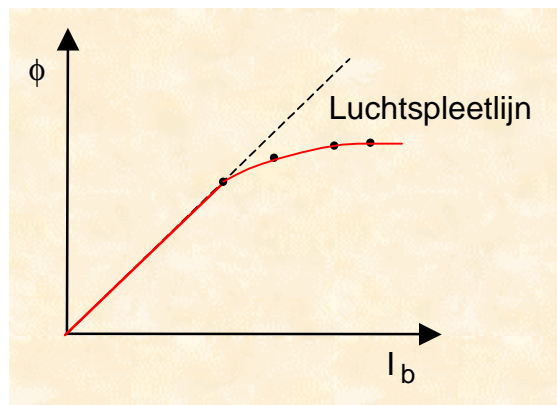


## HOOFDSTUK 4

### STATIONAIR GEDRAG VAN DE GELIJKSTROOMMOTOR

#### 4.1 Onderzoeksmethode

Een conventionele gelijkstroommachine kan zowel werken in generator- als motormode. In de meeste gevallen kan men op automatische wijze overschakelen van de ene mode naar de andere. Nochtans is het de gewoonte de beide modes afzonderlijk te behandelen omdat de interessepunten verschillen. Bij een generator is men vooral geïnteresseerd in de variatie van de klemspanning met de belastingsstroom en de generatorsnelheid. Bij een motor stelt men belang in de koppel-toerental relatie en het aanpassingsvermogen van de motor aan verschillende mechanische belastingen. De basis vormt de magnetiseringskarakteristiek van de machine (figuur 4.1) die het verband geeft tussen flux en velddoorstroming.



figuur 4.1 *Flux in functie van de bekrachtigingsstroom*

Als de doorstroming geproduceerd wordt door een enkele veldwikkeling die een stroom  $I_b$  voert, en als de machine aangedreven wordt op constante snelheid is de geproduceerde e.m.k.  $E_r$  direct evenredig met de flux in de luchtspleet. Daarom kan men de karakteristiek in figuur 4.1 ook beschouwen als het verband tussen  $E_r$  en  $I_b$ .

Zonder verzadiging is de ( $E_r$ - $I_b$ ) relatie een rechte: de luchtspleetlijn overeenkomstig de reluctantie van de luchtspleet. Bij hogere waarden van de bekrachtigingsstroom vergt het verzadigingseffect van de magnetische keten een steeds groter wordend deel van de totale velddoorstroming  $\Theta$ . Daarom blijft de gemiddelde magnetische inductie in de luchtspleet beperkt tot ongeveer 0,8 T, zodat de magnetische inductie ter hoogte van de rotortanden 1,6 T benadert, daar de doorsnede van de tanden ongeveer de helft is van deze van de luchtspleet.

Bij belasting van de gelijkstroommachine wordt de fluxverdeling in de luchtspleet gewijzigd ten gevolge van de ankerreactie. Bij niet-verzadigde polen is er geen verandering van de totale luchtspleetflux. Daar de machine normaal steeds in verzadiging is, geeft de rotorstroom

aanleiding tot een vermindering van 4 tot 8 % van de totale luchtspleetflux. Dit is een niet-lineair effect en is moeilijk analytisch te berekenen. Een 2p-polige gelijkstroommachine gedraagt zich volgens de hierna geschreven vergelijkingen:

- klemspanning of ankerspanning:

$$\text{motor: } U = E_r + I_a R_a \quad (4.1)$$

$$\text{generator: } U = E_r - I_a R_a$$

- opgewekte e.m.k.:

$$E_r = \frac{N_2 p}{\pi a} \omega_r \phi = C \omega_r \phi \quad (4.2)$$

- koppel:

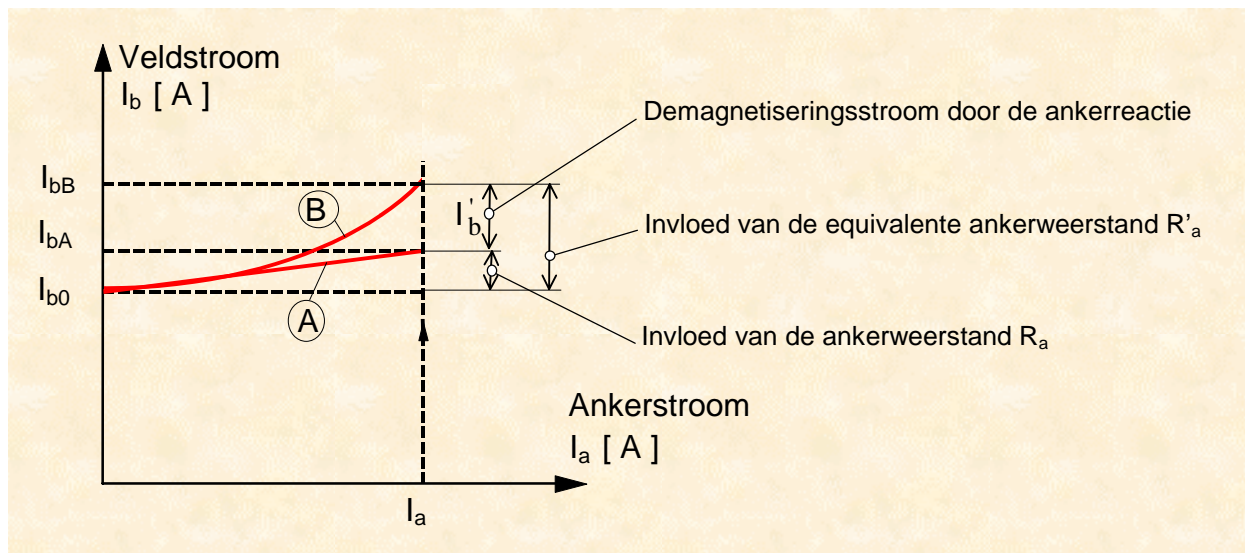
$$T = \frac{N_2 p}{\pi a} I_a \phi = C I_a \phi \quad (4.3)$$

- vermogenrelatie:

$$E_r I_a = T \omega_r \quad (4.4)$$

De meeste symbolen werden reeds vroeger gedefinieerd. Sommige symbolen werden aangepast:  $N_2$  = aantal spoelen van het anker;  $I_a$  = ankerstroom;  $U$  = spanning.

De ankerreactie is van belang. Onderstel een generator aangedreven met constante hoeksnelheid  $\omega_r$ . De uitgangsspanning  $U_a$  wordt constant gehouden. Indien de machine onbelast is ( $I_a = 0$ ), vraagt de machine een veldstroom  $I_{b0}$  om aan deze eisen te voldoen (figuur 4.2).



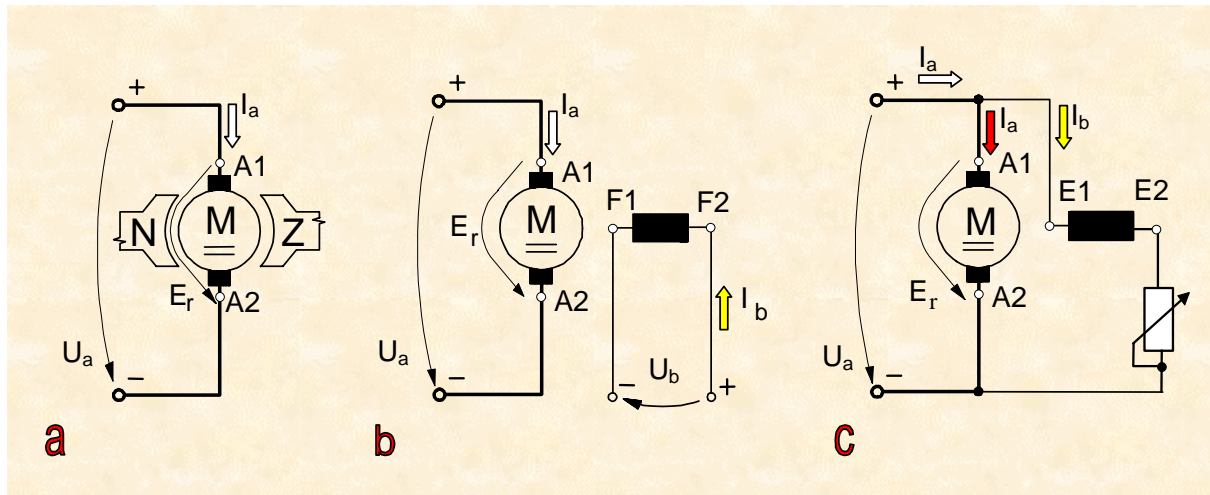
figuur 4.2 *Invloed van de ankerweerstand en de ankerreactie (a = berekend ; b = gemeten)*

Indien op basis van (4.1) een berekening doorgevoerd wordt van het verloop van de veldstroom in functie van de ankerstroom, geldt de rechte A (figuur 4.2). Daartegenover staat de curve B die gemeten wordt. Het verschil tussen de ordinaatwaarden van de curven B en A ( $I_{bB} - I_{bA}$ ) geeft een maat voor de ankerreactie. Voor iedere ankerstroom  $I_a$  kan een equivalente demagnetiseringsstroom  $I'_b$  gedefiniëerd worden: de machine wordt als het ware bekrachtigd met een bekrachtigingsstroom  $I_b - I'_b$ .

De waarde  $I'_b$  kan voor iedere  $I_a$  worden afgelezen in figuur 4.2. Een alternatieve manier om dit ankerreactie-effect in te rekenen, zou er in bestaan alle berekeningen uit te voeren met een equivalente ankerweerstand  $R'_a$ . Deze bestaat dan uit de echte ankerweerstand  $R_a$  en uit een zgn. "ankerreactieweerstand"  $R$  ( $R'_a = R_a + R$ ). Er weze evenwel aan herinnerd dat de ankerreactie eigenlijk geen spanningsval is, maar wel een spanningsvermindering. De weerstand  $R'_a$  is enkel een rekenmiddel en is een functie van zowel  $I_a$  als  $I_b$ . Zo stelt deze weerstand geen verlies voor en is het beter om de weerstandsvoorstelling niet te gebruiken, daar er dan aan de fundamentele eis van een equivalent schema niet meer voldaan is, met name dat de verliezen in de werkelijke machine en het equivalent schema gelijk moeten zijn.

## 4.2 Permanent magneet, onafhankelijke en shuntbekrachtiging

De principeschema's zijn op figuur 4.3 gegeven. In elk van deze gevallen is de bekrachtigingsstroom onafhankelijk van wat er in het anker gebeurt. Voor de onafhankelijk bekrachtigde machine is een onafhankelijke voedingsbron voor de veldketen voorzien, een variabele spanningsbron. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de klemaanduiding van de verschillende windingen van een gelijkstroommachine.



figuur 4.3 *Permanent magneet, onafhankelijke en shuntbekrachtiging*

Tabel 4.1 *Klemaanduidingen van de verschillende windingen van een gelijkstroom-machine*

Wikkeling	Klemaanduiding		Klemaanduiding	
	oud		nieuw	
Ankerwikkeling	A	B	A1	A2
Shuntwikkeling	C	D	C1	C2
Onafhankelijke bekrachtiging	I	K	F1	F2
Seriewikkeling	E	F	D1	D2
Hulpwikkeling	G	H	B1	B2

Bij een shuntmotor (figuur 4.3c) gebruikt men dezelfde spanning voor anker en bekrachtiging. Onder nominale werkingsvoorwaarden is dit een constante spanning. Bij kleine machines wendt men permanente magneten aan (figuur 4.3a) voor de veldflux. Bij een shuntbekrachtiging kan men de stroom  $I_b$  en ook de snelheid regelen door een regelweerstand in de veldketen. Een machine met permanente magneten gedraagt zich in stationaire toestand

als een onafhankelijk bekrachtigde machine met een constante, niet regelbare bekrachtigingsstroom.

Als de stroom  $I_a$  positief beschouwd wordt voor motormode, kunnen de volgende vergelijkingen geschreven worden:

$$\text{snelheid-stroom: } \omega_r = \frac{U_a - I_a R_a}{C\phi} \quad (4.5)$$

$$\text{koppel-stroom: } T = C\phi I_a \quad (4.6)$$

$$\text{koppel-snelheid: } T = \frac{C\phi(U_a - C\phi\omega_r)}{R_a} \sim \frac{U_a}{I_b} \quad (4.7)$$

$$\text{vermogen-snelheid: } P = T\omega_r = \frac{C\phi\omega_r(U_a - C\phi\omega_r)}{R_a} \quad (4.8)$$

De veldstroom is

$$I_b = \frac{U_b}{R_b}$$

Voor een shuntmotor geldt dat  $U_b = U_a = U$ , de gemeenschappelijke spanning. Voor een onafhankelijk bekrachtigde machine is  $U_b$  onafhankelijk regelbaar. Als de verzadiging kan verwaarloosd worden

$$C\phi = GI_b \quad (4.9)$$

kan de wet van Hopkinson met  $\mathfrak{R}_m$  als constante magnetische reluctantie gebruikt worden:

$$N_b I_b = \mathfrak{R}_m \phi \quad (4.10)$$

en

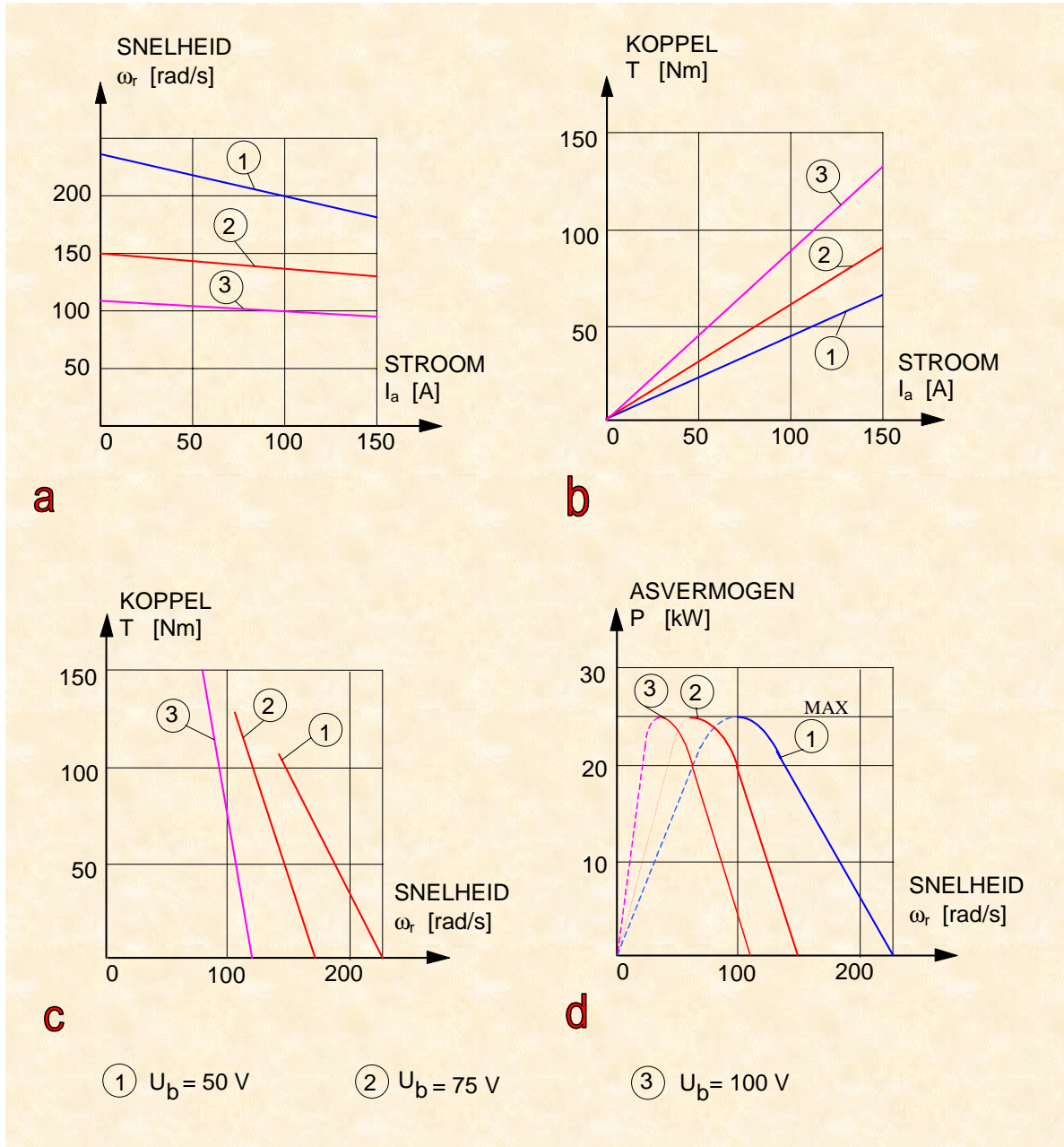
$$E_r = GI_b \omega_r = G \frac{U_b}{R_b} \omega_r \quad (4.11)$$

Vergelijkingen (4.5) en (4.6) worden gelineariseerd:

$$\text{snelheid-stroom: } \omega_r = \frac{(U_a - I_a R_a) R_b}{G U_b} \quad (4.12)$$

$$\text{koppel-snelheid: } T = GI_b I_a = \frac{G U_b}{R_b R_a} \left[ U_a - G \left( \frac{U_b}{R_b} \right) \omega_r \right] \quad (4.13)$$

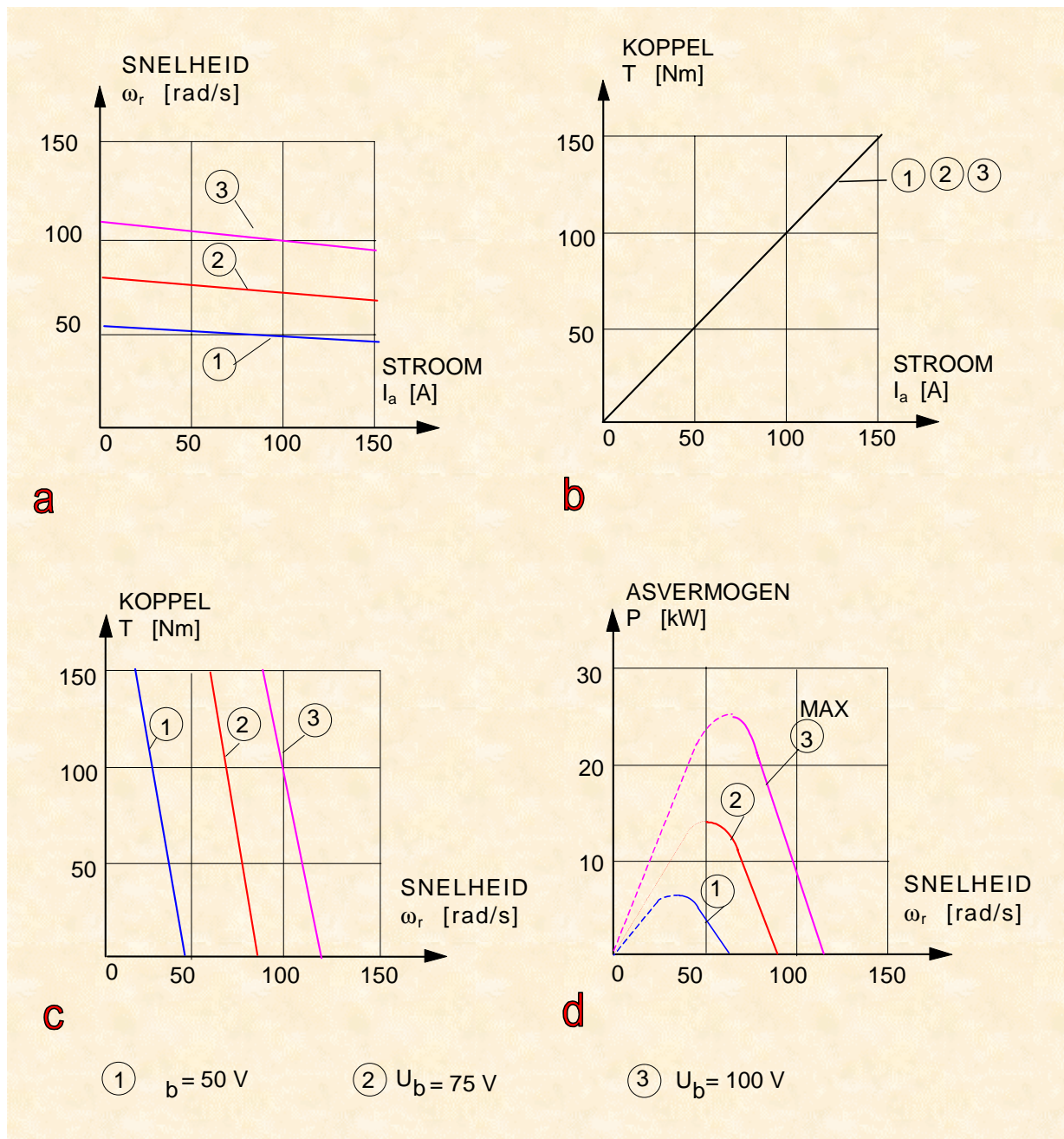
De karakteristieken van een onafhankelijk bekrachtigde motor met constante ankerspanning en variabele veldspanning zijn gegeven op figuur 4.4. ( $P = 10 \text{ kW}$ ;  $U_a = 100 \text{ V}$ ;  $U_b = 100, 75 \text{ en } 50 \text{ V}$ ;  $G = 0,9$ ;  $R_b = 100 \text{ } \Omega$ ,  $R_a = 0,10 \text{ } \Omega$ ). De verzadiging en de ankerreactie worden verwaarloosd.



figuur 4.4 Karakteristieken van een onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommotor met variabele veldstroom

Voor dezelfde machine met constante veldspanning  $U_b = 100 \text{ V}$  en veranderlijke ankerspanning  $U_a = 100, 75 \text{ en } 50 \text{ V}$  zien de curven eruit als in figuur 4.5.



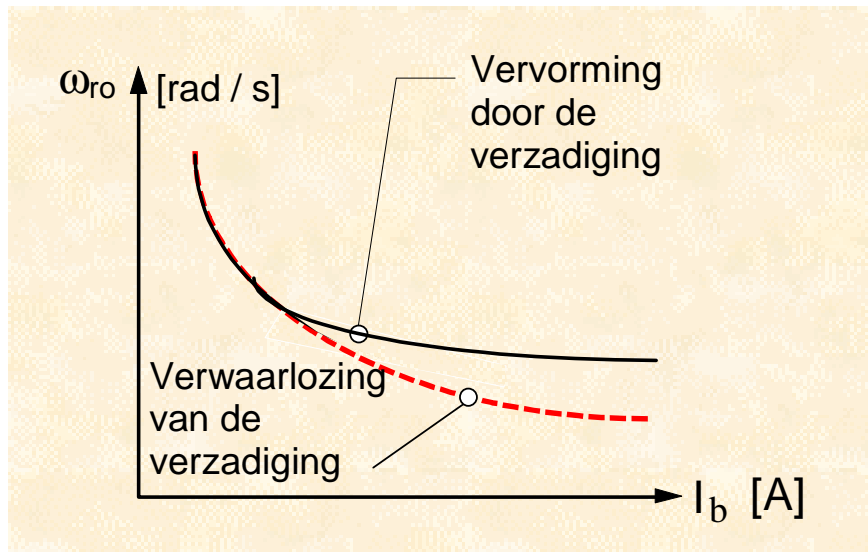


figuur 4.5 *Karakteristieken van een onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommachine met variabele ankerspanning*

Deze geïdealiseerde curven van de figuur 4.4 en figuur 4.5 moeten nog gecorrigeerd worden voor verzadiging en ankerreactie. Nullastnelheid of nullasttoerental  $\omega_{r0}$  is omgekeerd evenredig met de flux. De nullastnelheid is de snelheid waarbij het koppel nul is (figuur 4.4c). Volgens figuur 4.3 trekt de machine geen stroom ( $I_a = 0$ ). Het hyperbolisch en ongeveer hyperbolisch verloop van de  $\omega$ - $\phi$ , respectievelijk  $\omega_r$ - $I_b$  curven volgt uit:

$$\omega_{r0} = \frac{U_a}{C\phi} \quad (4.14)$$

De stippellijn in figuur 4.6 geeft de grafiek bij verwaarlozing van de verzadiging, de volle lijn geeft het reële geval.



figuur 4.6 *Invloed van de verzadiging op het nullasttoerental*

De nullastsnelheid wordt ontoelaatbaar groot als de bekrachtigingsstroom te klein wordt. In dit laatste geval zegt men dat de machine op hol slaat wat bijvoorbeeld kan ontstaan door een toevallige onderbreking in de bekrachtigingsketen. Dan wordt  $\phi$  immers zeer klein en streeft  $\omega_r$  naar een zeer grote waarde.



### 4.3 Seriebekrachtiging

De seriemotor heeft een vrij breed toepassingsdomein. Deze machine wordt gebruikt voor vermogens vanaf enkele W tot meerdere honderden kW. Het is deze machine die gebruikt wordt als universeelmotor, waarbij ze zowel met wissel- als gelijkspanning kan gevoed worden. Met de klemspanning  $U = U_s + U_a$ , de stroom  $I = I_s = I_a$  en de totale weerstand  $R = R_s + R_a$  worden de vergelijkingen voor het stationair gedrag:

$$\text{snelheid-stroom: } \omega_r = \frac{(U - IR)}{C\phi} \quad (4.15)$$

$$\text{koppel-stroom: } T = C\phi I \quad (4.16)$$

$$\text{koppel-snelheid: } T = \frac{C\phi}{R} (U - C\phi\omega_r) \quad (4.17)$$

$$\text{vermogen-snelheid: } P = T\omega_r = \frac{C\phi\omega_r}{R} (U - C\phi\omega_r) \quad (4.18)$$

De flux is een niet-lineaire functie van de belastingsstroom. Als in eerste instantie de verzadiging verwaarloosd wordt, zodat de flux evenredig is met de belastingsstroom, is:

$$C\phi = GI \quad (4.19)$$

en

$$E_r = G\omega_r I \quad (4.20)$$

De gelineariseerde vergelijkingen voor snelheid-stroom en koppel-stroom worden:

$$\omega_r = \frac{(U - IR)}{GI} \quad (4.21)$$

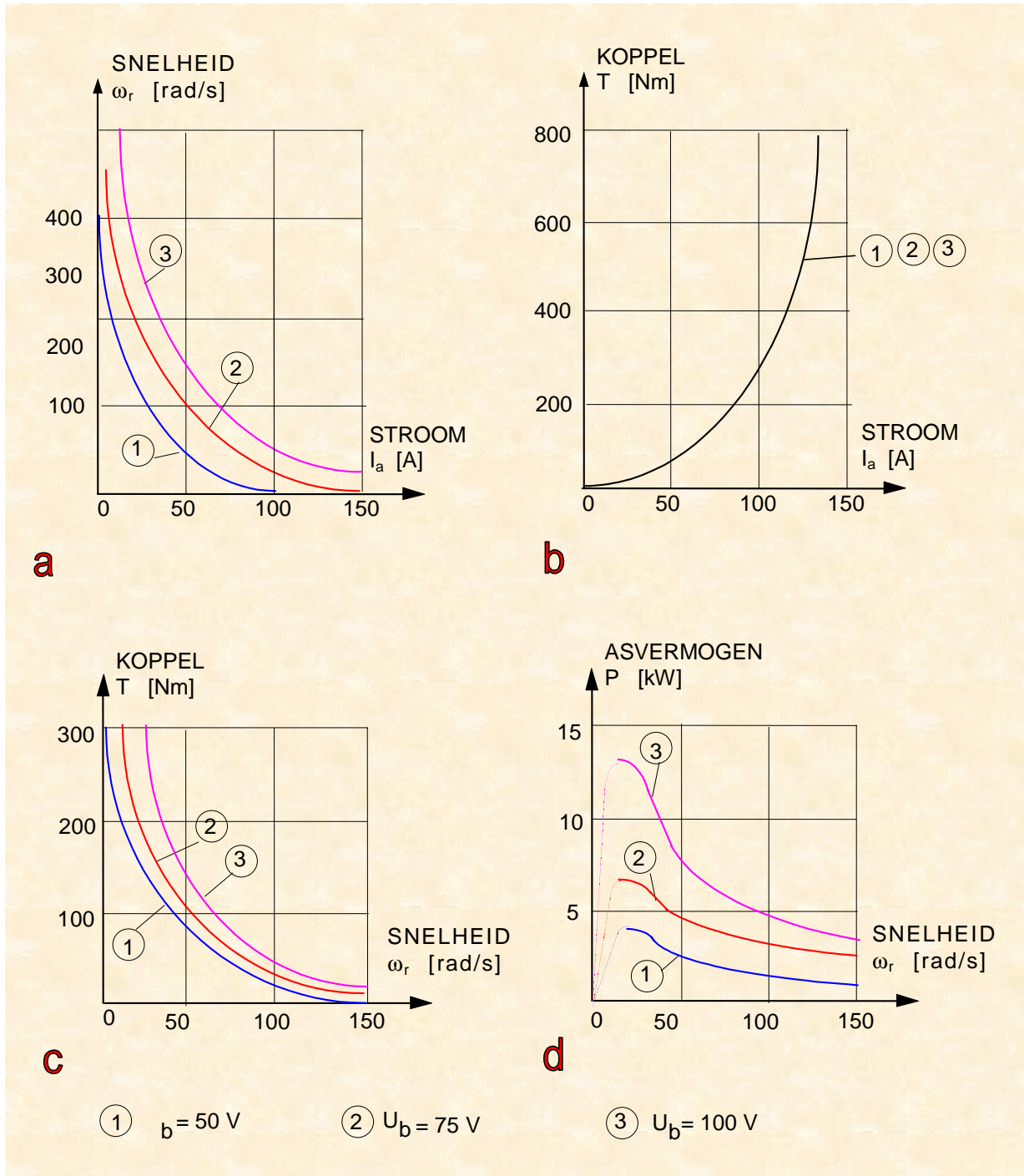
$$T = GI^2 \quad (4.22)$$

Het koppel is evenredig met het kwadraat van de stroom.

De koppel-toerental karakteristiek volgt uit (4.21) en (4.22) door eliminatie van de stroom:

$$T = \frac{GU^2}{(\omega_r G + R)^2} \quad (4.23)$$

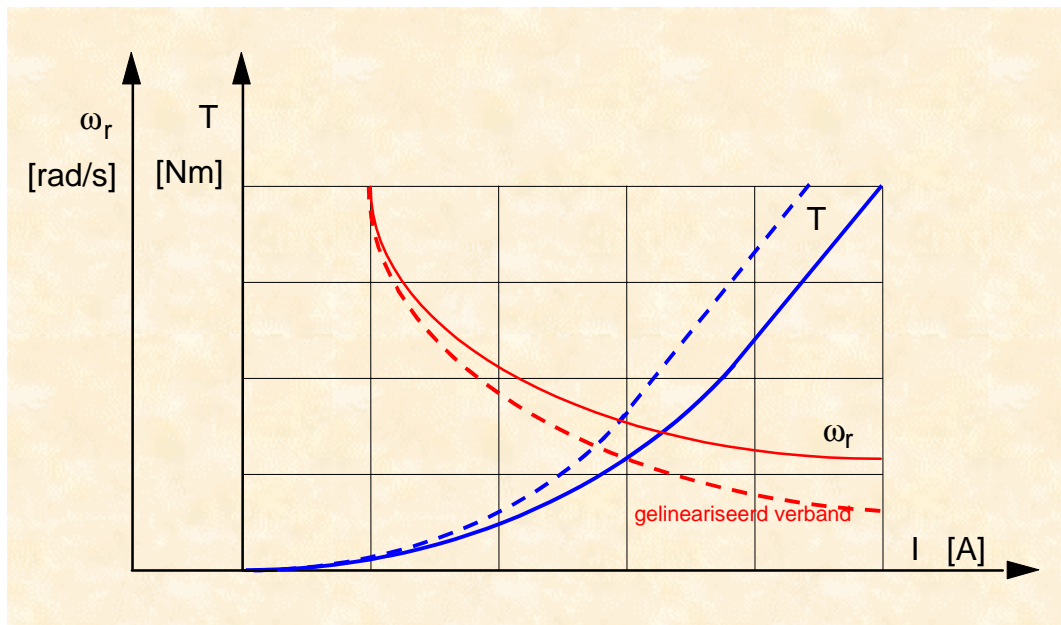
Voor het eenvoudige geval, waarbij verzadiging en ankerreactie worden verwaarloosd, zijn de karakteristieken getekend voor een 100 V - 10 kW machine. De parameter is de klemspanning  $U$ . De grafieken gelden voor  $U = 50, 75$  en  $100$  V (figuur 4.7).



figuur 4.7 Karakteristieken van een gelijkstroomseriemotor bij nominale spanning

Het koppel is zeer groot bij lage snelheid wat de seriemotor uitermate geschikt maakt voor tractiedoeleinden. Vermits bij stilstand  $E_r = 0$  is, trekt de seriemotor een zeer grote aanloopstroom. Omdat bij deze motor de bekrachtigingsstroom ook de belastingsstroom is, slaat de machine op hol bij te kleine belasting. De stroom in een machine wordt bepaald door de belasting (4.22). Een seriemotor mag nooit losgekoppeld worden van zijn last. Nullast is een werkpunt dat niet bestaat voor een seriemotor.

Door de verzadiging moeten de karakteristieken van figuur 4.7 worden aangepast, vooral onder nominale werkingsvoorwaarden. De werkelijke karakteristieken kunnen worden afgeleid uit de magnetische karakteristiek en de ankerreactiecorrectie (figuur 4.8).



figuur 4.8 *Reële karakteristieken van een gelijkstroomseriemotor*

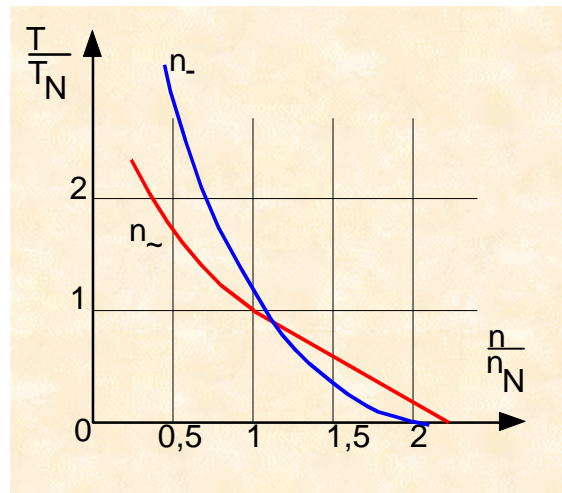
De dunne lijn stelt het gelineariseerde verband voor, terwijl de vette lijn een voorstelling geeft van de werkelijke curven. Bij stromen gelijk aan of groter dan nominaal is de snelheid  $\omega_r$  zowat 20% hoger dan in het geïdealiseerd geval. Het koppel daarentegen verkleint in vergelijking met de geïdealiseerde waarde. Voor grote stromen is het T-I verband een rechte.

## 4.4 Universeelmotor

Een universeelmotor is afgeleid van de klassieke gelijkstroomseriemotor. Wanneer men de polariteit van de klemmen van een gelijkstroommachine omkeert, veranderen stroom en flux van teken. Daardoor blijft het koppel in dezelfde zin, aangezien  $T = k \cdot \phi \cdot I$ . Bijgevolg is de werking van de klassieke gelijkstroomseriemotor niet tot gelijkstroom beperkt, maar draait hij ook als men een wisselspanning aan de klemmen legt. In de stator is eveneens een wisselende flux, zodat deze gelamelleerd wordt uitgevoerd. Een shuntmotor kan niet gebruikt worden als universeelmotor omdat de grote veldinductantie van de shuntmotor het snelle omkeren van de veldstroom onmogelijk maakt. Figuur 4.9 geeft een typische koppel-toerentalkarakteristiek van een universeelmotor. De wisselspanningskarakteristiek verschilt van de gelijkspanningskarakteristiek om twee redenen.

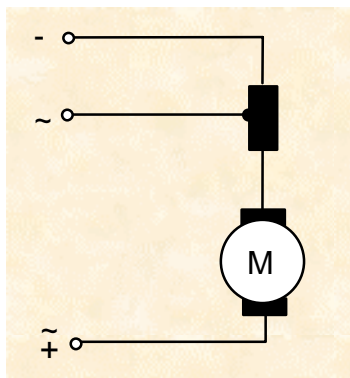
- In het wisselspanningsbedrijf is de e.m.k. lager tengevolge van de reactieve spanningsval over de veldinductantie. Bij een bepaalde stroom of flux komt dat neer op een lagere snelheid t.o.v. het gelijkspanningsgeval.

- Bij wisselspanningsbedrijf kan de magnetische keten in verzadiging komen bij het pieken van de stroomgolf. Bijgevolg is de effectieve waarde van de flux lager in wisselspanningsbedrijf, waardoor het koppel eveneens lager is.



figuur 4.9 *Koppel-toerentalkarakteristiek van een gelijkstroommotor als universeel-motor bij wisselstroom en gelijkstroom*

Samenvattend daalt de koppel-toerentalkarakteristiek bij gelijkstroom sneller dan bij wisselstroom. Daarom wordt de motor zo geconstrueerd dat het nominaal werkingpunt bij wisselspanning en gelijkspanning samenvalt door een wikkeling toe te voegen die enkel bij gelijkstroombedrijf wordt ingeschakeld (figuur 4.10).



figuur 4.10 *Universeelmotor met verschillende aansluitingen voor wisselstroom en gelijkstroom*

De universeelmotor is een van de goedkoopste kleinere motoren wanneer men de investeringskost per vermogeneenheid als criterium neemt. De universeelmotor komt vooral in aanmerking wanneer men een toerental hoger dan 3000 tr/min wil bereiken. Voor hogere toerentallen dan 20.000 tr/min is hij de motor bij uitstek. Toerentallen tot 25.000 tr/min kunnen zonder moeilijkheden bereikt worden. Het toerental is beperkt door commutatie en centrifugaalkrachten op de rotor. De universeelmotor leent zich uitstekend voor toerentalregeling. Ten gevolge van de borstels heeft hij een kortere levensduur dan de meeste andere kleine motoren. Tengevolge van de inductieve spanningsval over de veldwikkeling heeft de universeelmotor bij wisselstroom-bedrijf geen aanloopweerstand nodig. Aangezien het koppel van een seriemachine evenredig is met het kwadraat van de ankerstroom, pulseert het geleverde koppel op dubbele netfrequentie. Ten gevolge van deze trillingen produceert deze motor veel geluid. Het geluid veroorzaakt door deze motoren vereist een bijkomende geluidsisolatie voor de meeste toepassingen. De vonken aan de collectorlamellen maken deze motoren ongeschikt in een explosieve omgeving. Bovendien veroorzaken zij radiofrequente stoorsignalen en moet men ontstoringscondensatoren plaatsen.

## **4.5 Remmen**

Een machine op een veilige en efficiënte manier tot stilstand brengen is even belangrijk als elektromechanische, magnetische en wervelstroomremmen, en zelfs eenvoudige wrijvingsremmen behoren tot de mogelijkheden. Nochtans bestaan er meer elegante "elektrische remmethoden", die het voordeel bezitten meer economisch te zijn en/of remslijtage te verminderen. De elektrische remmethoden zijn er in principe op gebaseerd de machine tijdens de remming in de generatormode te laten werken en hetzij de kinetische energie van de last te dissiperen in weerstanden (weerstanden en tegenstroomremming), hetzij de energie terug te sturen naar het net (recuperatieremming).

### **4.5.1 Weerstandsremming**

Deze zeer eenvoudige remmethode bestaat erin de motor af te schakelen van het voedend net om hem dan onmiddellijk te verbinden met weerstanden. De energie van het systeem wordt gedissipeerd in de remweerstanden. Remming tot stilstand is niet mogelijk: bij stilstand wordt geen e.m.k. opgewekt en kan de machine geen vermogen aan de weerstanden leveren.

### **4.5.2 Tegenstroomremming**

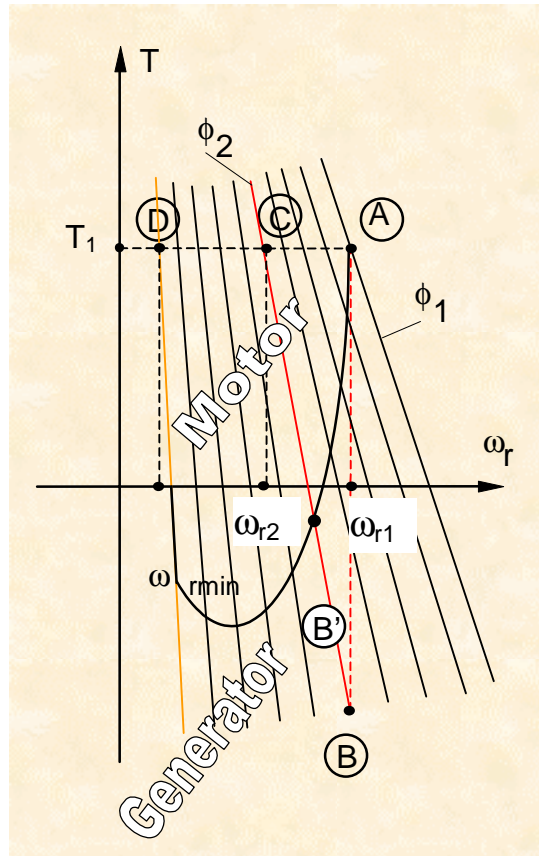
Om deze remmethode te verwezenlijken schakelt men de motor van het net, verwisselt de twee draden en sluit hem terug aan op het net, met de bedoeling de draairichting van de motor te wijzigen. Hierdoor grijpt een sterke remming plaats en is remming tot stilstand mogelijk. Omwille van het bruske karakter wordt dit type remming vrijwel niet meer toegepast.

### **4.5.3 Recuperatieremming**

Bij deze remmethode wordt de remenergie terug naar het net gestuurd. Recuperatieremming wordt vooral toegepast als de motor onderhevig is aan sterk variërende werkingsvoorwaarden waar veel moet geremd worden en als men er voordeel kan uit halen om de potentiële energie

(bijv. treinen in sterk heuvelachtige landschappen, kranen en liften bij het laten zakken van de last) om te zetten in elektrische energie. De essentiële voorwaarde voor recuperatieremming is dat de door de machine opgewekte e.m.k. groter is dan de spanning van het net. Dan draait het teken van de stroom om en werkt de machine als generator. Dit kan bekomen worden door de flux in de machine te laten toenemen of door de voedingsspanning te laten dalen.

Beschouwt men een onafhankelijk bekrachtigde motor met constant belastingskoppel  $T_1$  en die op een snelheid  $\omega_{r1}$  draait door de flux de waarde  $\phi_1$  te geven. Het werkingpunt is het punt A (figuur 4.11).



figuur 4.11 *Recuperatieremming bij een shuntmotor*

Veronderstelt men dat men de flux vermeerderd tot  $\phi_2$ . Daar de motor tengevolge van zijn traagheid niet ogenblikkelijk van snelheid verandert, gaat het werkingpunt over van A naar B: de machine werkt als generator en stuurt naar het net een hoeveelheid energie die hij onttrekt van kinetische energie van de roterende delen. Er grijpt een sterke remming plaats. Indien de flux constant blijft op de waarde  $\phi_2$  gebeurt de vertraging volgens de overeenstemmende rechte. Het werkingpunt komt in C. De motor vertraagt van  $\omega_{r1}$  tot  $\omega_{r2}$ . In werkelijkheid gaat het punt niet van A naar B. Enerzijds kan de motor wegens de mechanische inertie niet plots vertragen. Anderzijds kan de flux in de machine niet plots toenemen. Daar in werkelijkheid de veranderingen van snelheid en flux tegelijkertijd optreden, volgt het werkingpunt een kromme AB', om dan van B' naar C over te gaan indien de flux op de waarde  $\phi_2$  wordt gehouden. Maar indien men gedurende deze vertraging de bekrachtiging blijft verhogen, volgt

het werkpunt een kromme die na B' verlengd wordt en uiteindelijk in D uitkomt als men de flux op zijn nominale waarde gebracht heeft.

Recuperatieremming laat niet toe de motor tot stilstand te brengen. Om de motor trager te laten draaien dan  $\omega_{rmin}$ , kan men weerstandsremming toepassen, doch ook dit laat niet toe de motor veilig tot stilstand te brengen. Hierna gaat men over op mechanische remming.

Recuperatieremming kan ook worden uitgelegd via de ankerstroom

$$I_a = \frac{U - E_r}{R_a} \quad (4.24)$$

Er grijpt recuperatie plaats wanneer de verhoging van de flux voldoende is om  $E_r$  ondanks de snelheidsvermindering groter te maken dan  $U$ . Zolang  $E_r > U$  is de stroom  $I_a$  negatief: de motor stuurt energie terug naar het net.

## 4.6 Snelheidsregeling

In principe kan men de snelheid van een gelijkstroommotor als volgt uitdrukken:

$$\omega_r = \frac{E_r}{C\phi} = \frac{(U_a - I_a R_a)}{C\phi} \quad (4.25)$$

Deze formule maakt duidelijk dat men op drie parameters kan inspelen om de snelheid te regelen:

- |   |                        |
|---|------------------------|
| 1. wijziging van de flux $\phi$           | VELDSTURING            |
| 2. variatie van de ankerweerstand $R_a$   | INDIRECTE ANKERSTURING |
| 3. verandering van de ankerspanning $U_a$ | ANKERSTURING.          |

### 4.6.1 T- $\omega_r$ karakteristieken

#### 4.6.1.1 Onafhankelijke bekrachtiging, permanente magneten, shuntbekrachtiging

$$T = \frac{C\phi(U_a - C\omega_r\phi)}{R} \quad (4.26)$$

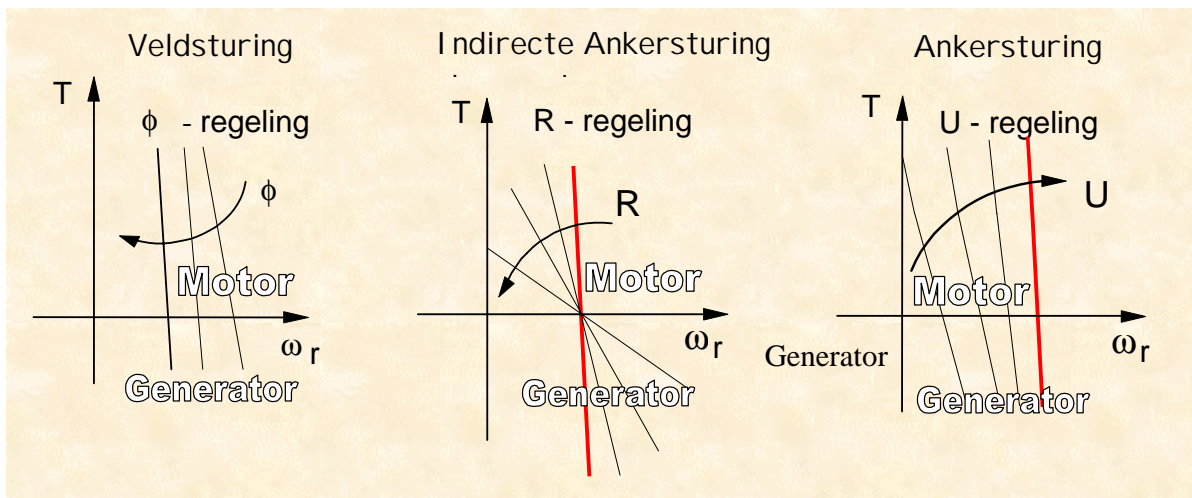
$$\omega_{r0} = \frac{U_a}{C\phi} \quad (4.27)$$

$$\frac{dT}{d\omega_r} = -\frac{C^2\phi^2}{R} \quad (4.28)$$

Met  $R$  bedoelt men hier de eigenlijke ankerweerstand  $R_a$  en de eventuele voorschakelweerstand. Aan de hand van bovenstaande uitdrukkingen is het plausibel figuur



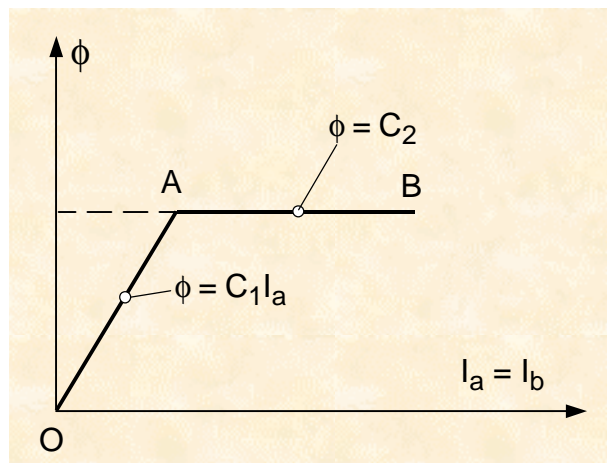
4.12 te verklaren. De pijlrichting duidt op toenemende waarde van resp.  $\phi$ ,  $R$  en  $U$ . De in dikke lijn getekende karakteristiek is geldig voor  $\phi = \phi_{\max}$ ,  $R = R_a$  en  $U_a = U_{\text{nom}}$ .



figuur 4.12 *Regelmogelijkheden bij de gelijkstroommotor met onafhankelijke bekrachtiging, permanente magneten en shuntbekrachtiging*

#### 4.6.1.2 Seriemoor

Tot nu toe werd de koppel-snelheids-karakteristiek afgeleid zonder verzadiging. Omdat er geen exacte analytische uitdrukking voor de magnetische curve bestaat, kan deze benaderend voorgesteld door twee rechte lijnen  $OA$  en  $AB$  (figuur 4.13).



figuur 4.13 *Geïdealiseerde magnetiseringskarakteristiek van de seriemotor*

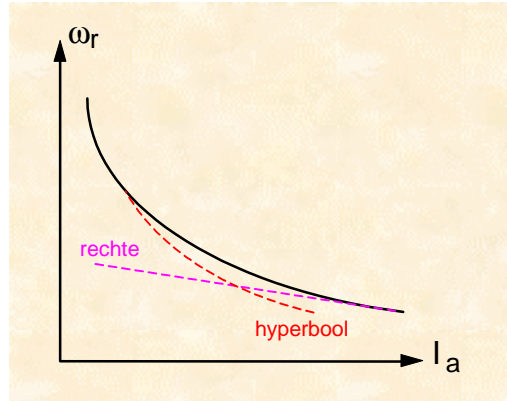
Dan is voor  $\phi = C_1 I_a$ :

$$\omega_r = \frac{U}{C \cdot C_1 I_a} - \frac{R}{C \cdot C_1} \quad (\text{hyperbool}) \quad (4.29)$$

en voor  $\phi = C_2$ :

$$\omega_r = \frac{U}{C \cdot C_2} - I_a \frac{R}{C \cdot C_2} \quad (\text{rechte}) \quad (4.30)$$

In figuur 4.14 is het verloop  $\omega_r = f(I_a)$  afgebeeld.



figuur 4.14 *Toerental in functie van de ankerstroom voor de verzadigde seriemotor volgens figuur 4.13*

Substitutie van  $I_a$  in (4.29) door:

$$I_a = \sqrt{\frac{T}{C C_1}} \quad (4.31)$$

en in (4.30) door:

$$\omega_r = \frac{U}{C C_2} - \frac{T R}{C C_1 C C_2} \quad (4.32)$$

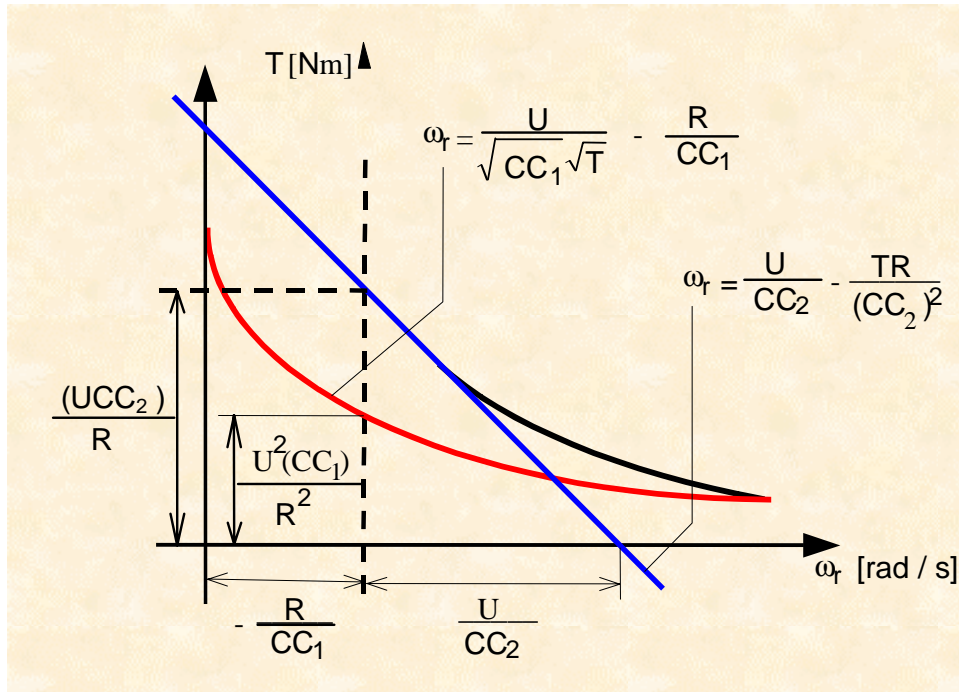
levert de koppel-toerental karakteristiek voor  $\phi = C_1 I_a$ :

$$\omega_r = \frac{U}{\sqrt{C C_1} \sqrt{T}} - \frac{R}{C C_1} \quad (4.33)$$

en voor  $\phi = C_2$ :

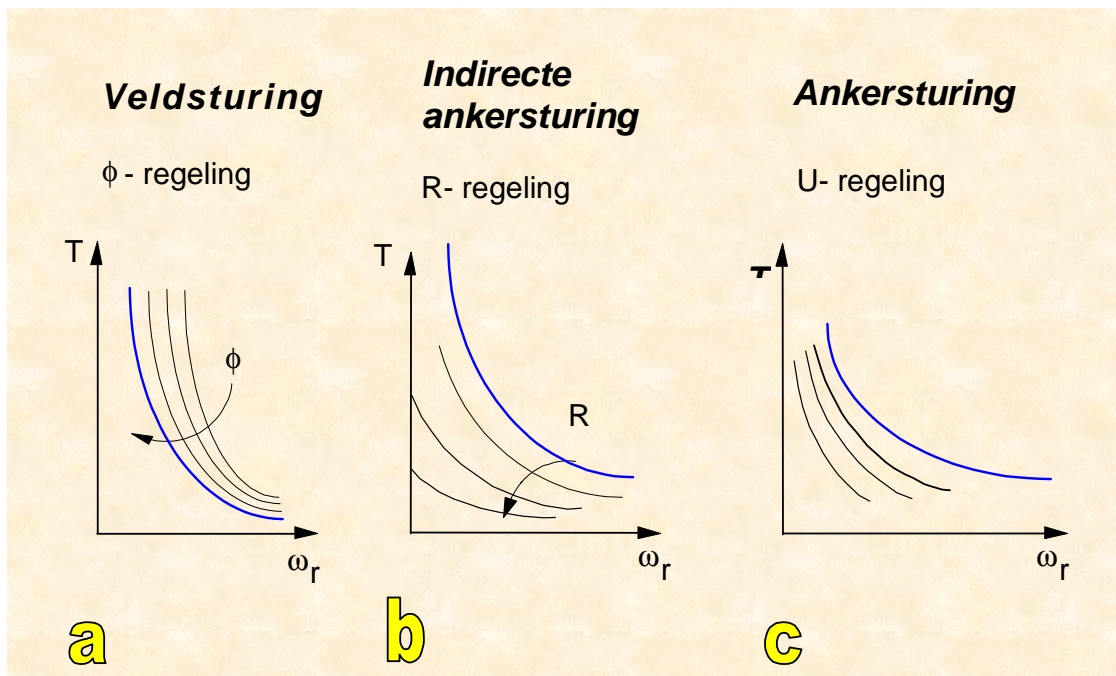
$$\omega_r = \frac{U}{C C_2} - \frac{T R}{(C C_2)^2} \quad (4.34)$$

De grafische voorstelling van deze uitdrukkingen is getekend in figuur 4.15.



figuur 4.15 Koppel-toerentekarakteristiek voor een seriemotor

Zo kan een schare  $T-\omega_r$  karakteristieken getekend worden voor elk van de vroeger vermelde regeloptyes (figuur 4.16).



figuur 4.16 Toerentalregeling voor een gelijkstroomseriemotor

## 4.6.2 Veldsturing

Door de bekrachtigingsstroom  $I_b$  en de ermee samenhangende flux te verkleinen, kunnen hogere snelheden bereikt worden dan bij maximale flux in de machine.

Daar de aanloop steeds met volle bekrachtiging gebeurt, is de snelheid bij volle veld ongeveer  $\omega_{r0}$  overeenkomstig de maximale flux. Men kan de snelheid verder verhogen door de stroom in de veldketen te verlagen: Daardoor stijgt  $\omega_{r0}$  en de helling van de koppel-toerental karakteristiek neemt toe (figuur 4.12a).

Bij de onafhankelijk bekrachtigde motor heeft men meer keuze om de regeling te verwezenlijken: met een weerstand of door een regelbare veldspanning  $U_b$ .

## 4.6.3 Indirecte ankersturing

Met deze term wordt eigenlijk de ankersturing bedoeld, waarbij de ankerspanning geregeld wordt door de spanningsval  $I_a R_a$  te vermeerderen. Deze methode werd vrij veel gebruikt, doch is heden ten dage volledig verdwenen omwille van de verliezen, die hoog oplopen en de vlotte regelbaarheid van de ankerspanning via vermogenelektronische schakelingen. Er wordt dan ook niet verder op ingegaan.

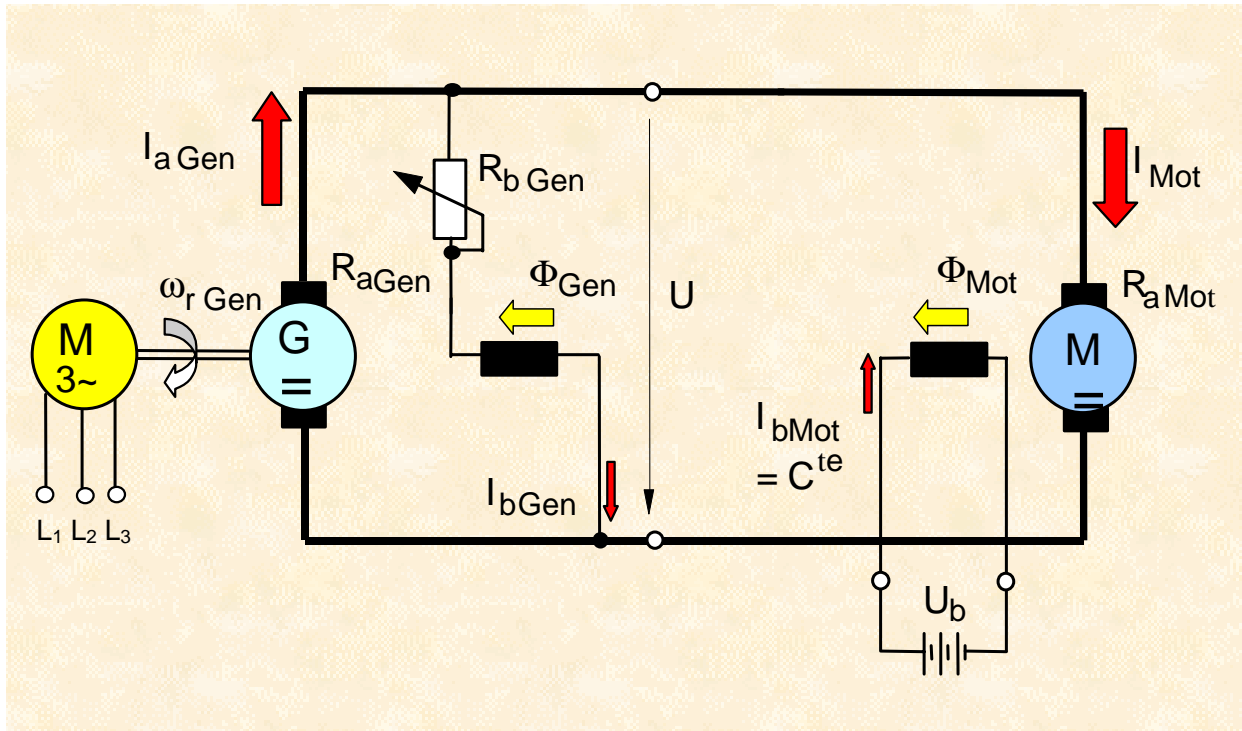
## 4.6.4 Ankersturing

Om de snelheid van een gelijkstroommotor te regelen door een variabele klemspanning  $U_a$  (figuur 4.12c en figuur 4.16c), past men hoofdzakelijk een van de volgende twee principes toe:

- de variabele spanning opwekken door een afzonderlijke gelijkstroom-generator;
- de klemspanning  $U_a$  regelen met een vermogenelektronische schakeling.

### 4.6.4.1 Klassieke Ward - Leonardschakeling

De klassieke Ward-Leonard schakeling (figuur 4.17) wordt aangewend bij shuntmotoren en onafhankelijke bekrachtigde motoren. Deze schakeling is volledig verdrongen door de verder besproken statische schakelingen. De fysische werking van de klassieke uitvoering is echter eenvoudiger te begrijpen.



figuur 4.17 *Klassieke Ward-Leonard*

De motor is onafhankelijk bekrachtigd en de flux wordt niet geregeld zodat  $\phi_M$  constant is. De spanning  $U$  aan het anker van de motor wordt opgewekt door een gelijkstroomshuntgenerator, waarvan de spanning  $U$  geregeld wordt door een regelweerstand  $R_{b\text{gen}}$  in de shuntbekrachtigingsketen. De gelijkstroomgenerator wordt aangedreven door een andere roterende machine: een driefasige inductiemotor of synchrone motor indien een wisselspanningsnet aanwezig is of een verbrandingsmotor indien geen net voorhanden is, of voor mobiele toepassingen zoals portaalkranen. Samengevat geldt voor deze schakeling

$$\omega_{r\text{Gen}} \rightarrow E_{r\text{Gen}} = C\omega_{r\text{Gen}}\phi_{\text{Gen}}$$

↓

$$U = E_{r\text{Gen}} - R_{a\text{Gen}}I_{a\text{Gen}} \quad (4.35)$$

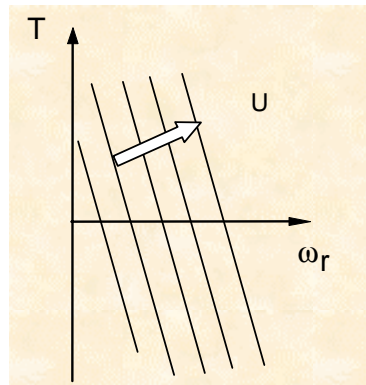
↓

$$\omega_{r\text{Mot}} = \frac{U - R_{a\text{Mot}}I_{a\text{Mot}}}{C\phi_{\text{Mot}}}$$

Als de kleine  $R_{a\text{Mot}}$  verwaarloosd wordt, is

$$\omega_{r\text{Mot}} = \frac{U}{C\phi_{\text{Mot}}} \sim U \quad (4.36)$$

De koppel-snelheidskarakteristieken zijn dan evenwijdige rechten (figuur 4.18).



figuur 4.18 *Koppel-snelheidskarakteristieken van een Ward-Leonard schakeling*

Dit systeem maakte een zeer soepele snelheidsregeling mogelijk op een ogenblik dat de vermogenelektronica nog niet sterk ontwikkeld was. De opstelling (figuur 4.17) heeft het groot voordeel recuperatieremming mogelijk te maken, tot volledige stilstand van de motor(

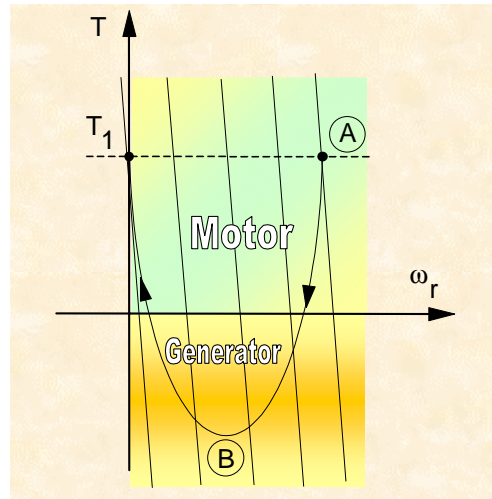
figuur 4.19). Onderstel dat het werkingspunt zich bevindt in A en dat men de bekrachtiging van de generator snel vermindert. Indien de spanning U sneller daalt dan de motor vertraagt, gaat het werkingspunt over naar B zoals bij de shuntmotor. Terwijl in dit laatste geval U constant is en  $E_r$  verhoogt om de richting van de stroom te veranderen, vermindert hier geleidelijk de spanning U om ze kleiner te maken dan  $E_r$ . Het resultaat is hetzelfde: de stroom

$$I_a = \frac{U - E_r}{R_a} \quad (4.37)$$

verandert in beide gevallen van richting, en er wordt energie gerecupereerd. Hier kan men deze methode toepassen tot volledige stilstand van de motor.

Er is hierbij wel een fundamentele voorwaarde. De motor die de generator aandrijft moet de terugvoer van energie kunnen verwerken. Dit kan voor een inductiemotor en een synchrone motor die met het net gekoppeld zijn, maar niet voor een verbrandingsmotor.



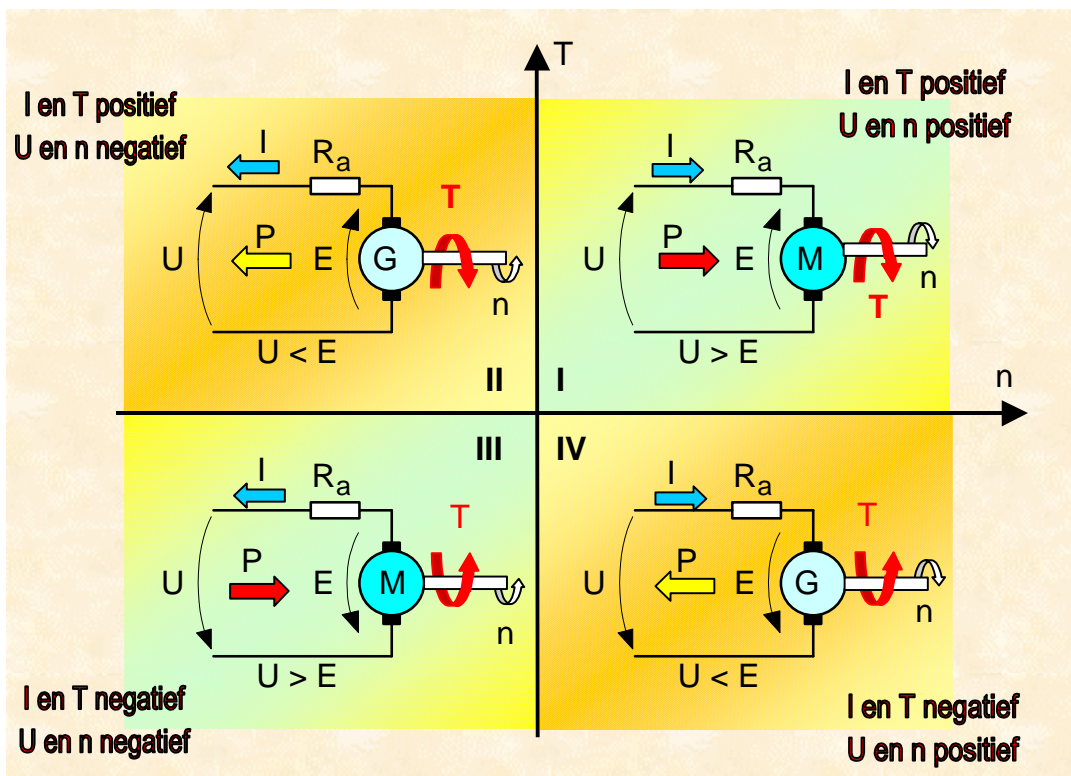


figuur 4.19 *Recuperatieremming bij de Ward-Leonard schakeling*

#### 4.6.4.2 Statische Ward - Leonard schakeling

##### 4.6.4.2.1 Snelheidsregeling-Vierkwadrantenbedrijf

De snelheidsregeling van een gelijkstroommachine met een constante bekrachtiging berust op de eigenschap dat het toerental evenredig is met de klemspanning  $U$ . De draairichting wordt bepaald door de polariteit van de klemspanning. Een variabele snelheid kan worden gerealiseerd door de machine aan te sluiten op een regelbare gelijkspanningsbron.

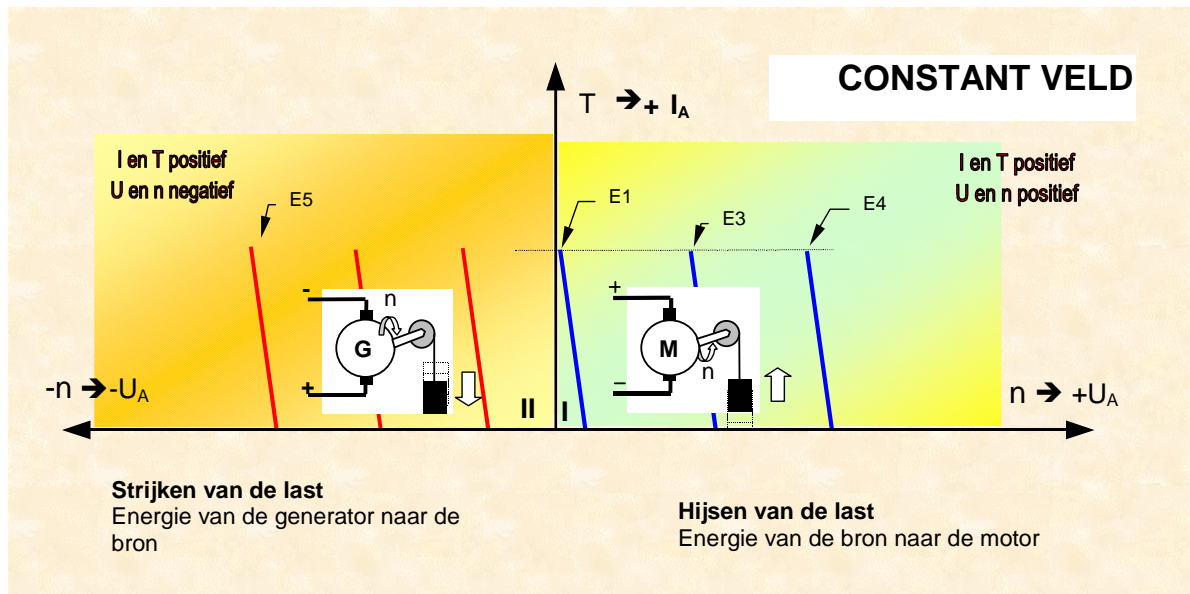


figuur 4.20 *Werking in vier kwadranten bij constant veld*



Het koppel  $T$  van de machine is evenredig met de ankerstroom  $I$  en is positief of negatief, afhankelijk van de richting van de stroom. In figuur 4.20 zijn de vier mogelijke bedrijfstoestanden weergegeven.

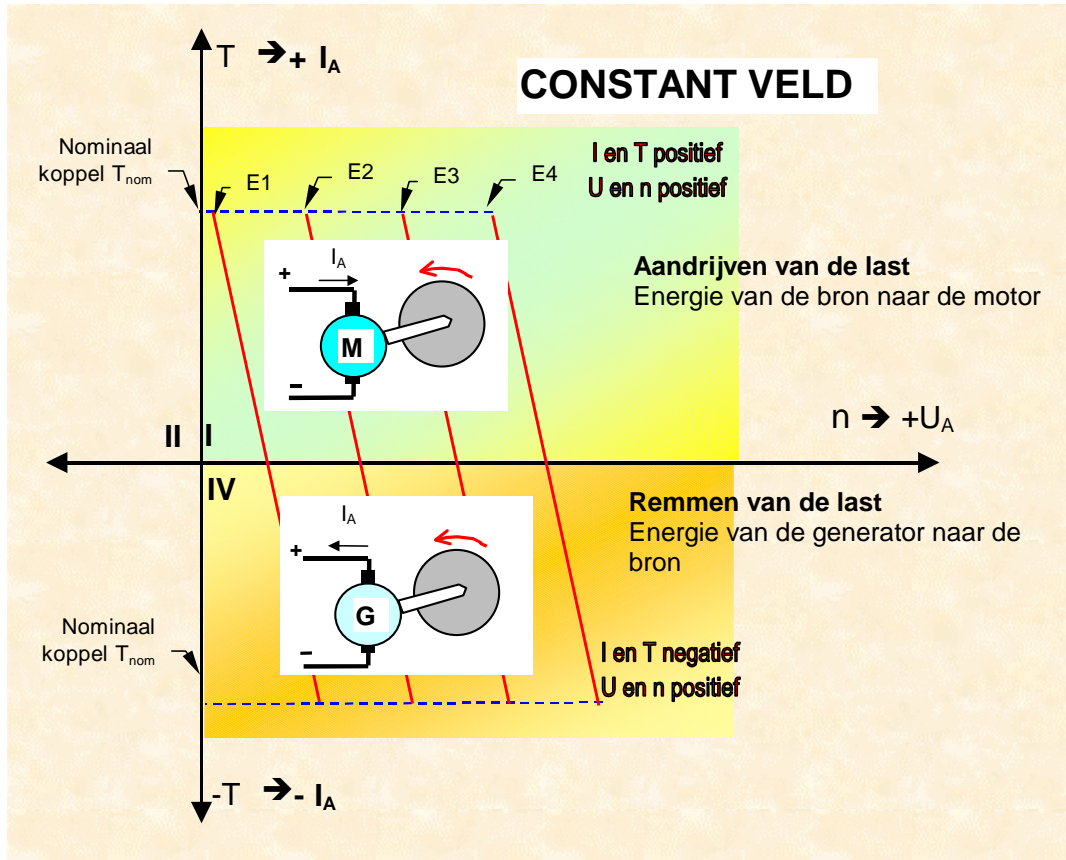
De overgang van het eerste naar het tweede kwadrant wordt ondermeer verkregen tijdens het hijsen van een last.



figuur 4.21 *Tweekwadrantenwerking bij een hijsbelasting – machinekoppel blijft positief, draaizin keert om*

In kwadrant 1 bij positief koppel en toerental wordt de last gehesen. Wordt de ankerspanning verminderd dan stijgt de last trager. Bij verwaarlozing van het lastkoppel keert na het ompolen van de ankerspanning de draaizin van de motor om en daalt de last. Praktisch is er een lastkoppel aanwezig. Indien dit voldoende groot is, laat dat de last terug dalen (strijken van de last). De gelijkstroombmachine zal als generator werken indien de emk groter is dan de bronspanning. Daardoor wordt vermeden dat de last in vrije val zou naar beneden donderen.

Een analoge redenering kan men toepassen bij een motor die belast is met een grote traagheidsmassa. In het eerste kwadrant is er een motorwerking. Naarmate de aangelegde spanning groter is draait de machine sneller. Wordt de ankerstroom omgepoold dan verplaatst het werkingspunt naar het vierde kwadrant. De traagheidsmassa drijft de machine-as aan (de draaizin blijft gelijk), zodat deze als generator werkt zolang zijn emk groter is dan de aangelegde spanning. Zolang er voldoende kinetische energie is, en het emk groot genoeg, is er generatorwerking.



figuur 4.22 Tweekwadrantenwerking bij een traagheidsmassa – draaizin blijft ongewijzigd, het machinekoppel keert om

#### 4.6.4.2.2 Keuzecriteria

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de meest gebruikte gelijkrichter gevoede gelijkstroomaandrijvingen voor een- en meerkwadrantenbedrijf.

In het vermogenbereik tot 10 kW worden om economische redenen steeds gelijkrichters met eenfasige netaansluiting gebruikt. Boven 10 kW gebruikt men driefasige gelijkrichters. Hier verminderen de harmonischen in de netstroom en de gesuperponeerde wisselspanningen aan de gelijkspanningskant des te sterker naarmate het pulsgetal van de gelijkrichter groter is.

Eenkwadrantaandrijvingen worden altijd gevoed met een enkelvoudige gelijkrichter. Meerkwadrantaandrijvingen worden naargelang de vereisten met een enkelvoudige of een dubbele gelijkrichter uitgevoerd. Om het koppel van richting te veranderen bij een enkelvoudige gelijkrichter, moet een omschakeling voorzien worden in de anker- of veldketen van de gelijkstroommachine. Gebruikt men een dubbele gelijkrichter, dan staat voor elke stroom- of koppelrichting een afzonderlijke gelijkrichter ter beschikking en vervalt de trage mechanische omschakeling. De keuze van de omkeerschakeling hangt af van de eisen die aan de aandrijving gesteld worden. De keuzecriteria zijn de stroomloze of de koppelloze pauze bij de omkering, de tijd nodig om van nominaal koppel in de ene richting om te keren tot

nominaal koppel in de andere richting, het aantal koppelomkeringen per lastcyclus en het vermogen van de aandrijving.

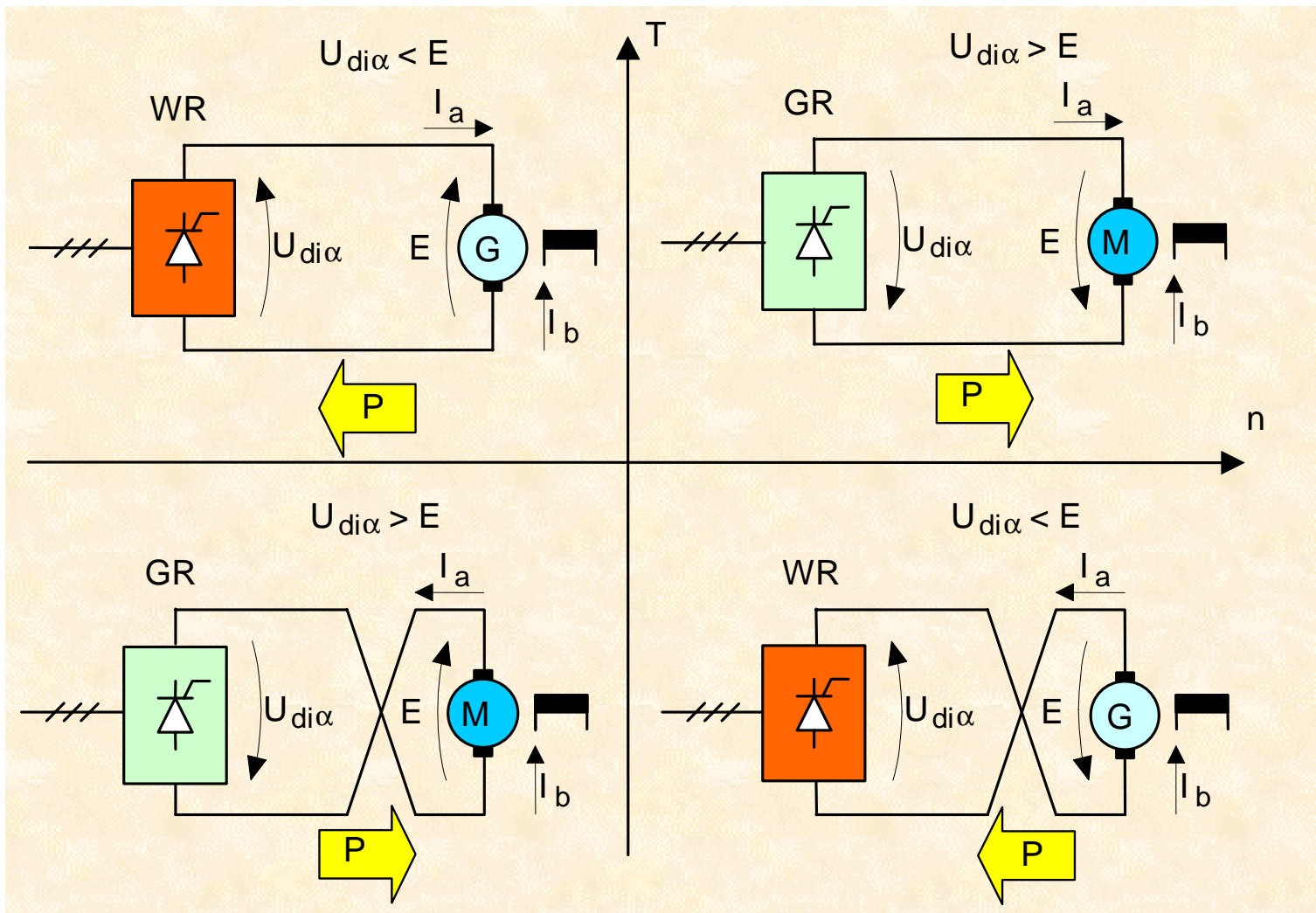
De eenvoudigste methode om de spanning en de draaizin om te keren is de ankerkringomschakeling (figuur 4.23). Vermits slechts een gelijkrichter aanwezig is, moet bij de omkering van de draaizin de gelijkstroommachine omgekeerd aan de gelijkrichter aangesloten worden. Deze omschakeling gebeurt altijd in stroomloze toestand, zodat een koppellose pauze optreedt. De omschakeltijd van de schakelaars bedraagt 100 tot 200 ms. De kostprijs van de vermogensschakelaars voor gelijkstroom mag niet uit het oog verloren worden. De ankerkringomschakeling is slechts voor eenvoudige aandrijvingen geschikt, waar de koppellose pauze geen bezwaar vormt. Door de beperkte levensduur van de schakelaar voor gelijkstroom is deze schakeling niet geschikt voor aandrijvingen met frequente koppelomkeringen.

Een tweede, eenvoudige methode om de draaizin van de gelijkstroommachine om te keren is de veldketenomschakeling. Hier moet men rekening houden met een merkkelijk langere koppellose pauze van 0,5 tot 2 s, omdat de grote inductantie van de veldketen slechts een langzame op- en afbouw van de bekrachtigingsflux toelaat. De veldketenomschakeling wordt toegepast bij zeer eenvoudige aandrijvingen met sporadische koppelomkeringen.

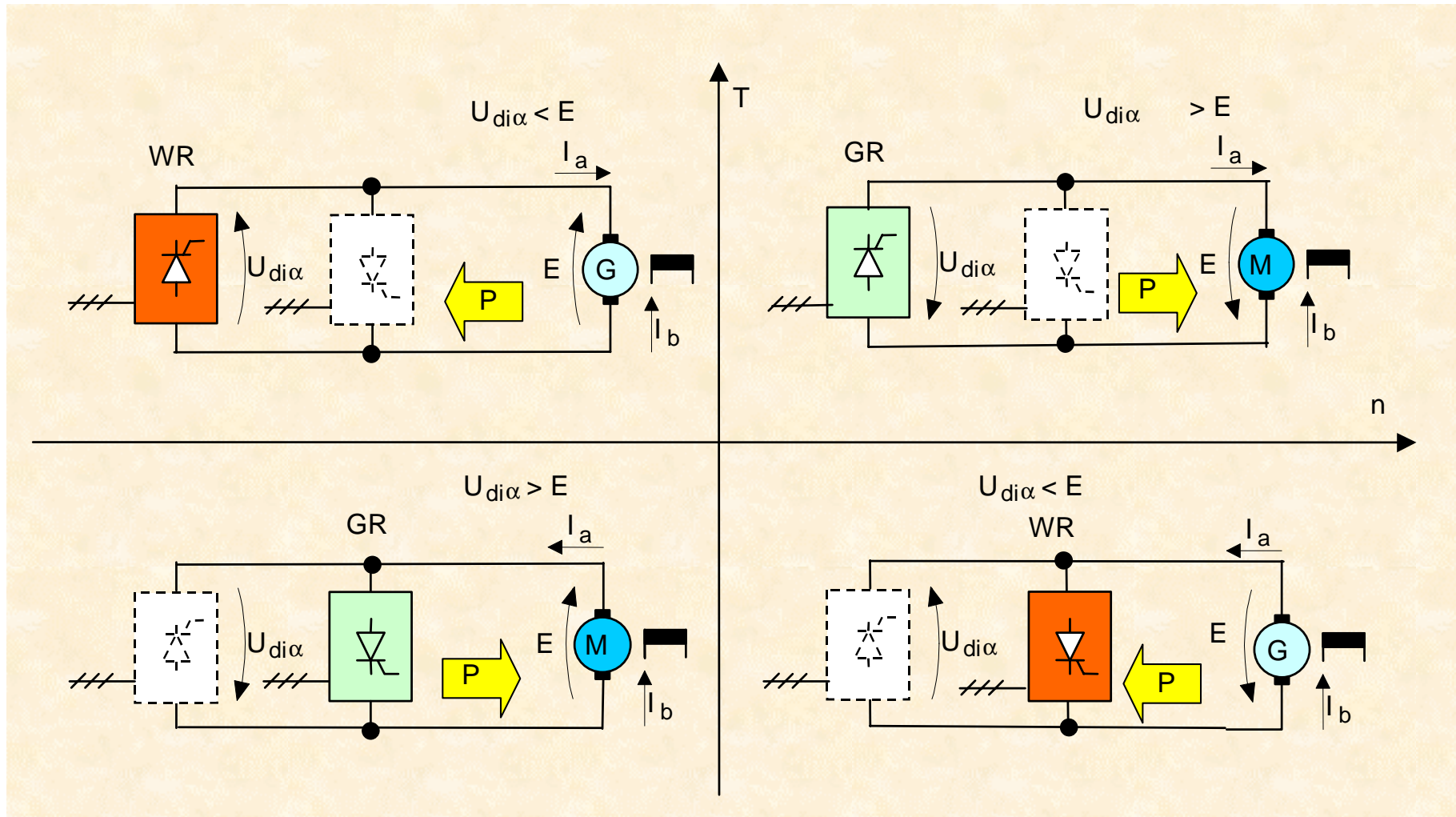
Worden aan een aandrijving hogere eisen gesteld voor de koppellose pauze en de frequentie van omschakeling, dan is het nodig de omschakeling contactloos te laten gebeuren en voor iedere ankersstroomrichting een afzonderlijke gelijkrichter te voorzien (figuur 4.24). Naargelang de bedrijfstoestand (aandrijven of remmen) wordt een gelijkrichter aangestuurd in gelijkrichter- of wisselrichter-bedrijf, terwijl de pulsen voor de andere gelijkrichter gesperd worden. De omschakeling tussen de gelijkrichters gebeurt telkens bij de omkering van de draaizin.

Tabel 4.2 *Overzicht van gelijkrichter gevoede gelijkstroomaandrijvingen*

Aandrijving	een kwadrant een omvormer	vier kwadranten een omvormer	vier kwadranten twee omvormers
Motor	gelijkstroommotor		
Instelbare grootheid	ankerspanning (veldspanning)		
Snelheids- variatie	gesloten kring regeling van ankerspanning met netgecommuteerde omvormers		
Snelheidsbereik	1:50		
Koppel- omkering	-	omkering van anker-(of veld-) stroom; externe contactoren	omkering van ankerstroom
Koppelloze pauze	-	anker : 0.1 tot 0.2 s (veld : 0.5 tot 2 s)	zonder kring- stroom: 2 tot 10 ms met kringstroom : 0 s
Bedrijfs- toestand	een draairichting, enkel drijven	omkeerbare draairichting drijven en remmen	
Vermogen	tot 10 MW		
Investering	lage omvormerkost	hoge omvormerkost	
Kenmerken		beperkt aantal koppelomkeringen	uitstekende dynamische regeling
Toepassing	ventilatoren, pompen, compressoren	hefwerktuigen, persen, centrifuges, walsen, draaibanken	kranen, walsen, papier-, plastic- en textielmachines, werktuigmachines



figuur 4.23 Ankerkringschakeling



figuur 4.24 Meerkwadrantenaandrijving met anti-parallelschakeling



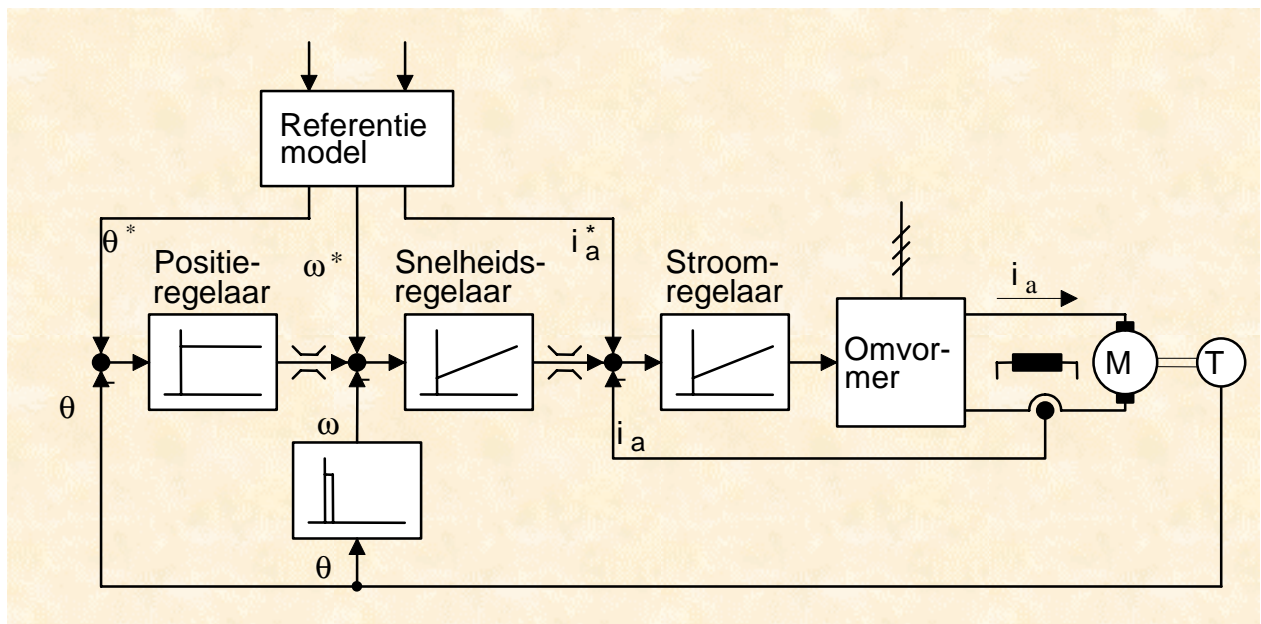
#### 4.6.4.2.3 Cascaderegeling

Het meest effectieve regelschema voor aandrijvingen, in het bijzonder voor gelijkstroom-aandrijvingen, is de cascaderegeling (figuur 4.25) met een inwendige stroomregelketen waarop een uitwendige toerentalregelketen is gesuperponeerd. Dit regelsysteem is zeer flexibel. Om de positie te controleren kan het uitgebreid worden met een positieregelketen, gesuperponeerd op de toerentalregelketen. De opeenvolging stroom (of koppel) - toerental - positie is een natuurlijke sequentie, overeenkomstig de structuur van de aandrijving.

De stroom- of koppelregelkring kan bij benadering beschouwd worden als een stroombron voor de ankerketen van de gelijkstroommachine. De stroomregelaar beïnvloedt op de eerste plaats de dynamica van de omvormer en de ankerketen. Door de referentiewaarde van de stroom te beperken, oefent de inwendige regelketen ook een beveiligingsfunctie uit.

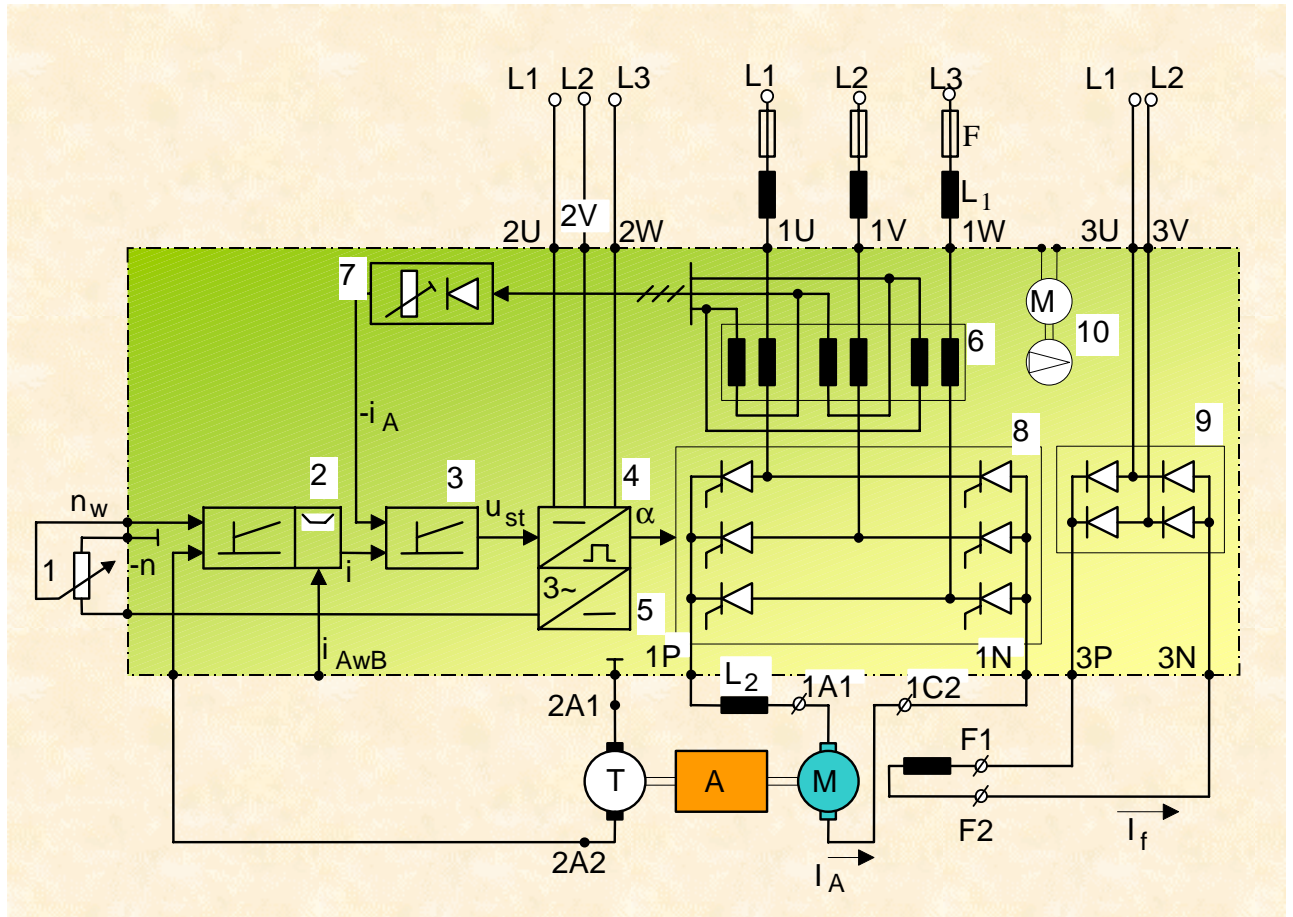
De hiërarchische structuur wordt uitgebreid met toerental- en eventueel positieregelaar. Deze cascaderegeling kan maar degelijk functioneren indien de bandbreedte van de regeling stijgt naar de inwendige regelketens toe, met de stroomregelketen als snelste en de positieregelketen als traagste.

figuur 4.26 geeft een beeld van een geregelde eenkwadrantaandrijving.



figuur 4.25 *Principe van de cascaderegeling*





Legende:

- |                |                                       |    |                                  |
|----------------|---------------------------------------|----|----------------------------------|
| A              | arbeidsmachine                        | 3  | stroomregelaar                   |
| G              | gelijkrichter met sturing en regeling | 4  | pulssturing                      |
| M              | gelijkstroommotor                     | 5  | stroomvoorziening                |
| T              | tachogenerator                        | 6  | stroomtransformator              |
| F              | zekeringen                            | 7  | meetomvormer                     |
| L <sub>1</sub> | commutatiespoel                       | 8  | gelijkrichter                    |
| 1              | potentiometer                         | 9  | gelijkrichter voor bekrachtiging |
| 2              | toerentalregelaar                     | 10 | ventilator                       |

figuur 4.26 *Geregelde eenkwadrantaandrijving met gelijkstroommotor*

#### 4.6.4.3 Hakkervoeding van gelijkstroombmachine

Indien de motor gevoed wordt vanuit een gelijkstroombron, kan het toerental geregeld worden met een hakker. Voor de gelijkspanningsbron bestaan er fundamenteel drie mogelijkheden:

- batterij (mobiele toestellen voor audio en dergelijke en elektrische voertuigen)
- vaste gelijkspanning op de bovenleiding of op de derde rail (tram, metro, spoorwegen)
- een diodegelijkrichter met afvlakcondensator (servo-aandrijvingen en hifi, video, elektronische apparaten, computer en periferie).

Alhoewel er variaties op de gelijkspanning voorkomen, wordt hier ondersteld dat er een constante waarde  $U$  geleverd wordt .

De schakelaar legt de spanning  $U$  aan de motor aan gedurende een tijd  $t_a$ . De schakelaar werkt met een periode  $T$ . De gemiddelde spanning aan de motor is dan

$$U_m = \frac{t_a}{T} U \quad (4.38)$$

In stationair regime en bij verwaarlozing van de ankerweerstand is  $U_m = E$ , zodat de verhouding ( $t_a/T$ ) evenredig is met de e.m.k en dus met de snelheid.

De inductantie van de motor, vaak aangevuld met een externe afvlakspoel, laat niet toe dat de stroom door de motor bij het openen van de schakelaar plots verandert. Het is juist om deze stroom  $I$ , die het koppel bepaalt, constant te houden dat de afvlakspoel gebruikt wordt, daar anders de stroomveranderingen bij in- en uitschakelen aanleiding zouden geven tot koppeltrillingen, vermits het koppel evenredig is met de ogenblikkelijke waarde van de stroom. Daarom wordt er parallel met de motor een vrijlooptiode geplaatst die de stroom overneemt als de schakelaar  $S$  open is. De schakelaar  $S$  is een vermogenelektronische component, die de stroom maar in een richting kan geleiden. Om de spanning  $U$  en de stroom  $I$  van teken te kunnen laten omkeren en dus zowel het koppel  $T$  als de snelheid  $\omega$  te kunnen omkeren, zijn vier schakelaars nodig. Dit is de zogenaamde H-schakeling die in hoogdynamische servo-aandrijvingen met permanent magneetmotor gebruikt wordt.

