

# Typen van gelijkstroommotoren met hun karakteristieken

## Wegwijzer

Leereenheid 3 gaf een theoretische verklaring van de verschijnselen die bij alle gelijkstroommotoren voorkomen. In die theoretische benadering gingen we ervan uit dat de hoofddflux op de een of andere manier aanwezig was. Om in sommige toepassingen de nadruk te leggen op het constant blijven van de hoofddflux tijdens de werking werd uitzonderlijk gesproken over 'een onafhankelijk bekrachtigde motor'. Voor al de andere toepassingen hadden we in principe eveneens van een onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommotor kunnen spreken. Dat werd opzettelijk niet gedaan omdat de typische studie van het gedrag van de onafhankelijk bekrachtigde motor bij veranderlijke belasting slechts nu, in deze leereenheid, aan bod komt.

Deze leereenheid handelt uitvoerig over de verschillende motortypes. Net zoals bij generatoren wordt het motortype bepaald door de manier waarop de hoofddflux wordt gevormd. De schakelwijze van de bekrachtigingswikkeling(en) van motoren verloopt parallel met de schakelwijze van de bekrachtigingswikkeling(en) van generatoren, zodat hier ook sprake zal zijn van onafhankelijke bekrachtiging, shunt-, serie- en compound-bekrachtiging.

Opvallend is wel de grote verscheidenheid van motorgedrag en toepassingsgebied van de onderscheiden motortypes.

Omdat het toepassingsgebied van gelijkstroommotoren zich situeert in alle takken van de techniek, is een degelijke studie van de onderscheiden motortypen van belang. De gelijkstroomregeling is nog steeds de meest flexibele en nauwkeurige regeling en is bovendien zeer prijsgunstig bij grotere vermogens ( $> 15 \text{ kW}$ ).

9424

ENKEL VOOR KLASGEBRUIK

## 4.1 Motortypen

### 4.1.1 Algemene indeling

#### Doelstelling

- Volgens de manier van bekrachtiging een indeling van de motortypen opstellen.

De indeling van de motoren gebeurt volgens de manier van bekrachtiging of excitatie. Zo onderscheiden we motoren met:

- permanente magneten: van toepassing voor gelijkstroombmotoren met klein vermogen. Die motoren kunnen ook gerangschikt worden bij de onafhankelijk bekrachtigde motoren, de flux is dan niet regelbaar;
- onafhankelijke bekrachtiging: de bekrachtigingswikkeling wordt hier gevoed door een spanningsbron, onafhankelijk van de spanningsbron die de ankerserieketen voedt;
- shunt-, serie- en compoundbekrachtiging: de voedingsbron van de ankerketen levert tevens de nodige magnetisatiestroom.

### 4.1.2 Karakteristieken van gelijkstroombmotoren

#### Doelstellingen

- De algemene karakteristieke krommen van gelijkstroombmotoren opsommen.
- Het verband tussen de onderscheiden grootheden toelichten.

Zoals bij de generator geeft een grafiek het verband aan tussen twee veranderlijke grootheden terwijl al de andere grootheden constant worden gehouden.

Om de motortypen te onderscheiden zullen meestal de volgende karakteristieken in aanmerking worden genomen:

- de toerentalkromme  $n = f(I_a)$   
met  
 $U = \text{constant}$   
 $R_v = \text{constant}$  ( $R_v$  = weerstand van de veldketen);
- de koppelkromme  $T = f(I_a)$   
met  
 $U = \text{constant}$   
 $R_v = \text{constant}$ ;
- de rotatiefrequentie-koppelkromme  $n = f(T)$   
met  
 $U = \text{constant}$   
 $R_v = \text{constant}$ .

De toerental- en de koppelkromme van een motor geven het verband tussen een mechanische en een elektrische grootheid. De koppel-toerentalkromme geeft het verband tussen twee mechanische grootheden. Die kromme zal beter tot de verbeelding spreken en daarom ook van groot belang zijn.

### 4.1.3 Gebruikte symbolen

#### Doelstellingen

- De gebruikte symbolen van de onderscheiden motorwikkelingen weergeven.
- Het verband met de symbolen van de generatorwikkeling aantonen.

De klemmenaanduidingen van de motorwikkelingen zijn identiek aan deze van de generatorwikkelingen. De tabel in 2.1.3 is hier integraal toepasselijk.

## 4.2 Motor met onafhankelijke bekrachtiging

### 4.2.1 Kenmerkende eigenschappen

#### Doelstellingen

- De kenmerkende constructie-eigenschappen van een onafhankelijk bekrachtigde motor verduidelijken.
- De karakteristieke waarden van de elektrische grootheden omschrijven.
- Deze in verband brengen met de waarde van de elektrische grootheden van een onafhankelijk bekrachtigde generator.

In fig. 125 is de onafhankelijk bekrachtigde motor constructief vereenvoudigd weergegeven (zie ook fig. 52). Fig. 126 geeft het schakelschema.

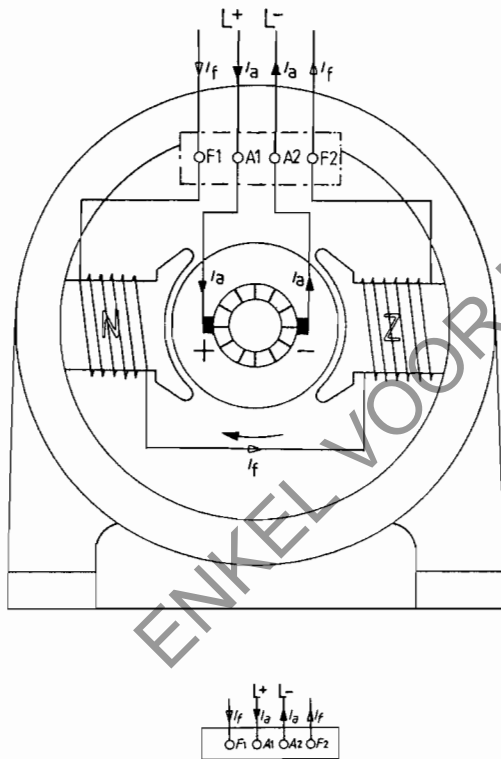


fig. 125

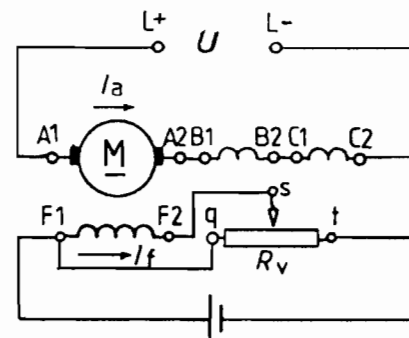


fig. 126

De bekrachtigingsstroom of excitatiestroom  $I_f$  wordt geleverd door een gelijkspanningsbron die helemaal onafhankelijk is van de gelijkspanningsbron die de ankerserieketen voedt. De bekrachtigingswinding voorziet in de hoofdflux

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

Om het energieverlies te beperken wordt meestal de bekrachtigingsstroom klein gehouden. Om de nodige flux op te wekken bestaat de bekrachtigingswinding uit veel windingen van dunne draad.

De coëfficiënt van zelfinductie

$$L_f = \frac{N_f^2}{R_m}$$

is groot, waardoor de bekrachtigingsketen erg inductief is. De ohmse weerstand is relatief hoog omdat er veel windingen van dunne draad zijn ( $R = \frac{\rho \cdot l}{A}$ ).

#### 4.2.2 Karakteristieken

##### a Toerentalkromme

$$n = f(I_a)$$

met

$U = \text{constant}$

$R_v = \text{constant}$

##### Doelstellingen

- Het schema voor het opnemen van de toerentalkromme tekenen.
- De werkwijze voor het opnemen van deze karakteristieken toelichten.
- Het verloop van de toerentalkromme tekenen.
- Met behulp van de basisformules het verloop verklaren.

We regelen de motor bij nullast op nominale snelheid d.m.v. de veldregelaar  $R_v$ .

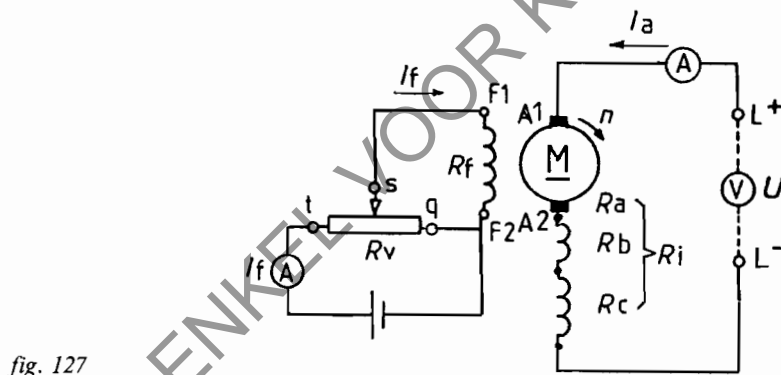


fig. 127

Vervolgens gaan we de motor belasten. Deze motorbelasting zal dan gevormd worden door bv. een generator die op de motor gekoppeld is en een regelbare belasting (lampenweerstand) voedt. Ook een bandrem, rem van Prony of Foucaultrem kan voor de nodige belasting zorgen. Bij elke belasting meten we het toerental en de opgenomen stroom  $I_a$ . Al de andere elektrische grootheden houden we constant.

De tegenspanning bij motorwerking  $E_t = k \cdot \phi \cdot n$

Daaruit volgt

$$n = \frac{E_t}{k \cdot \phi} = \frac{U - R_i \cdot I_a}{k \cdot \phi} \quad (1)$$

met

$$R_i = R_a + R_b + R_c$$

Als de klemspanning  $U$  en de weerstand van de veldketen  $R_v$  constant zijn, is de bekrachtigingsstroom

$$I_f = \frac{U}{R_v + R_f}$$

en de flux  $\phi = \frac{N_f \cdot I_f}{R_m}$  ook constant.

Vermits de inwendige spanningsval  $R_i \cdot I_a$  klein is t.o.v.  $U$  mogen we stellen dat

$$n \approx \frac{U}{k'}$$

Omdat de klemspanning  $U$  constant is, is ook de snelheid constant en onafhankelijk van de belasting van de motor.

In fig. 128 stellen we de toerentalkromme voor.

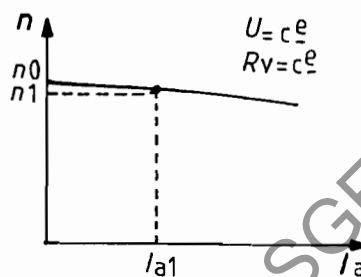


fig. 128

#### Toelichting

##### Spanningsval en ankerreactie

Uit formule (1) kunnen we vaststellen dat door de toenemende inwendige spanningsval de rotatiefrequentie bij toenemende belasting enigszins afneemt. Anderzijds weten we dat door de toenemende ankerreactie de totale flux daalt. Dat heeft bij toenemende belasting een snelheidstoename tot gevolg. Beide invloeden compenseren elkaar ongeveer. Daardoor kunnen we stellen dat de rotatiefrequentie van een onafhankelijk bekrachtigde motor bij toenemende belasting ongeveer constant is. Bij grote machines is de invloed van de inwendige spanningsval groter dan de invloed van de ankerreactie waardoor de rotatiefrequentie iets afneemt.

##### Snelheidsregeling

Uit de formule

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

blijkt dat de snelheid soepel kan geregeld worden door de klemspanning  $U$  of de flux  $\phi$  regelbaar te maken. In de praktijk worden beide mogelijkheden toegepast. Ook de regelcombinatie van beide factoren  $U$  en  $\phi$  is mogelijk.

##### Wiskundige benadering:

$$n = f(I_a)$$

met

$U = \text{constant}$

$R_v = \text{constant}$

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

Aangezien  $U$  en  $R_v$  constant zijn, is ook

$$I_f = \frac{U}{R_v + R_f} \text{ constant}$$

De flux  $\phi = \frac{N_f \cdot I_f}{R_m}$  zal bijgevolg ook constant zijn.

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

of  $n = -k' I_a + k''$

Dit stelt een rechte voor met negatieve richtingscoëfficiënt die niet door de oorsprong gaat (fig. 129).

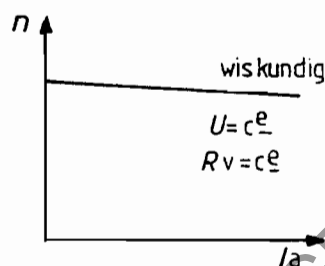


fig. 129

#### b Koppelkromme

$$T = f(I_a)$$

met

$$U = \text{constant}$$

$$R_v = \text{constant}$$

#### Doelstellingen

- Het prinscipeschema voor het opnemen van de koppelkromme tekenen.
- De werkwijze voor het opnemen van deze karakteristiek toelichten.
- Het verloop van de koppelkromme tekenen.
- Met behulp van basisformules het verloop verklaren.

Voor het opnemen van de koppelkromme gebruiken we dezelfde opstelling als aangegeven in fig. 127. We belasten de motor met bv. een remdynamo. De remdynamo maakt het mogelijk om de motorbelasting geleidelijk op te drijven en gelijktijdig het ontwikkelde koppel te bepalen (kracht ' $F$ ') op afstand ' $T$ ' van de motoras). Bij elke ingestelde belastingswaarde meten we de opgenomen stroomsterkte en bepalen we het koppel ' $T$ ' dat op de motoras ter beschikking komt.

Het elektromechanisch motorkoppel  $T = k \cdot \phi \cdot I_a$ .

Met  $U$  en  $R_v$  constant is ook de bekrachtigingsstroom

$$I_f = \frac{U}{R_v + R_f}$$

en de flux  $\phi = \frac{N_f \cdot I_f}{R_m}$  constant.

Het elektromechanisch motorkoppel  $T = k' \cdot I_a$  is recht evenredig met de ankerstroom  $I_a$  (fig. 130).

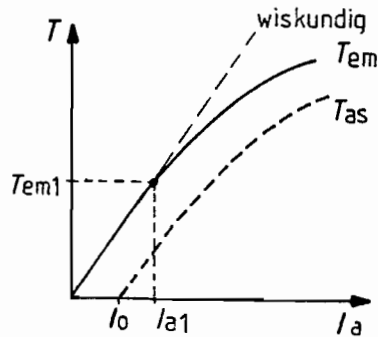


fig. 130

De door de motor opgenomen stroomsterkte  $I_a$  wordt praktisch uitsluitend bepaald door de aangelegde belasting van de motor.

*Wiskundige benadering:*

$$T = k \cdot \phi \cdot I_a$$

Daar  $U$  en  $R_v$  constant zijn, zijn ook  $I_f = \frac{U}{R_v + R_f}$  en  $\phi = \frac{N_f \cdot I_f}{R_m}$  constant.

Dus  $T = k' I_a$

Dit geeft het verloop van een rechte door de oorsprong (fig. 130)

*Toelichting*

*Nuttig koppel*

Uit de algemene theorie weten we dat het nuttig koppel dat op de as ter beschikking is, kleiner is dan het elektromechanisch koppel:  $P_{as} = P_{em} - P_{Fe} - P_m$ .

De curve die het nuttig motorkoppel geeft, ligt dus iets lager dan de curve van het elektromechanisch koppel (fig. 130)

*Nullaststroom*

De stroomsterkte  $I_0$  (fig. 130), uit het net opgenomen als de motor op nullast draait, is nodig om de wrijvings- en ijzerverliezen te compenseren.

*Ankerreactie*

Wanneer de belasting toeneemt, zal de ankerreactie meer invloed beginnen uit te oefenen. De totale flux neemt hierdoor geleidelijk af met het gevolg dat de kromme meer en meer zal afbuigen naar de  $I_a$ -as toe. Het koppel neemt bij grote belasting niet meer lineair toe.

*c Snelheid-koppelkromme*

$$n = f(T)$$

met

$U = \text{constant}$

$R_v = \text{constant}$

#### Doelstellingen

- Het verband tussen de toerentalkromme, koppelkromme en snelheid-koppelkromme illustreren.
- De snelheid-koppelkromme tekenen en de hoofdeigenschap van de onafhankelijk bekrachtigde motor afleiden.

Deze kromme kan afgeleid worden uit de vorige twee karakteristieken. Voor een reeks waarden van de ankerstroom  $I_a$  bepalen we de waarden van  $n$  en  $T$

bv. voor  $I_a = 0$  is  $n_0$  (fig. 128) en  $T_{em} = 0$  (fig. 130)

voor  $I_a = I_{a1}$  is  $n = n_1$  (fig. 128) en  $T_{em} = T_{em1}$  (fig. 130)



We zetten de reeks bekomen waarden uit in een assenstelsel en bekomen de snelheid-koppelkarakteristiek van fig. 131.

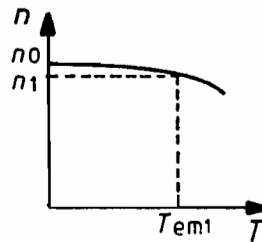


fig. 131

We stellen vast dat de rotatiefrequentie nagenoeg constant blijft bij veranderlijk elektromagnetisch koppel.

#### 4.2.3 Snelheidsregeling van de onafhankelijk bekrachtigde motor

##### Doelstellingen

- Aan de hand van een formule de rotatiefrequentie-regelfactoren afleiden.
- Het verloop van de rotatiefrequentie van een onafhankelijk bekrachtigde motor, belast met een constant tegenwerkend koppel, onderzoeken als men de rotatiefrequentie met de ankerspanning wil regelen.
- Het verloop van de karakteristieken  $n = f(U)$  en  $P = f(n)$  tekenen en het verloop toelichten.
- Het verloop van de rotatiefrequentie van een onafhankelijk bekrachtigde motor bij constant opgenomen vermogen onderzoeken, als men de rotatiefrequentie met de bekrachtigingsstroom wil regelen.
- Het verloop van de karakteristieken  $n = f(I_m)$  en  $T = f(n)$  tekenen en het verloop toelichten.
- De beperktheid van het 'snelheidsregelgebied' toelichten.

Uit par. 3.5.2 weten we reeds dat de snelheidsregeling ( $n \approx \frac{U}{k \cdot \phi}$ ) mogelijk is door:

- de ankerspanning te regelen;
- de bekrachtigingsstroom te regelen;
- de ankerspanning en de bekrachtigingsstroom te regelen.

##### a Regeling van de ankerspanning bij een motor met constant tegenwerkend koppel

Het elektromechanisch moment  $T_{em} = k \cdot \phi \cdot I_a$  en de magnetisatiestroom  $I_f$  worden constant verondersteld. Praktisch stellen we dat de motorbelasting niet verandert en de hoofdflex constant blijft.

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

Vermits  $\phi$  constant is, is ook  $I_a$  constant en

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

Het verloop van  $n = f(U)$  is in fig. 132 weergegeven.

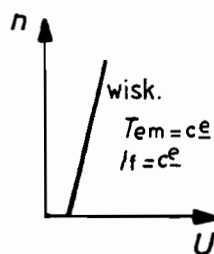


fig. 132

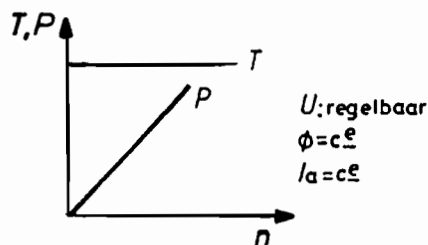


fig. 133

De snelheid verandert evenredig met de aangelegde spanning. Het nuttig vermogen

$$P_n = \omega T \text{ en } 2\pi n \cdot T = k'n$$

is evenredig met de rotatiefrequentie.

Samengevat: zie fig. 133.

#### Toelichting

##### Spanningsregeling

De ankerspanning kan men regelen door:

- het plaatsen van een voorschakelweerstand in de ankerketen;
- een regeltransformator met gelijkrichter;
- een gestuurde gelijkrichter.

##### Snelheidsregelgebied

De minimale snelheid van de motor wordt beperkt door de ventilatie (afkoeling).

De maximale snelheid van de motor wordt beperkt door de mechanische constructie en commutatiemoeilijkheden.

#### b Regeling van de bekrachtigingsstroom van een motor met constant vermogen

De ankerspanning 'U' en het opgenomen vermogen  $U \cdot I_a$  zijn constant verondersteld.

Vermits  $P = U \cdot I_a$  constant is, is ook  $I_a$  constant.

De snelheid

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

vermits  $R_a I_a$  klein is t.o.v.  $U$ .

Dus  $k \cdot \phi \cdot n = U$

of  $\phi \cdot n = U = \text{constant}$

Dit is de vergelijking van een hyperbool ( $xy = \text{constant}$ ).

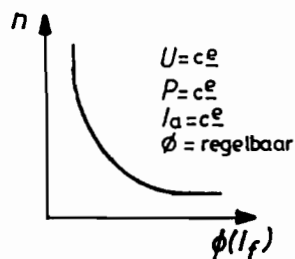


fig. 134

De snelheid verandert niet lineair met de fluxverandering of verandering van de bekrachtigingsstroom.

Aangezien we uitgaan van een constant vermogen kunnen we stellen

$$P_n = \omega \cdot T = 2\pi n \cdot T = \text{constant}$$

of  $n \cdot T = \text{constant}$  (hyperbool).

Grafisch geeft dat:

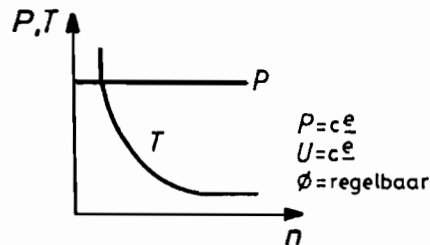


fig. 135

#### Toelichting

##### a Fluxregeling

De fluxregeling gebeurt door een veldregelaar in serie met de bekrachtigingswikkeling te plaatsen.

##### b Regelgebied

Aangezien de flux niet tot nul kan worden geregeld en de maximum flux beperkt is door verzadiging, is het regelgebied, vooral voor de laagste snelheden, beperkt.

#### 4.2.4 Aanlopen van een onafhankelijk bekrachtigde motor

##### Doelstellingen

- De werkwijze voor het aanlopen en afschakelen van een onafhankelijk bekrachtigde motor verklaren.
- De middelen die een krachtige aanloop opleveren, omschrijven.

De uitleg zoals gegeven in 3.6 is hier integraal toepasselijk.

Om een krachtige aanloop te verkrijgen moet het aanzetmoment ( $T = k \cdot \phi \cdot I_a$ ) zo groot mogelijk zijn. We regelen de flux op maximum (veldregelaar uitgeschakeld) en voor de ankerstroom laten we de maximum toegelaten stroomsterkte toe. De onafhankelijk bekrachtigde motor heeft een krachtig aanzetkoppel. Naarmate de aanzetstroom groter is, zal ook het aanzetkoppel groter zijn. Naarmate de rotatiefrequentie toeneemt, schakelen we de aanzetweerstand geleidelijk uit. Na het volledig uitschakelen van de aanzetweerstand drijven we de snelheid op tot de gewenste waarde door de veldregelaar geleidelijk in te schakelen.

Voor het afschakelen van de motor moet er steeds op gelet worden dat de inductieve bekrachtigingsketen niet plots wordt onderbroken (hoge spanning van zelfinductie).

Om te hoge snelheden te vermijden (op hol slaan) schakelen we eerst de ankerspanning uit en pas daarna de veldketen. Bij het inschakelen is dat net andersom. We zetten dan eerst de bekrachtigingsspoel onder spanning om daarna de ankerspanning aan te leggen.

### 4.3 De shuntmotor

#### 4.3.1 Kenmerkende eigenschappen

##### Doelstellingen

- De kenmerkende constructie-eigenschappen van een shuntmotor verduidelijken.
- De typische eigenschappen van de samenstellende stroomkringonderdelen omschrijven.

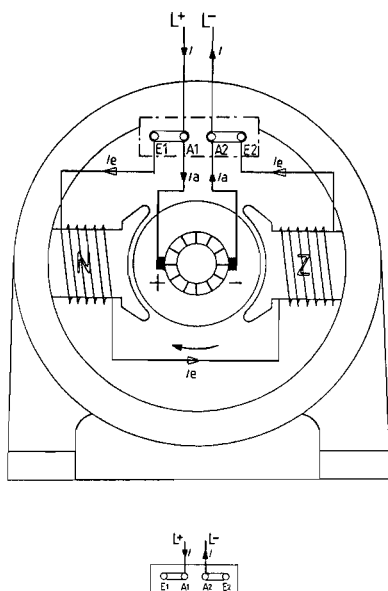


fig. 136

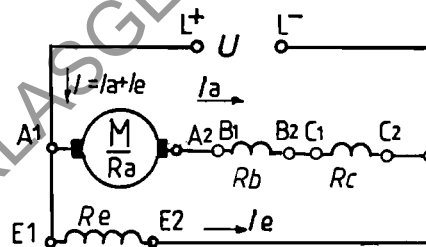


fig. 137

In fig. 136 is de shuntmotor constructief vereenvoudigd weergegeven. De hulp- en compensatiepolen zijn omwille van de duidelijkheid niet getekend. In het principe-aansluitschema (fig. 137) zien we dat de shuntwikkeling parallel staat met de ankerserieketen die de anker-, de hulppool- en de compensatiewikkeling bevat.

Constructief is de shuntmotor identiek aan de shuntgenerator. De ohmse weerstand van de parallel geschakelde veldwikkeling (shuntwikkeling) is groot t.o.v. de weerstand van de ankerserieketen. De shuntwikkeling is zeer inductief. Zoals op fig. 137 duidelijk blijkt, is de veldwikkeling tijdens normaal bedrijf op de volle netspanning aangesloten.

#### 4.3.2 Karakteristieken

##### a Toerentalkromme

$$n = f(I_a)$$

met

$U = \text{constant}$

$R_v = \text{constant}$

### Doelstellingen

- Het prinsipschema voor het opnemen van de toerentalkromme tekenen en de werkwijze voor het opnemen van die karakteristiek toelichten.
- Het verloop van de toerentalkromme tekenen en met behulp van basisformules het verloop verklaren.
- De invloed van de ankerreactie op het verloop van de rotatiefrequentie omschrijven.
- Uit basisformules het verloop van de toerentalkromme wiskundig afleiden.

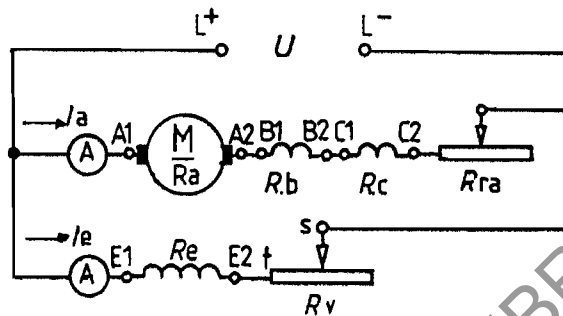


fig. 138

We regelen door middel van de weerstand  $R_v$  de motor op nominale snelheid, nadat de aanzetweerstand  $R_{ra}$  werd uitgeschakeld. Vervolgens belasten we geleidelijk de motor en meten bij elke deelbelasting de ankerstroom en het toerental. Alle andere grootheden blijven constant (fig. 138).

Vermits  $U$ ,  $R_e$  en  $R_v$  constant zijn, is ook

$$\frac{U}{R_e + R_v} = I_e$$

en dus ook de flux

$$\phi = \frac{N_e \cdot I_e}{R_m} \text{ constant.}$$

Uit  $E_t = k \cdot \phi \cdot n$  volgt de rotatiefrequentie

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

Bij toenemende motorbelasting zal de ankerstroom toenemen met het gevolg dat de rotatiefrequentie enigszins afneemt. Ten gevolge van de ankerreactie zal, bij toenemende belasting, de flux  $\phi$  een weinig afnemen. Daardoor zal de rotatiefrequentie toenemen. In de praktijk is de invloed van de inwendige spanningsval iets groter dan de invloed van de ankerreactie. Daardoor zal de rotatiefrequentie, zij het in geringe mate, dalen bij toenemende motorbelasting.

In fig. 139 is het verloop van de rotatiefrequentie in functie van de belastingsstroom weergegeven.

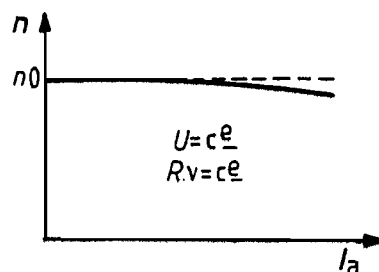


fig. 139

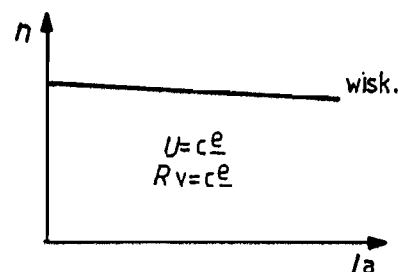


fig. 140

Wiskundige benadering:

$$n = f(I_a)$$

met

$$U = \text{constant}$$

$$R_v = \text{constant}$$

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

Vermits we  $U$ ,  $\phi$  en  $R_i$  als constant beschouwen, is  $n = -K \cdot I_a + K'$

Dat is de vergelijking van een rechte met negatieve richtingscoëfficiënt die niet door de oorsprong gaat (fig. 140).

b Koppelkromme

$$T = f(I_a)$$

met

$$U = \text{constant}$$

$$R_v = \text{constant}$$

#### Doelstellingen

- Het prinsipschema voor het opnemen van de koppelkromme tekenen.
- De werkwijze voor het opnemen van deze karakteristiek toelichten.
- Het verloop van de koppelkromme tekenen en met behulp van basisformules het verloop verklaren.
- De invloed van de ankerreactie, de wrijvings- en ijzerverliezen op het verloop van de koppelkromme toelichten.

Voor het opnemen van de koppelkromme gebruiken we de opstelling zoals in fig. 138. Met een remdynamo, bandrem, Foucaultrem of rem van Prony belasten we de motor en berekenen we bij elke deelbelasting het ontwikkelde motorkoppel.

Het elektromechanisch koppel  $T = k \cdot \phi \cdot I_a$

Daar  $U$ ,  $R_e$  en  $R_v$  constant zijn, zijn de bekrachtigingsstroom

$$I_e = \frac{U}{R_e + R_v}$$

en de flux  $\phi = \frac{N_e \cdot I_e}{R_m}$  ook constant, dus  $T = k' \cdot I_a$

Dat is de vergelijking van een rechte door de oorsprong (fig. 141).

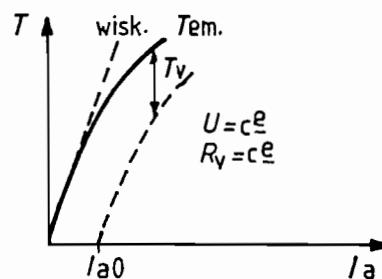


fig. 141

Bij toenemende belasting zal de hoofdflex  $\phi$  door de ankerreactie iets afnemen. Gevolg daarvan is dat de koppelkromme afbuigt naar de  $I$ -as toe. Het nuttig koppel, gemeten op de motoras, is iets kleiner dan het elektromechanisch koppel:

$$T_{\text{nuttig}} = T_{em} - T_v$$

met

$T_v$ : het verlieskoppel, d.w.z. het koppel dat nodig is om de wrijvings- en ijzerverliezen te overwinnen.

In fig. 141 is het nuttig motorkoppel voorgesteld. De ankerstroom  $I_a$  is nodig om het totale verlieskoppel te overwinnen.

### c Snelheid-koppelkromme

$$n = f(T)$$

met

$$U = \text{constant}$$

$$R_v = \text{constant}$$

#### Doelstellingen

- Uit de toerental-kromme en de koppelkromme de snelheid-koppelkromme afleiden.
- Uit de basisformules het verloop van de snelheid-koppelkromme wiskundig afleiden.

Zoals bij de onafhankelijk bekrachtigde motor leiden we deze kromme af uit de toerental- en koppelkromme.

Het resultaat is weergegeven in fig. 142.

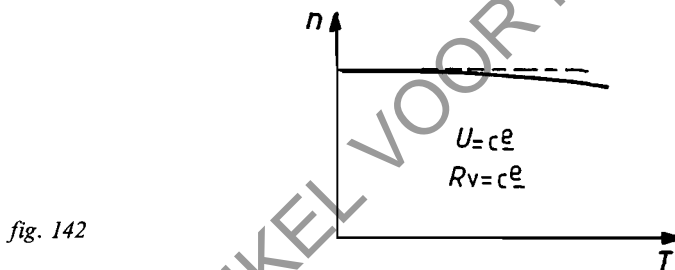


fig. 142

Wiskundige benadering:

$$E_t = U - R_i I_a$$

$$k \cdot \phi \cdot n = U - R_i \cdot \frac{T}{k' \cdot \phi}$$

$$n = \frac{U}{k \cdot \phi} - \frac{R_i}{k' \cdot k \cdot \phi^2} \cdot T$$

$$n = K - K' \cdot T$$

Dit is een rechte met negatieve richtingscoëfficiënt die niet door de oorsprong gaat (fig. 143).

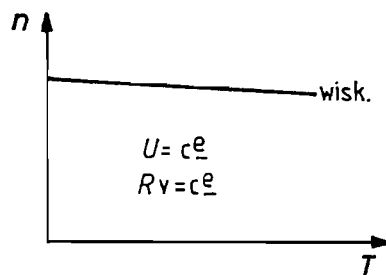


fig. 143

#### 4.3.3 Snelheidsregeling bij constant koppel

##### Doelstelling

- Aan de hand van basisformules de snelheidsregeling van een shuntmotor bij constant koppel toelichten.

Binnen bepaalde grenzen is het mogelijk de rotatiefrequentie te regelen bij constant werk-koppel. We veronderstellen de voedingsspanning  $U$  constant en regelen de rotatiefre-quentie door de flux te regelen. Dat kan eenvoudig gebeuren door de bekrachtigings-stroom  $I_e$  te regelen door middel van de veldregelaar  $R_v$  (fig. 144).

We weten dat

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

Uit deze formule blijkt dat indien de flux  $\phi$  toeneemt ( $I_e \nearrow$ ), de snelheid afneemt en daar  $T = k \cdot \phi \cdot I_a = \text{constant}$ , moet  $I_a$  afnemen.

Met een kleinere snelheid komt een kleinere ankerstroom overeen.

De snelheid door fluxvermeerdering kan niet willekeurig laag geregeld worden wegens het verzadigingsverschijnsel.

Op dezelfde wijze zal bij afnemende flux ( $I_e \searrow$ ), de snelheid toenemen en de ankerstroom toenemen. De snelheid kan niet willekeurig hoog geregeld worden omdat de ankerserie-keten slechts een beperkte stroom mag voeren (gevaar voor verbranden en slechte com-mutatie).

#### 4.3.4 Aanlopen van de shuntmotor

##### Doelstellingen

- Het prinsipschema voor het aanlopen van een shuntmotor tekenen.
- De constructiebijzonderheden toelichten.

De noodzaak van een aanloopweerstand werd in de algemene uitleg uitvoerig toegelicht (3.6). Bij elke aanloop zal men ernaar streven om de aanzetstroom te beperken tot de maximum toegelaten waarde. Daarnaast zal men een maximum aanzetkoppel nastreven. De aanzetweerstand is zodanig gedimensioneerd dat de aanzetstroom zijn maximum toe-gelaten waarde bereikt. Om het maximum aanzetkoppel  $T = k \cdot \phi \cdot I_a$  te bekomen moet de flux bij het aanzetten zo groot mogelijk zijn. De schakeling is dan zodanig uitgevoerd dat de shuntwikkeling vanaf het eerste ogenblik op de volle netspanning wordt aangeslo-ten. Het prinsipschema is in fig. 144 weergegeven.

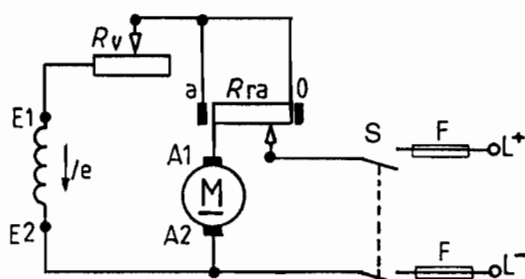


fig. 144



Opdat de flux bij inschakelen zo groot mogelijk zou zijn, staat de veldregelaar  $R_v$  volledig uitgeschakeld.

Vanaf het ogenblik dat de motor op spanning komt is de aanzetweerstand volledig ingeschakeld. Ook de veldketen ( $R_v$  uitgeschakeld) krijgt vanaf het eerste ogenblik de volle netspanning. Daar de shuntwikkeling zeer inductief is, kan de stroom  $I_e$  niet plots maximaal worden. Gevolg hiervan is dat de flux geleidelijk stijgt en het aanzetkoppel klein is. Naarmate de rotatiefrequentie stijgt, schakelen we geleidelijk de aanzetweerstand uit tot nul. Het uitgeschakelde deel van de aanzetweerstand (fig. 144) komt tijdens de aanloop in serie te staan met de veldketen.

Aangezien de aanzetweerstand zeer klein is t.o.v. de waarde van de weerstand van de shuntketen is deze invloed verwaarloosbaar. Om echter na aanloop de aanzetweerstand volledig uit te schakelen, voorziet men een eindcontact 'a' dat dit schakeltechnisch mogelijk maakt. We merken in fig. 144 eveneens op dat bij het afschakelen van de motor de shuntketen parallel op de ankerserietketen blijft staan. Dat is noodzakelijk om de opgehopte energie in de shuntketen geleidelijk in warmte om te zetten in de ankerserietketen.

#### 4.3.5 Remmen van de shuntmotor

##### Doelstellingen

- Aan de hand van enkele praktische probleemstellingen de noodzaak van het remmen van een shuntmotor aantonen.
- De verschillende methoden die bij het remmen worden toegepast met hun kenmerkende remeigenschappen toelichten.

##### a Verantwoording

Bij een aantal aandrijvingen van werktuigmachines is het soms nodig dat in bepaalde, welomschreven bedrijfssituaties, de aandrijvende motor het aangedreven werktuig moet afremmen.

##### Voorbeelden

- 1 Bij bepaalde toepassingen (robotisering) moet een gelijkstroommotor zeer snel van draaizin kunnen veranderen. Na het afschakelen dient de motor snel afgeremd te worden om daarna zijn drijvend koppel in de andere zin te ontwikkelen.
- 2 Bij elektrische tractievoertuigen moet het aangedreven voertuig in betrekkelijk korte tijd tot stilstand worden gebracht. Anderzijds moet de snelheid worden afgeremd wanneer het tractievoertuig een helling afdalt.
- 3 Bij hefwerktuigen of liften is het noodzakelijk dat een dalende last wordt afgeremd.

Principieel komt het remmen altijd neer op een omvorming van kinetische energie van het bewegende werktuig naar een andere vorm van energie, bv. warmte-energie (remschoenen) of elektrische energie (terug naar het net te sturen of onder de vorm van warmte in een ohmse weerstand).

Indien de kinetische energie groot is, is mechanisch, pneumatisch of hydraulisch remmen moeilijk omdat de vrijgekomen warmte-energie snel moet worden afgevoerd. Daarbij komt dat die energie meestal verloren gaat. Wanneer het af te remmen voertuig een grote kinetische energie bezit (bv. tractievoertuigen) dan verkiest men een remmethode die de kinetische energie van het bewegend voertuig omvormt tot elektrische energie die dan terug naar het voedingsnet wordt gestuurd. Die remwijze is bedrijfszeker en economisch zeer interessant, zodat ze bij grote vermogens de voorkeur geniet.

##### b Methoden

We onderscheiden drie methoden van elektrisch remmen:

- 1 remmen zonder terugwinnen van energie;
- 2 remmen met terugwinnen van energie;
- 3 tegenstroomremmen.

### 1 Remmen zonder terugwinnen van energie

Deze methode wordt ook *weerstandremmen* of *reostatisch remmen* genoemd.

Bij dit remmen blijft de shuntwikkeling op de netspanning aangesloten om de maximum flux te behouden (fig. 145). De draaiende motor wordt afgeschakeld van het net en onmiddellijk op een ohmse weerstand aangesloten. Gevolg hiervan is dat de nog draaiende motor een spanning  $E = k \cdot \phi \cdot n$  genereert.

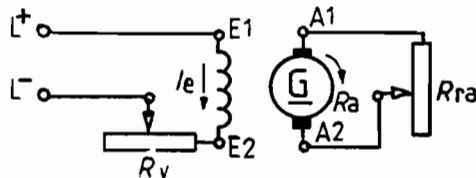


fig. 145

Op het eerste moment zijn  $n$  en  $\phi$  maximaal en dus ook de gegenereerde spanning. De motor werkt nu als generator en stuurt een stroom  $I$  door de aangesloten weerstand (dat kan bv. de aanzetweerstand zijn). Die stroomsterkte veroorzaakt in de weerstand een joule-effect  $R \cdot I^2$ . De vrijgekomen warmte gaat ten koste van de kinetische energie van de nog draaiende motor. De motor remt dus af. De remkracht kan geregeld worden door de waarde van de weerstand aan te passen. Een grotere stroomsterkte ( $R$  kleiner) zal het joule-effect kwadratisch met de stroomsterkte doen toenemen en de remkracht sterk vergroten. De vrijgekomen warmte-energie is meestal als verloren te beschouwen. Als de stroomsterkte onvoldoende groot is om nog behoorlijk te remmen, kan men het remmend koppel versterken door de flux  $\phi$  op te drijven. Door het verzadigingsverschijnsel is de beïnvloeding beperkt. Door het afremmen daalt de snelheid van de motor snel waardoor de gegenereerde spanning ook snel afneemt en de remkracht sterk vermindert. Om de motor tot volledige stilstand te brengen zal men in laatste instantie mechanisch afremmen.

### 2 Remmen met terugwinnen van energie

Deze methode wordt ook *recuperatieremmen* genoemd.

In dit geval wordt de kinetische energie in plaats van verloren te gaan, teruggeleverd aan het net. Opdat elektrische energie terug naar het net zou kunnen gestuurd worden, is het nodig dat de tegenspanning van de motor de aangelegde voedingsspanning ' $U$ ' overtreft. In dat geval stuurt de motor, werkend als generator, een stroom terug naar het voedingsnet.

Praktisch: zoals fig. 146 aantoont blijven de aansluiting van anker- en veldwikkeling onveranderd.

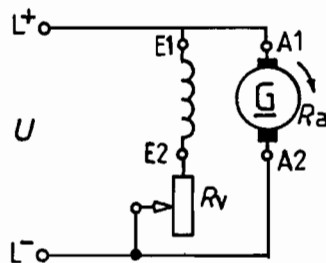


fig. 146

Op hoge snelheid is de flux  $\phi$  relatief klein en is  $R_v$  ingeschakeld. Om de rotatiefrequentie te verkleinen, vergroten we de flux  $\phi$  door de weerstand  $R_v$  uit te schakelen. Wanneer we nu de flux plots aanzienlijk vergroten, kan de motor met zijn belasting niet plots van snelheid veranderen. De traagheid belet dat. De tegenspanning  $E_1 = k \cdot \phi \cdot n$  neemt dan plots toe en zal de waarde van de klemspanning  $U$  overschrijden.

Vermits

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

met

$$R_t = R_a + R_b + R_c$$

en  $E_t > U$  zal  $I_a$  negatief worden.

Omdat  $I_a$  negatief is, is ook het vermogen  $U \cdot I_a$  negatief, hetgeen betekent dat het net energie ontvangt. Die energie wordt geleverd ten koste van de kinetische energie van de draaiende motor. De motor remt dus af.

Door de snelheidsafname zal ook de tegenspanning afnemen en op een bepaald moment gelijk worden aan  $U$ .

De ankerstroom  $I_a = \frac{U - E_t}{R_t}$  is dan nul.

We kunnen de flux nu opnieuw vergroten om  $E_t > U$  te krijgen en het beschreven verschijnsel herhaalt zich. Wegens de verzadiging enerzijds en de sterk afgenomen snelheid anderzijds, is het niet mogelijk op deze manier de remming te voltooien. Als  $E_t$  niet meer groter dan  $U$  geregeld kan worden, zal bij ankerstroom nul de motor van het net afgeschakeld worden en voltooit men de remming zonder terugwinnen van energie.

### 3 Tegenstroomremmen

Een in bedrijf zijnde motor wordt plotseling in de omgekeerde draaizin geschakeld door ofwel het omkeren van de stroom door de ankerwikkelingen ofwel het ompolen van de veldwikkeling.

In beide gevallen keert het drijvend motorkoppel om.

$$[T = k \cdot \phi \cdot (-I_a) \text{ of } T = k \cdot (-\phi) \cdot I_a]$$

De optredende tegenspanning werkt dan in dezelfde zin als de klemspanning, waardoor de ankerstroom zeer groot wordt. Om die enigszins te beperken schakelt men bij deze wijze van remmen tegelijkertijd de aanzetweerstand in de ankerketen. Het ontwikkelde remkoppel is zeer hoog en voor motoren met grote vermogens niet aan te raden. Het volledig tot stilstand brengen gebeurt ook hier op mechanische, pneumatische of hydraulische wijze.

#### 4.3.6 Toelichtingen

##### Doelstellingen

- De werkwijze voor het omkeren van de draaizin van een shuntmotor toelichten.
- De gevolgen van een onderbreking in de bekrachtigingsketen van een shuntmotor omschrijven.
- Uit de karakteristieke eigenschappen van een shuntmotor het toepassingsgebied omschrijven.

##### a Draaizinomkering

Daar  $T = k \cdot \phi \cdot I_a$  volstaat het de flux  $\phi$  of de ankerstroom  $I_a$  om te keren. Bij omkeren van de netaansluiting zullen zowel  $I_a$  als  $\phi$  van zin veranderen waardoor de draaizin ongewijzigd blijft. Wegens de hoge coëfficiënt van zelfinductie van de bekrachtigingsketen geeft men meestal de voorkeur aan het omkeren van de ankerstroomzin. Nadat de aanzetweerstand weer is ingeschakeld, schakelt men de motor van het net af. Men wijzigt de aansluitingen van de ankerserieketen en de motor kan weer gestart worden.

*b Onderbreking in de bekrachtigingsketen*

Bij een onderbreking in de bekrachtigingsketen neemt de flux af tot de remanente inductie. Uit de volgende formule blijkt onmiddellijk dat de snelheid ontoelaatbaar hoog wordt.

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

We zeggen 'de motor slaat op hol'. Dat brengt mechanisch gevaar mee. De kans op beschadiging van de rotor (door de middelpuntvliedende kracht) en van de lagers en collector is hierdoor reëel.

De ankerstroom

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

zal ook veel te groot worden omdat, door de kleine waarde van de remanente inductie de tegenspanning wordt herleid tot een zeer kleine waarde. De wikkelingen zullen verbranden.

Bij een shuntmotor moet er altijd over gewaakt worden dat een onderbreking in de veldketen wordt vermeden.

*c Toepassingsgebied*

Uit de karakteristieken van de shuntmotor blijkt dat de motor zal gebruikt worden waar geen al te groot aanzetkoppel vereist is en waar bij wisselende belasting de snelheid ongeveer constant dient te blijven of waar de snelheid over een bepaald regelgebied continu regelbaar moet zijn. we vinden de shuntmotor terug voor aandrijving van werktuigmachines, pompen enz.

#### 4.4 De seriemotor

##### 4.4.1 Kenmerkende eigenschappen

**Doelstellingen**

- De kenmerkende constructie-eigenschappen van een seriemotor verduidelijken.
- De typische eigenschappen van de samenstellende stroomkringonderdelen omschrijven.

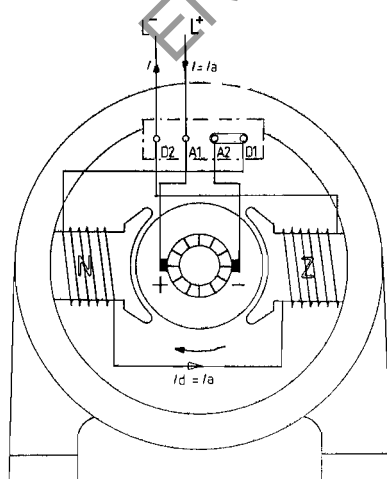


fig. 147

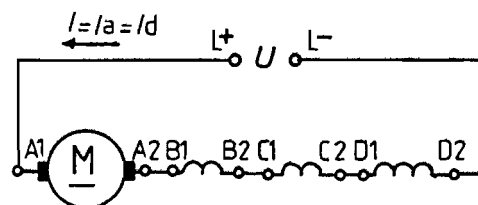


fig. 148

In fig. 147 is de seriemotor constructief vereenvoudigd weergegeven. De hulp- en compensatiewikkelingen zijn voor het overzicht niet getekend.

In fig. 148 is het principe-aansluitschema getekend. De seriewikkeling  $D_1D_2$  is in serie geschakeld met de anker-, de hulppool- en de compensatiewikkeling.

Constructief is de seriemotor identiek aan de seriegenerator. De seriewikkeling voert de volledige ankerstroom en bevat relatief weinig windingen van dikke draad. De seriewikkeling is daardoor weinig inductief en heeft een kleine ohmse weerstand. Bij de seriegenerator is  $I_a = I = I_d$  vermits alle elementen in serie geschakeld zijn.

#### 4.4.2 Karakteristieken

##### a Toerentalkromme

$$n = f(I_a)$$

met

$U = \text{constant}$

$R_v = \text{constant}$

##### Doelstellingen

- Het prinsipeschema voor het opnemen van de toerentalkromme tekenen.
- De werkwijze voor het opnemen van deze karakteristiek toelichten.
- Het verloop van de toerentalkromme tekenen en met behulp van basisformules het verloop verklaren.
- Uit basisformules het theoretisch verloop van de toerentalkromme wiskundig afleiden.

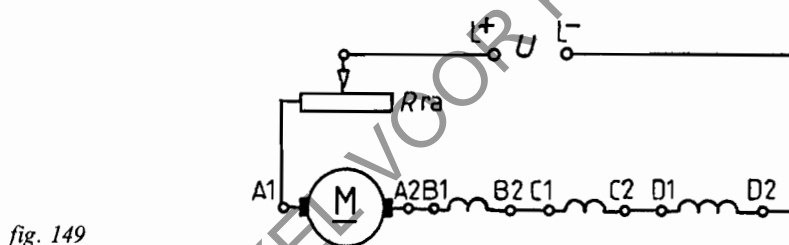


fig. 149

We weten dat

$$n = \frac{E_t}{k \cdot \phi} = \frac{U - R_i(I_a)}{k \cdot \frac{I_a N_d}{R_m}}$$

en aangezien  $I_d = I_a$ , is

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

We merken op dat bij kleine belasting de ankerstroom ook klein is, met het gevolg dat de rotatiefrequentie, vooral bij nullast, zeer hoog kan zijn. We zeggen: 'de seriemotor slaat op hol bij nullast'. Als de ankerstroom (de belasting) toeneemt, zal in het lineair gedeelte van de magnetisatiekromme de flux evenredig toenemen en de rotatiefrequentie afnemen. In fig. 150 is het verloop van de toerentalkromme aangegeven.

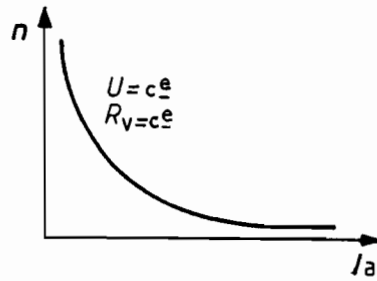


fig. 150

We herkennen in deze vorm de hyperbool. Door de verzadiging van de polen zal bij grote ankerstromen (grote belasting) de flux niet meer toenemen omdat zijn waarde maximaal is. De snelheid is dan klein en wijzigt enkel nog maar door de invloed van de inwendige spanningsval en de ankerreactie.

Een seriemotor mag niet op nullast werken, daarom zal men hem steeds rechtstreeks met de belasting koppelen door bv. een tandwielkoppeling. Riemoverbrengingen moeten ten stelligste worden vermeden.

Wiskundige benadering:

$$n = f(I_a)$$

met

$$U = \text{constant}$$

$$R_v = \text{constant}$$

$$E_t = k \cdot \phi \cdot n \quad \text{waaruit}$$

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

$$\text{Vermits} \quad \phi = \frac{N_d \cdot I_d}{R_m}$$

en  $I_d = I_a$ , kan men stellen dat  $\phi = k' \cdot I_a$

We bekommen

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

en daar  $R_i I_a$  klein is t.o.v.  $U$  kunnen we bij benadering stellen:

$$n \approx \frac{U}{k' \cdot I_a} \quad \text{of} \quad \boxed{n \cdot I_a = \text{constant}}$$

Deze vergelijking stelt grafisch een hyperbool voor (fig. 151).

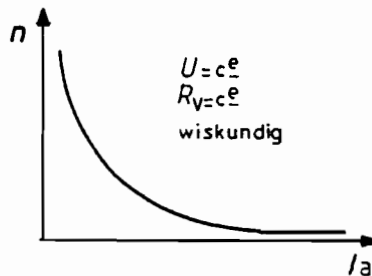


fig. 151

b Koppelkromme

$$T = f(I_a)$$

met

$$U = \text{constant}$$

$$R_v = \text{constant}$$

$$T = k \cdot \phi \cdot I_a$$

**Doelstellingen**

- Het prinsipeschema voor het opnemen van de koppelkromme tekenen.
- De werkwijze voor het opnemen van deze karakteristiek toelichten.
- Het verloop van de koppelkromme tekenen en met behulp van basisformules het verloop verklaren.
- De invloed van de ankerreactie, de wrijvings- en ijzerverliezen op het verloop van de koppelkromme toelichten.
- Uit de basisformules het theoretisch verloop van de koppelkromme wiskundig afleiden.

Als  $I = 0$ , dan is ook het koppel  $T = 0$ .

De curve vertrekt uit de oorsprong. Als bij de seriemotor de belasting stijgt, zal ook  $I_a$  stijgen. Deze doet op zijn beurt de flux stijgen waardoor het koppel zeer snel toeneemt. In fig. 152 is het verloop van de koppelkromme weergegeven. Ze heeft een parabolisch verloop.

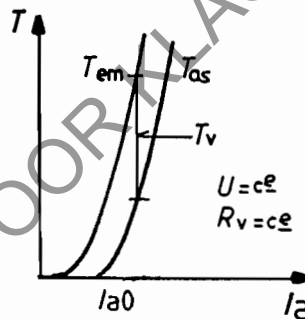


fig. 152

Eenmaal in het verzadigingsgebied (bij grote belastingen) zal het koppel enkel nog toeneemen in evenredigheid met de ankerstroom. Het nuttig askoppel is kleiner dan het elektromechanisch koppel door de wrijvings- en ijzerverliezen. De kromme die het nuttig askoppel weergeeft is in fig. 152 voorgesteld. De stroomsterkte  $I_{a0}$  is vereist om het resulterend verlieskoppel ( $T_v$ ) te compenseren.

*Wiskundige benadering:*

$$T = f(I_a)$$

met

$$U = \text{constant}$$

$$R_v = \text{constant}$$

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

Daar  $\phi = \frac{N_d \cdot I_d}{R_m}$  en  $I_d = I_a$

is  $\phi = k' \cdot I_a$

Het elektromechanisch moment

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

of

$$T_{em} = K \cdot I_a^2$$

Deze vergelijking stelt een parabool voor (fig. 153).

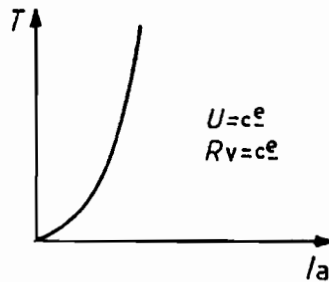


fig. 153

c Snelheid-koppelkromme

$$n = f(T)$$

met

$U = \text{constant}$

$R_v = \text{constant}$

#### Doelstellingen

- Uit de toerentalkromme en de koppelkromme de snelheid-koppelkromme afleiden.
- Uit de basisformules het theoretisch verloop van de snelheid-koppelkromme wiskundig afleiden.

Net zoals bij de onafhankelijk bekrachtigde motor en de shuntmotor kan deze karakteristiek uit beide voorafgaande karakteristieken worden afgeleid. Voor verschillende stroomwaarden  $I_a$  bepalen we de rotatiefrequentie en het elektromechanisch koppel. Het resultaat is weergegeven in fig. 154.

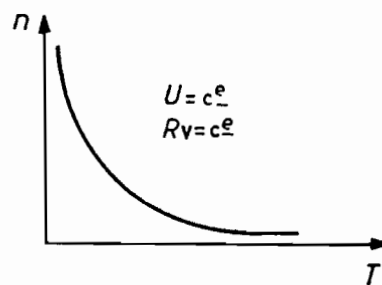


fig. 154

We stellen nogmaals vast dat bij kleine last de rotatiefrequentie zeer groot is (de motor slaat op hol bij nullast!). Door de hoge middelpuntvliedende kracht brengt dat gevaar mee voor beschadiging van de rotor en de collector. Een seriemotor mag niet op nullast draaien en is dus veiligheidshalve vast verbonden met zijn last. We stellen ook vast dat de seriemotor een zeer groot aanloopkoppel bezit. Het elektromechanisch koppel is zeer groot bij zeer lage snelheden. Bij het op hol slaan is er enkel mechanisch gevaar. De opgenomen stroomsterkte zal niet groot zijn (karakteristiek  $n = f(I_a)$ ).



De smeltveiligheden zullen dus niet reageren wanneer een seriemotor op hol slaat. Een centrifugaalschakelaar zou bij te hoge snelheden de seriemotor van het net kunnen afschakelen.

Wiskundige benadering:

$$n = f(T)$$

met

$$U = \text{constant}$$

$$R_v = \text{constant}$$

$$n = \frac{E_t}{k \cdot \phi} \approx \frac{U}{k' \cdot I_a} \quad (1)$$

$$\text{Uit} \quad T = k \cdot \phi \cdot I_a = k \cdot k' \cdot I_a \cdot I_a = K \cdot I_a^2$$

$$\text{volgt:} \quad I_a = \frac{\sqrt{T}}{\sqrt{K}} \quad (2)$$

(2) in (1) geeft:

$$n = \frac{U}{\frac{k' \sqrt{T}}{\sqrt{K}}}$$

of

$$n \cdot \sqrt{T} = \text{constant}$$

Deze vergelijking stelt een hyperbool voor (fig. 155).

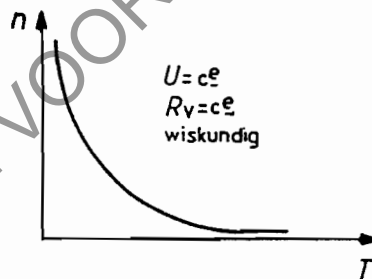


fig. 155

#### 4.4.3 Snelheidsregeling bij constant koppel

##### Doelstelling

- Aan de hand van de basisformules de snelheidsregeling van een seriemotor bij constant koppel toelichten.

In fig. 155 zien we dat we een willekeurige rotatiefrequentie kunnen instellen door het veranderen van de belasting. In de praktijk stelt men de eisen hoger. Daar wil men de snelheid regelen zonder dat de belasting wijzigt. Bij de shuntgenerator was dat eenvoudig toe te passen door de flux te regelen. De ankerstroom paste zich dan automatisch aan (4.3.3). Bij de seriemotor is dat niet zo vanzelfsprekend. Ankerstroom en bekrachtigingsstroom zijn hier gelijk en op het eerste zicht niet onafhankelijk van elkaar te regelen. In fig. 156 is een mogelijke oplossing weergegeven.

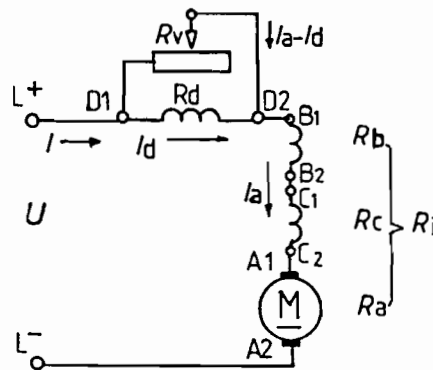


fig. 156

We schakelen een regelweerstand parallel over de seriewikkeling, waardoor  $I_d$  los van  $I_a$  kan geregeld worden. De stroomsterkte in de veldwikkling is nu niet meer dezelfde als de stroomsterkte door het anker.

$$I_d = \left[ \frac{R_v}{R_v + R_d} \right] \cdot I_a$$

We stellen voorop dat  $T = k \cdot \phi \cdot I_a$  constant moet zijn, terwijl de rotatiefrequentie in deze voorwaarde regelbaar moet zijn.

$$n = \frac{U - \left[ R_i + \left( \frac{R_v \cdot R_d}{R_v + R_d} \right) \right] \cdot I_a}{k \cdot \phi}$$

Als  $\phi$  afneemt ( $R_v$  uitschakelen) zal de rotatiefrequentie toenemen.

Daar  $T = k \cdot \phi \cdot I_a$  constant is, moet  $I_a$  toenemen.

Inderdaad:

- enerzijds zal de weerstand tussen  $D_1$  en  $D_2$  kleiner worden omdat de weerstand  $\frac{R_v \cdot R_d}{R_v + R_d}$  kleiner wordt. De ankerstroom  $I_a$  zal toenemen omdat de bronspanning  $U$  constant is;
- anderzijds zal door de fluxvermindering eveneens de tegenspanning afnemen waardoor

$$I_a = \frac{U - E_t}{R_i + \left( \frac{R_v \cdot R_d}{R_v + R_d} \right)}$$

toeneemt.

**Besluit:**

Bij een geschikte keuze van veldregelaar  $R_v$  is het mogelijk het koppel  $T = k \cdot \phi \cdot I_a$  constant te houden bij veranderlijke rotatiefrequentie.

**Toelichting**

#### Doelstellingen

- De constructiebijzonderheden van de veldregelaar bij een seriemotor verduidelijken.
- Het uitbreiden van het snelheidsregelgebied van een seriemotor toelichten.

*a Veldregelaar*

De veldregelweerstand  $R_v$  mag de seriewikkeling niet volledig kortsluiten omdat de flux  $\phi$  dan theoretisch nul wordt en de motor op hol slaat. Om dat te beletten is de veldregelaar zo uitgevoerd dat hij niet volledig kan uitgeschakeld worden.

*b Regelgebied*

Met de snelheidsregeling zoals ze hier is voorgesteld, kan de rotatiefrequentie maar binnen een beperkt gebied geregeld worden. Wil men een groter regelgebied, dan moet men de voedingsspanning regelbaar maken. Wanneer meerdere motoren gelijktijdig in dienst zijn (tractie), kan men bv. bij constante voedingsspanning, de spanning op de motoren wijzigen door ze achtereenvolgens in serie of parallel te schakelen.

4.4.4 Aanlopen van de seriemotor

**Doelstellingen**

- De voorwaarden voor een optimale aanloop van een seriemotor verklaren.
- De waarde van de aanzetweerstand berekenen.

Uit de gelijkheid

$$U = E_t + I_a \left[ R_i + \frac{R_v \cdot R_d}{R_v + R_d} \right]$$

volgt dat 
$$I_a = \frac{U - E_t}{R_i + \frac{R_v \cdot R_d}{R_v + R_d}}$$

Bij aanloop ( $n = 0$ ) is de tegenspanning  $E_t = k \cdot \phi \cdot n = 0$ .

Gevolg:

$$I_a = \frac{U}{R_i + \frac{R_v \cdot R_d}{R_v + R_d}}$$

wordt ontoelaatbaar groot.

Bovendien wordt het joule-effect te groot en treedt een stroomstoot op die hinderlijk is voor andere verbruikers die op hetzelfde net zijn aangesloten. Om dat te vermijden schakelen we een aangepaste ohmse weerstand  $R_{ra}$  in serie (fig. 157) met het anker.

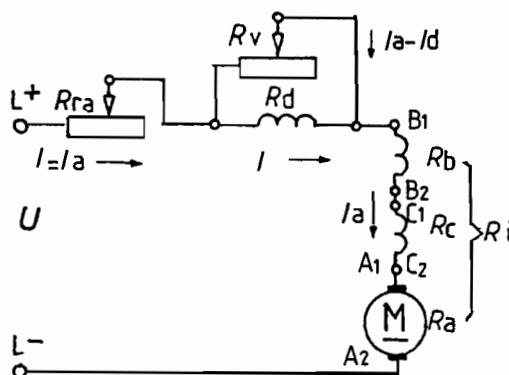


fig. 157

De ankerstroom wordt dan:

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

Als de toelaatbare aanloopstroomsterkte gekend is (par. 3.6.3), kan de maximumwaarde van  $R_{ra}$  uit de hierboven beschreven formule worden berekend:

$$R_{ra} = \frac{U}{I_a} - R_i - \frac{R_v \cdot R_d}{R_v + R_d}$$

Om een zo groot mogelijk aanzetkoppel te krijgen, moet de flux  $\phi$  zo groot mogelijk zijn. De weerstand  $R_v$  moet bij aanloop volledig ingeschakeld zijn. Na de aanloop kan dan met  $R_v$  de juiste rotatiefrequentie ingesteld worden.

#### 4.4.5 Remmen van de seriemotor

##### Doelstellingen

- De verschillende methoden onderscheiden die bij het remmen van een seriemotor worden toegepast.
- De schakelmoeilijkheden bij het remmen van seriemotoren verduidelijken.

We passen, zoals bij de shuntmotor, verschillende methoden toe.

*a* We schakelen de motor van het net af en remmen op mechanische, pneumatische of hydraulische wijze af.

*b* De draaiende motor wordt van het net geschakeld en op een weerstand aangesloten (*reostatisch remmen*). De motor werkt dan als generator die een stroom door de weerstand stuurt. Er ontstaat een koppel dat remmend werkt. De stroom, geleverd als generator, is tegengesteld gericht aan de stroom als motor opgenomen.

Zonder voorzorgen zou dat tot gevolg hebben dat de flux, afkomstig van de seriewikkeling, snel nul wordt (het remanent magnetisme wordt zelfs vernietigd). Generatorwerking kan dan niet meer en een remmend effect wordt onmogelijk. Alvorens de motor op de aanzetweerstand aan te sluiten moet bijgevolg de relatieve schakeling tussen veld- en ankerketen worden omgewisseld. Bij die methode van remmen zal de remenergie verloren gaan.

*c* Het remmen met terugwinnen van energie, zoals bij de shuntmotor toegelicht, is hier eveneens mogelijk. Dat soort remmen geeft echter aanleiding tot betrekkelijk ingewikkelde schakelingen. Dat is dan ook de reden waarom die methode enkel wordt toegepast wanneer het terugwinnen van energie een lonende operatie is. Het remmen van seriemotoren met terugwinnen van energie vindt toepassing bij elektrische tractie-installaties.

#### 4.4.6 Toelichtingen

##### Doelstellingen

- De werkwijze voor het omkeren van de draaizin van een seriemotor toelichten.
- Uit de karakteristieke eigenschappen van een seriemotor het toepassingsgebied omschrijven.

##### *a* Draaizinomkering

Uit  $T = k \cdot \phi \cdot I_a$  weten we dat de zin van het koppel omkeert als de flux  $\phi$  of de ankerstroom  $I_a$  omkeert. Het omkeren van de polariteit van de voedingsbron heeft tot gevolg dat zowel de flux als de ankerstroom omkeren. De zin van het drijvend koppel wijzigt niet!

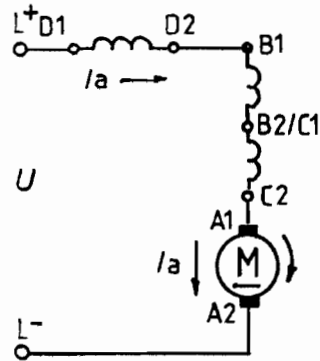


fig. 158

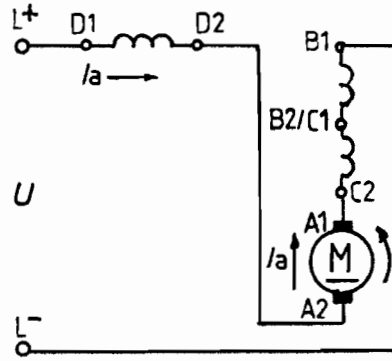


fig. 159

Er zijn twee verschillende manieren. Praktisch geeft men de voorkeur aan het omschakelen van de stroomzin  $I_a$  door het anker (fig. 158 - 159). De stroomzin in de anker-, hulp- en compensatiewikkeling keert om terwijl de zin van de stroom in de seriewikkeling behouden blijft. De draaizin keert om.

#### b Toepassingsgebied

De eigenschap van een groot aanzetkoppel maakt de seriemotor zeer geschikt voor het aandrijven van tractievoertuigen. Bij het aanlopen moet hier immers de inertie van het in rust zijnde voertuig overwonnen worden. Eenmaal op snelheid is het vereist motorkoppel veel kleiner. Verder vindt de seriemotor toepassing bij hijswerktuigen. Ook de startmotor van autovoertuigen is een gelijkstroomseriemotor.

### 4.5 De compoundmotor

#### 4.5.1 Kenmerkende eigenschappen

##### Doelstellingen

- Vanuit de kenmerkende eigenschappen van de shunt- en seriemotor de compoundmotor opbouwen.
- De kenmerkende constructie-eigenschappen van de compoundmotor verduidelijken.
- De schakelmogelijkheden van de shunt- t.o.v. de seriewikkeling omschrijven.

Het grote voordeel van de shuntmotor is dat hij een ongeveer constante rotatiefrequentie heeft bij veranderlijke belasting en dat binnen bepaalde grenzen de rotatiefrequentie soepel regelbaar is. Een nadeel van de shuntmotor is echter zijn beperkt aanloopkoppel. Belast aanlopen is voor de shuntmotor niet mogelijk. De seriemotor daarentegen heeft als voordeel een groot aanzetkoppel, terwijl zijn rotatiefrequentie bij veranderlijke belasting erg varieert.

Het ideaal dat we nastreven is een motor met groot aanzetkoppel en een constante rotatiefrequentie bij veranderlijke belasting. De rotatiefrequentie moet daarenboven op een soepele wijze geregeld kunnen worden.

Deze ideale karakteristieken benaderen we door de eigenschappen van de shunt- en seriemotor te verenigen in de compoundmotor.

De compoundmotor is voorzien van twee bekrachtigingswikkelingen, een shuntwikkeling ( $E_1 - E_2$ ) en een seriewikkeling  $D_1 - D_2$ ). In fig. 160 is de compoundmotor constructief vereenvoudigd weergegeven.

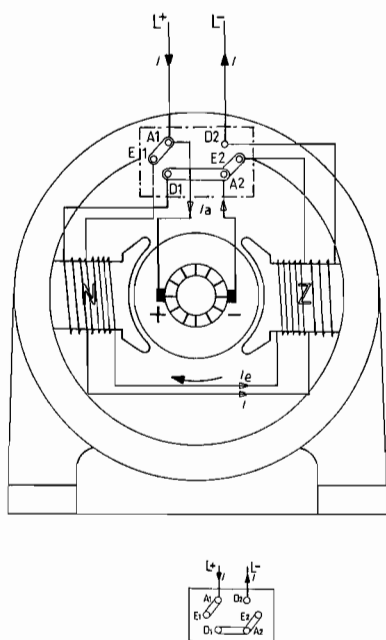


fig. 160

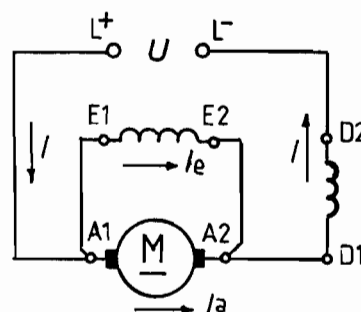


fig. 161

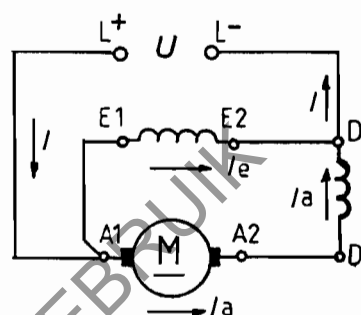


fig. 162

We merken al dadelijk op dat de compoundmotor constructief identiek is aan de compoundgenerator. De aansluitingen kunnen zoals in fig. 161 - 162 is weergegeven, als korte of lange shunt worden uitgevoerd. De karakteristieken, opgenomen als korte of lange shunt, verschillen weinig. Verdere studie die het onderscheid weergeeft tussen beide schakelingen is dan ook overbodig wegens het beperkt praktisch nut.

Het is bij de compoundmotor van het grootste belang te weten, dat het magnetisch veld ( $\phi$ ) in de luchtspleet tussen stator en rotor, gevormd wordt door de shuntflux (afhankelijk van  $U$ ) en de serieflux (afhankelijk van de belasting). Beide fluxen kunnen elkaar *versterken* wat een versterking van het aanzetkoppel en een minder constant toerental bij belastingsverandering zal meebrengen. Beide fluxen kunnen elkaar ook *tegenwerken* waardoor het aanzetkoppel verzwakt (de flux zal bij aanzetten haast 'weggeblazen' worden) terwijl de rotatiefrequentie bij toenemende last minder snel zal dalen.

De karakteristieken van de compoundmotor zullen dus sterk variëren naar gelang van de verhouding van de serieflux t.o.v. de shuntflux én mee- of tegenwerkende fluxen. Om dit probleemveld enigszins te ordenen, beschouwen we twee types:

#### 1 Compoundmotor met shuntkarakteristiek

De flux is hier hoofdzakelijk afkomstig van de shuntwikkeling. De serieflux heeft hier slechts een kleine invloed die vooral merkbaar zal zijn wanneer het statorijzer ver van de verzadigingstoestand verwijderd is. De snelheidsregeling wordt gerealiseerd door de veldregelaar in de shuntketen. Bij onderbreking in de shuntketen zal de seriewikkeling een voldoende flux opwekken om het 'op hol slaan' tegen te gaan.

#### 2 Compoundmotor met seriekarakteristiek

Dit type komt in de praktijk weinig voor. De shuntflux is hier klein t.o.v. de serieflux en zal het 'op hol slaan' bij nullast gedeeltelijk beletten.

Verder beperken we de uitleg tot de compoundmotor met shuntkarakteristiek. De lezer kan dan (eventueel ter inoefening van de leerstof) het gedrag van de motor met seriekarakteristiek zelf afleiden.

#### 4.5.2 Karakteristieken

##### a Toerentalkromme

$$n = f(I_a)$$

met

$U = \text{constant}$

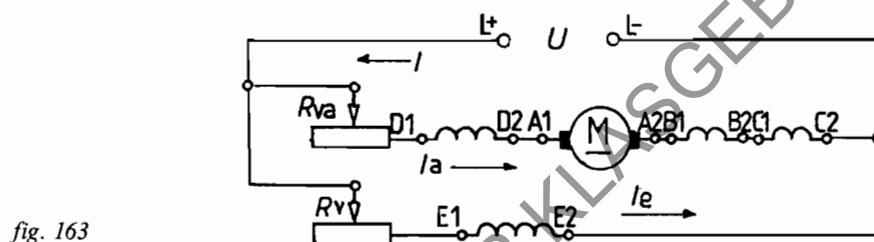
$R_v = \text{constant}$

Stad Antwerpen  
Stedelijk Lyceum  
Hoofdinstelling :  
Paardenmarkt 94  
2000 Antwerpen  
tel. (03)232 42 95

##### Doelstellingen

- Het prinsipeschema voor het opnemen van de toerentalkromme tekenen.
- De werkwijze voor het opnemen van deze karakteristiek toelichten.
- Het verloop van de toerentalkrommen tekenen voor het geval de serieflux de shuntflux versterkt of verzwakt.
- Het verloop verklaren.
- Beide krommen vergelijken met de toerentalkromme van de shuntmotor.

Voor het opnemen van de toerentalkromme passen we de schakeling van fig. 163 toe.



##### - Meewerkende serieflux

Bij de shuntgenerator bleef het toerental bij toenemende belasting nagenoeg constant. Dat was te verklaren aan de hand van de formule:

$$n = \frac{U - R_i I_a}{k \cdot \phi} \quad (\text{par. 4.3.2})$$

Wanneer we die formule aanpassen aan de compoundmotor met lange shunt met meewerkende serieflux krijgen we:

$$n = \frac{U - (R_i + R_d) I_a}{k \cdot (\phi_e + \phi_d)} \quad (1)$$

Deze formule toont aan dat naarmate het aandeel van de serieflux

$$\left( \phi_d = \frac{N_d \cdot I_d}{R_m} = \frac{N_d \cdot I_a}{R_m} \right)$$

groter wordt, de snelheid in vergelijking met de shuntmotor meer zal afnemen. De weerstand van de seriewikkeling zal ook de teller van formule (1) iets sneller doen dalen. Deze invloed mogen we hier praktisch verwaarlozen. In fig. 164 is een mogelijk verloop van  $n = f(I_a)$  weergegeven.

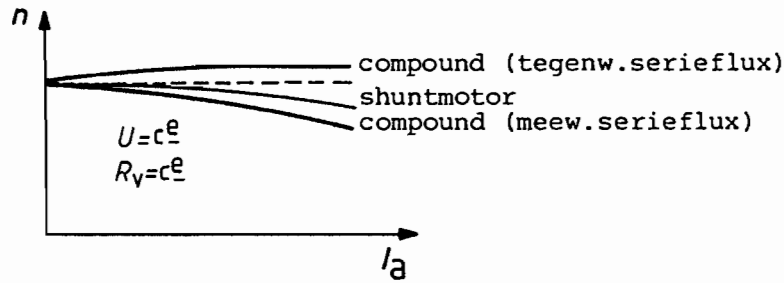


fig. 164

– *Tegenwerkende serieflux*

De snelheidsformule wordt

$$n = \frac{U - (R_i + R_d)I_a}{k \cdot (\phi_e - \phi_d)}$$

Bij toenemende belasting zal de rotatiefrequentie minder snel dalen omdat de serieflux de hoofdflex doet afnemen. Indien het aantal seriewindingen oordeelkundig wordt gekozen, is het mogelijk de snelheidsdaling van de shuntmotor te compenseren. Meer nog, men kan de snelheid zelfs doen stijgen bij toenemende last; dit wordt enkel bepaald door het aantal seriewindingen.

b *Koppelkromme*

$$T = f(I_a)$$

met

$U = \text{constant}$

$R_v = \text{constant}$

**Doelstellingen**

- Het verloop van de koppelkromme tekenen voor het geval de serieflux de shuntflux versterkt of verzwakt.
- Het verloop verklaren.
- Beide koppelkrommen vergelijken met de koppelkromme van de shuntmotor.

We passen de schakeling van fig. 163 toe.

Het koppel  $T = k \cdot \phi \cdot I_a$

Bij de shuntmotor is

$$\phi_e = \frac{N_e \cdot I_e}{R_m}$$

theoretisch constant met het gevolg dat  $T = k' \cdot I_a$  (rechte door de oorsprong).

– *Meewerkende serieflux*

$$T = k \cdot [\phi_e + \phi_d] \cdot I_a$$

Bij toenemende  $I_a$  zal ook

$$\phi_d = \frac{N_d \cdot I_d}{R_m} = \frac{N_d \cdot I_a}{R_m}$$

toenemen, met het gevolg dat het koppel sneller stijgt.

In fig. 165 is een mogelijk verloop weergegeven.



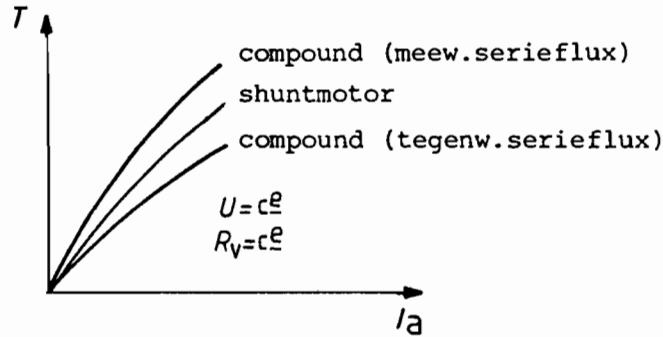


fig. 165

– Tegenwerkende serieflex

$$T = k \cdot [\phi_e - \phi_d] \cdot I_a$$

Bij toenemende  $I_a$  zal de serieflex toenemen. Op zijn beurt zal de hoofdflux verzwakken waardoor het drijvend koppel minder snel toeneemt.

In fig. 165 is een mogelijk verloop weergegeven.

c Snelheid-koppelkromme

$$n = f(T)$$

met

$U = \text{constant}$

$R_v = \text{constant}$

**Doelstellingen**

- Uit de toerentalkromme en de koppelkromme de snelheid-koppelkromme afleiden, dit voor het geval dat de serieflex de shuntflux versterkt of verzwakt.
- Beide snelheid-koppelkrommen vergelijken met de snelheid-koppelkromme van de shuntmotor.

Zoals bij de andere motortypes kan deze karakteristiek afgeleid worden uit de toerental- en koppelkromme. In fig. 166 is het verloop grafisch weergegeven.

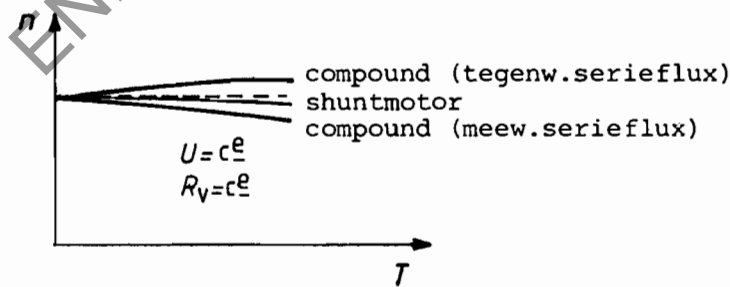


fig. 166

4.5.3 Snelheidsregeling bij constant koppel

**Doelstelling**

- De rotatiefrequentieregeling van de compoundmotor bij constant koppel toelichten.

De rotatiefrequentieregeling met constant koppel gebeurt bij de compoundmotor principeel op dezelfde wijze als bij de shuntmotor. We regelen de bekrachtigingsstroom  $I_e$  door middel van de veldregelweerstand  $R_v$ . Zoals reeds gebleken is, zal een grotere flux een lagere rotatiefrequentie tot gevolg hebben. Een kleinere flux zal de rotatiefrequentie opdrijven.

#### 4.5.4 Aanlopen van de compoundmotor

##### Doelstellingen

- Het aanlopen van de compoundmotor toelichten.
- De rol die de serieflux en de aangelegde voedingsspanning spelen bij het aanlopen van de compoundmotor, verduidelijken.

Het aanzetten van de compoundmotor gebeurt op dezelfde wijze als het aanzetten van de shuntmotor. Bij meewerkend serieveld zal de aanloop veel krachtiger zijn dan bij de shuntmotor. Bij tegenwerkend serieveld zal men erop letten de aanzetweerstand niet te vlug uit te schakelen, omdat men dan gevaar loopt het resulterend veld te sterk te verzwakken of zelfs van zin te veranderen. Dat zou een aanloop kunnen beletten of zelfs een draaizinomkering kunnen veroorzaken. Dat gevaar loopt men ook als de compoundmotor op een lagere bedrijfsspanning wordt aangesloten. De serieflux wordt dan te groot t.o.v. de shuntflux.

We mogen wel stellen dat de aanloop met tegenwerkende serieflux een weinig stabiele werking garandeert. Bij sommige toepassingen zal men in de aanloopfase de seriewikkeling meewerkend schakelen om een groot aanzetkoppel te bekomen. Na de aanloop wordt de zin van de serieflux omgepoold en zal die de shuntflux bekampen. Dat zal dan tijdens het bedrijf een constante rotatiefrequentie waarborgen.

##### Toelichtingen

##### Doelstellingen

- Het begrip *veiligheidscompounding* toelichten.
- De werkwijze voor het omkeren van de draaizin van een compoundmotor toelichten.
- Uit de karakteristieke eigenschappen van de compoundmotor het toepassingsgebied omschrijven.

##### a Veiligheidscompounding

Om het op hol slaan van shuntmotoren met snelheidsregeling door veldverzwakking te beletten, brengt men een seriewikkeling aan met weinig windingen. De serieflux versterkt de shuntflux. Dat zal bij normaal bedrijf de shuntkarakteristiek weinig beïnvloeden, terwijl bij onderbreking in de shuntketen de hoge opgenomen stroom een serieflux opwekt die het op hol slaan beperkt.

##### b Draaizinomkering

Dat kan door:

- De shuntwikkeling om te polen. Wil men bereiken dat de compoundmotor dezelfde karakteristieke eigenschappen behoudt, dan moet men eveneens de seriewikkeling ompolen;
- de ankerstroom door de anker-, hulppool- en compensatiewikkelingen om te polen. De shunt- en serieveldwikkeling worden dan niet omgepoold.

*c Toepassingsgebied*

Compoundmotoren treffen we vooral aan bij toepassingen waar bij veranderlijke belasting de rotatiefrequentie ongeveer constant moet blijven. Ook bij toepassingen waar de motor belast moet aanlopen wordt de compoundmotor gebruikt, bv. bij liften, persen, werktuigmachines enz. Om bij meewerkende serieflux de snelheid in bedrijf zo constant mogelijk te houden (shuntkarakteristiek) sluit men soms de seriewikkeling kort nadat de aanloop voltrokken is.

#### 4.6 Bepalen van het rendement van gelijkstroommotoren

**Doelstelling**

- Het totaal rendement van het elektromechanisch rendement onderscheiden.

Uit leereenheid 3 par. 3.9 weten we dat bij motoren in het algemeen het totaal rendement

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

en het elektromechanisch of inwendig rendement

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

Om het rendement te bepalen staan er twee methoden ter beschikking. Alhoewel diepgaande studie van de rendementsbepaling thuishoort in het leervak Metingen en/of Laboratorium behandelen we hier principieel beide methoden.

##### 4.6.1 Directe methode

**Doelstellingen**

- Het bepalen van het rendement volgens de directe methode toelichten.
- Het doel en de principewerking van de rem van Prony uitleggen.

Men meet met de directe methode het mechanisch vermogen dat beschikbaar is op de as ( $P_n$ ) en het toegevoerd elektrisch gelijkstroomvermogen ( $P_t$ ).

Het toegevoerd elektrisch vermogen is altijd eenvoudig te meten door middel van bv. een volt- en A-meter of een wattmeter, aangezien  $P_t = U \cdot I$ .

Het nuttig vermogen meten is niet zo eenvoudig. Om dat te meten moeten we beschikken over een rem van Prony, bandrem, remdynamo of Foucaultrem. Die toestellen zullen de motor belasten en gelijktijdig het afgegeven koppel aanduiden. Deze methode van meten kan slechts worden toegepast voor motoren met relatief klein vermogen (max. 10 kW). Het afgegeven vermogen van de motor wordt immers totaal vrijgegeven aan de 'vermogenmeter'. Bij grote motoren is deze methode dan ook niet van toepassing. Als toepassingsvoorbeeld bespreken we de rem van Prony. Bij die rem is de principiële werking van vermogenmeting het best te illustreren (fig. 167).

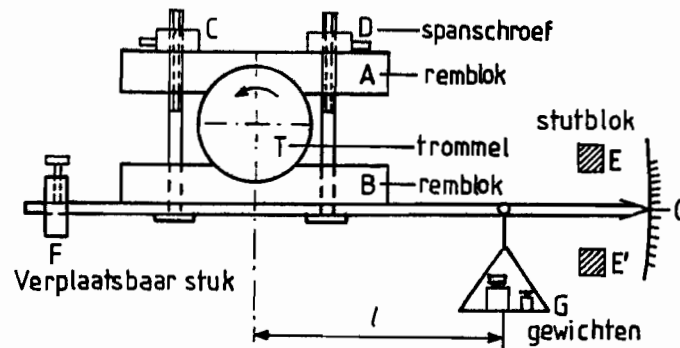


fig. 167

De trommel T zit vast aan de motoras gekoppeld en wordt tussen twee remblokken A en B gespannen. Met de spanschroeven C en D kan men met de remschoenen de motor belasten (een willekeurige belasting instellen). De aanstootstukken E en E' zullen beletten dat de rem meedraait. Om het rendement te bepalen zal men tegengewichten G aanbrengen en wel zodanig dat het drijvend en het tegenwerkend moment in evenwicht zijn (stand 0 op de schaal).

Het ontwikkelde motorkoppel  $T = G \cdot l$  (Nm)

Bij een rotatiefrequentie (te meten met een tachometer) van 'n' omwentelingen per seconde is het afgegeven vermogen

$$P_n = \omega \cdot T = 2\pi \cdot n \cdot G \cdot l \quad (\text{Nm/s} = \text{W})$$

met

G : gewicht in newton

l : afstand in meter

n : rotatiefrequentie in  $\text{s}^{-1}$

Het totaal rendement is dan

$$\eta_t = \frac{P_n}{P_t} = \frac{2\pi \cdot n \cdot G \cdot l}{U \cdot I}$$

Toelichtingen

#### Doelstelling

- De verschijnselen en begrippen in verband met ijking, koeling, rendementskromme en toegevoerd vermogen van een onafhankelijk bekrachtigde motor toelichten.

#### a Ijking

Voor het meten moet de rem in evenwicht worden gebracht. In onbelaste toestand (gewicht  $G = 0$  (N)) verplaatst men het gewicht F totdat de rem in evenwicht is.

#### b Koeling

Omdat alle motorenergie onder de vorm van warmte vrijkomt in de rem (trommel T) zal men ervoor zorgen dat die warmte tijdig wordt afgevoerd. Dat gebeurt door de trommel T te koelen met koelmiddel, bv. water gemengd met vloeibare zeep (zeeploog).

#### c Rendementskromme

Het rendement van de motor verandert met de belasting. Als men het rendement van een motor geeft, is dat altijd bij vollast. In fig. 168 is het verloop van het rendement in functie van het nuttig afgegeven vermogen weergegeven.

We merken op dat het rendement van  $P_n$  boven de 50 % een economisch aanvaardbare waarde heeft. Dat heeft belang bij de keuze van een motor. Men zal, om een economische reden, steeds trachten de motor zodanig te dimensioneren dat het rendement zo hoog mogelijk ligt.

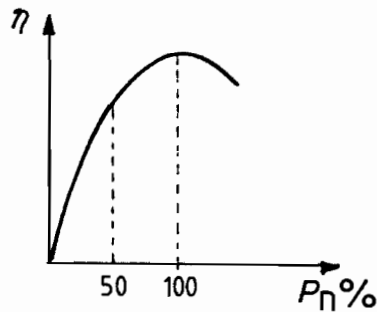


fig. 168

*d Onafhankelijk bekrachtigde motor*

Hier lette men erop dat het toegevoerd vermogen uit twee delen bestaat, nl. het vermogen toegevoerd aan de ankerserieketen ( $U \cdot I_a$ ) en het vermogen toegevoerd aan de bekrachtigingsketen ( $U_f \cdot I_f$ ).

4.6.2 Indirecte methode (methode van Swinburne)

**Doelstellingen**

- Het rendement volgens de indirecte methode bepalen.
- Voor een willekeurige gelijkstroommotor de formule voor het berekenen van het rendement volgens de indirecte methode opstellen.

Bij de indirecte methode gaat het enkel om de bepaling van de verliezen. Om de wrijvings- en ijzerverliezen te bepalen volstaat de nullastproef.

Het totaal rendement

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

Zoals bij de directe methode is het toegevoerd elektrisch vermogen eenvoudig te meten. Het nuttig vermogen bekomen we hier door de verliezen afzonderlijk te bepalen en ze af te trekken van het toegevoerd vermogen. Uit par. 3.9 weten we dat de verliezen  $P_v$  bestaan uit:

$P_m$  : mechanische verliezen (wrijving en ventilatie)

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

$P_{Cu}$  : som van de jouleverliezen in anker- en bekrachtigingskring

Schematisch is dat voorgesteld in fig. 170.

Nemen we als voorbeeld een shuntmotor (fig. 169).

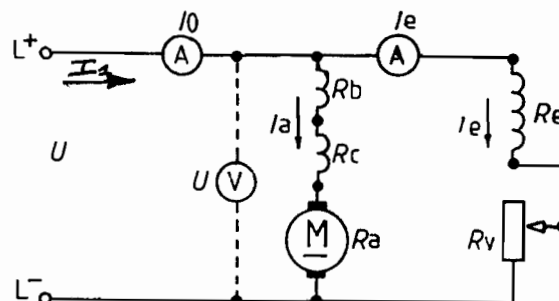
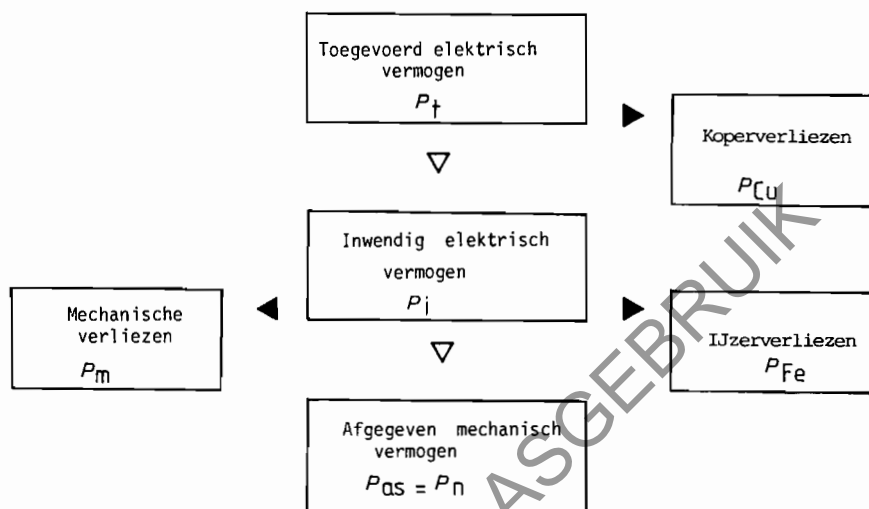
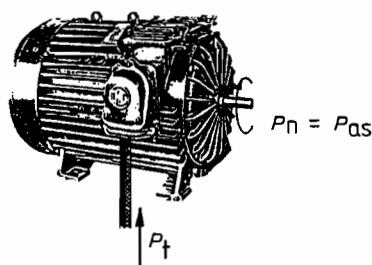


fig. 169



$$\text{Rendement } \eta_t = \frac{P_n}{P_t}$$

fig. 170

Wij drijven de motor aan op nominale rotatiefrequentie.  
Het toegevoerd elektrisch vermogen bij nullast wordt:

$$P_0 = U \cdot I_0 = P_m + P_{Fe} + (R_a + R_b + R_c)I_a^2 + U \cdot I_e$$

De som van wrijvings- en ijzerverliezen wordt dan:

$$P_m + P_{Fe} = U \cdot I_0 - (R_a + R_b + R_c)I_{a0}^2 - U \cdot I_e$$

Vermits de rotatiefrequentie van een shuntmotor een ongeveer constant verloop kent, beschouwen we de mechanische verliezen en de ijzerverliezen bij een constant blijvende voedingsspanning als constant bij elke deelbelasting omdat de rotatiefrequentie en flux de overeenstemmende jouleverliezen en dus ook het rendement bepalen.

Bv.: de opgenomen stroomsterkte bij deelbelasting ( $I_1$ ) =  $I$ .

Er treedt dan een koperverlies (joule-effect) op van

$$P_{Cu} = I_a^2(R_a + R_b + R_c) + U \cdot I_e$$

of in functie van de aanduiding van ampèremeters  $A_1$  en  $A_2$

$$P_{Cu} = [I_1 - I_e]^2 \cdot [R_a + R_b + R_c] + U \cdot I_e$$

Het totaal rendement wordt dan (bij opgenomen stroomsterkte  $I_1$ ):

$$\eta_t = \frac{P_t - P_v}{P_t} = \frac{U \cdot I_1 - (P_m + P_{Fe}) - P_{Cu}}{U \cdot I_1}$$

$$\eta_t = \frac{U \cdot I_1 - [U \cdot I_0 - (R_a + R_b + R_c)I_{a0}^2 - U \cdot I_e] - [I_1 - I_e]^2 \cdot [R_a + R_b + R_c] - U \cdot I_e}{U \cdot I_1}$$

of

$$\eta_t = \frac{U \cdot I_1 - U \cdot I_0 + I_{a0}^2 (R_a + R_b + R_c) - U \cdot I_e - (I_1 - I_e)^2 \cdot (R_a + R_b + R_c) - U \cdot I_e}{U \cdot I_1}$$

#### Toelichting

##### a Andere motortypen

Eenzelfde redenering om het rendement te bepalen past men toe bij andere motortypen. Bij de seriemotor is het echter nodig om de motor bij nullast onafhankelijk te bekrachtigen omdat de seriemotor met zelfbekrachtiging 'op hol slaat' bij nullast.

##### b Niet-meetbare verliezen

In het behandelde voorbeeld werd geen rekening gehouden met de niet-meetbare verliezen (borstelovergangsverliezen). Bij meer diepgaande studie zal men met deze niet-meetbare verliezen rekening moeten houden. De studie hiervan kan desgewenst het best gebeuren binnen het vak Laboratorium.

##### c Klemspanning bij nullastproef

De nullastproef werd uitgevoerd met dezelfde spanning als bij normaal bedrijf. Dat is niet helemaal correct. Voor de shuntmotor bij vollast geldt:

$$U = E_t + I_{an} [R_a + R_b + R_c]$$

met

$$I_{an} = \text{vollast ankerstroom}$$

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

Voor de shuntmotor bij nullast geldt:

$$U_0 = E_{t0} + I_{a0} (R_a + R_b + R_c)$$

met

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

Wil men bij de nullastproef voor dezelfde rotatiefrequentie ook dezelfde flux hebben, dan moet  $E_{t0} = E_t$

$$\text{of} \quad U_0 = U - I_{a0} [R_a + R_b + R_c] = U - I_{a0} [R_a + R_b + R_c]$$

De aangelegde klemspanning zou moeten zijn:

$$U_0 = U - I_{an} [R_a + R_b + R_c] + I_{a0} [R_a + R_b + R_c]$$

## 4.7 Voorbeelden

- 1 Een seriemotor neemt 10 kW uit het net bij een bronspanning van 200V. Bereken de weerstand van de ankerserieketen als de tegenspanning  $E_t$  190 V bedraagt.

#### Oplossing

De opgenomen stroomsterkte

$$I = \frac{P}{U} = \frac{10\,000}{200} = 50 \text{ A}$$

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

$$R_s = \frac{U - E_t}{I_a} = \frac{200 - 190}{50} = 0,2 \, \Omega$$

met

$$R_s = R_a + R_b + R_c + R_d$$

- 2 Bij vollast ontwikkelt een seriemotor een vermogen van 19,995 kW met een rendement van 86 %; de voedingsspanning is 250 V. De weerstand van de ankerserieketen is 0,8  $\Omega$ . Welke waarde zal de aanzetweerstand moeten hebben om een aanloop te krijgen die beantwoordt aan de voorwaarden in par. 3.8.3?

Oplossing

$$P_t = \frac{P_n}{\eta} = \frac{19,995}{0,86} = 23,25 \text{ kW}$$

Nominale stroomsterkte:

$$I_{a_{nom}} = \frac{23\,250}{250} = 93 \text{ A}$$

Volgens par. 3.6.3 is

$$I_{max} = 1,75 \cdot I_{nom} \\ = 1,75 \cdot 93 = 162,75 \text{ A}$$

$$1,5 \cdot I_{nom} = 1,5 \cdot 93 = 139,5 \text{ A}$$

De aanzetweerstand:

$$R_{ra} = \frac{U}{I_{max}} - R_i = \frac{250}{162,75} - 0,8 = 0,736 \, \Omega.$$

$$\frac{250}{139,5} - 0,8 = 0,992 \, \Omega$$

- 3 Om een pompinstallatie optimaal te doen werken, is een nuttig vermogen nodig van 16 kW. Men verkiest een shuntmotor als aandrijving. De beschikbare spanning is 220 V. Op het kenplaatje van de shuntmotor noteren we de volgende gegevens  $U = 220 \text{ V}$ ;  $R_a = 0,13 \, \Omega$ ;  $R_b = 0,04 \, \Omega$ ;  $R_c = 0,03 \, \Omega$ ;  $\eta = 0,82$  en  $R_e = 137,5 \, \Omega$ . Bereken het vermogenverlies in de ankerwikkeling.

Oplossing

$$P_t = \frac{P_n}{\eta} = \frac{16\,000}{0,82} = 19\,512,195 \text{ W}$$

De netstroom:

$$I = \frac{P_t}{U} = \frac{19\,512,195}{220} = 88,6918 \text{ A}$$

De ankerstroom:

$$I_a = I - I_e = 88,6918 - \frac{220}{137,5} = 87,091795 \text{ A}$$

$$P_{Cu_{anker}} = R_a \cdot I_a^2 = 0,13 \cdot 87,091795^2 = 986,0475 \text{ W}$$

- 4 Een compoundmotor met lange shunt neemt uit een net van 210 V een stroom op van 15 A. De inwendige weerstand  $R_i = R_a + R_b + R_c = 0,4 \, \Omega$ ; de seriewikkeling heeft een weerstand  $R_d = 0,3 \, \Omega$  en de shuntwikkeling heeft een weerstand van  $R_e = 105 \, \Omega$ . Bereken de tegenspanning.

Oplossing

$$I_a = I - I_e = 15 - \frac{210}{105} = 13 \text{ A}$$

$$E_t = U - [R_i + R_d] \cdot I_a = 210 - 0,7 \cdot 13 = 200,9 \text{ V}$$

- 5 Dezelfde opgave als voorbeeld nr. 4 (hierboven), maar nu met korte shuntschakeling.

Oplossing

$$U_e = U - U_d = 210 - 15 \cdot 0,3 = 205,5 \text{ V}$$

$$I_e = \frac{205,5}{105} = 1,9571 \text{ A}$$

$$I_a = I - I_e = 15 - 1,9571 = 13,0428 \text{ A}$$

$$E_t = U_a - 0,4 \cdot 13,0428 = 200,28 \text{ V}$$



#### 4.8 Toepassingen

- 1 Een seriemotor ontwikkelt 21,25 kW. De ankerserieketen is aangesloten op een spanning van 400 V en zijn rendement is 85 %. Bereken de opgenomen stroomsterkte.
- 2 Een rem van Prony belast een gelijkstroombmotor en is in evenwicht gebracht door het plaatsen van een gewicht van 100 N. We noteren de volgende meetresultaten: bronspanning  $U = 200$  V; opgenomen netstroom 65 A; 1500 omw./min en de hefboomarm  $l = 0,7$  m.  
Bepaal uit deze meetresultaten het totaal rendement van de gelijkstroombmotor.
- 3 Een hijswerktuig wordt aangedreven door een seriemotor die aangesloten is op 120 V en een stroomsterkte van 20 A opneemt. Bereken de tegenspanning als  $R_a + R_b + R_c + R_d = 0,4 \Omega$ .
- 4 Een shuntmotor drijft een werktuigmachine aan en neemt bij 220 V een stroom op van 12 A. De inwendige weerstand  $R_i = R_a + R_b + R_c = 0,3 \Omega$  en de veldweerstand  $R_e = 100 \Omega$ . Bereken de tegenspanning.
- 5 Een shuntmotor levert aan een werktuigmachine een vermogen van 28 kW. De ijzerverliezen van de motor worden op 1200 W geschat en de inwendige weerstand ( $R_a + R_b + R_c$ ) is  $0,22 \Omega$ . De meettoestellen duiden de volgende waarden aan:  $U = 400$  V;  $I_a = 80$  A en  $I_e = 3$  A. Bepaal het rendement en de grootte van de wrijvingsverliezen.
- 6 Een compoundmotor met lange shunt neemt een stroom van 25 A uit het net van 250 V. De inwendige weerstand  $R_i = R_a + R_b + R_c = 0,4 \Omega$ ; de weerstand van de serie wikkeling  $R_d = 0,4 \Omega$  en de weerstand van de shuntwikkeling  $R_e = 156,25 \Omega$ . De nullastverliezen ( $P_m + P_{Fe}$ ) bedragen samen 200 W. Bereken het rendement van de compoundmotor.

#### 4.9 Diagnostische toets

Zie Toetsenboekje.

#### 4.10 Herhalingstaken - Basis

- 1 Een seriemotor heeft de volgende kenmerken:  $R_a + R_b + R_c = 0,15 \Omega$ ;  $R_d = 0,025 \Omega$ . Aangesloten op een spanning van 220 V voert hij een stroom van 40 A. Bereken de tegenspanning.
- 2 Een seriemotor neemt bij een spanning van 110 V een vermogen uit het net van 6,6 kW bij een rotatiefrequentie van 1500 omw./min. De inwendige weerstand  $R_i = R_a + R_b + R_c = 0,15 \Omega$  en  $R_d = 0,2 \Omega$ . Deze motor, gebruikt als generator, wordt aangedreven op 1000 omw./min terwijl hij wordt belast met een stroomsterkte van 60 A.  
Bereken de klemspanning van deze seriegenerator.
- 3 Een shuntmotor drijft een pompinstallatie aan en neemt uit een net van 250 V een stroomsterkte op van 50 A. De rotatiefrequentie is  $13 \frac{1}{3} \text{ s}^{-1}$ .  
 $R_i = R_a + R_b + R_c = 0,5 \Omega$ ; de veldweerstand  $R_e = 125 \Omega$ . Bereken het moment dat de motor ontwikkelt als de nullastverliezen worden verwaarloosd.
- 4 Een seriemotor levert aan een hijswerktuig een vermogen van 5 kW bij een rotatiesnelheid van  $50 \text{ s}^{-1}$ . Het totaal rendement van de motor is 0,80. De weerstand van de wikkelingen bedraagt:  $R_a + R_b + R_c = 0,3 \Omega$ ;  $R_d = 0,2 \Omega$ . De bronspanning is 250 V. Bereken de opgenomen stroomsterkte, de tegenspanning, het elektromechanisch vermogen en het elektromechanisch koppel.

- 5 Een compoundmotor met korte shuntschakeling drijft een pompinstallatie aan met een rotatiefrequentie van  $33 \frac{1}{3} \text{ s}^{-1}$ . De motor is aangesloten op een voedingsnet van 200 V, neemt 8 kW op en werkt met een totaal rendement van 80 %. De weerstanden van de onderscheiden wikkelingen bedragen:  
 $R_a = 0,02 \Omega$ ;  $R_b + R_c = 0,01 \Omega$ ;  $R_d = 0,03 \Omega$  en  $R_e = 99,4 \Omega$ . Bereken het elektromechanisch rendement en het elektromechanisch en nuttig koppel.
- 6 Een seriemotor met rendement 0,86 is aangesloten op een net van 110 V en draait 750 omw./min. Op de as is een koppel van 500 Nm ter beschikking van het aan te drijven hijstoestel.  $R_a + R_b + R_c = 0,06 \Omega$ ;  $R_d = 0,02 \Omega$ . Bereken het elektromechanisch rendement.

#### 4.11 Verrijkingsopdrachten

- 1 Met het oog op het bepalen van het rendement van een shuntmotor noteerde men de volgende resultaten. Bij vollast was de klemspanning  $U = 200 \text{ V}$ , de netstroom  $I = 25 \text{ A}$ , de bekrachtigingsstroom  $I_e = 1,25 \text{ A}$  en de rotatiefrequentie  $25 \text{ s}^{-1}$ . De nullastproef leverde de volgende resultaten op: klemspanning  $U_0 = 192 \text{ V}$ , netstroom  $I_0 = 3 \text{ A}$ ,  $1500 \text{ s}^{-1}$ , inwendige weerstand  $0,15 \Omega$ . Bereken het rendement van deze shuntmotor bij vollast.
- 2 Een tractievoertuig wordt aangedreven door een seriemotor met de volgende kenmerken:  $U = 400 \text{ V}$ ,  $R_a + R_b + R_c = 0,6 \Omega$ ,  $R_d = 0,4 \Omega$ . In een bepaalde bedrijfssituatie neemt de motor een vermogen uit het net van 4 kW en is de rotatiefrequentie  $33 \frac{1}{3} \text{ s}^{-1}$ . Bereken de rotatiefrequentie als men een weerstand van  $4 \Omega$  in serie met de ankerserieketen plaatst en de motor eenzelfde moment laat ontwikkelen.
- 3 Een seriemotor drijft een werktuigmachine ( $T_t = \text{constant}$ ) aan. De motor is aangesloten op een gelijkspanning van 200 V en geeft een vermogen van 3000 W. De motor heeft een rendement van 0,8 en draait 1200 omw./min.  
 $R_a + R_b + R_c = 0,4 \Omega$  en  $R_d = 0,2 \Omega$ . Men wil de rotatiefrequentie van de aangedreven werktuigmachine verlagen tot 1000 omw./min. Bereken de waarde van de weerstand die men in serie met het anker moet plaatsen.
- 4 Een shuntmotor in nominaal bedrijf neemt uit een net van 150 V een stroom op van 20 A. De rotatiefrequentie bedraagt  $25 \text{ s}^{-1}$ , de inwendige weerstand  $R_a + R_b + R_c = 0,3 \Omega$ , de weerstand van de shuntketen  $R_e = 75 \Omega$ . Bereken de aanloopweerstand, rekening houdend met de beperkingen van par. 3.6.3, en de rotatiefrequentie die de motor zal hebben als men de aanloopweerstand inschakelt terwijl het belastingskoppel behouden blijft.
- 5 De ankerwikkeling van een vierpolig bewikkelde rotor bestaat uit 4 ankertakken en bevat 600 werkzame geleiders rond de ankeromtrek. De flux per pool is 0,01 Wb. Geschakeld als shuntmotor levert hij een vermogen van 3000 W bij een rotatiefrequentie van  $38 \frac{1}{3} \text{ s}^{-1}$ . Een A-meter duidt een ankerstroom van 15 A aan, terwijl de bronspanning 225 V aanduidt. De weerstand van de shuntwikkeling is  $140,625 \Omega$ . Bereken het elektromechanisch koppel, het nuttig koppel, het elektromechanisch vermogen, het elektromechanisch en het totaal rendement.
- 6 Met het oog op de rendementsbepaling van een shuntmotor met de methode Swinburne noteren we de volgende meetresultaten: nullastproef  $U_0 = 195 \text{ V}$ ,  $I_{a0} = 7 \text{ A}$ ,  $I_e = 1,6 \text{ A}$ , 1500 omw./min. Als weerstandswaarden noteren we  $R_a = 0,2 \Omega$ ,  $R_b + R_c = 0,2 \Omega$ . De nominale spanning  $U = 200 \text{ V}$  en de rotatiefrequentie bij vollast is 1500 omw./min.  
 Bepaal het rendement bij vollast, de nullastverliezen ( $P_m + P_{Fe}$ ) en de weerstand van de shuntwikkeling. (Bij de nullastproef moet  $E_{t0} = E_t$ ).

## SYNTHESE

### Typen van gelijkstroombmotoren met hun karakteristieken

#### Algemeen

De principewerking van de onderscheiden motortypen is identiek.  
Constructief zijn de gelijkstroombmotoren gelijk aan de gelijkstroombgeneratoren.  
De klemmenaanduidingen zijn eveneens identiek.

#### Motortypen

De herkomst van de bekrachting (excitatie) is, net zoals bij de gelijkstroombgeneratoren, bepalend voor het motortype.

Voor motoren met zeer beperkt vermogen volstaan permanente magneten.

Voor motoren met groot vermogen onderscheiden we:

- motoren met onafhankelijke bekrachting (de voedingsbron van de bekrachtigingswikkeling is onafhankelijk van de spanningsbron die de ankerserieketen voedt);
- motoren met shunt-, serie- en compoundbekrachting (de spanningsbron die de ankerserieketen voedt, levert eveneens de nodige bekrachtigingsstroom).

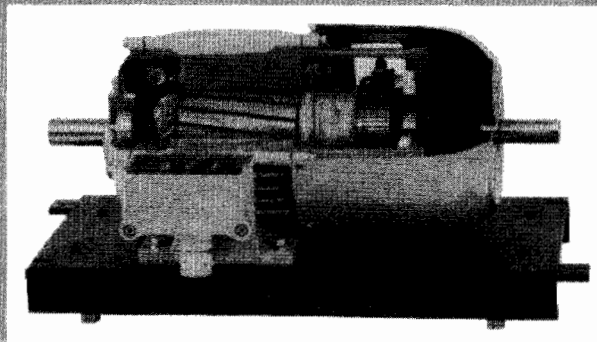
#### Karakteristieken

Het 'gedrag' of het 'karakter' van de onderscheiden typen van motoren leiden we af uit de z.g. karakteristieken. De karakteristieken geven op een grafische manier het verband weer tussen twee veranderlijke grootheden terwijl de overige grootheden constant worden gehouden.

De voornaamste karakteristiek bij motoren is ontegensprekelijk

de 'snelheid-koppelkromme'

( $n = f(T)$  met  $U$  en  $R_a$  constant) omdat ze ons duidelijk het (mechanisch) gedrag van een gelijkstroombmotor weergeeft.





### Kenmerkende eigenschappen

De motor met *onafhankelijke bekrachting* is gekenmerkt door:

- een krachtig aanloopkoppel omwille van de maximaal aanwezige flux en de maximum toegelaten aanzetstroomsterkte vanaf het startmoment;
- een weinig veranderlijke rotatiefrequentie bij veranderlijke motorbelasting.

De *shuntmotor* is gekenmerkt door:

- een minder krachtige aanloop in vergelijking met de onafhankelijk bekrachtigde motor omwille van de hoge coëfficiënt van zelfinductie van de bekrachtigingsketen;
- een weinig veranderlijke rotatiefrequentie bij veranderlijke motorbelasting.

De *seriemotor* is gekenmerkt door:

- een zeer hoog aanloopkoppel;
- een erg veranderlijke rotatiefrequentie bij veranderlijke motorbelasting.

De *compoundmotor* verenigt de typische eigenschappen van de shunt- en seriemotor.

Een optimale combinatie van de flux, afkomstig van de shunt- en seriewikkeling, maakt het mogelijk om een motor te ontwikkelen met:

- een zeer krachtig aanloopkoppel;
- een nagenoeg constante rotatiefrequentie bij veranderlijke belasting.

### Gevaarsituaties bij het gebruik van gelijkstroommotoren

Om het 'op hol slaan' van de motor te vermijden moet men er altijd over waken dat:

- de flux steeds maximaal aanwezig is vooraleer de netspanning aan de anker-serieketen van de motor wordt aangelegd. Dat geldt voor de onafhankelijk bekrachtigde motor en de shuntmotor;
- de seriemotor steeds belast blijft (motor op een vaste wijze koppelen aan de belasting).

De compoundmotor met een grote (tegenwerkende) invloed van de seriewikkeling veroorzaakt een weinig stabiele werking bij het aanlopen.

### Remmen van motoren

Naast mechanisch remmen past men ook elektrisch remmen van motoren toe.

Bij elektrisch remmen schakelt men van de motorwerking over naar de generatorwerking. De kinetische energie van de draaiende rotor wordt omgezet in elektrische energie. Die elektrische energie kan worden omgezet in bv. warmte-energie of terug naar het voedingsnet worden gestuurd. In het eerste geval gaat de energie verloren, in het tweede geval remt men 'met terugwinnen' van energie.

## Rendement van gelijkstroombmotoren

Het rendement kan men op twee manieren bepalen

### 1 de directe methode

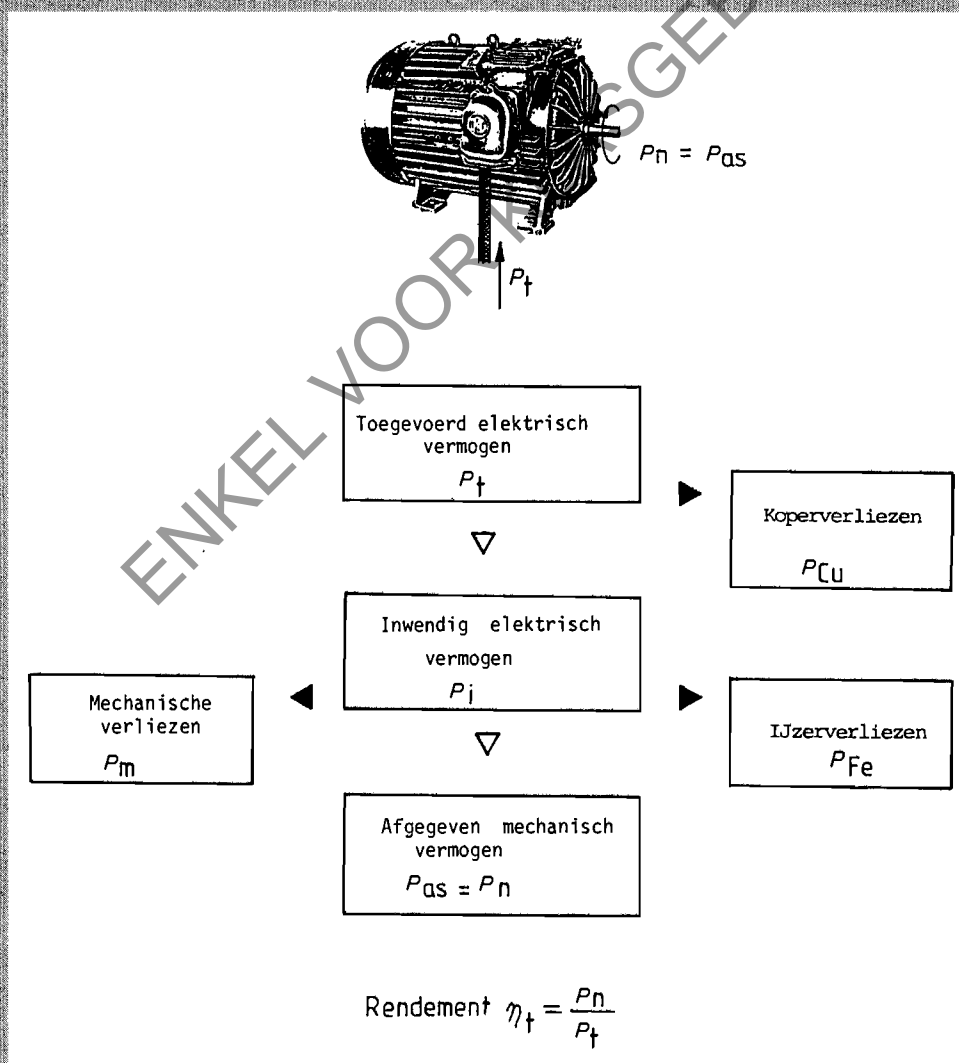
Deze methode is in de praktijk enkel voor motoren met beperkt vermogen uitvoerbaar. We meten rechtstreeks het totaal toegevoerd en het totaal nuttig vermogen.

$$\text{totaal rendement } \eta_t = \frac{P_n}{P_t}$$

### 2 de indirecte methode

Toegepast voor motoren met groot vermogen. We meten enkel de onderscheiden verliezen.

$$\text{totaal rendement } \eta_t = \frac{P_t - P_v}{P_t}$$



9121

ENKEL VOOR KLASGEBRUIK