, het bedrijfspunt is instabiel, fig.12.1 a.

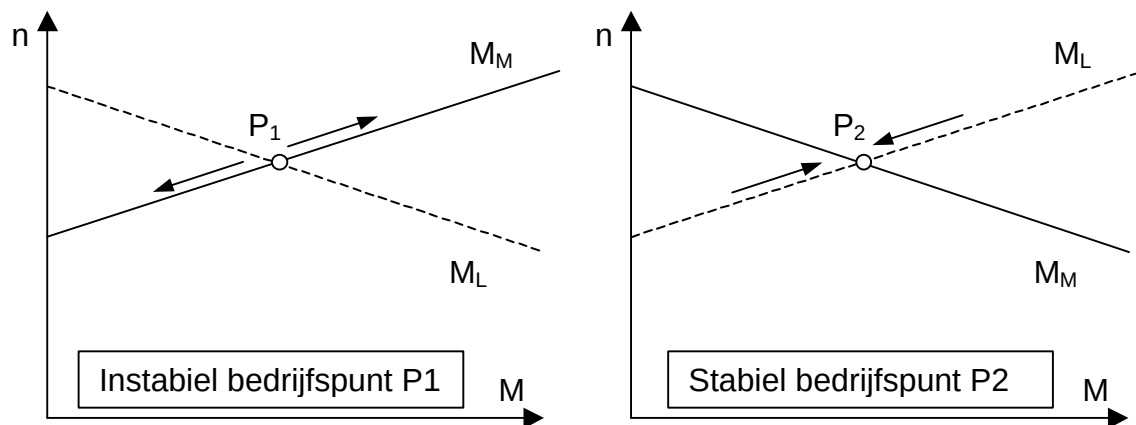


Fig.12.1 Stabiliteit van het motorbedrijf

We kunnen nu een meer algemene betrekking opstellen voor de stabiliteit van een bedrijfspunt van roterende machines.

$$\left(\frac{dM}{dn} \right)_{\text{LAST}} > \left(\frac{dM}{dn} \right)_{\text{MOTOR}} \quad [12.4]$$

12.3 SHUNTMOTOR

12.3.1 SCHEMA

Zoals we in het hoofdstuk over bekrachtigingssystemen gezien hebben, kan de bekrachtigings- of veldwikkeling parallel met het anker geschakeld worden (fig. 12.2a) of uit een aparte voedingsbron de vereiste veldenergie betrekken (fig. 12.2b).

We spreken in beide gevallen van een shuntmotor, de veld- of bekrachtigingswikkeling noemen we nu ook de shuntwikkeling.

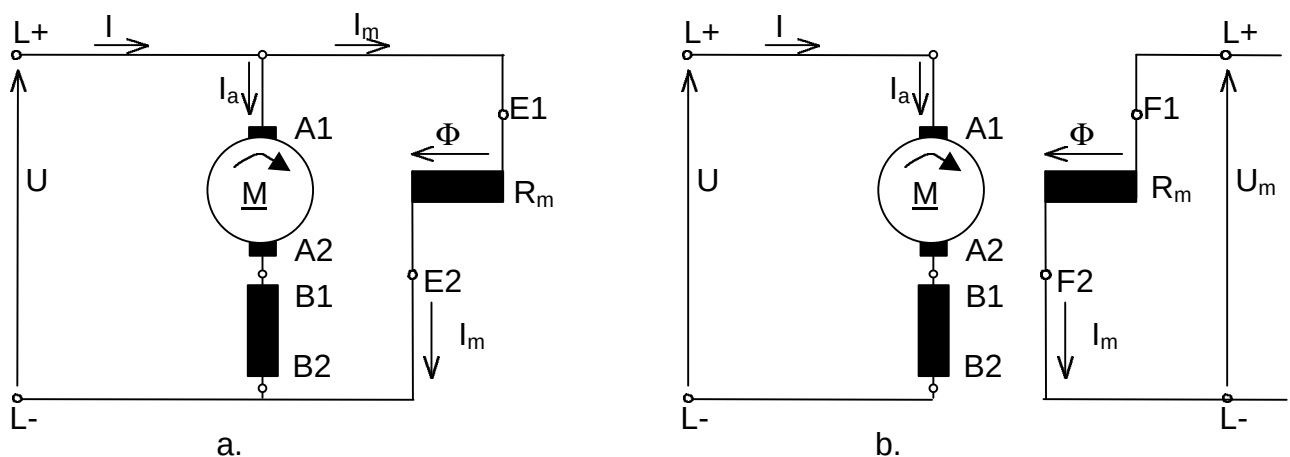


Fig. 12.2 Rechtsdraaiende shuntmotor met aanloopweerstand

- a) Shuntwikkeling parallel met anker.
- b) Afzonderlijk bekrachtigde motor.

Wordt de motor aan een gelijkstroomnet met constante spanning gekoppeld, dan moet de aanloopstroom in de ankerketen beperkt worden. Dit kan door een aanloopweerstand bij te plaatsen in serie met het anker, of door een elektronische aanloopstroombegrenzing. In het hoofdstuk "gelijkstroommotoren - gestuurd bedrijf" gaan we hier dieper op in.

12.3.2 KARAKTERISTIEKEN

Alvorens we de bedrijfskarakteristieken gaan afleiden, veronderstellen we dat de motor zich in de nominale bedrijfstoestand bevindt:

Bekrachtiging: $\Phi = \Phi_N$ (Nominale flux)

Spanning: $U = U_N$ (Nominale spanning)

Verder gelden nog enkele vereenvoudigingen:

De borstelspanning U_B wordt verwaarloosd. Het verlieskoppel wordt verwaarloosd, we nemen dus $M_i = M_{as} = M$. De nullaststroom I_{a0} wordt verwaarloosd omdat hij klein is in verhouding tot de nominale ankerstroom.

12.3.2.1 STROOM-KOPPELGRAFIEK

Voor nominaal bedrijf ($\Phi = \Phi_N$) gaat [12.2] over in:

$$\frac{M}{M_N} = \frac{I_a}{I_{aN}} \quad [12.5]$$

De stroomopname van de shuntmotor is rechtevenredig met het askoppel M van de motor, fig.12.3.

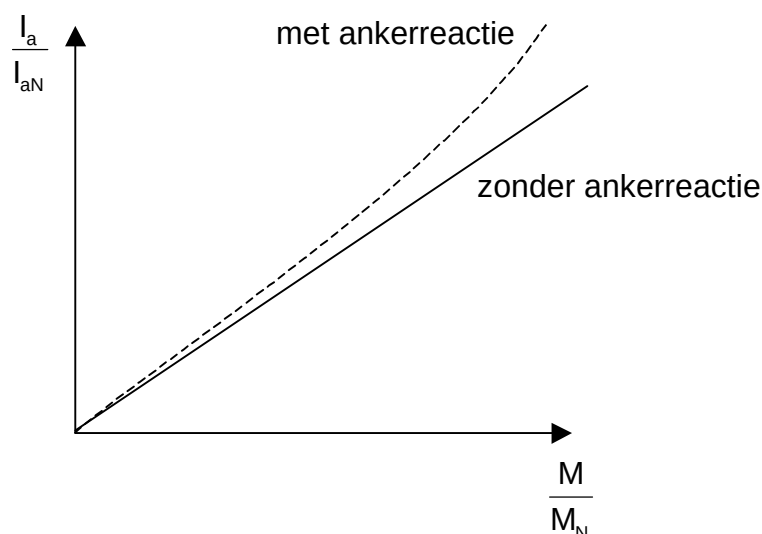


Fig. 12.3 Stroom-koppelgrafiek van een shuntmotor

Bezit de motor geen compensatie- en hulpwikkeling, of zijn de hulppolen verzadigd, dan zal de ankerreactie haar invloed doen gelden. Uit hfdst. 5.3 weten we dat het resulterende veld (hoofdveld + ankerveld) bij toenemende belasting kleiner wordt dan het hoofdveld bij nullast.

Er zal meer stroom nodig zijn om hetzelfde koppel te behouden, de stroom-koppelgrafiek wijkt dan af van een rechte lijn, fig. 12.3.

12.3.2.2 TOEREN-KOPPELGRAFIEK

In het nominale bedrijfspunt ($\Phi = \Phi_N$; $U = U_N$) gaat [12.3] over in:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U_N}{E_N} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} \quad (1)$$

De enige variabelen hierin zijn n en M , zodat we ter vereenvoudiging enkele constanten benoemen:

$$\frac{U_N}{E_N} = K_1 \quad \text{en} \quad \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} = K_2 \quad (2)$$

Alzo bekomen we:

$$\frac{n}{n_N} = K_1 - \frac{M}{M_N} \cdot K_2 \quad [12.6]$$

Vergelijking [12.6] beschrijft de grafiek $n = f(M)$ als een dalende rechte, fig. 12.4.

Is de motor niet van een compensatiewikkeling voorzien, of zijn de hulppolen verzadigd, dan zal de fluxdaling tengevolge van ankerreactie een stijgend toerentalverloop opleveren bij stijgende belasting, zie curve b in fig. 12.4.

De reden hiervoor is dat:

$$n \sim \frac{1}{\Phi}$$

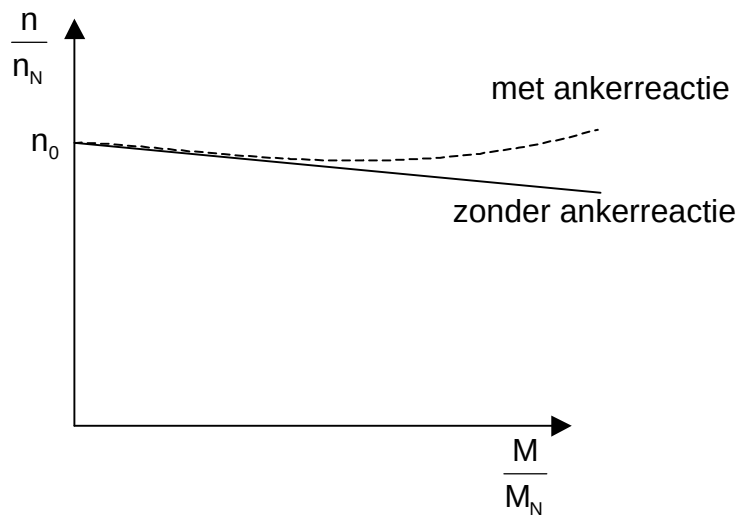


Fig. 12.4 Toeren-koppelgrafiek van een shuntmotor

a) zonder ankerreactie b) met ankerreactie

Toepassingsgebied van de shuntmotor

Het bij last slechts zwak dalend toerentalverloop maakt deze motor bijzonder geschikt voor aandrijvingen waar een constant toerental vereist, zoals dit het geval is bij werktuigmachines.

VOORBEELD 12.1

Een gelijkstroom shuntmotor bezit volgende nominale gegevens:

Nominale spanning $U_N = 220 \text{ V}$

Nominaal toerental $n_N = 1440 \text{ min}^{-1}$

Nominaal vermogen $P_N = 3,7 \text{ kW}$

Nominale stroom $I_{aN} = 21 \text{ A}$

Ankerweerstand $R_a = 1,05 \Omega$

1. Bepaal het nullasttoerental n_0 .
2. Hoe groot zijn M_N en η_N in het nominale bedrijfspunt?

OPLOSSING

1. Inwendige spanning bij nominaal bedrijf:

$$E_N = U_N - I_{aN} \cdot R_a = 220 - 1,05 \cdot 21 = 198 \text{ V}$$

Bij nullast is:

$$n = n_0 \quad I_a = 0 \quad M = 0$$

Invullen in [12.3]:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U_N}{E_N} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N}$$

$$\text{Zodat: } n_0 = n_N \cdot \frac{U_N}{E_N} = 1440 \cdot \frac{220\text{V}}{198\text{V}} = 1600 \text{ min}^{-1}$$

2. Volgens [1.8] geldt voor het nominaal koppel:

$$\begin{aligned} M_N \text{ (Nm)} &= 9550 \cdot \frac{P_N \text{ (kW)}}{n_N \text{ (min}^{-1})} \\ &= 9550 \cdot \frac{3,7\text{kW}}{1440 \text{ min}^{-1}} \\ &= 24,5 \text{ Nm} \end{aligned}$$

3. Het rendement bij nominale belasting:

$$\eta_N = \frac{P_n}{P_t} = \frac{P_N}{U_N \cdot I_{aN}} = \frac{3700}{220 \cdot 21} = 0,8$$

12.4 SERIEMOTOR

12.4.1 SCHEMA

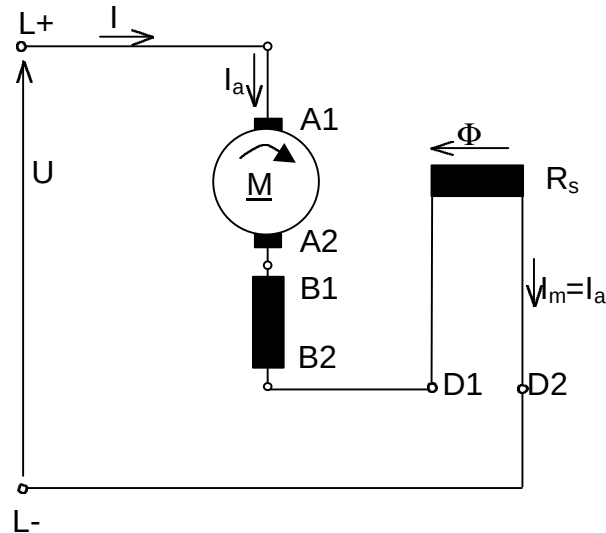


Fig. 12.5 Rechtsdraaiende seriemotor

Bij de seriemotor is de ankerstroom I_a gelijktijdig de veldstroom I_m . Omdat de magnetische flux Φ , via de magnetiseringsgrafiek van het ijzer, afhankelijk is van de veldstroom I_m , kunnen we het verband $\Phi = f(I_m)$ niet exact door middel van een vergelijking uitdrukken. Voor de volgende afleidingen verwaarlozen we het verzadigingsverschijnsel van het ijzer en we veronderstellen $\Phi \propto I_m$.

Bij nauwkeurige berekeningen is het aangewezen om de bij een bepaalde veldstroom (ankerstroom) behorende flux uit fig. 11.2 af te lezen.

12.4.2 KARAKTERISTIEKEN

We stellen voorop dat de motor op nominale spanning $U = U_N$ draait.

12.4.2.1 STROOM-KOPPELGRAFIEK

Met $\Phi \propto I_a$ en $\Phi_N \propto I_N$ evenals $U = U_N$ wordt vergelijking [12.2]:

$$\frac{M}{M_N} = \frac{\Phi}{\Phi_N} \cdot \frac{I_a}{I_{aN}} = \left(\frac{I_a}{I_{aN}} \right)^2 \quad [12.7]$$

Daaruit volgt voor de ankerstroom:

$$\frac{I_a}{I_{aN}} = \sqrt{\frac{M}{M_N}} \quad [12.8]$$

De stroomopname van een seriemotor stijgt, lineaire magnetisatiegrafiek verondersteld, met de vierkantswortel ($Y = X^{1/2}$) van het aan de as beschikbare koppel, zie curve a in fig. 12.6.

Wordt de invloed van de verzadiging van het ijzer in rekening gebracht (Φ stijgt dan niet meer evenredig met I), dan is er meer stroom vereist om hetzelfde koppel te bekomen, zie curve b.

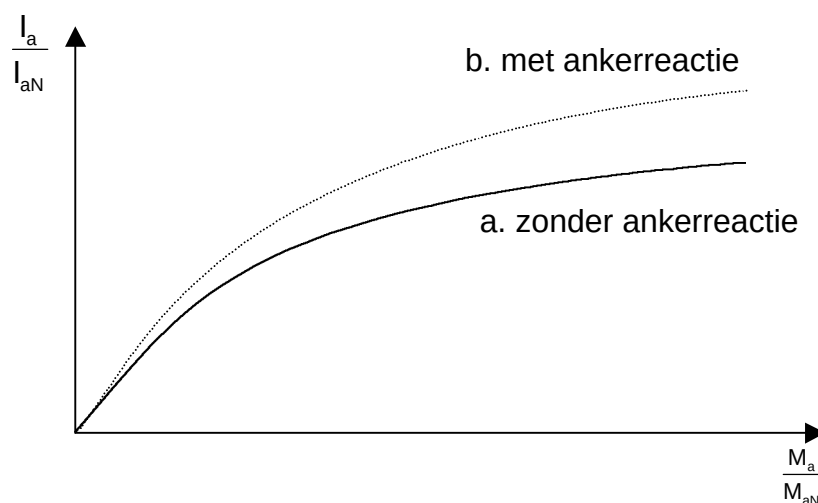


Fig. 12.6 Stroom-koppelgrafiek van een seriemotor

a) Zonder verzadiging v/h ijzer b) Met verzadiging v/h ijzer

12.4.2.2 TOEREN-KOPPELGRAFIEK

We veronderstellen geen verzadiging van het ijzer, zodat $\Phi \propto I_a$.

Vervangen we in [12.3] Φ door I_a en deze laatste door [12.8] dan behouden we:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{M}{M_N}}} - \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} \quad (1)$$

Verder bepalen we:

$$\frac{U}{E_N} = K_1 \quad \text{en} \quad \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} = K_2 \quad (2)$$

De uiteindelijke vergelijking voor het toerental:

$$\frac{n}{n_N} = K_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{M}{M_N}}} - K_2 \quad [12.9]$$

Vergelijking [12.9] stelt een hyperbool voor in de vorm $y = \sqrt{\frac{1}{x}}$ die over een waarde K_2 verschoven is, fig. 12.7.

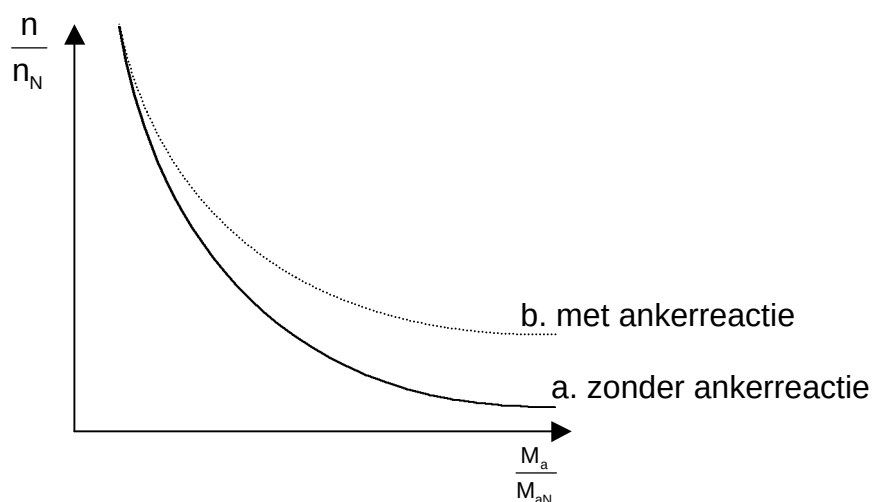


Fig. 12.7 Toeren-koppelgrafiek van een seriemotor

a) zonder verzadiging b) met verzadiging

Brengt men hier ook de verzadigingsverschijnselen van het ijzer in rekening, dan stijgt de flux niet meer evenredig met de stroom.

Omdat $n \propto \frac{1}{\Phi}$ ligt curve b hoger dan de geïdealiseerde curve a in fig 12.7.

Toepassingsgebied van de seriemotor

Aan de hand van de bedrijfskarakteristieken van de seriemotor kunnen we twee belangrijke uitspraken doen.

- De ankerstroom I_a verandert met de vierkantswortel van het koppel, of omgekeerd; het askoppel is kwadratisch evenredig met de ankerstroom. Dit motorgedrag maakt de seriemotor bijzonder geschikt als tractiemotor bij treinen waar men steeds met een hoog aanloopkoppel te maken heeft.

Een andere populaire toepassing van de seriemotor is hem te gebruiken als startmotor bij motorvoertuigen.

Ondanks het grote aanloopkoppel (groter dan van de shuntmotor) is de aanloopstroom relatief kleiner dan bij de shuntmotor.

- Uit de toeren-koppelgrafiek en uit vergelijking [12.9] herkennen we dat bij wegnemen van de belasting ($M \rightarrow 0$) het toerental naar oneindig evolueert ($n \rightarrow \infty$). De motor slaat als het ware op hol.

Gelijkstroom-seriemotoren mogen daarom nooit ontlast worden.

Bij de kleinere motoren is de nullaststroom relatief groot, ten gevolge van het grote verlieskoppel, zodat zich bij nullast nog een aanvaardbaar toerental ($< n_{\max}$) instelt.

VOORBEELD 12.2

Een gelijkstroom-seriemotor bezit volgende gegevens:

Nominale spanning $U_N = 440 \text{ V}$	Nominaal vermogen $P_N = 37 \text{ kW}$
Nominale stroom $I_N = 96 \text{ A}$	Nominaal toerental $n_N = 860 \text{ min}^{-1}$
Weerstand:	
Ankerwikkeling $R = 0,067 \Omega$	
Seriewikkeling $R = 0,012 \Omega$	
Hulppoolwikk. $R = 0,007 \Omega$	

1. Bepaal voor $I = 50 \text{ A}$ en $I = 150 \text{ A}$ de bijbehorende toerentallen.
 - a) Veronderstel $\Phi \sim I$
 - b) Veronderstel $\Phi = f(I)$ volgens standaardcurve van fig.11.2
2. Bepaal voor $I = 50 \text{ A}$ en $I = 150 \text{ A}$ de bijbehorende koppels M .
 - a) Veronderstel $\Phi \sim I$
 - b) veronderstel $\Phi = f(I)$ volgens fig 11.2.

OPLOSSING

- 1.a) Berekening van het toerental indien $\Phi \sim I$

Uit vergelijking [12.1]

$$\frac{E}{E_N} = \frac{\Phi}{\Phi_N} \cdot \frac{n}{n_N} \quad \text{met} \quad \frac{\Phi}{\Phi_N} = \frac{I}{I_N} \text{ volgt:}$$

$$n = n_N \cdot \frac{E}{E_N} \cdot \frac{I_N}{I}$$

- $I = 50 \text{ A}$

$$\begin{aligned} E &= U_N - I_a \cdot (R_a + R_h + R_s) \\ &= 440 \text{ V} - 50 \text{ A} \cdot 0,086 \Omega = 435,7 \text{ V} \\ E_N &= 440 \text{ V} - 96 \text{ A} \cdot 0,086 \Omega = 431,7 \text{ V} \\ n &= 860 \cdot \frac{435,7 \text{ V}}{431,7 \text{ V}} \cdot \frac{96 \text{ A}}{50 \text{ A}} = 1666 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$

- $I = 150 \text{ A}$

$$E = 440 \text{ V} - 150 \text{ A} \cdot 0,086 \Omega = 428 \text{ V}$$

$$n = 860 \cdot \frac{428 \text{ V}}{431,7 \text{ V}} \cdot \frac{96 \text{ A}}{50 \text{ A}} = 546 \text{ min}^{-1}$$

1.b) Berekening van het toerental met $\Phi = f(I)$ volgens grafiek

- $I = 50 \text{ A}$

$$\frac{I}{I_N} = \frac{50 \text{ A}}{96 \text{ A}} = 0,52 \Rightarrow \frac{\Phi}{\Phi_N} = 0,76 \text{ (uit figuur 2.60)}$$

$$n = n_N \cdot \frac{E}{E_N} \cdot \frac{\Phi_N}{\Phi}$$

$$n = 860 \cdot \frac{435,7 \text{ V}}{431,7 \text{ V}} \cdot \frac{1}{0,76} = 1142 \text{ min}^{-1}$$

- $I = 150 \text{ A}$

$$\frac{I}{I_N} = \frac{150 \text{ A}}{96 \text{ A}} = 1,56 \Rightarrow \frac{\Phi}{\Phi_N} = 1,1 \text{ (uit figuur 2.60)}$$

$$n = n_N \cdot \frac{E}{E_N} \cdot \frac{\Phi_N}{\Phi}$$

$$n = 860 \cdot \frac{428 \text{ V}}{431,7 \text{ V}} \cdot \frac{1}{1,1} = 775 \text{ min}^{-1}$$

2.a) Berekening van het koppel indien $\Phi \sim I$

Nominaal koppel volgens [1.8]

$$\begin{aligned} M \text{ (Nm)} &= 9550 \cdot \frac{P_N(\text{kW})}{n_N(\text{min}^{-1})} = 9550 \cdot \frac{37 \text{ kW}}{860 \text{ min}^{-1}} \\ &= 411 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Uit [12.7] kunnen we het koppel afleiden:

$$M = M_N \cdot \left(\frac{I_a}{I_{aN}} \right)^2$$

- $I = 50 \text{ A}$

$$M = M_N \cdot \left(\frac{I_a}{I_{aN}} \right)^2 = 411 \text{ Nm} \cdot \left(\frac{50}{96} \right)^2 = 111 \text{ Nm}$$

- $I = 150 \text{ A}$

$$M = M_N \cdot \left(\frac{I_a}{I_{aN}} \right)^2 = 411 \text{ Nm} \cdot \left(\frac{150}{96} \right)^2 = 1002 \text{ Nm}$$

2.b) Berekening van het koppel met $\Phi = f(I)$ volgens grafiek

Uit [12.2] volgt voor het motorkoppel:

$$M = M_N \cdot \frac{\Phi}{\Phi_N} \cdot \frac{I_a}{I_{aN}}$$

- $I = 50 \text{ A}$

$$\frac{I}{I_N} = \frac{50 \text{ A}}{96 \text{ A}} = 0,52 \Rightarrow \frac{\Phi}{\Phi_N} = 0,76 \text{ (uit figuur 2.60)}$$

$$M = 411 \text{ Nm} \cdot 0,76 \cdot \frac{50 \text{ A}}{96 \text{ A}} = 162 \text{ Nm}$$

- $I = 150 \text{ A}$

$$\frac{I}{I_N} = \frac{150 \text{ A}}{96 \text{ A}} = 1,56 \Rightarrow \frac{\Phi}{\Phi_N} = 1,1 \text{ (uit figuur 2.60)}$$

$$M = 411 \text{ Nm} \cdot 1,1 \cdot \frac{150 \text{ A}}{96 \text{ A}} = 705 \text{ Nm}$$

12.5 COMPOUND MOTOR

12.5.1 SCHEMA

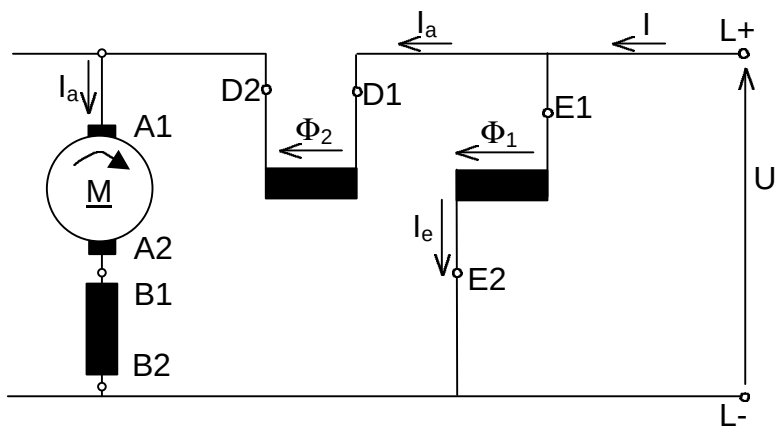


Fig. 12.8a compoundmotor met lange shunt
rechtsdraaiend en meegecompoundeerd

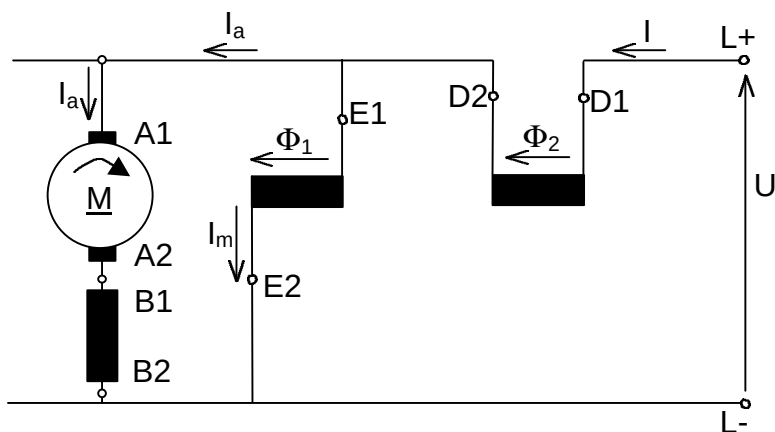


Fig. 12.8b compoundmotor met korte shunt
rechtsdraaiend en meegecompoundeerd

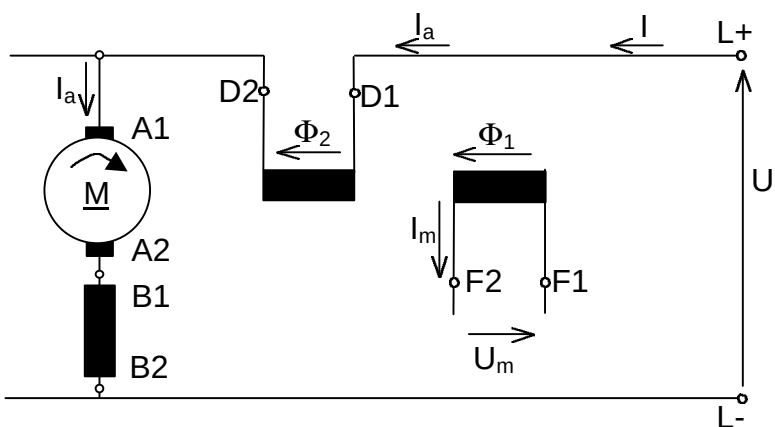


Fig. 12.8c Afzonderlijk bekrachtigde compoundmotor
rechtsdraaiend en meegecompoundeerd

De compoundmotor wordt meestal als meegecompoundeerde motor geschakeld, zoals in fig.12.8. De flux van de ankerstroom I_a in de seriewikkeling ondersteunt daarbij de flux van de veldstroom I_m in de shuntwikkeling. Op deze manier ontstaan er karakteristieken die zich bevinden tussen de serie- en shuntkarakteristieken.

12.5.2 KARAKTERISTIEKEN

Al naargelang het aantal windingen van de seriewikkeling kunnen we de compoundmotor vergelijken met een serie- of een shuntmotor.

12.5.2.1 STROOM-KOPPELGRAFIEK

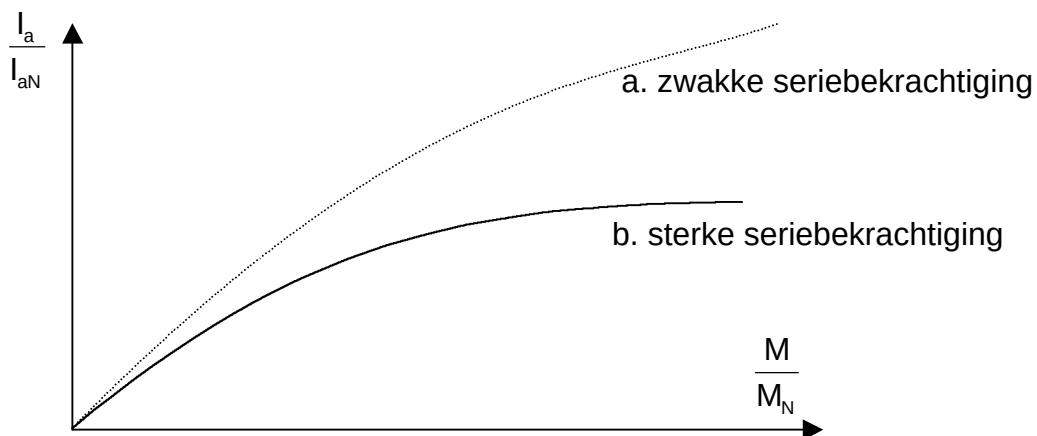


Fig.12.9 Stroom-koppelgrafiek van een compoundmotor

12.5.2.2 TOEREN-KOPPELGRAFIEK

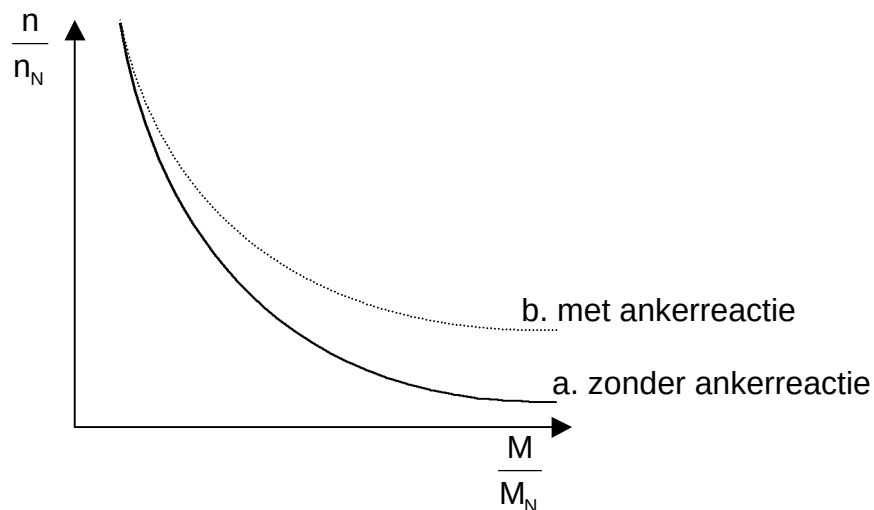


Fig.12.10 Toeren-koppelgrafiek van een compoundmotor

Aan de hand van fig.12.9 en fig.12.10 ontstaan er enkele toepassingen voor de compoundmotor:

- **ZWAKKE SERIEBEKRACHTIGING**

Deze bekrachtigingswijze heeft zijn nut voor machines zonder compensatiewikkeling omdat deze machines gevoelig zijn voor de gevolgen van de ankerreactie (dalen van de flux). De seriewikkeling produceert een relatief kleine flux die dit verschijnsel verregaand tegenwerkt.

De ankerstroom zal nu bij belasting (fig.12.9) niet meer zo sterk stijgen en een mogelijke instabiliteit van de toeren-koppelgrafiek (fig. 12.10) wordt vermeden.

Deze manier van bekrachtiging is toepasbaar voor middelgrote gelijkstroommotoren omdat een seriewikkeling constructief goedkoper te realiseren is dan een compensatiewikkeling.

- **STERKE SERIEBEKRACHTIGING**

De toeren-koppelgrafiek gelijk hier sterk op deze van de seriemotor. Deze wijze van bekrachtiging is aangewezen voor machines die onderhevig zijn aan sterke koppelveranderingen en waar bij nullast nog een stabiel bedrijf mogelijk moet zijn.

Bijvoorbeeld de aandrijving van een pers wordt gekenmerkt door een plotse laststoten gevolgd door nullastbedrijf.

13. GELIJKSTROOMMOTOREN

GESTUURD BEDRIJF

In het vorige hoofdstuk heeft U de bijzonderste karakteristieken leren kennen van gelijkstroommotoren in normaal bedrijf. Wordt zo'n motor op een gelijkspanning aangesloten, dan vloeit er op dat moment een zeer hoge aanloopstroom, deze kan voor het net en de motor nadelige gevolgen hebben.

De grootste betekenis voor de aandrijftechniek is echter dat men het toerental van de gelijkstroommotor regelen kan en dat de mogelijkheid bestaat om snel af te remmen en van draairichting te veranderen.

In dit hoofdstuk bestuderen we daarom deze niet-stationaire bedrijfstoestanden van de shunt- en seriemotor.

13.1 BEGRENZING VAN DE AANLOOPSTROOM

Uit:
$$U = E + I_a \cdot R_a \quad (1)$$

volgt:
$$I_a = \frac{U - E}{R_a} \quad (2)$$

met:
$$E = C_1 \cdot \Phi \cdot n \quad (3)$$

Bij het verbinden van een stilstaande motor met de netspanning U is op het eerste ogenblik de inwendige spanning $E = 0$. De aanloopstroom $I_{aanl.}$ wordt op dat moment enkel begrensd door de ankerweerstand R_a . Deze aanloopstroom bereikt zodanige waarden dat er gevaar bestaat voor beschadiging van de motor.

13.1.1 AANLOOPWEERSTAND IN DE ANKERKETEN

Indien een extra aanzetweerstand R_{az} in de ankerketen bijgeschakeld wordt (fig.13.1), kan men de aanloopstroom tot een willekeurige waarde I_{max} begrenzen:

$$I_{max} = \frac{U}{R_a + R_{az}} \quad [13.1]$$

De vereiste aanzetweerstand R_{az} laat zich hieruit berekenen:

$$R_{az} = \frac{U}{I_{max}} - R_a \quad [13.2]$$

Volgens vergelijking (2) daalt de ankerstroom bij stijgend toerental omdat de inwendige spanning E toerentalafhankelijk is.

Om nog voldoende aanloopkoppel te behouden mag de aanloopstroom niet onder een minimale waarde I_{min} dalen. Het is dus noodzakelijk om de aanzetweerstand geleidelijk uit te schakelen tijdens de aanloop. We kunnen dus zeggen dat de aanloopstroom varieert tussen een maximale en een minimale waarde.

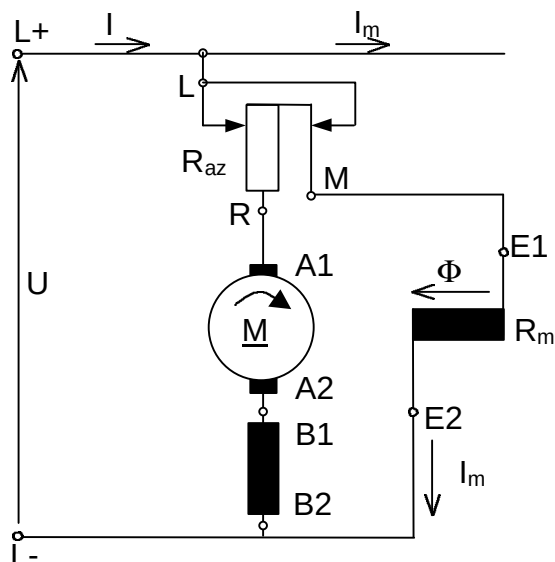


Fig.13.1 Shuntmotor met aanzetweerstand R

Afhankelijk van het motorvermogen is de toelaatbare aanloopstroom $I_{\max}$ gereguleerd (A.R.E.I.). De minimale aanloopstroom is afhankelijk van de gebruiksomstandigheden, men streeft hier steeds naar een voldoende koppeloverschot tussen motor- en lastkoppel.

Figuur 13.2 toont een toeren-stroomgrafiek van een shuntmotor die moet aanlopen tussen $I_{\max} = 1,5 \cdot I_{aN}$ en $I_{\min} = 1,15 \cdot I_{aN}$.

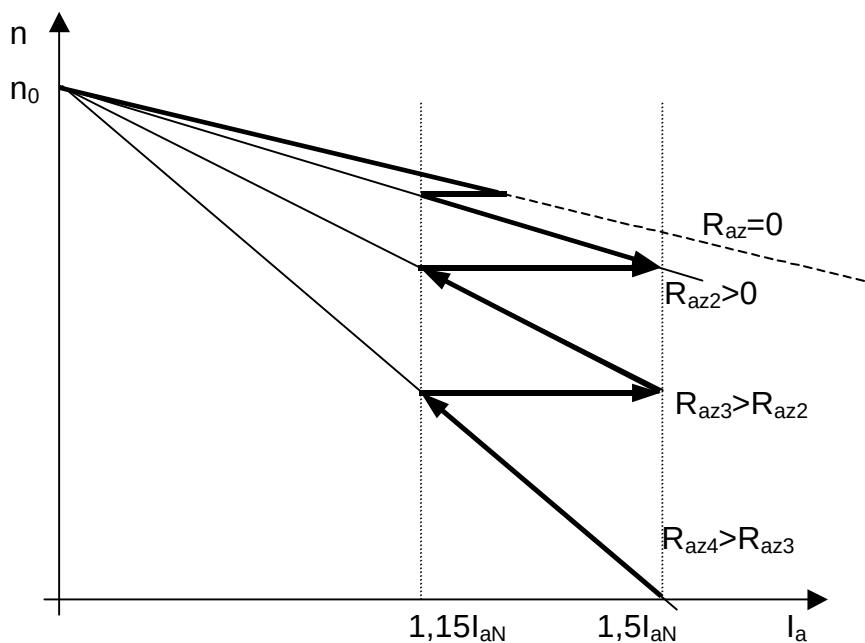


Fig.13.2 Toeren-stroomgrafiek van een shuntmotor met drietraps-aanloopweerstand

VOORBEELD 13.1

Gegeven de shuntmotor uit voorbeeld 12.1.

1. Bereken de aanzetweerstand opdat deze motor met $1,5 \cdot I_{aN}$ kan aanlopen.
2. Het terugschakelen op een lagere weerstandswaarde moet bij $1,15 \cdot I_{aN}$ gebeuren.

Welk toerental heeft de motor op dat moment bereikt?

3. Tot welke waarde moet R_{az} weer verminderd worden, opdat de ankerstroom weer stijgt tot $1,5 \cdot I_{aN}$?

OPLOSSING

1. Bij start is de inwendige spanning $E = 0$, volgens [13.2] is de aanzetweerstand:

$$R_{az} = \frac{U}{I_{max}} - R_a = \frac{U}{1,5 \cdot I_{aN}} - R_a = \frac{220 \text{ V}}{1,5 \cdot 21 \text{ A}} - 1,05 \Omega = 5,93 \Omega$$

2. Voor $I = 1,15 \cdot I_{aN}$ is de inwendige spanning:

$$\begin{aligned} E &= U_N - 1,15 \cdot I_{aN} \cdot (R_a + R_{az}) \\ &= 220 \text{ V} - 1,15 \cdot 21 \text{ A} \cdot (1,05 + 5,93) \Omega \\ &= 51 \text{ V} \end{aligned}$$

Volgens [12.1] zijn, bij constante flux Φ , de inwendige spanningen evenredig met hun bijbehorende toerentallen:

$$\frac{E}{E_N} = \frac{n}{n_N}$$

Daaruit volgt het gezochte toerental:

$$n = \frac{E}{E_N} \cdot n_N \quad \text{met} \quad E = 51 \text{ V} \text{ en } E_N = 198 \text{ V}$$

$$n = 1440 \cdot \frac{51 \text{ V}}{198 \text{ V}} = 371 \text{ min}^{-1}$$

3. De volgende waarde van R_{az} kan nu gevonden worden door in [13.2] de nieuwe inwendige spanning E in rekening te brengen.

$$R_{az} = \frac{U_N - E}{I_{max}} - R_a = \frac{U_N - E}{1,5 \cdot I_{aN}} - R_a = \frac{220 \text{ V} - 51 \text{ V}}{1,5 \cdot 21 \text{ A}} - 1,05 \Omega = 4,3 \Omega$$

GELIJKRICHTER

van de nodige regelkringen.

waarmee het mogelijk is om de snelheid te regelen en de ankerstroom te begrenzen.

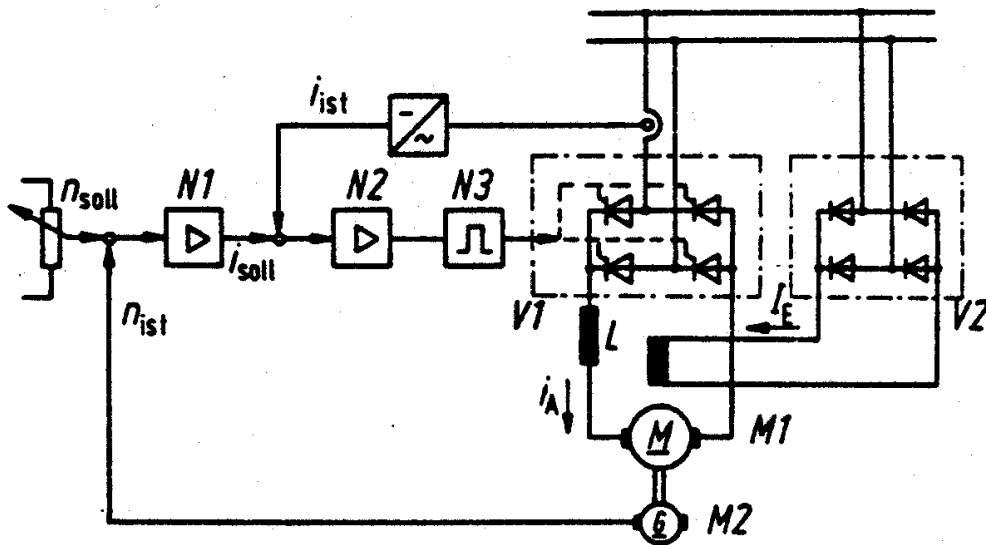


Fig. 13.3 Shuntmotor met gestuurde brugschakeling

V1 = thyristor brugschakeling

V2 = diodenbrug

N1 = regelaar toerental

N2 = regelaar stroomsterkte

N3 = Impulsschakeling

M2 = tachogenerator

13.2 REGELING VAN HET TOERENTAL

Uit de basisvergelijkingen:

$$E = C_1 \cdot \Phi \cdot n$$

en

$$U = E + I_a \cdot R_a$$

volgt voor het toerental:

$$n = \frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - I_a \cdot \frac{R_a}{C_1 \cdot \Phi} \quad [13.3]$$

We herkennen hier dadelijk een drietal mogelijkheden voor regeling van het toerental:

- a) Veranderen van de ankerspanning U ;
- b) Veranderen van de flux Φ ;
- c) Vergroten van de ankerweerstand d.m.v. een extra weerstand.

Bovenstaande redenering is onafhankelijk van de schakelwijze van de bekrachtigingswikkeling en is dus geldig voor zowel de shunt- als de seriemotor.

13.2.1 SHUNTMOTOR

13.2.1.1 VERANDEREN VAN DE ANKERSPANNING U

Deze manier van toerentalregeling is enkel mogelijk met de afzonderlijk bekrachtigde gelijkstroommotor, omdat de flux Φ constant moet blijven, fig.13.4.

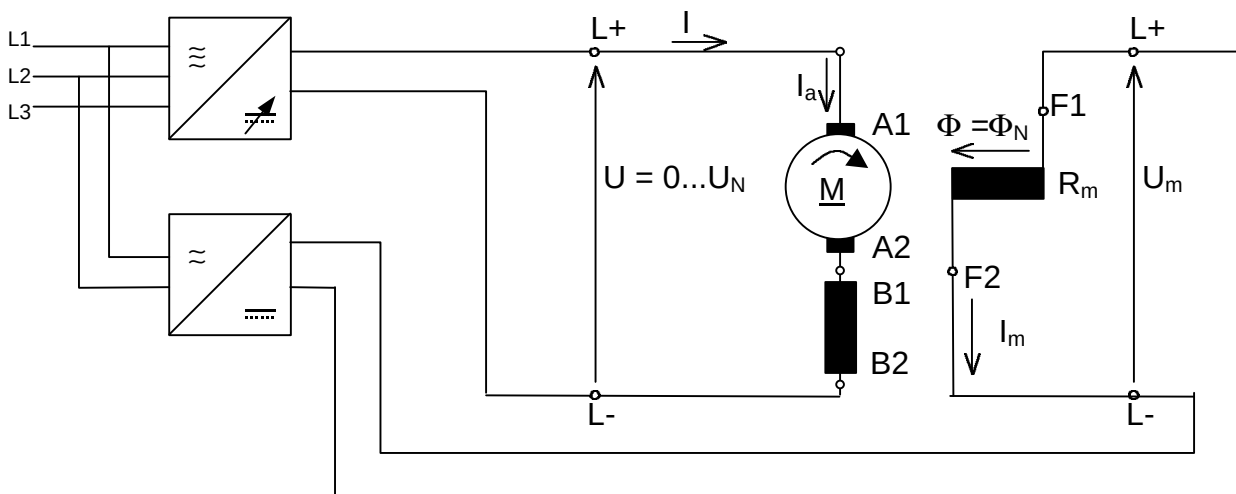


Fig.13.4 Shuntmotor met ankerspanningsregeling

Met het gegeven dat $\Phi = \Phi_N = \text{cte}$ en een variabele ankerspanning U , verandert vergelijking [12.3] van:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} \cdot \frac{\Phi_N}{\Phi} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} \cdot \left(\frac{\Phi_N}{\Phi} \right)^2$$

naar:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} \quad [13.4]$$

Dit is de vergelijking van een dalende rechte ($y = a - b \cdot x$) waarvan de helling constant blijft, maar waarvan het snijpunt met de y-as afhankelijk is van de spanning U .

Door regelen van de spanning U ontstaan also evenwijdige rechten aan de nominale grafiek, fig.13.5.

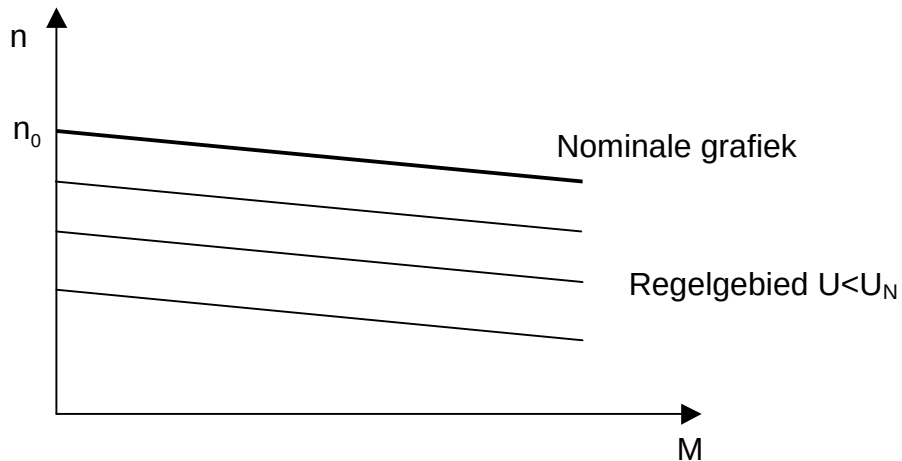


Fig.13.5 Toeren-koppelgrafieken van een shuntmotor met variabele ankerspanning U en met $\phi = \text{cte}$

REGELGEBIED

Omwille van mogelijke overslag tussen de collectorlamellen mag de spanning niet stijgen boven U , het regelgebied van de ankerspanning U ligt dus vast op:

$$0 \leq U \leq U_N \quad \text{en voor het toerentalgebied:} \quad 0 \leq n \leq n_N$$

VOORBEELD 13.2

De shuntmotor uit voorbeeld 12.1 wordt bij constante bekrachtiging $\Phi = \Phi_N = \text{cte}$ gevoed met een ankerspanning $U = 160 \text{ V}$.

1. Welk toerental n' stelt zich in bij een belasting met het nominale koppel $M = M_N$?
2. Welk toerental is mogelijk bij nullast (n_0')?

OPLOSSING

1. Voor de oplossing gebruiken we vergelijking [12.3] met $M = M_N$ en $\Phi = \Phi_N = \text{cte}$.

$$n' = n_N \cdot \frac{U}{E_N} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N}$$

$$n' = 1440 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{160 \text{ V}}{198 \text{ V}} - \frac{21 \text{ A} \cdot 1,05 \Omega}{198 \text{ V}} = 1003 \text{ min}^{-1}$$

2. Bij nullast is het koppel $M = 0$, zodat bovenstaande vergelijking zich vereenvoudigt tot:

$$\begin{aligned} n' &= n_N \cdot \frac{U}{E_N} \\ &= 1440 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{160 \text{ V}}{198 \text{ V}} \\ &= 1163 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$

13.2.1.2 VERANDEREN VAN DE FLUX

De motor ligt aan de nominale spanning $U = U_N$. De flux Φ is regelbaar van Φ_N tot lagere waarden door de veldstroom I te verkleinen, bijvoorbeeld door de spanning op de veldwikkeling te regelen of een veldregelaar R_v in serie te plaatsen met de veldwikkeling, zoals in fig.13.6.

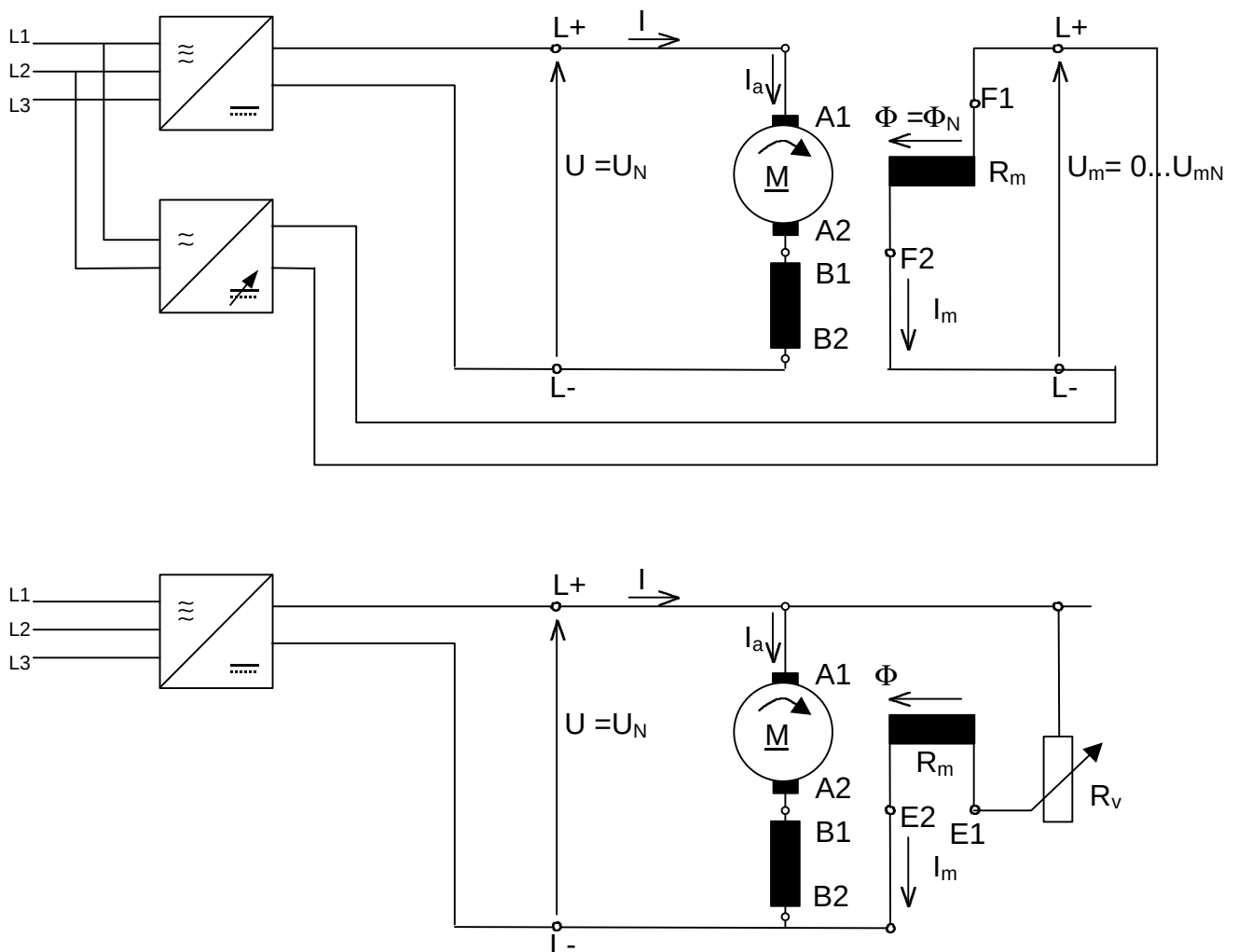


Fig.13.6 Shuntmotor met fluxregeling

Voor het toerental is nog steeds vergelijking [12.3] geldig:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} \cdot \frac{\Phi_N}{\Phi} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} \cdot \left(\frac{\Phi_N}{\Phi} \right)^2$$

Omdat de flux verminderd wordt (veldverzwakking), liggen alle toeren-koppelgrafieken boven de nominale grafiek ($\Phi = \Phi_N$).

Het lastafhankelijk gedeelte $\frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} \cdot \left(\frac{\Phi_N}{\Phi} \right)^2$ is kwadratisch afhankelijk van Φ , zodat

tevens de helling stijgt bij afnemende flux Φ , fig.13.7.

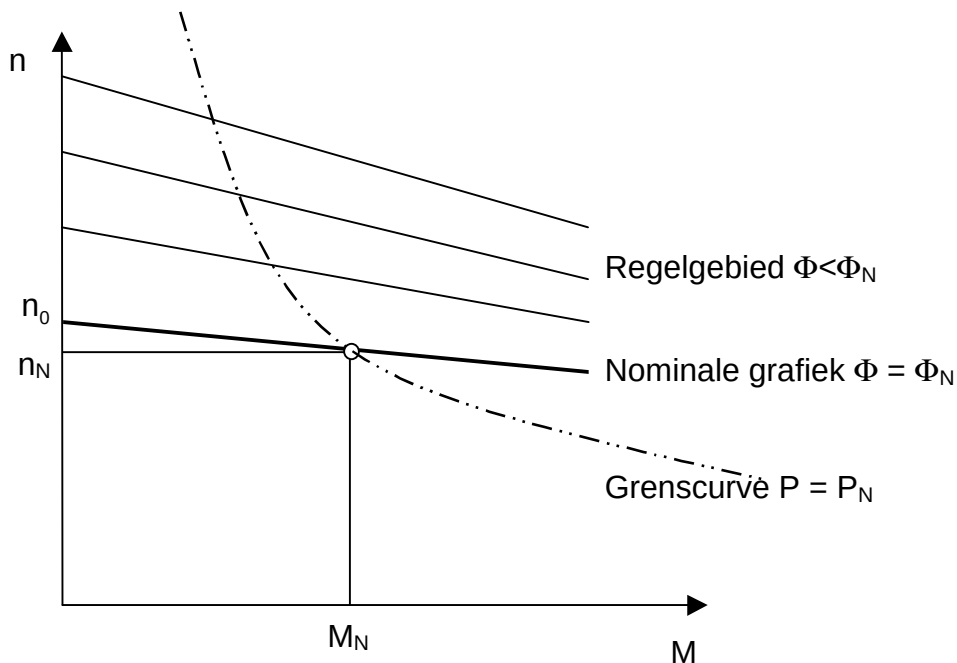


Fig.13.7 Toeren-koppelgrafieken van een shuntmotor met veldverzwakking

REGELGEBIED

Omdat bij veldverzwakking $n > n_N$ wordt, moet men er op letten, dat de motor deze toerentalverhoging mechanisch aankan (centrifugale krachten op de collector en ankerdraden). Het toerental is daarom begrensd tot $n_{\max}$ en de bijbehorende flux mag daarom nooit onder een minimale waarde $\Phi_{\min}$ dalen:

$$\Phi_{\min} \leq \Phi \leq \Phi_N \quad \text{en} \quad n_{\max} \geq n \geq n_N$$

GRENSCURVE BIJ $P = P_N$

Indien de shuntmotor met een constant koppel $M = M_N$ belast wordt en door veldverzwakking ($\Phi < \Phi_N$) op een toerental $n > n_N$ gestuurd wordt, moet de ankerstroom I_a volgens

$$M = C_2 \cdot \Phi \cdot I_a$$

stijgen tot $I_a > I_{aN}$ om het gevraagde lastkoppel te leveren.

De motor zal thermisch overbelast geraken !!!

Het is dus noodzakelijk dat men, in het gebied $n > n_N$, het lastkoppel evenredig laat dalen met Φ opdat steeds $I_a \leq I_{aN}$ blijft.

Hieruit blijkt dus dat:

$$M \propto \Phi \quad \text{en omdat} \quad \Phi \propto \frac{1}{n} \quad \text{wordt dit:} \quad M \propto \frac{1}{n}$$

Vullen we dit in de vermogenformule $P = M \cdot \omega$, dan ontstaat er een grenscurve (fig. 13.7) bestaande uit bedrijfspunten van gelijk vermogen $P = P_N = \text{cte}$;

$$\text{omdat:} \quad \omega \propto n \quad \text{en} \quad M \propto \frac{1}{n}$$

13.2.1.3 VOORSCHAKELWEERSTAND R_v IN DE ANKERKETEN

De shuntmotor werkt met nominale spanning U_N en nominale flux Φ_N .

Om het toerental te regelen, plaatst men een voorschakelweerstand R_v in serie met het anker, fig.13.8.

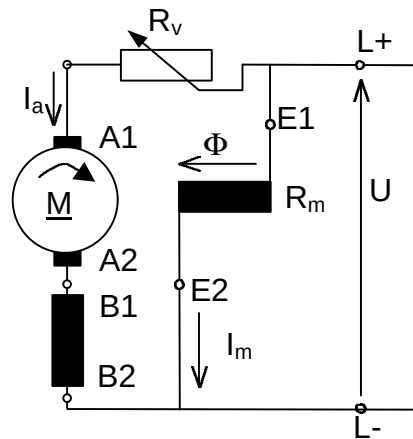


Fig.2.94 Shuntmotor met voorschakelweerstand

Voor het toerental blijft steeds vergelijking [13.3] geldig:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} \cdot \frac{\Phi_N}{\Phi} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} \cdot \left(\frac{\Phi_N}{\Phi} \right)^2$$

Met $U = U_N$, $\Phi = \Phi_N$ en R_v vormen we deze om tot:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot (R_a + R_v)}{E_N} \quad [13.5]$$

Uit [13.5] merkt U dat deze vorm van toerentalregeling geen invloed heeft op het nullasttoerental n_0 bij $M = 0$. Het lastafhankelijke gedeelte,

$$\frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot (R_a + R_v)}{E_N}$$

stijgt evenredig met de voorschakelweerstand R_v waardoor de helling van de rechten steeds groter wordt in vergelijking tot de nominale grafiek voor $R_v = 0$, zie fig.13.9.

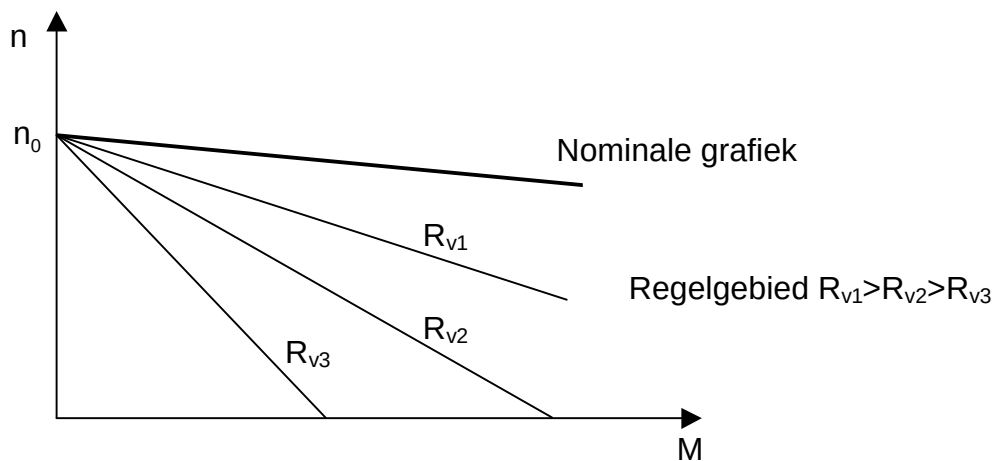


Fig.13.9 Toeren-koppelgrafieken van een shuntmotor met voorschakelweerstand in de ankerketen

BEPERKINGEN

Deze manier van toerentalregeling geeft een extra jouleverlies in de voorschakelweerstand, zodat bij dalend toerental ($R_v \uparrow$) het jouleverlies toeneemt waardoor het rendement gaat dalen.

Om deze redenen wordt deze vorm van toerentalregeling niet gebruikt in de aandrijftechniek.

Voorbeeld 13.3 toont duidelijk het nadelige rendement bij deze vorm van toerentalregeling.

VOORBEELD 13.3

De shuntmotor uit voorbeeld 12.1 moet met behulp van een voorschakelweerstand in de ankerketen, bij $M = M_N$, tot een toerental $n = 800 \text{ min}^{-1}$ gebracht worden.

1. Hoe groot is de vereiste voorschakelweerstand R_v ?
2. Voor welk vermogen moet deze weerstand gebouwd zijn?
3. Welk is het nieuwe rendement van de motor?

OPLOSSING

1. Omvormen van [13.5] naar R geeft bij $\Phi = \Phi_N$ en $U = U_N$:

$$\begin{aligned} R_v &= \left(\frac{U_N}{E_N} - \frac{n}{n_N} \right) \frac{E_N}{I_{aN}} - R_a \\ &= \left(\frac{220 \text{ V}}{198 \text{ V}} - \frac{800 \text{ min}^{-1}}{1440 \text{ min}^{-1}} \right) \frac{198 \text{ V}}{21 \text{ A}} - 1,05 \Omega \\ &= 4,19 \Omega \end{aligned}$$

2. Bij belasting met nominaal koppel is $I_a = I_{aN} = 21 \text{ A}$. Het vermogen van de weerstand is dan:

$$P_R = I_{aN}^2 \cdot R_v = 21^2 \text{ A} \cdot 4,19 \Omega = 1,85 \text{ kW}$$

3. Het nuttig asvermogen van de motor:

$$P_n = \frac{M \cdot n}{9550} = \frac{24,5 \text{ Nm} \cdot 800 \text{ min}^{-1}}{9550} = 2,05 \text{ kW}$$

Het opgenomen vermogen:

$$P_t = U \cdot I_a = 220 \text{ V} \cdot 21 \text{ A} = 4,62 \text{ kW}$$

Het nieuwe rendement is duidelijk lager dan het nominale:

$$\zeta = \frac{P_n}{P_t} = \frac{2,05 \text{ kW}}{4,62 \text{ kW}} = 0,44 \text{ (44\%)}$$

13.2.1.4 SAMENVATTING

We kunnen de voorgaande snelheidsregelingen (behalve R_v in de ankerketen) ook combineren in één enkele machine. Dit kan door een regelbare gelijkspanning voor de ankerketen te gebruiken en bijkomend een regelbare gelijkspanning voor de veldketen.

De toeren-koppelgrafiek bevat dan twee gebieden, zie fig.13.10.

1. Een gebied met ankerspanningsregeling $U \leq U_N$ bij nominale flux $\Phi = \Phi_N = \text{cte}$, geschikt voor toerentallen $n \leq n_N$.
2. Een gebied met veldregeling $\Phi \leq \Phi_N$ bij nominale ankerspanning $U = U_N = \text{cte}$, geschikt voor toerentallen $n \geq n_N$.

De bovenste toerentalgrens $n_{\max}$ ligt bij $n_{\max} = 2 \dots 4.n_N$ en is afhankelijk van de optredende centrifugaalkrachten en van de mogelijke problemen met de commutatie.

Anker- en veldsturing overlappen elkaar bij het nominale toerental en leveren tesamen de grenscurven voor alle andere toerentallen (stippellijnen in fig.13.10).

Indien men dus beschikt over twee regelbare gelijkstroomvoedingen, dan kan het toerental van de gelijkstroombmachine in een breed gebied (0 tot $2 \dots 4.n_N$) praktisch verliesloos geregeld worden.

Het is om deze reden dat de gelijkstroombmachine niet weg te denken is uit de aandrijftechniek.

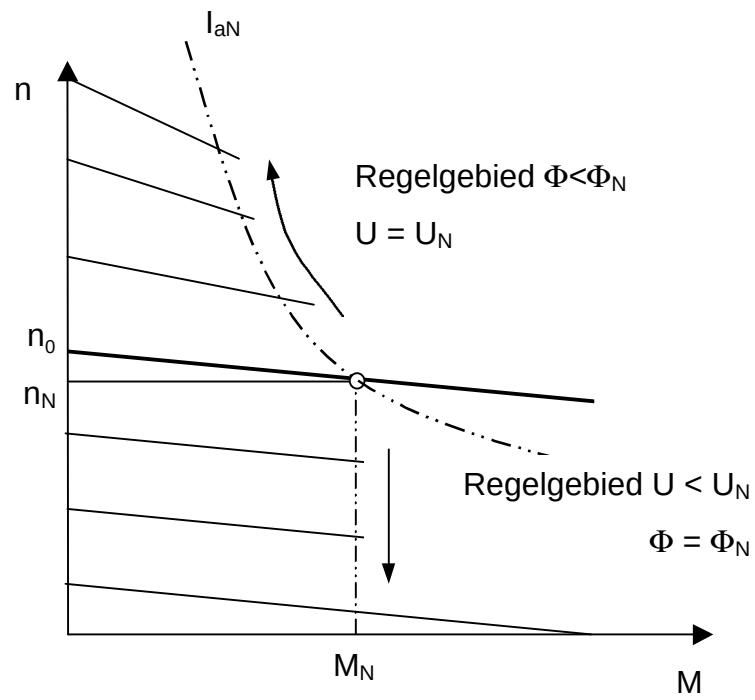


Fig.13.10 Anker- en veldsturing van een shuntmotor

13.2.2 SERIEMOTOR

Het toerental van de seriemotor is, evenals de shuntmotor van een drietal grootheden afhankelijk, namelijk; de spanning U , de magnetische flux Φ en de weerstand R_v in de ankerketen.

Vergelijking [12.9] toont ons de toerentalformule van een seriemotor:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{M}{M_N}}} - \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N}$$

Op een gelijkaardige manier als bij de shuntmotor gaan we het motorgedrag bestuderen aan de hand van deze 3 grootheden.

13.2.2.1 VERANDEREN VAN DE ANKERSPANNING

De grafiek $n = f(M)$ verschuift naar beneden indien $U < U_N$.

Het gedeelte $\frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N}$ is onafhankelijk van de belasting (I_a komt niet voor), zodat de verschuiving ten gevolge van U des te sterker wordt naarmate de belasting M van de motor daalt, fig.13.11.

We zien dit effect duidelijk optreden bij de lagere M -waarden.

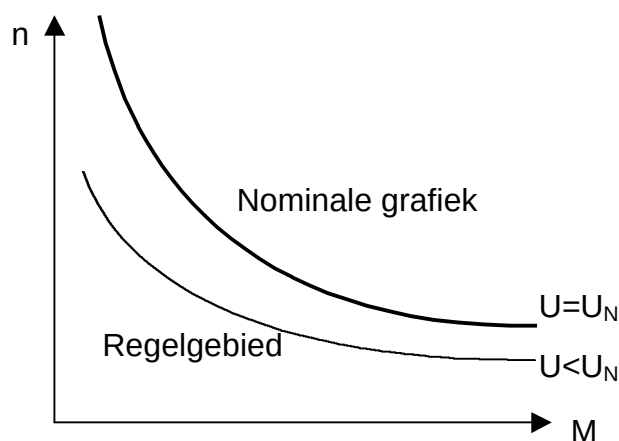


Fig.13.11 Toeren-koppelgrafieken van een seriemotor met regelbare ankerspanning

REGELGEBIED

Om dezelfde redenen als bij de shuntmotor kan de ankerspanning U van de seriemotor maximaal tot de nominale spanning U_N geregeld worden. Het regelgebied van de spanning ligt dus vast en ook het bijbehorende toerentalbereik.

$$0 \leq U \leq U_N \quad \text{waaruit} \quad 0 \leq n \leq n_N$$

13.2.2.2 VERANDEREN VAN DE FLUX

In een seriemotor is de ankerstroom tevens ook de bekrachtigingsstroom in de veldwikkeling D1-D2. Een veldverzwakking kan enkel met een parallelweerstand R ten opzichte van de veldwikkeling, zie fig. 13.12.

Een fluxdaling ($\Phi \downarrow$ omdat $R_p \downarrow$) veroorzaakt hier een verhoging van het toerental ($\Phi \propto \frac{1}{n}$) zodat de toeren-koppelgrafieken hoger komen te liggen, zie fig.13.13.

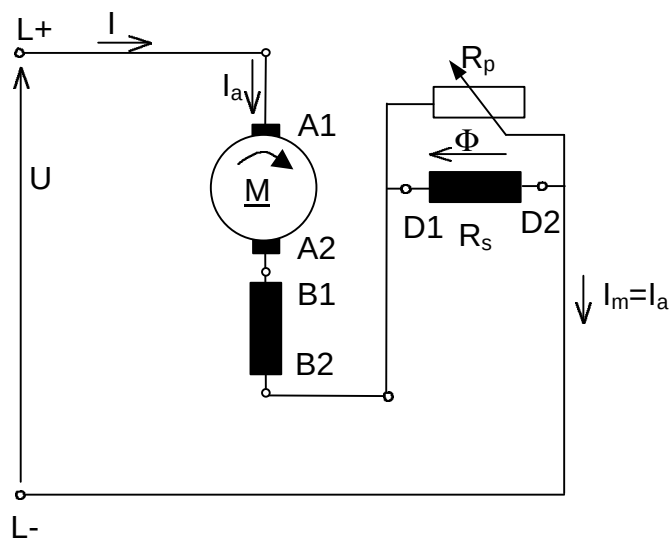


Fig.13.13 Veldgestuurde seriemotor met weerstand R_p parallel aan de veldwikkeling

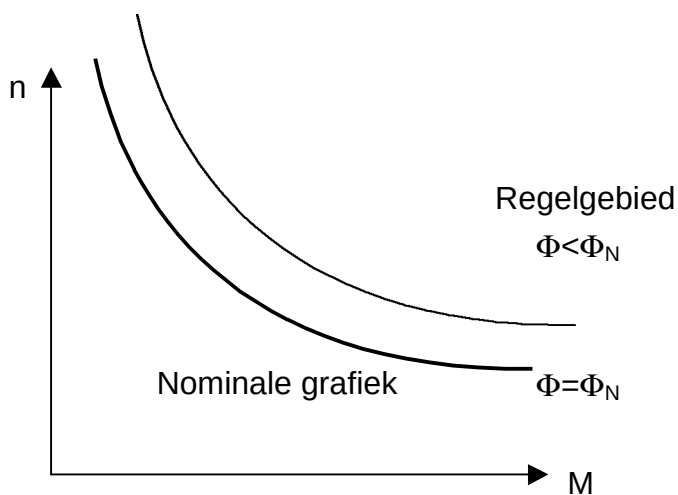


Fig.13.14 Toeren-koppelgrafieken van een veldgestuurde seriemotor met parallelweerstand aan de veldwikkeling

REGELGEBIED

Het gaat hier dus om veldverzwakking met een toerentalgebied boven het nominale toerental ($n > n_N$) waarbij als beperking geldt dat omwille van de optredende centrifugale krachten het toerental niet boven $n_{\max}$ mag uitstijgen. Daaruit volgt dat de parallelweerstand steeds boven een minimum waarde $R_{p(\min)}$ moet blijven.

$$R_{p(\min)} \leq R_p \leq \infty \quad \text{en} \quad n_{\max} \geq n \geq n_N$$

13.2.2.3 VOORSCHAKELWEERSTAND R_v IN DE ANKERKETEN

De toerentalvergelijking [2.58] gaat dan over in:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{M}{M_N}}} - \frac{I_{aN} \cdot (R_a + R_v)}{E_N} \quad [13.6]$$

Het gedeelte $\frac{I_{aN} \cdot (R_a + R_v)}{E_N}$ is onafhankelijk van de belasting, maar vergroot evenredig met de ingestelde waarde van R_v . Naarmate de weerstand R_v stijgt verschuift de toeren-koppelgrafiek naar beneden, zie fig.13.14. We bekomen de nominale grafiek weer bij $R_v = 0$.

Het gedeelte $\frac{U}{E_N} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{M}{M_N}}}$ is onafhankelijk van de belasting (I_a) en van de weerstand R_v waardoor het geen invloed uitoefent op de toeren-koppelgrafiek.

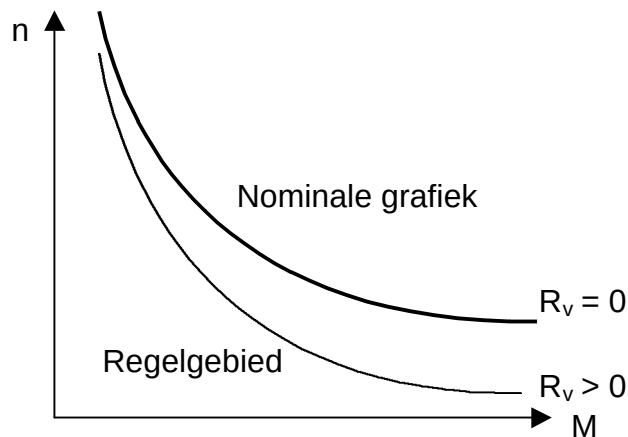


Fig.13.14 Toeren-koppelgrafieken van een seriemotor met voorschakelweerstand R_v in de ankerketen

REGELGEBIED

Verhogen van de weerstand R_v levert steeds een daling op van het toerental. Opdat de motor nog voldoende koppel zou bezitten bij het aanlopen, is deze weerstand beperkt tot een maximumwaarde $R_{v(max)}$.

$$0 \leq R_v \leq R_{v(max)} \quad \text{en} \quad n_N \geq n \geq 0$$

13.3 AFREMMEEN VAN GELIJKSTROOMMOTOREN

De gelijkstroommotor wordt in het rembedrijf als generator gebruikt, waarbij het askoppel $M = C_2 \cdot \Phi \cdot I$ van richting verandert (omkeren van I_a of van Φ) en dus niet meer aandrijvend (= motorbedrijf) maar remmend (= generatorbedrijf) werkt op de belasting.

Om de motor als generator te laten werken, bestaan er 3 mogelijkheden:

- Weerstandsremmen; de kinetische energie van de machine wordt omgezet in elektrische energie welke op haar beurt verloren gaat als warmte in weerstanden.
- Recuperatief remmen; de kinetische energie wordt omgezet in elektrische energie en teruggeleverd aan het voedingsnet.
- Tegenstroom remmen; de motor wordt plotseling geschakeld voor een andere draairichting waardoor grote stromen optreden die tevens grote remmende koppels opwekken.

In de volgende paragrafen zullen we deze drie mogelijkheden toelichten voor de shunt- en seriemotor.

13.3.1 SHUNTMOTOR

13.3.1.1 WEERSTANDSREMMEN

Opdat de machine snel van motorbedrijf naar generatorbedrijf kan overgaan is het wenselijk dat de inwendige spanning E aanwezig blijft.

Vermits $E = C_1 \cdot \Phi \cdot n$ en de machine nog draait $n > 0$ is het dus noodzakelijk dat de flux Φ aanwezig blijft. Dit kan het best gebeuren door de veldwikkeling aangesloten te houden op een aparte voedingsbron.

Veronderstellen we nu dat de ankerketen volgens fig.13.15 aangesloten is op een veranderlijke weerstand R_v en dat de veldwikkeling op nominale bekrachtiging blijft $\Phi = \Phi_N$.

De toeren-koppelgrafieken kunnen we uit vergelijking [12.3] afleiden:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} \cdot \frac{\Phi_N}{\Phi} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} \cdot \left(\frac{\Phi_N}{\Phi} \right)^2$$

Door hierin $\Phi = \Phi_N$ en $U = 0$ (netspanning U is niet aanwezig) in te vullen, bekomen we:

$$\frac{n}{n_N} = - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot (R_a + R_v)}{E_N} \quad [13.7]$$

Deze vergelijking [13.7] beschrijft rechten ($y = -a \cdot x$), waarvan de helling evenredig stijgt met de remweerstand R_v en die gelegen zijn in het positieve toerentalbereik en het negatieve koppelbereik (remmend koppel!) van de toeren-koppelgrafiek, fig.13.16.

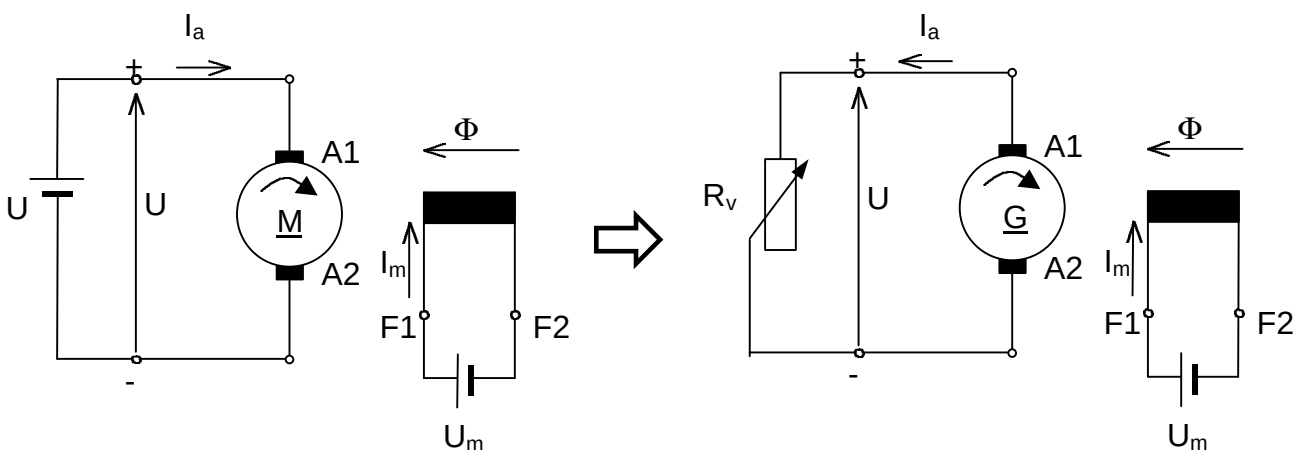


Fig.13.15 Weerstands remmen van een shuntmotor

Door continu uitschakelen van de remweerstand kan het remmend koppel nagenoeg constant gehouden worden tot stilstand.

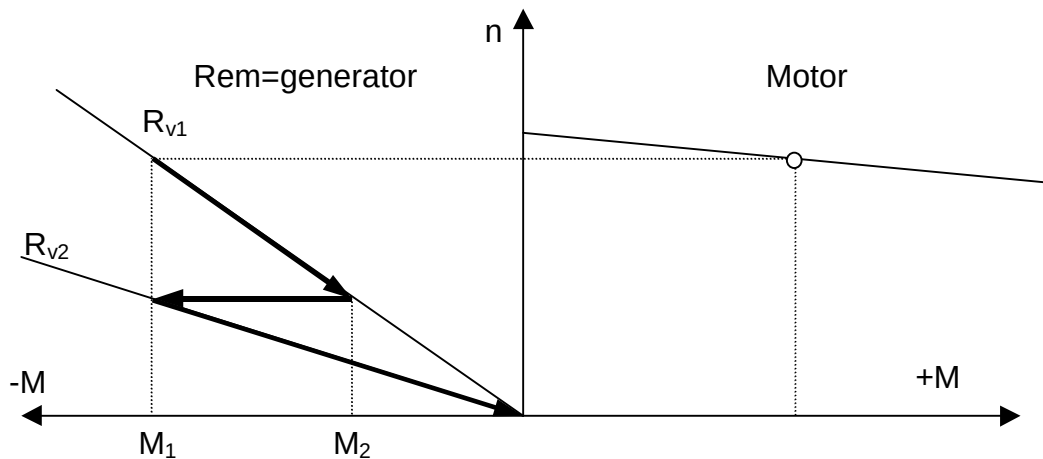


Fig.13.16 Toeren-koppelgrafieken van een shuntmotor met tweektraps remweerstand R_v

13.3.1.2 RECUPERATIEF REMMEN

Bij recuperatief remmen blijft de motor op het net geschakeld. Hierbij wordt alleen elektrische energie aan het net teruggeleverd, als de inwendige spanning E van de motor groter is dan de netspanning U . De motor werkt dus als generator. Deze situatie kan worden bereikt door:

- Verhoging van de motorsnelheid boven het ingestelde nominale toerental.
- Verlaging van de motorspanning. Dit kan bijvoorbeeld met gestuurde gelijkrichters voor vier kwadrantenbedrijf.
- Verhoging van de magnetische flux Φ . Hier moeten we wel rekening houden met optredende verzadigingsverschijnselen.

Voor een gelijkstroommotor geldt de bekende vergelijking:

$$E = U - I_a \cdot R_a \quad (1)$$

Indien nu om een van de hierboven genoemde oorzaken $E > U$ wordt, dan volgt uit (1) dat I_a van richting moet zijn omgekeerd, dus:

$$E = U - (-I_a \cdot R_a) = U + I_a \cdot R_a \quad [13.8]$$

In figuur 13.17 is E als functie van de ankerstroom getekend:

- Het eerste kwadrant wordt gekenmerkt doordat $E < U$ met andere woorden, de machine werkt als motor.
- Het tweede kwadrant wordt gekenmerkt doordat $E > U$, de motor werkt nu als generator en kan energie terugleveren. De motorsnelheid zal daardoor verminderen.

Houden we de flux constant dan is $E \div n$ en $I_a \div M$. Hierdoor kunnen we in fig.13.17 de spanning E vervangen door toerental n en de ankerstroom I_a door motorkoppel M .

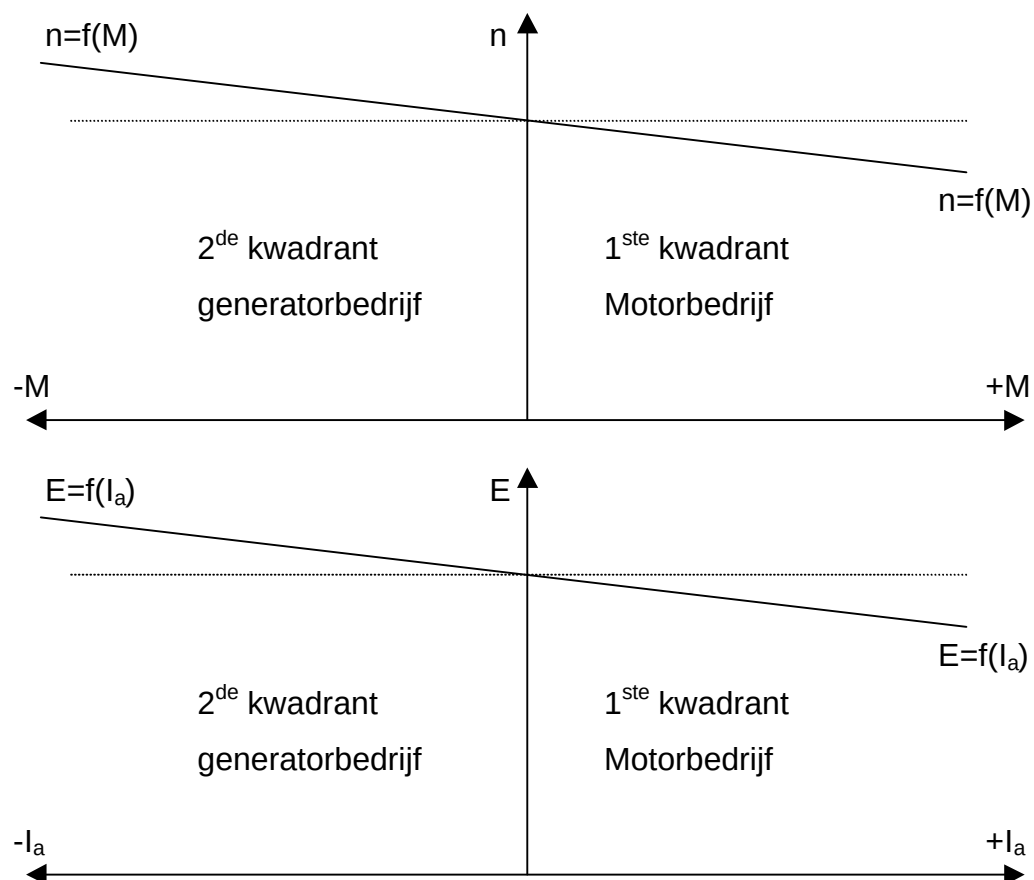


Fig.13.17 Recuperatief remmen van een shuntmotor $E = f(I_a)$ en $n = f(M)$

Uit bovenstaande figuur blijkt dat motorbedrijf wordt gekenmerkt door gelijke tekens van koppel en toerental (= eerste kwadrant).

In het tweede kwadrant is er tekenverschil tussen toerental en koppel. De motor werkt nu als generator.

13.3.1.3 TEGENSTROOMREMMEN

Bij tegenstroomremmen wordt de motor plotseling in omgekeerde draairichting geschakeld. Hierdoor verandert de inwendige spanning E van richting en gaat ze met de klemspanning U meewerken:

$$U = -E + I_a \cdot R_a \quad \text{waaruit} \quad I_a = \frac{U + E}{R_a} \quad [13.9]$$

De stroom wordt hierdoor ontoelaatbaar hoog, zodat we tegelijkertijd weerstanden in de ankerketen moeten plaatsen voor begrenzing van deze stromen.

13.3.2 SERIEMOTOR

13.3.2.1 WEERSTANDSREMMEN

Hier moet de motor als seriegenerator gaan werken, hetgeen enkel mogelijk is als de seriewikkeling omgepoold wordt, fig.13.18, omdat anders de remanente flux afgebouwd zou worden.

De machine kan nu op spanning komen mits R_v voldoende laag is. De stroom door deze weerstand is hier immers niet alleen gelijk aan de ankerstroom I_a , maar vormt ook de magnetiseringsstroom. Met een te kleine magnetiserings(belastings)stroom wordt slechts een zeer kleine flux Φ en dus ook een kleine spanning opgewekt :

$$E = C_1 \cdot \Phi \cdot n$$

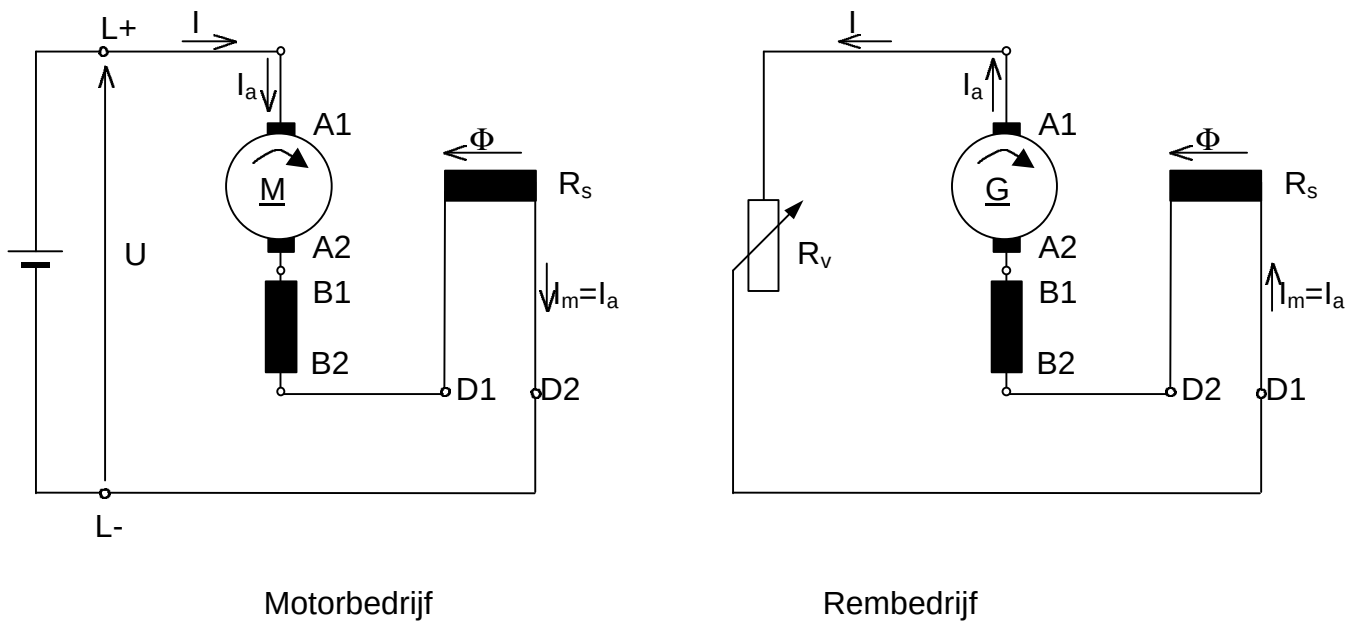


Fig. 13.18 Weerstandremmen van een seriemotor

In figuur 13.19 zijn de $U = f(I_a)$ -grafieken getekend voor toerentallen n_1 en n_2 ($n_2 < n_1$) evenals de weerstandskarakteristieken van de remweerstand $R_{v(1)}$ en $R_{v(2)}$ ($R_{v(2)} < R_{v(1)}$).

De machine wordt van motor- naar rembedrijf vooreerst gekoppeld met remweerstand $R_{v(1)}$ en levert in dit punt een maximale stroom $I_{a(max)}$ aan deze weerstand.

Het toerental daalt zodat het werkingpunt via de karakteristiek van $R_{v(1)}$ naar beneden verschuift. Om nog voldoende remmend koppel te behouden wordt bij het bereiken van de minimale stroom $I_{a(min)}$ een kleinere remweerstand R ingeschakeld. De ankerstroom stijgt dan onmiddellijk naar de maximale waarde. Door de remweerstand in trappen te verdelen kan men de motor praktisch tot stilstand afremmen.

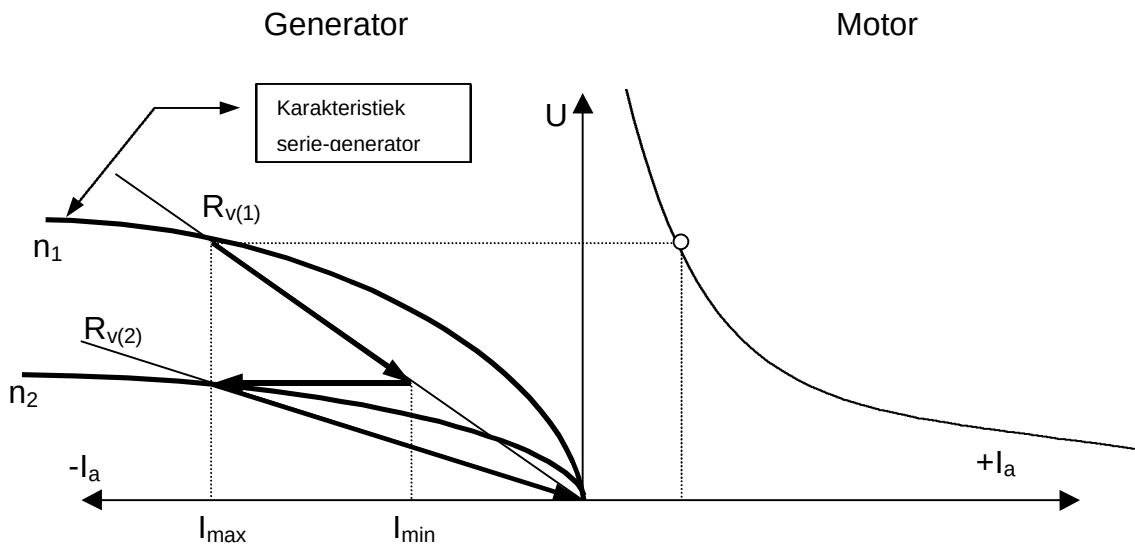


Fig.13.19 Weerstandremmen van een seriemotor

13.3.2.2 RECUPERATIEF REMMEN

Deze methode is niet mogelijk omdat een seriegenerator ongeschikt is om energie te leveren aan een elektrisch net.

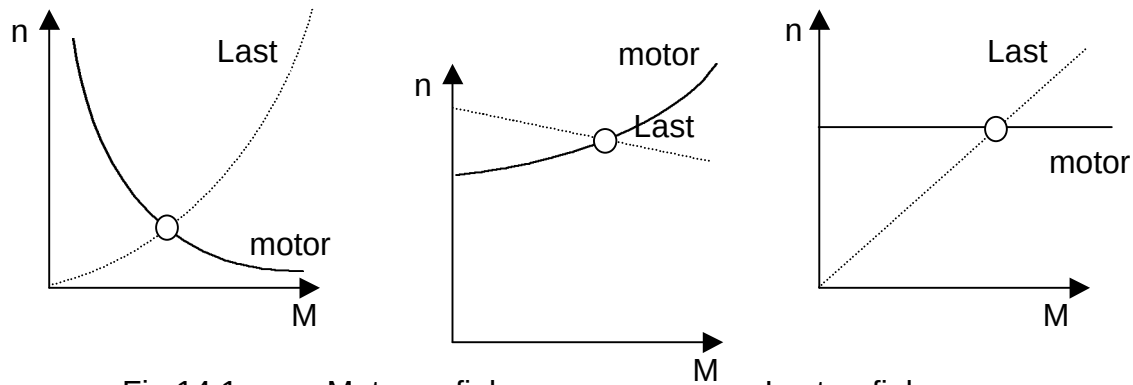
13.3.2.3 TEGENSTROOM REMMEN

Het principe is hetzelfde als bij de shuntmotor, alleen de methode om van draairichting te veranderen kan hier op twee manieren.

14. OEFENINGEN

1. Bespreek welke van de volgende toeren-koppelgrafieken voor motor en belasting een stabiel en welke een instabiel bedrijfspunt opleveren?

(a en c zijn stabiel b is instabiel)



2. Een gelijkstroom seriemotor neemt bij het inschakelen $1,5 \cdot I_N$ op als aanloopstroom. Hoeveel groter wordt het aanloopkoppel ten opzichte van het nominale koppel, als U veronderstelt:

a) magnetische flux $\Phi \propto I$;

b) magnetische flux $\Phi = f(I)$ volgens karakteristiek van fig.11.2 ?

($2,25 \cdot M_N$; $1,65 \cdot M_N$)

3. Een gelijkstroom shuntmotor bezit volgende gegevens:

nominale spanning $U_N = 220 \text{ V}$

nominale stroom $I_N = 24 \text{ A}$

nominaal toerental $n_N = 1480 \text{ min}^{-1}$

nominaal rendement $\eta_N = 0,8$

nullast toerental $n_0 = 1600 \text{ min}^{-1}$

a) Bereken de ankerweerstand R_a

b) Construeer de grafiek $I_a = f(M)$ bij verwaarlozing van de nullaststroom I_0 en de ankerreactie. Veronderstel ook $\Phi = \Phi_N$

($0,67 \Omega$; $I_a = f(M)$ = rechte door de oorsprong en door het punt)

($I_{aN} = 24 \text{ A}$ en $M_N = 27,2 \text{ Nm}$)

4. De shuntmotor uit oefening 3 moet in snelheid geregeld worden.
- In welk bereik moet de ankerspanning U geregeld worden opdat bij nominaal koppel en $\Phi = \Phi_N$ het toerental van $0,4.n_N$ tot n_N kan geregeld worden?
 - Tot welke verhouding moet de magnetische flux Φ verminderd worden, bij $U = U_N$, opdat het toerental bij $0,5.M_N$ belasting tot $1,2.n_N$ zou stijgen?
 - Welk toerental is maximaal bereikbaar door middel van veldverzwakking bij $I_a = I_{aN}$, $M = 0,6.M_N$ en $U = U_N$
(98 - 220 V ; $0,86.\Phi$; 2467 min^{-1})

5. Construeer schematisch volgende grafieken van een shuntmotor welke in toerental moet geregeld worden:

Koppel	$M = f(n)$
Elektrisch vermogen	$P = f(n)$
Ankerstroom	$I = f(n)$
Magnetische flux	$\Phi = f(n)$
Spanning	$U = f(n)$

- Snelheidsregeling met een regelbare ankerspanning U in het gebied $0 \leq n \leq n_N$ met constante flux $\Phi = \Phi_N = \text{cte}$ en $I_a = I_{aN}$.
- Snelheidsregeling door middel van veldverzwakking in het gebied $n_N \leq n \leq 2.n_N$ bij $U = U_N = \text{cte}$ en $I_a = I_{aN}$.

6. Een gelijkstroomgenerator met volgende kenmerken:

$I = 30,43 \text{ A}$; $U = 115 \text{ V}$; $n = 950 \text{ min}^{-1}$; $\eta = 0,78$; $3,5 \text{ kW}$ wordt gebruikt als motor. Bepaal het nuttig koppel van deze motor bij dezelfde spanning, stroom en toerental.

($M_n = 27,44 \text{ Nm}$)

7. Een vierpolige gelijkstroommotor heeft 440 actieve geleiders, verdeeld over 4 ankertakken. De afmetingen van de rotor zijn: $l = 20 \text{ cm}$ en $d = 16 \text{ cm}$. De magnetische inductie in de luchtspleet is $0,6 \text{ Wb/m}^2$ en de globale lengte van de 4 poolbogen komt overeen met 65 % van de omtrek van de rotor.

Enkele elektrische gegevens:

$$U = 240 \text{ V} ; I_a = 100 \text{ A} ; E = 235,8 \text{ V} \text{ en } \eta = 78 \text{ \%}.$$

Bereken het inwendig koppel, het askoppel het toerental en het nuttig vermogen.

$$(M_1 = 68,66 \text{ Nm} ; M_n = 54,5 \text{ Nm} ; n = 3280 \text{ min}^{-1} ; P_n = 18,72 \text{ kW})$$

8. Bij nullast is de rotorstroom van een gelijkstroommotor met onafhankelijke bekrachtiging 2,5 A bij $U = 120 \text{ V}$ en $n = 1250 \text{ min}^{-1}$. De ankerweerstand R_a bedraagt $0,18 \Omega$.

De motor wordt nu zodanig belast dat de rotorstroom stijgt tot 30 A, terwijl de flux in de luchtspleet hetzelfde gebleven is. Bereken in dit geval: het nieuwe toerental, het inwendig vermogen en het totale jouleverlies in het anker.

Bepaal tevens het toerental als de flux wordt herleid tot 75 % van de originele sterkte bij nullast, bij een ankerstroom van 50 A.

$$(n = 1198 \text{ min}^{-1} ; P = 3438 \text{ W} ; P_{Cu} = 162 \text{ W})$$

$$(n = 1547,5 \text{ min}^{-1} \text{ bij } I_a = 50 \text{ A})$$

9. Een gelijkstroommotor met onafhankelijke bekrachtiging levert een nuttig vermogen van 7,5 kW bij $I_a = 37 \text{ A}$, $U = 240 \text{ V}$ en $R_a = 0,24 \Omega$.

Bereken de inschakelstroom zonder aanzetweerstand.

Welke aanzetweerstand is vereist om de aanloopstroom te beperken tot 150 % van de vollaststroom.

$$(I = 1000 \text{ A} ; R_{az} = 4,084 \Omega)$$

10. Een seriemotor is aangesloten op 240 V en neemt een stroom op van 12 A. Het toerental $n = 1250 \text{ min}^{-1}$ het rendement $\eta = 78 \text{ \%}$ en $R_a + R_h + R_s = 0,75 \Omega$.

Bereken de inwendige spanning E , het inwendig koppel M_i en het nuttig- of askoppel M_n .

$$(E = 231 \text{ V} ; M_i = 21,18 \text{ Nm} ; M_n = 17,16 \text{ Nm})$$

11. Een gelijkstroommotor met onafhankelijke bekrachtiging heeft een nominaal vermogen van 30 kW bij $n = 500 \text{ min}^{-1}$ en $I_a = 75 \text{ A}$.
De totale ankerweerstand $R_a + R_h$ bedraagt $0,4 \Omega$ terwijl $E = 440 \text{ V}$.
Bereken de inschakelstroom bij een beginspanning van 50 V. Bereken ook het aanloopkoppel bij deze beginspanning. Bereken het nominale nuttig koppel.
Ter vereenvoudiging mag men het inwendig en het nuttig koppel aan elkaar gelijkstellen.
($I = 125 \text{ A}$; $M_{aanl} = 954,93 \text{ Nm}$; $M_n = 572,96 \text{ Nm}$)
12. Een gelijkstroommotor met onafhankelijke bekrachtiging neemt 20 A uit het net op bij $U = 220 \text{ V}$, tevens is de ankerketen $R_a + R_h = 0,2 \Omega$, het toerental $n = 2400 \text{ min}^{-1}$ en $\eta = 82 \%$.
Bepaal de inwendige spanning E en het nuttig- of askoppel.
($E = 216 \text{ V}$; $M_n = 14,36 \text{ Nm}$)
13. Een seriemotor van 4 kW is aangesloten op een gelijkspanning van 240 V en werkt met een totaal rendement van 80 %. Indien $R_a + R_h + R_s = 0,4 \Omega$, bereken dan de ankerstroom, de inwendige spanning, het inwendig koppel en het inwendig vermogen als het toerental van de rotor $n = 3000 \text{ min}^{-1}$.
($I = 20,83 \text{ A}$; $M = 15,36 \text{ Nm}$; $P = 4825 \text{ W}$)
14. Een seriemotor is aangesloten op een netspanning van 500 V. Bij een toerental van 550 min^{-1} is het nuttig koppel op de as 925 Nm en $R_a = 0,07 \Omega$; $R_h = 0,048 \Omega$; $R_s = 0,102 \Omega$; $P_w + P_{Fe} = 2663 \text{ W}$ en $\eta = 82 \%$.
Bereken het opgenomen vermogen en de jouleverliezen.
($P_1 = 64970 \text{ W}$; $P_{Cu} = 9031 \text{ W}$)
15. Een seriemotor van 8 kW werkt op een net van 500 V bij een toerental van 1000 min^{-1} en een rendement van 80 %.
Indien $R_a + R_h + R_s = 0,5 \Omega$ is, welke weerstand moet men in serie plaatsen om het toerental te laten dalen tot 900 min^{-1} bij gelijkblijvende ankerstroom.
De magnetische flux in de seriewikkeling is evenredig met de ankerstroom.
($2,45 \Omega$)

16. Bij vollast neemt een seriemotor, met een nuttig vermogen van 36,8 kW een stroom op van 98 A uit een net van 440 V. Het toerental van de rotor is 450 min^{-1} terwijl $R_a = 0,1 \, \Omega$; $R_h = 0,07 \, \Omega$ en $R_s = 0,12 \, \Omega$.

Bereken de toerentallen voor opgenomen stroomsterkten van 145 A en 50 A.

Bepaal ook de opgenomen stroom als het toerental stijgt tot 1100 min^{-1} .

Als vereenvoudiging neemt men de magnetisatie-curve lineair terwijl de ankerreactie te verwaarlozen is.

($n_1 = 294 \, \text{min}^{-1}$; $n_2 = 912 \, \text{min}^{-1}$; $I = 41,68 \, \text{A}$)

17. Een 220 V-seriemotor heeft een ankerweerstand van $0,2 \, \Omega$ en een seriewikkeling van $0,3 \, \Omega$. bij 13 A is het toerental 600 min^{-1} .

Bereken de opgenomen stroom bij verdubbeling van het inwendig koppel als het magnetisch veld hierbij 1,3 maal zo sterk wordt. Bereken ook het toerental bij dit nieuwe koppel.

Waarom wordt het magnetisch veld slechts 1,3 maal zo sterk?

Bereken de procentuele toename van het opgenomen vermogen.

($I = 20 \, \text{A}$; $n = 454 \, \text{min}^{-1}$; $\Delta P = 54 \, \%$)

18. Een 500 V-seriemotor maakt 1000 min^{-1} bij een stroomsterkte van 20 A. De weerstand van het anker bedraagt $0,5 \, \Omega$ en de seriewikkeling $0,2 \, \Omega$.

Bereken het toerental bij een netstroom van 10 A als de magnetische flux hierbij 70 % is van de flux bij 20 A.

($n = 1449 \, \text{min}^{-1}$)

19. Een seriemotor met een asvermogen van 12 kW, een nominale spanning van 500 V, een rendement $\eta = 85 \, \%$ en $R_a + R_h + R_s = 1 \, \Omega$ draait op een toerental van 1500 min^{-1} bij de nominale ankerstroom.

Bereken de aanloopweerstand indien we rekening houden met $I_{a(\max)} = 1,75 \cdot I_{aN}$

($R_{az} = 9,12 \, \Omega$)

20. Een shuntmotor is aangesloten op een net van 250 V. Bij een toerental van 1400 min^{-1} is de nullast-ankerstroom 1,2 A. De inwendige weerstand van anker- en hulpwikkeling is tezamen $0,2 \Omega$.
Hoe groot is het toerental indien de ankerstroom stijgt tot de nominale waarde van 16 A ?
De ankerreactie mag verwaarloosd worden.
($n = 1383 \text{ min}^{-1}$)
21. Een vierpolige shuntmotor van 2500 W neemt bij vollast 13,4 A ankerstroom op bij een netspanning van 220 V. Er zijn 480 actieve geleiders verdeeld over 4 parallele takken. De hoek tussen de poolspitsen, gezien vanuit het middelpunt van het anker, is $67,5$ meetkundige graden. De magnetische inductie in de luchtspleet $B = 0,75 \text{ Wb/m}^2$. De lengte van het anker is 20 cm, terwijl de diameter 12 cm is. De weerstand van de shuntwikkeling is 100Ω en het nominale toerental is 2000 min^{-1} .
Bereken het inwendig koppel en het totale rendement.
($M_i = 10,85 \text{ Nm}$; $\eta = 72,8 \%$)
22. Een shuntmotor van 12 kW heeft een rendement van 80 %.
De netspanning $U = 220 \text{ V}$, $R_a + R_h = 0,2 \Omega$ en $R_m = 100 \Omega$.
Indien $I_{\min} = I_N$, hoe groot is dan de maximale stroom in het anker en de aanloopweerstand?
($I_{a(\text{Max})} = 115,5 \text{ A}$; $R_{az} = 1,7 \Omega$)
23. Een 220 V-shuntmotor heeft $R_a + R_h = 0,2 \Omega$ en $R_m = 110 \Omega$.
De motor neemt 52 A uit het net op bij een toerental van 1000 min^{-1} en een totaal rendement van 85 %.
Bereken de inwendige spanning, het inwendig koppel, de nuttig koppel en het toerental bij 2 A netstroom en bij 32 A netstroom
($E = 210 \text{ V}$; $M_i = 100,3 \text{ Nm}$; $M_n = 92,9 \text{ Nm}$; $n_{2A} = 1047 \text{ min}^{-1}$; $n_{32A} = 1019 \text{ min}^{-1}$)

24. Een shuntmotor van 15 kW werkt met een rendement van 78% op een net van 240 V. De verschillende weerstanden zijn; $R_a + R_h = 0,25 \, \Omega$ en $R_s = 100 \, \Omega$. Bereken de maximaal toelaatbare ankerstroom ($I_{a(max)} = 1,5 \cdot I_{aN}$) bij het aanzetten en de aanloopweerstand.
($I_{a(max)} = 116,6 \, A$; $R_{az} = 1,808 \, \Omega$)
25. Een 220 V-shuntmotor heeft een ankerweerstand van $0,1 \, \Omega$ en een shuntweerstand van $55 \, \Omega$. Bij een netstroom van $64 \, A$ is het toerental $1070 \, \text{min}^{-1}$. De motor wordt nu zwaarder belast waardoor het toerental daalt tot $1050 \, \text{min}^{-1}$. Welke stroom neemt de motor op uit het net?
($I = 104 \, A$)
26. Van een 220 V-shuntmotor is $R_a = 0,3 \, \Omega$ en $R_m = 110 \, \Omega$. Bij een opgenomen stroom van $62 \, A$ is het toerental $800 \, \text{min}^{-1}$. Bereken het toerental bij nullast als de nullaststroom uit het net $6 \, A$ bedraagt.
($n = 650 \, \text{min}^{-1}$)
27. Een compoundmotor met lange shunt is aangesloten op een netspanning van 440 V. Volgende waarden zijn bekend; $n = 1000 \, \text{min}^{-1}$, $R_a + R_h = 0,2 \, \Omega$, $R_s = 0,1 \, \Omega$, $R_m = 110 \, \Omega$, $I = 100 \, A$ en $P_w + P_{Fe} = 2000 \, W$. Bereken de inwendige spanning, het inwendig vermogen, het inwendig koppel, het jouleverlies en het nuttig koppel.
($E = 411,2 \, V$; $P_i = 39475 \, W$; $M_i = 376,96 \, \text{Nm}$; $P_{Cu} = 4524,8 \, W$)
($M_n = 357,86 \, \text{Nm}$)

28. Een compoundmotor met korte shunt is aangesloten op een net van 440 V en werkt met een totaal rendement van 78 %. Het toegevoerd elektrisch vermogen is 11 kW bij $n = 1800 \text{ min}^{-1}$.

$$R_a + R_h = 0,03 \, \Omega ; R_s = 0,04 \, \Omega ; R_m = 219,5 \, \Omega$$

Bereken de opgenomen stroom uit het net, de ankerstroom, de inwendige spanning, het inwendig vermogen, het inwendig koppel, het nuttig koppel, het elektrisch rendement.

$$(I = 25 \text{ A} ; I_a = 23 \text{ A} ; E = 438,31 \text{ V} ; P_i = 10081 \text{ W})$$

$$(M_i = 53,48 \text{ Nm} ; M_n = 45,52 \text{ Nm} ; \eta = 91,6 \%)$$

29. Een afzonderlijk bekrachtigde motor heeft een nominaal toerental van 840 min^{-1} bij een ankerspanning van 440 V. De ankerweerstand is $0,4 \, \Omega$ en de nominale ankerstroom bedraagt 50 A.

De ankerspanning is regelbaar van 50 V tot 440 V. Het aangedreven werktuig vraagt een constant lastkoppel hetgeen gelijk is aan het nominaal motorkoppel.

Bereken het inwendig koppel, het toerental en de ankerstroom bij een ankerspanning van 50 V.

De magnetische flux blijft steeds constant.

$$(M_i = 238,7 \text{ Nm} ; n = 60 \text{ min}^{-1} ; I_a = 50 \text{ A})$$

1. NORMALISATIE

AFLEIDBARE GEGEVENS VAN EEN KENPLAAT

$$\eta = \frac{P_n}{P_t} \quad [1.1]$$

Met: η = rendement
 P_n = nuttig vermogen in W of kW
 P_t = toegevoerd vermogen in W of Kw

$$P_n = P_t - P_v \quad [1.2]$$

Met: P_v = vermogenverlies in W of kW

$$\zeta_t = \zeta_1 \cdot \zeta_2 \cdot \zeta_3 \cdot \dots \cdot \zeta_n \quad [1.3]$$

Met: $\eta_1 \dots \eta_n$ = afzonderlijk rendement per machine

$$M = F \cdot r \quad [1.4]$$

Met: M = askoppel in Nm
 F = kracht in N
 r = straal in m

$$P = M \cdot \omega \quad [1.5]$$

Met: P = asvermogen in W
 M = askoppel in Nm
 ω = hoeksnelheid in s

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad [1.6]$$

Met: ω = hoeksnelheid in s^{-1}
 n = toerental in min^{-1}

$$M = 9,55 \cdot \frac{P}{n} \quad [1.7]$$

Met: M = askoppel in Nm
 P = asvermogen in W
 n = toerental in min^{-1}

$$M = 9550 \cdot \frac{P}{n} \quad [1.8]$$

Met: P = asvermogen in kW

$$V \div M \quad (\text{is evenredig met}) \quad [1.9]$$

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \quad [1.10]$$

Met: V = bouwvolume in m^3
 d = rotordiameter machine in m
 l = rotorlengte machine in m

2. ALGEMENE GRONDSLAGEN

ONTSTAAN VAN EEN WISSELSPANNING

$$e = E_m \cdot \sin \alpha = E_m \cdot \sin (\omega.t) \quad [2.1]$$

Met: E_m = topwaarde wisselspanning in V
 α = doorlopen hoek t.o.v. de neutrale lijn in rad.
 ω = elektrische cirkelfrequentie in s^{-1}
 $\omega = 2.\pi.f$

ONTSTAAN VAN EEN KOPPEL

$$F = B \cdot I \cdot l \quad [2.2]$$

Met: F = Lorentzkracht in N
 B = Magnetische fluxdichtheid in Wb/m^2
 I = Stroomsterkte in A
 l = Geleiderlengte in het magnetisch veld in m

$$M = 2 \cdot F \cdot r = F \cdot d$$

$$M = B \cdot I \cdot l \cdot d \quad [2.3]$$

Met: M = Koppel op twee geleiders van een winding in Nm
 d = rotor -of ankerdiameter in m

4. HET TROMMELANKER

POOLSTEEK

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot d}{2 \cdot p} \quad [4.1]$$

Met: τ_p = poolsteek in m
 d = diameter anker in m
 p = aantal poolparen
 $2 \cdot p$ = totaal aantal polen

KEUZE VAN DE ANKERWIKKELING

$$I_{\text{tak}} = A \cdot J \quad [4.2]$$

Met: I_{tak} = stroom in ankertak in A
 A = draadsectie ankerwinding in mm^2
 J = stroomdichtheid in A/mm^2

$$I_a = I_{\text{tak}} \cdot 2 \cdot a \quad [4.3]$$

Met: I_a = ankerstroom in A
 I_{tak} = stroom in ankertak in A
 $2 \cdot a$ = totaal aantal ankertakken

$$R_a = \frac{R_{\text{tak}}}{2 \cdot a} \quad [4.4]$$

Met: R_a = totale ankerweerstand in Ω
 R_{tak} = weerstand ankertak in Ω

$$R_a = \frac{\tilde{n} \cdot I_{\text{tak}}}{A} \quad [4.5]$$

Met: ρ = soortelijke weerstand in $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ of $10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$
 I_{tak} = totale lengte draad ankertak in m
 A = doorsnede ankerdraad in mm^2 of m^2

6. BASISVERGELIJKINGEN

SPANNINGSVERGELIJKING

$$E = \frac{2 \cdot p \cdot N}{a} \cdot \Phi \cdot n \quad [6.1]$$

Met:

- E = opgewekte ankerspanning in V
- P = aantal poolparen
- A = aantal paar parallelle takken
- N = aantal ankerwindingen
- 2.N = aantal actieve ankerdraden
- Φ = poolflux in Vs
- n = toerental anker in s^{-1}

$$E = \frac{2 \cdot p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \Phi \cdot n \quad [6.2]$$

Met: n = toerental anker in min^{-1}

$$C_1 = \frac{2 \cdot p \cdot N}{a} \quad [6.3]$$

a = 1 voor een golfwikkeling

a = p voor een luswikkeling

$$E = C_1 \cdot \Phi \cdot n \quad [6.4]$$

UITGEBREIDE SPANNINGSVERGELIJKING

Generator: $U = E - I_a \cdot (R_a + R_h) - 2 \cdot U_B \quad [6.10]$

Motor: $U = E + I_a \cdot (R_a + R_h) + 2 \cdot U_B \quad [6.11]$

KOPPELVERGELIJKING

$$M_i = \frac{p \cdot n}{\pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_a \quad [6.5]$$

Met:

- M_i = inwendig koppel in Nm
- p = aantal poolparen
- a = aantal paar parallelle takken
- N = aantal ankerwindingen
- $2.N$ = aantal actieve ankerdraden
- Φ = poolflux in Vs
- I_a = ankerstroom in A

$$C_2 = \frac{p \cdot N}{\pi \cdot a} \quad [6.6]$$

$a = 1$ voor een golfwikkeling

$a = p$ voor een luswikkeling

$$M_i = C_2 \cdot \Phi \cdot I_a \quad [6.7]$$

ASKOPPEL EN VERLIESKOPPEL

Motorbedrijf

$$M_{as} = M_i - M_v \quad [6.8]$$

Met:

- M_{as} = askoppel motor in Nm
- M_i = inwendig koppel in Nm
- M_v = verlieskoppel in Nm

Generatorbedrijf

$$M_{as} = M_i + M_v \quad [6.9]$$

Met:

- M_{as} = askoppel generator in Nm

7. ENERGIE-OMZETTING

KOPERVERLIEZEN

$$P_{cu} = R_a \cdot I_a^2 + \frac{U^2}{R_m} \quad [7.1]$$

Met: $R_a \cdot I_a^2$ = som van de koperverliezen in de totale ankerketen in W

$\frac{U^2}{R_m}$ = koperverlies in de eventueel aanwezige shuntwikkeling in W

MECHANISCHE VERLIEZEN

$$P_w + P_{Fe}$$

Met: P_w = wrijvingsverlies in W

P_{Fe} = Ijzerverlies in W

VOLGORDE VAN ENERGIE-OMZETTING

GENERATORBEDRIJF

$$P_i = M_i \cdot \omega = E \cdot I_a \quad [7.2]$$

$$P_i = P_t - (P_w + P_{Fe}) \quad [7.3]$$

$$P_t = M_{as} \cdot \omega \quad [7.4]$$

$$P_w + P_{Fe} = M_v \cdot \omega \quad [7.5]$$

$$P_n = P_i - P_{Cu} \quad [7.6]$$

$$P_n = U \cdot I \quad [7.7]$$

MOTORBEDRIJF

$$P_i = P_t - P_{Cu} \quad [7.8]$$

$$P_t = U \cdot I \quad [7.9]$$

$$P_n = P_i - (P_w + P_{Fe})$$

$$[7.10]$$

$$P_n = M_{as} \cdot \omega$$

$$[7.11]$$

Met:

P_i = inwendig vermogen in W

P_t = toegevoegd mechanisch vermogen generator in W

P_t = toegevoegd elektrisch vermogen motor in W

P_n = nuttig elektrisch vermogen generator in W

P_n = nuttig mechanisch vermogen motor in W

P_w = wrijvingsverlies in W

P_{Fe} = Ijzerverlies in W

M_i = inwendig koppel in Nm

M_{as} = askoppel in Nm

ω = mechanische hoeksnelheid in s^{-1}

I_a = ankerstroom in A

U = netspanning in V

RENDEMENT

TOTAAL RENDEMENT

$$\zeta = \frac{P_n}{P_t} \quad [7.12]$$

Met voor generatorbedrijf: $P_n = U \cdot I$

$$P_t = M_{as} \cdot \omega$$

En voor motorbedrijf: $P_n = M_{as} \cdot \omega$

$$P_t = U \cdot I$$

ELEKTRISCH RENDEMENT

Voor generatorbedrijf

$$\zeta_e = \frac{P_n}{P_t} = \frac{P_n}{P_i} = \frac{U \cdot I}{E \cdot I_a} \quad [7.13]$$

Voor motorbedrijf

$$\zeta_e = \frac{P_n}{P_t} = \frac{P_i}{P_t} = \frac{E \cdot I_a}{U \cdot I} \quad [7.14]$$

RENDEMENTSKROMME

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

Met:

$$P_v = \left(P_w + P_{Fe} + \frac{U^2}{R_m} \right) + (R \cdot I^2)$$

Constante verliezen Kwadratische verliezen

Het rendement van een gelijkstroommachine bereikt een maximum wanneer de constante verliezen gelijk zijn aan de kwadratische.

12. GELIJKSTROOMMOTOREN

NORMAAL BEDRIJF

BASISVERGELIJKINGEN

INWENDIGE SPANNING E

$$\frac{E}{E_N} = \frac{\Phi}{\Phi_N} \cdot \frac{n}{n_N} \quad [12.1]$$

MOTORKOPPEL M

$$\frac{M}{M_N} = \frac{\Phi}{\Phi_N} \cdot \frac{I_a}{I_{aN}} \quad [12.2]$$

TOERENTAL n

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} \cdot \frac{\Phi_N}{\Phi} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} \cdot \left(\frac{\Phi_N}{\Phi} \right)^2 \quad [12.3]$$

STABIEL EN INSTABIEL BEDRIJF VAN EEN MOTOR

$$\left(\frac{dM}{dn} \right)_{\text{LAST}} > \left(\frac{dM}{dn} \right)_{\text{MOTOR}} \quad [12.4]$$

SHUNTMOTOR

STROOM-KOPPELGRAFIEK

$$\frac{M}{M_N} = \frac{I_a}{I_{aN}} \quad [12.5]$$

TOEREN-KOPPELGRAFIEK

$$\frac{n}{n_N} = K_1 - \frac{M}{M_N} \cdot K_2 \quad [12.6]$$

met : $\frac{U_N}{E_N} = K_1$ en $\frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} = K_2$

SERIEMOTOR

STROOM-KOPPELGRAFIEK

$$\frac{M}{M_N} = \frac{\Phi}{\Phi_N} \cdot \frac{I_a}{I_{aN}} = \left(\frac{I_a}{I_{aN}} \right)^2 \quad [12.7]$$

$$\frac{I_a}{I_{aN}} = \sqrt{\frac{M}{M_N}} \quad [12.8]$$

TOEREN-KOPPELGRAFIEK

$$\frac{n}{n_N} = K_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{M}{M_N}}} - K_2 \quad [12.9]$$

Met: $\frac{U}{E_N} = K_1$ en $\frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} = K_2 \quad (2)$

13. GELIJKSTROOMMOTOREN

GESTUURD BEDRIJF

BEGRENZING VAN DE AANLOOPSTROOM

AANLOOPWEERSTAND IN DE ANKERKETEN

$$I_{\max} = \frac{U}{R_a + R_{az}} \quad [13.1]$$

$$R_{az} = \frac{U}{I_{\max}} - R_a \quad [13.2]$$

AANLOOPSTROOMBEGRENZING MET EEN GESTUURDE GELIJKRICHTER

REGELING VAN HET TOERENTAL

$$n = \frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - I_a \cdot \frac{R_a}{C_1 \cdot \Phi} \quad [13.3]$$

TOERENTALREGELING BIJ EEN SHUNTMOTOR

VERANDEREN VAN DE ANKERSPANNING U

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} \quad [13.4]$$

VERANDEREN VAN DE FLUX

Voor het toerental is nog steeds vergelijking [12.3] geldig:

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} \cdot \frac{\Phi_N}{\Phi} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot R_a}{E_N} \cdot \left(\frac{\Phi_N}{\Phi} \right)^2$$

VOORSCHAKELWEERSTAND R_v IN DE ANKERKETEN

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} - \frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot (R_a + R_v)}{E_N} \quad [13.5]$$

Met: R_v = voorschakelweerstand

TOERENTALREGELING BIJ EEN SERIEMOTOR

VERANDEREN VAN DE ANKERSpanNING

Zie [12.9] met veranderlijke spanning U

VERANDEREN VAN DE FLUX

Zie [12.3] met Φ evenredig met I_a

VOORSCHAKELWEERSTAND R_v IN DE ANKERKETEN

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U}{E_N} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{M}{M_N}}} - \frac{I_{aN} \cdot (R_a + R_v)}{E_N} \quad [13.6]$$

AFREMMEN VAN GELIJKSTROOMMOTOREN

AFREMMEN VAN EEN SHUNTMOTOR

WEERSTANDSREMMEN

$$\frac{n}{n_N} = -\frac{M}{M_N} \cdot \frac{I_{aN} \cdot (R_a + R_v)}{E_N} \quad [13.7]$$

Met: remweerstand R_v

RECUPERATIEF REMMEN

$$E = U - I_a \cdot R_a \quad [13.8]$$

zolang $E > U$ zal de motor als generator werken

TEGENSTROOMREMMEN

$$I_a = \frac{U + E}{R_a} \quad [13.9]$$

AFREMMEN VAN EEN SERIEMOTOR

WEERSTANDSREMMEN

$$E = C_1 \cdot \Phi \cdot n$$

RECUPERATIEF REMMEN

Deze methode is niet mogelijk

TEGENSTROOM REMMEN

Het principe is hetzelfde als bij de shuntmotor