

Hoofdstuk 8

De elektronisch commuterende actuator.

8.1. INLEIDING.

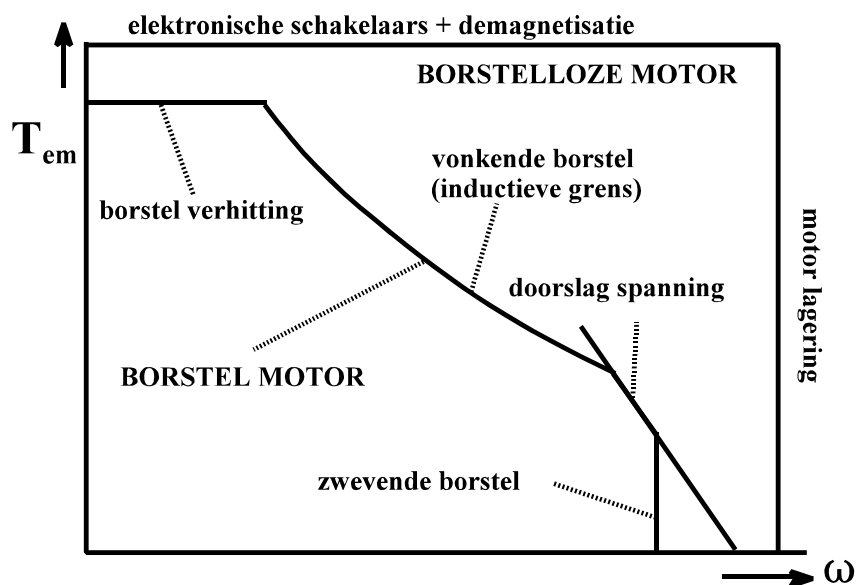
Het type actuator dat in dit hoofdstuk beschreven wordt bestaat uit een permanente magneet rotor en een stator met meer-fasige wikkelingen. De elektronisch commuterende motor wordt door het ontbreken van borstels ook wel de borstelloze gelijkstroommotor genoemd. Deze actuator is zeer sterk in opkomst en heeft in het gebied tussen de 100 W tot 10 kW de mechanisch commuterende motor (met borstels) bijna geheel verdrongen. De opwekking van het koppel is volgens het synchrone-principe.

De meeste toepassingen vindt de borstelloze motor in servo-aandrijvingen voor positie- en snelheidsregelingen. De borstelloze motor heeft voor zijn werking altijd een terugkoppeling van zijn positie en/of snelheid nodig. Deze opnemers zijn te combineren met het te sturen object. Om een goede afweging te maken van een borstelloze motor tegenover een borstel motor moet men daarbij ook de omvormers en voedingen van deze motoren betrekken.

8.2. DE VOORDELEN EN NADELEN.

De voordelen van de borstelloze motor t.o.v. de borstel motor zijn als volgt samen te vatten:

- een grotere levensduur, deze wordt in hoofdzaak bepaald door de lagers. De grootste winst zit in het ontbreken van een kwetsbare collector met borstels. Met name piekstromen zijn zeer nadelig voor collector en borstels. De levensduur voor borstelloze motoren kan oplopen tot 40.000 uur.
- bedrijfszekerheid is groter. Het gedrag van de gebruikte componenten zijn gemakkelijk te voorspellen.
- het werkgebied is groter doordat een aantal beperkingen van de mechanische commutatie wegvallen. Een hoger toerental is haalbaar omdat er geen borstels zijn, die eventueel



kunnen gaan zweven. Er is een hogere voedingsspanning mogelijk, omdat er geen doorslag kan ontstaan tussen de commutatorlamellen. Ook een hoger koppel is mogelijk, omdat er geen borstelverhitting optreedt. De begrenzing van de borstelloze motor is de lagering en de gebruikte elektronische schakelaars. De laatste is afgestemd op de demagnetisatiestroom van de magneet. Hoe wel de laatste ontwikkelingen zijn dat deze demagnetisatie niet meer zo van belang is, door het gebruik van betere magneten. Toerentallen boven 10.000 omw/min zijn haalbaar. Figuur 8.1. geeft een indruk van de werkgebieden voor vergelijkbare motoren van beide typen.

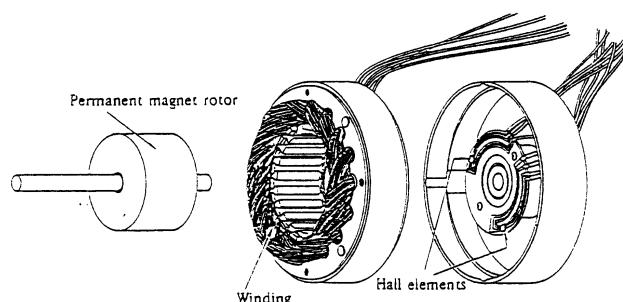
- geen vonkvorming. De borstelloze is dus geschikt in ruimten waar explosiegevaar heerst. Er is ook minder storing voor EMC-gevoelige circuits.
- eenvoudige opbouw. Er hoeft geen commutator aangebracht worden, waardoor een compactere bouw mogelijk is.
- een thermisch gunstige opbouw. De warmte ontwikkeling geschiedt op de stator en is daardoor gemakkelijk af te voeren en eventueel te meten. Met het laatste is het mogelijk om de wikkelingen thermisch te beveiligen. De bedrijfszekerheid wordt daarmee groter.
- te leveren vermogen per bouwvolume is beter benut.

De minpunten:

- door de uitvoering van rotor als magneet ontstaan er ijzerverliezen. Met name sterke magneet materialen als SmCo en NdFeB veroorzaken hoge magnetische inductie velden in het statorijzer. De ijzerverliezen nemen toe met het kwadraat van de snelheid van de rotor. De ijzerverliezen stelt dus een grens aan het toerental in relatie met het rendement. Voor toerentallen boven 4000 omw/min zijn de ijzerverliezen van grote invloed. De ijzerverliezen werken remmend op de beweging.
- positie sensoren. Om op de juiste manier de statorfasen te laten commuteren zijn er sensoren nodig voor de positie van de rotor. Mogelijke sensoren zijn Hall-plaatjes, optische opnemers of een resolver.
- demagnetisatie van de magneet. Ter voorkoming van beschadigen van de magneet mag de stroom een bepaalde waarde niet overschreden worden. Dit wordt nog extra nadelig beïnvloed door eventuele temperatuurverhogingen.
- kleeftkrachten Als er rond de magneet discontinue ijzervlakken zijn, dan ontstaan er door de aantrekking van magneet naar ijzer wisselende koppel. Dit worden kleeftkrachten genoemd.

8.3. DE WERKING.

Een algemene opbouw van een borstelloze motor zijn in de figuren 8.2. en 8.3 weergegeven. Op de stator zijn fase-wikkelingen aangebracht waarmee een 'draaiveld' kan worden opgewekt. De rotor bestaat uit één of meer permanente magneten. Essentieel zijn de positie-opnemers voor



Figuur 8.2: Opbouw borstelloze motor

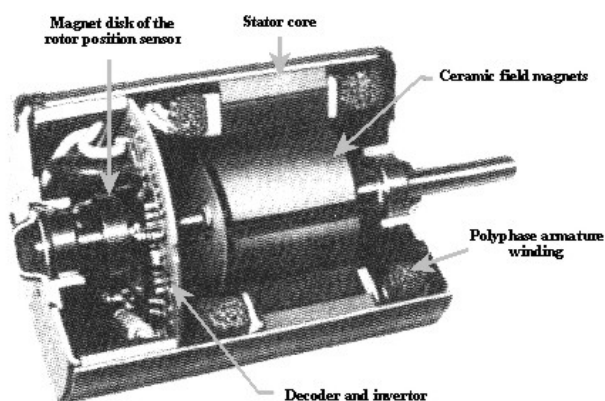
de rotor. In figuur 8.2. zijn dat Hall-elementen. De stator is meestal voorzien van een 3-fase wikkeling.

Om de werking uit te leggen gaan we uit van een drie-fasen motor met fototransistoren als positie-opnemers.

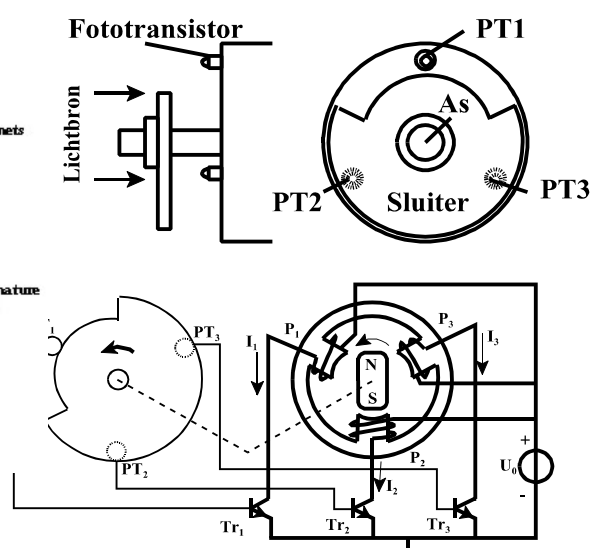
In figuur 8.4 is schematisch een eenvoudige borstelloze actuator met zijn aan sturing getekend. Deze aansturing noemt men unipolair, omdat maar in één richting de stroom

door een statorfase kan lopen.

Drie fototransistoren PT1, PT2 en PT3 zijn op een plaat gemonteerd onder hoek van 120° van elkaar. De fototransistoren kunnen afhankelijk van de stand van een sluiters verlicht worden. De sluiters is gekoppeld met de as van de rotor. Zoals getekend in figuur 8.4. staat de zuidpool van de rotor tegenover de statorpool P2. De fototransistor PT1 is verlicht, zodat transistor Tr1 in geleiding is. De stroom door winding 1 veroorzaakt een zuidpool in P1 en zal de noordpool van de rotor aantrekken. De rotor zal linksom (tegen de klok in, CCW) bewegen. Als de noordpool van de rotor tegenover P1 staat, wordt PT1 verduisterd en PT2 verlicht. De stroom door Tr1 zal doven en in Tr2 gaat een stroom lopen. Het 'verleggen' van de stroom van Tr1 naar Tr2 wordt commuteren genoemd. De stroom veroorzaakt een zuidpool op P2 en de noordpool van de rotor wordt naar P2 getrokken volgens het richteffect-principe (fluxvergrotingswet). De rotor blijft in dezelfde richting draaien.



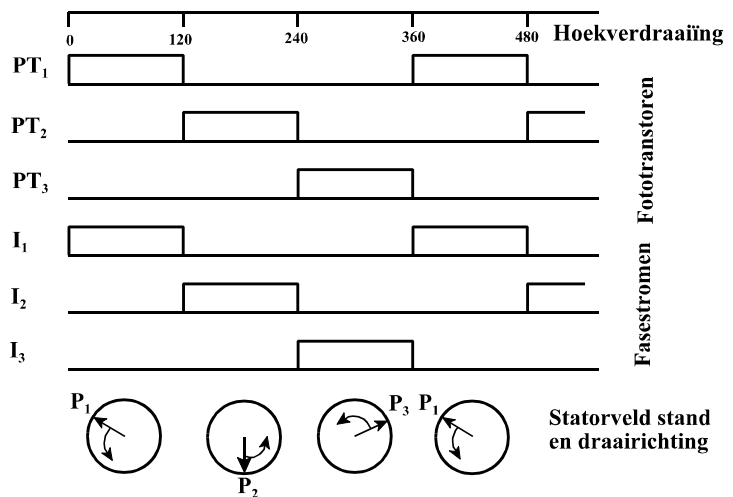
Figuur 8.3: Borstelloze motor



Figuur 8.4: Unipolaire borstelloze actuator

Uiteindelijk komt de noordpool van de rotor tegenover P2 te staan en zal PT2 verduisteren en PT3 verlicht worden. De rotor zal na herhaling van deze schakelvolgorde een continue rotatie uitvoeren.

In figuur 8.5. is een schakeldiagram van het linksom (CCW) roteren getekend. Ook is de stand van het statorveld aangegeven waarlangs de rotor magneet wil oplijnen (fluxvergroting van de bekrachtigde statorwikkeling). Als deze stand bereikt wordt dan moet de volgende fase aangestuurd worden. Het omkeren van de draairichting is bij een borstelmotor vrij eenvoudig n.l. de voedingsspanning omdraaien. Dit is bij een borstelloze motor niet mogelijk door de toepassing van



Figuur 8.5: Schakeldiagram en de stand van het statorveld.

halfgeleiderschakelaars, die slechts in één richting geleiden. Bij een unipolaire aansturing liggen de stroomrichtingen door de fasen vast.

Door de schakelvolgorde van de transistoren te veranderen kan de rotor de andere kant op (rechtsom, met de klok mee, CW) draaien. Er moeten echter ook verbindingen verlegd worden:

PT1 aan Tr3 i.p.v. PT1 aan Tr1

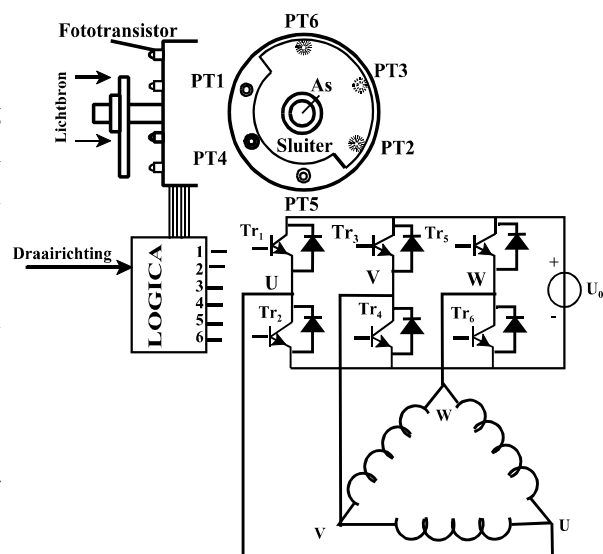
PT2 aan Tr1 i.p.v. PT2 aan Tr2

Pt3 aan Tr2 i.p.v. PT3 aan Tr3

Een manier om twee draairichtingen te realiseren is een z.g. bipolaire aansturing. De stator fasen staan in een brug-schakeling en kunnen in twee richtingen de stroom sturen. In figuur 8.6 is een voorbeeld van een bipolaire aansturing getekend.

Er zijn zes fototransistoren, die de positie van de rotor vastleggen. De statorfasen zijn in driehoek aangesloten. Via een 'logisch' circuit worden afhankelijk van de draairichting de verbindingen tussen de fototransistoren PT en de transistoren Tr gemaakt.

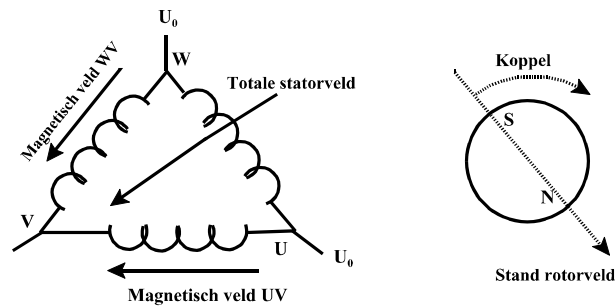
Als de PT1 met Tr1 en PT2 met Tr2 etc is



Figuur 8.6: Bipolaire aansturing

verbonden dan geldt voor de getekende situatie uit figuur 8.6 dat Tr1, Tr4, Tr5 in geleiding zijn. De aansluitingen U en W hebben de positieve spanning potentiaal van de voedingsspanning U_0 en aansluiting V heeft de potentiaal nul.

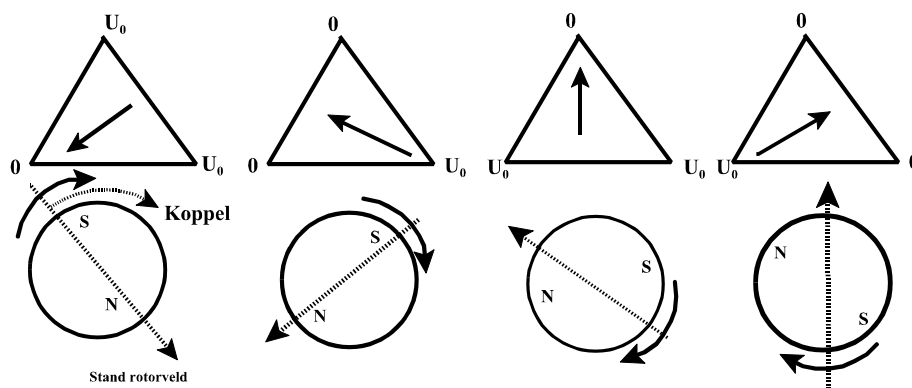
Er lopen stromen van U naar V en van W naar V. In figuur 8.7 is getekend in welke richting deze stromen een statorveld opwekken. De velden van WV en UV vormen samen het statorveld.



Figuur 8.7: Stand van het stator- en rotor veld

Het rotorveld is nu zo geplaatst dat deze loodrecht staat op het statorveld. Geschakeld wordt net voor en net na deze stand van de rotor. Er wordt dan een koppel opgewekt voor een beweging rechtsom (zie ook figuur 8.6). Na een rotatie van 60° wordt PT5 uit en PT6 aan geschakeld.

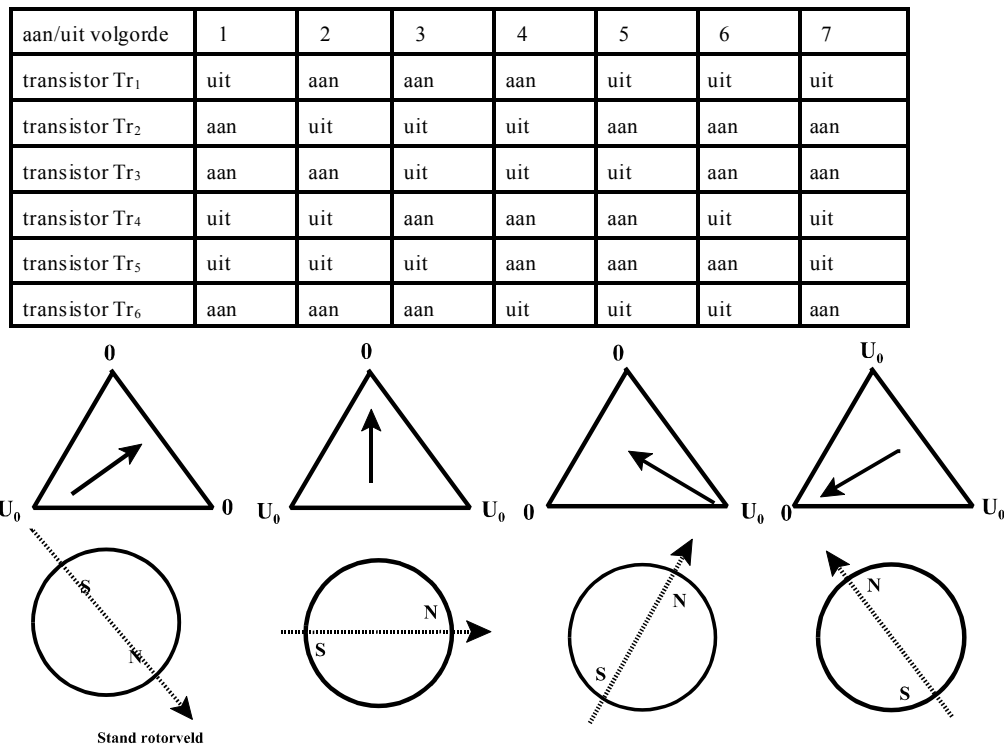
aan/uit volgorde	1	2	3	4	5	6	7
transistor Tr ₁	aan	aan	aan	uit	uit	uit	aan
transistor Tr ₂	uit	uit	uit	aan	aan	aan	uit
transistor Tr ₃	uit	uit	aan	aan	aan	uit	uit
transistor Tr ₄	aan	aan	uit	uit	uit	aan	aan
transistor Tr ₅	aan	uit	uit	uit	aan	aan	aan
transistor Tr ₆	uit	aan	aan	aan	uit	uit	uit



Figuur 8.8: De schakeltabel van een rechtsom gaande beweging.

Tr5 gaat sperren en Tr6 gaat geleiden, zodat W op potentiaal nul komt. Er lopen nu stromen van U naar V en van U naar W. Het stator veld is een hoek van 60° rechtsom gedraaid. Op deze manier is een rechtse rotatie gerealiseerd. In figuur 8.8 is het schakeldiagram en de standen van het statorveld en de rotorpositie afgebeeld.

Een linksom rotatie wordt verkregen door via het logische circuit andere verbindingen te maken tussen fototransistoren en transistoren. Nu moet als fototransistoren met zelfde cijfer elkaars inverse zijn. Als PT1 verlicht wordt dan moet Tr1 uit en is PT1 verduisterd dan moet Tr1 in geleiding zijn. In figuur 8.9 is linksom gaande beweging in een tabel uitgezet.

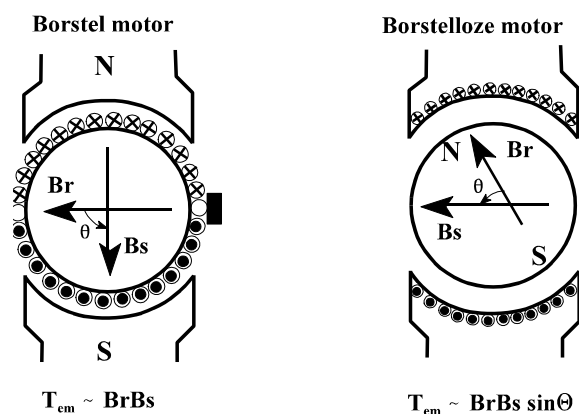


Figuur 8.9: Schakeltabel van de linksom gaande rotatie.

8.4. DE COMMUTATIE.

De hierboven beschreven voorbeelden hebben en niet zo optimale werking en komen in de praktijk slechts sporadisch voor. In figuur 8.10 zijn de borstel en een borstelloze DC-motoren schematisch naast elkaar gezet. Volgens de fluxvergrotingswet draaien beide motoren linksom. Voor een zo groot mogelijke koppelontwikkeling moeten de velden van stator en rotor loodrecht op elkaar staan. Bij de borstel gecommuteerde motor zorgt de mechanische commutator daarvoor.

Voor borstelloze motoren zal de elektronica daarvoor moeten zorgen. Een groot deel van de aansturing van borstelloze motor is hierop gericht. De wikkelingen van de statorfasen van de



Figuur 8.10: het principe van een borstel en een borstelloze actuator.

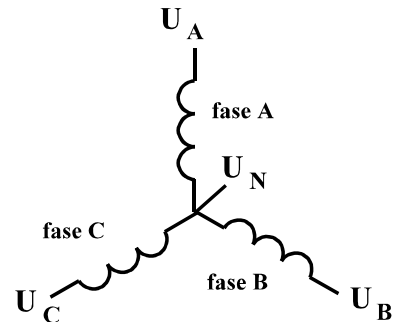
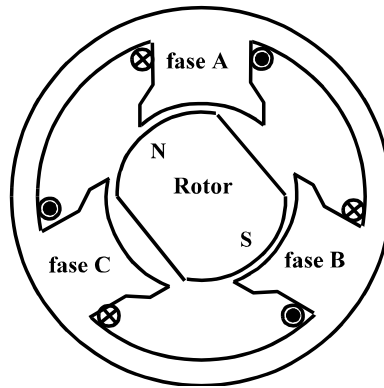
borstelloze motoren zijn verdeelde wikkelingen, soms sinusvormig, soms trapeziumvormig.

Er zijn twee elektronische commutator principes:

- 1e. De blokvormige of trapeziumvormige commutatie.
- 2e. De sinusvormige commutatie.

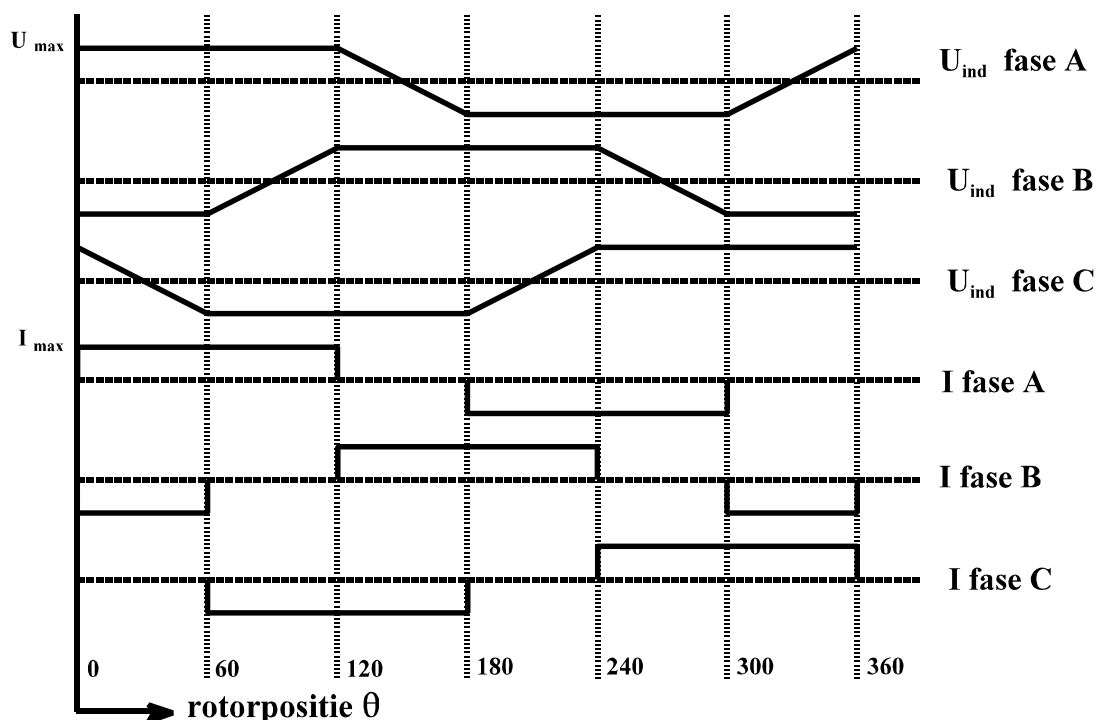
De motoren die blokvormig worden aangestuurd worden borstelloze DC-motoren genoemd. De motoren met een sinusvormige commutatie worden borstelloze AC-motoren genoemd.

Bij de beschrijving van de commutatie gaan we uit van een drie-fase motor met een



Figuur 8.11: Drie-fase borstelloze motor.

2-polige magneetrotor. De fasenwikkelingen zijn ruimtelijk 120° verschoven en zijn in ster geschakeld. In figuur 8.11 is dit getekend. In werkelijkheid zijn de spoelen niet geconcentreerd maar verdeeld. Vroeger was er een constructief verschil (m.n. de verdeling van de wikkelingen) tussen motoren die blokvormig werden aangestuurd t.o.v. motoren die sinusvormig werden aangestuurd. Nu is het zo dat deze constructieve verschillen niet meer bestaan. Daarnaast is er een tendens dat de sinusverdeling t.a.v. het magnetische veld niet meer door de verdeling van de wikkeling gerealiseerd wordt, maar door de magnetisatie van de rotormagneet. Men magnetiseert dan een sinusvormig verloop van de inductie.



Figuur 8.12: Stroom en spanning bij blokvormige commutatie

8.4.1. De blokvormige stroom commutatie.

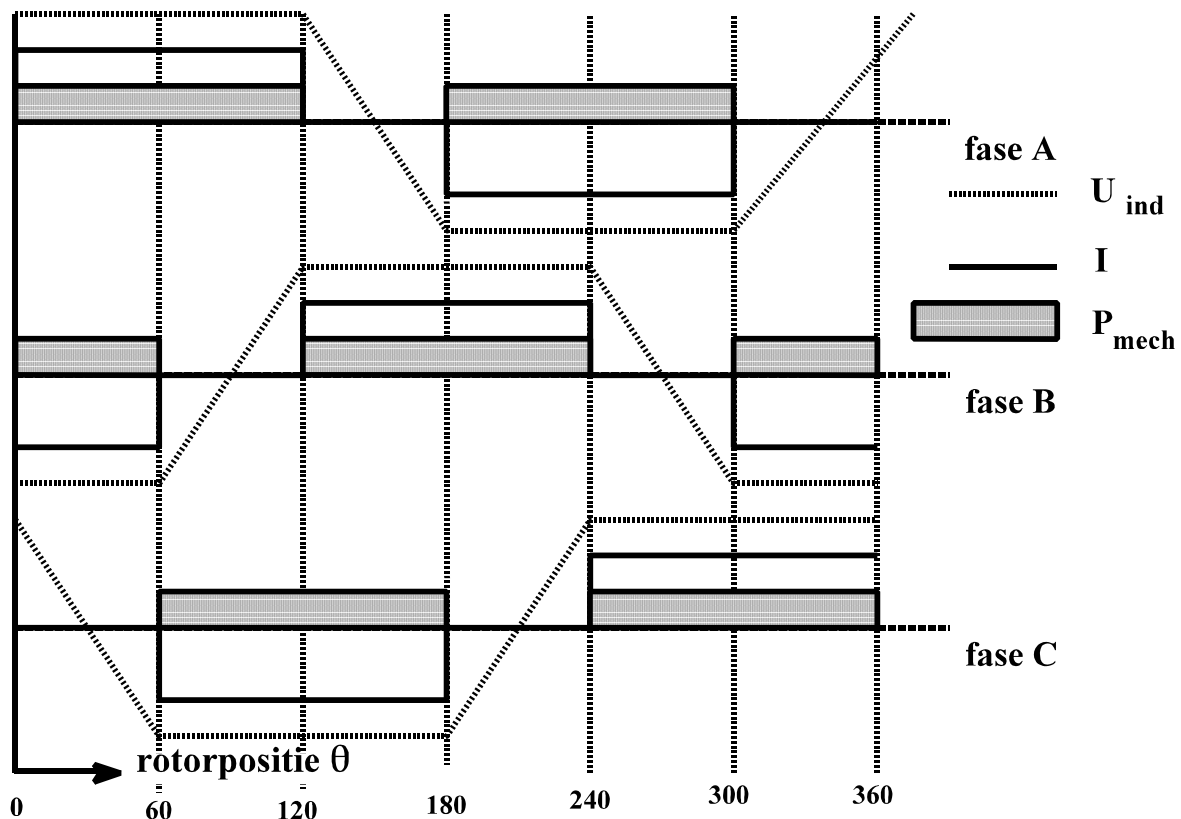
De fase wikkelingen zijn zo verdeeld dat bij het ronddraaien van de rotor een trapezium-vormige spanning wordt geïnduceerd. Om een draaiveld in de stator tot stand te brengen wordt achtereenvolgens een stroom in de fasen A, B, C gestuurd. In figuur 8.12 zijn voor verschillende rotorposities de geïnduceerde spanningen en de stromen van de fasen uitgezet.

Het aantal rotorpolen van deze machine is gelijk aan 2 ($p = 1$).

De commutatiesignalen worden afgeleid uit de positie van de rotor d.m.v. Hall-sensoren. Iedere 60° is een commutatie van een fase stroom noodzakelijk, terwijl er altijd twee fasen tegelijk stroom voeren. Per omwenteling wordt er 6 keer gecommuteerd, vandaar de naam "six-step controller". De geïnduceerde spanning van een fase is elektrisch gezien 90° verschoven t.o.v. de flux van de rotormagneet. Het opgewekte statorveld, zal altijd loodrecht staan op het magneetveld van de rotor. Het toerental wordt bepaald door de frequentie van het draaiveld, dat extern wordt opgedrukt. De stator draaiveld frequentie is proportioneel met het gewenste toerental n en het aantal polen. Voorkomende poolparen zijn 2 tot 6. Het overgedragen vermogen is globaal gelijk aan:

$$P_{em} = P_{as} = T_{em} \omega_{as} = 3 \cdot (U_{ind} I_{fase})_{gem} = 2 \cdot U_{max} I_{max} \quad (8.1)$$

In figuur 8.13 is het vermogen, stroom en spanning per fase uitgezet. De som van het vermogen is constant, hetgeen een constant koppel zou inhouden. Het koppel wordt bepaald door de hoogte van de stroom.



Figuur 8.13 Vermogensverloop per fase.

De nadelen van deze commutatie zijn:

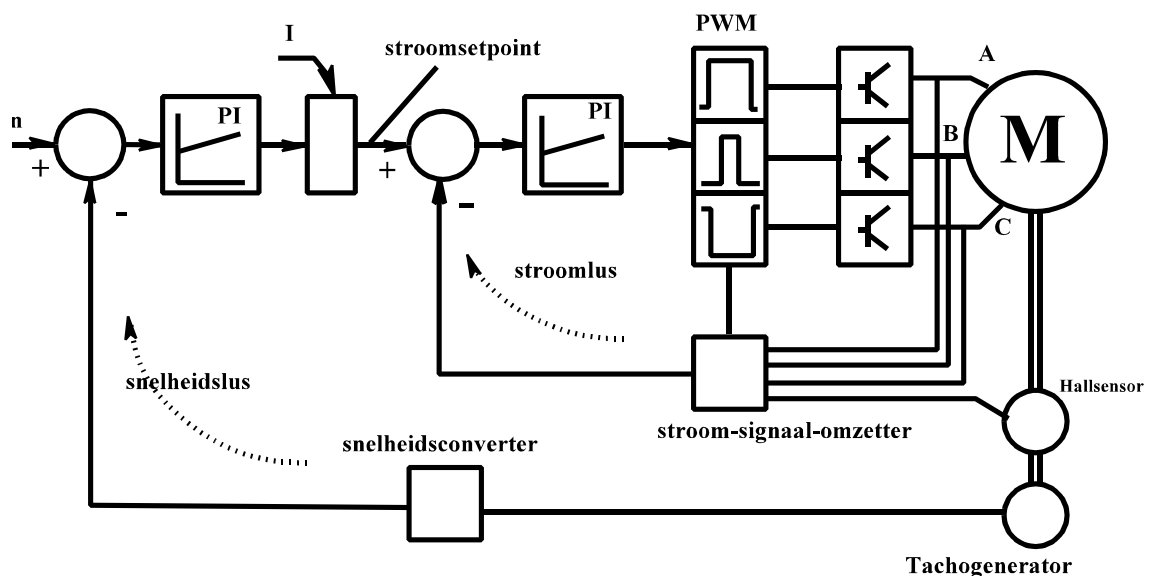
- de schakelovergangen kunnen een koppelrimpel van 13% veroorzaken. Voor veel toepassingen is dit ontoelaatbaar, vooral bij lage toerentallen. Bij hogere toerentallen zal de stroom door de zelfinductie van de statorspoelen ook trapeziumvormig worden. Dit leidt tot koppelverlies.
- de schakelpunten verlopen bij hoge temperaturen, door de Hall-sensoren.
- de overige meetsignalen van het servosysteem, zoals snelheids- en positieopnemers, moeten extra aangebracht worden. De extra belasting van eventuele koppelingen en opnemers aan de as zal het regelgedrag nadelig beïnvloeden.

De voordelen zijn:

- eenvoudige sensoren vaak Hall-sensoren die de magneet overgangen detecteren.
- de omvormer is eenvoudig. De eindtransistoren kunnen met beperkte elektronica door de Hall-sensoren worden geschakeld.

Toepassingen zijn te vinden in video-recorders en CD-spelers en disk-drives.

De actuatoren werken dan vaak onbelast of met een toerental boven 300 omw/min en kunnen zonder sensor werken. Een schematische voorstelling voor de blok aansturing voor een borstelloze motor is getekend in figuur 8.14.



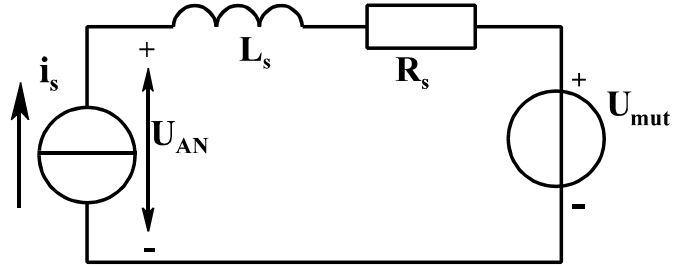
Figuur 8.14: Blokschema borstelloze motor met servoversterker.

De informatie nodig voor de commutatie volgt uit de nuldoorgang van de geïnduceerde spanning van de niet bekrachtigde spoel. Er zijn hiervoor IC's in de handel onder de naam EMK-sensing motor-IC. Met behulp van extern aan te sluiten condensatoren kan eventueel het commutatie tijdstip vervroegd of vertraagd worden..

8.4.2. De sinusvormige commutatie.

Deze commutatie houdt in dat door de positie van de rotor de momentane waarde van de fasestromen worden vastgelegd. Het verloop van de fasestromen wordt dan sinusvormig.

In figuur 8.15. is het elektrisch vervangingsschema van fase A uit figuur 8.11 getekend. De fasewikkelingen zijn sinusvormig ver-



Figuur 8.15: Vervangingsschema van fase A.

eeld, zodat de geïnduceerde spanning U_{mut} en het koppel van de fasen als functie van de rotorpositie θ sinusvormig verloopt. De (fase-) koppels voor een rotor met p poolparen zijn:

$$\begin{aligned} \text{Fase A: } T_A &= K_{em} i_A \sin p\theta \\ \text{Fase B: } T_B &= K_{em} i_B \sin(p\theta - 120^\circ) \\ \text{Fase C: } T_C &= K_{em} i_C \sin(p\theta - 240^\circ) \end{aligned} \quad (8.2)$$

K_{em} = de koppelconstante en spanningsconstante per fase. We bekrachtigen de fasen met de volgende stromen:

$$\begin{aligned} \text{Fase A: } i_A &= I_{A,max} \sin \omega_{net} t \\ \text{Fase B: } i_B &= I_{B,max} \sin(\omega_{net} t - 120^\circ) \\ \text{Fase C: } i_C &= I_{C,max} \sin(\omega_{net} t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (8.3)$$

Door de net frequentie f_{net} wordt indirect het toerental bepaald n.l. $\omega_{net} = p \cdot \omega_{as}$. Het totale koppel is de som van de koppels van de fasen:

$$T_{em} = T_A + T_B + T_C = \frac{3}{2} K_{em} I_{max} \quad (8.4)$$

De uitkomst van (8.4) laat zien dat het totale koppel onafhankelijk is van de rotorpositie en dat de T_{em} evenredig is met de amplitude I_{max} . De spanning over de omvormer (voeding) wordt bepaald door L_s , R_s en de geïnduceerde spanning U_{mut} door de rotormagneet. Deze spanningen zijn:

$$\begin{aligned} U_{AN} &= U_{max} \sin(p\theta + \varphi) \\ U_{BN} &= U_{max} \sin(p\theta + \varphi - 120^\circ) \\ U_{CN} &= U_{max} \sin(p\theta + \varphi - 240^\circ) \end{aligned} \quad (8.5)$$

Betrekking (8.5) laat zien dat de spanning en hoek φ voorijlt op de stroom. Deze verschuiving verslechtert de efficiëntie van de motor. We gaan eens bekijken of er een optimale δ is die de spanning vervroegd op de stroom. Om een optimale δ af te leiden, gaan we uit van de spanningsrelatie behorende bij het vervangingsschema uit figuur 8.15:

$$U_{AN} = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + U_{mut} = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + K_{em} \omega_{as} \sin p\theta \quad (8.6)$$

Stel nu dat we voeden nu met de spanningen:

$$\begin{aligned} U_{AN} &= U_{max} \sin(p\theta) \\ U_{BN} &= U_{max} \sin(p\theta - 120^\circ) \\ U_{CN} &= U_{max} \sin(p\theta + -240^\circ) \end{aligned} \quad (8.7)$$

Met betrekking (8.6) en gebruik makend van $p\omega_{as} = \omega_{net}$ is de stroom i_A te bepalen en het koppel T_A :

$$i_A = b \sin p\theta + c \cos p\theta \Rightarrow T_A = K_{em} i_A \sin p\theta = K_{em} (b \sin^2 p\theta + c \sin p\theta \cos p\theta)$$

$$\text{met } b = \frac{(U_{\max} - \frac{K_{em}}{p} \omega_{net}) R_s}{R_s^2 + \omega_{net}^2 L_s^2} \quad \text{en} \quad c = \frac{-\omega_{net} L_s (U_{\max} - \frac{K_{em}}{p} \omega_{net})}{R_s^2 + \omega_{net}^2 L_s^2} \quad (8.8)$$

De constanten b en c zijn ingevoerd vanwege schrijfgemak. De constanten bepalen uiteindelijk het fase verschil tussen de spanning en de stroom van elke fase. Het totale koppel kan worden uitgedrukt in de amplitude $U_{\max}$, de weerstand R_s en de inductie L_s :

$$T_{em} = \frac{3}{2} K_{em} b = \frac{3}{2} \frac{K_{em} (U_{\max} - \frac{K_{em}}{p} \omega_{net}) R_s}{R_s^2 + \omega_{net}^2 L_s^2} \quad (8.9)$$

Uitdrukking (8.9) is de koppel-hoeksnelheidsrelatie van de borstelloze motor. In figuur 8.16 is het koppel van een borstelloze motor getekend. Ter illustratie is in figuur 8.16 ook het koppel van een vergelijkbare borstel motor getekend. Het verschil tussen de krommen wordt veroorzaakt door de inductie L_r van de wikkelingen. Stel dat er nu met de volgende spanningsvervroeging toepassen:

$$\begin{aligned} U_{AN} &= U_{\max} \sin(p\theta + \delta) \\ U_{BN} &= U_{\max} \sin(p\theta + \delta - 120^\circ) \\ U_{CN} &= U_{\max} \sin(p\theta + \delta - 240^\circ) \end{aligned} \quad (8.10)$$

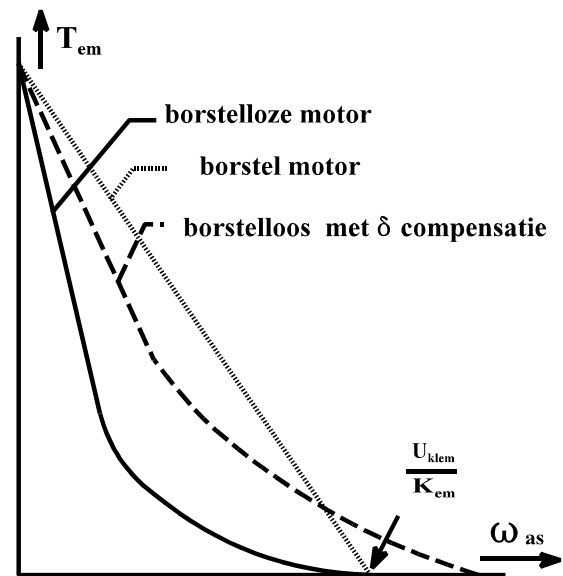
Voor de constante b en T_{em} kan dan afgeleid worden:

$$b = \frac{U_{\max} R_s \cos \delta + U_{\max} \omega_{net} L_s \sin \delta - \frac{K_{em}}{p} \omega_{net} R_s}{R_s^2 + \omega_{net}^2 L_s^2} \quad (8.11)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} K_{em} b = \frac{3}{2} K_{em} \frac{U_{\max} R_s \cos \delta + U_{\max} \omega_{net} L_s \sin \delta - \frac{K_{em}}{p} \omega_{net} R_s}{R_s^2 + \omega_{net}^2 L_s^2}$$

Er kan bewezen worden dat de optimale δ gelijk is aan:

$$\delta = \text{atan} \frac{\omega_{net} L_s}{R_s} \quad (8.12)$$



Figuur 8.16: Koppeldoerental van de borstel en borstelloze motor

De waarde van δ is afhankelijk van de weerstand R_s , inductie L_s en ω_{net} en dus van de snelheid ω_{as} . In de praktijk kan deze afhankelijkheid worden opgelost door de optimale waarde van δ en snelheid in een tabel van een computer op te slaan. Een simpelere oplossing is δ evenredig met ω_{net} te kiezen. Dit is niet optimaal maar wel goedkoper. Het koppel T_{em} met een optimale δ wordt dan gelijk aan:

$$T_{em} = \frac{3}{2} K_{em} \frac{U_{max}}{\sqrt{R_s^2 + \omega_{net}^2 L_s^2}} - \frac{3}{2} K_{em} \frac{K_{em}}{p} \frac{R_s \omega_{net}}{R_s^2 + \omega_{net}^2 L_s^2} \quad (8.13)$$

In figuur 8.16 is de kromme met de compensatie van δ getekend. Er ontstaat duidelijk een winst voor het werkgebied te zien.

Voor een optimale aansturing worden er voor de fase spanningen drie stappen uitgevoerd:

- selecteer een waarde van δ .
- realiseer de spanning U_{max}
- genereer de spanningen U_{AN} , U_{BN} en U_{CN}

Voor het genereren van de fasespanningen en stromen is het noodzakelijk dat de rotorpositie exact bekend moet zijn. Het oplossend vermogen vereist enkele boogminuten. In het algemeen wordt een resolver gebruikt als positie-opnemer. De resolver geeft middels een R/D converter informatie over:

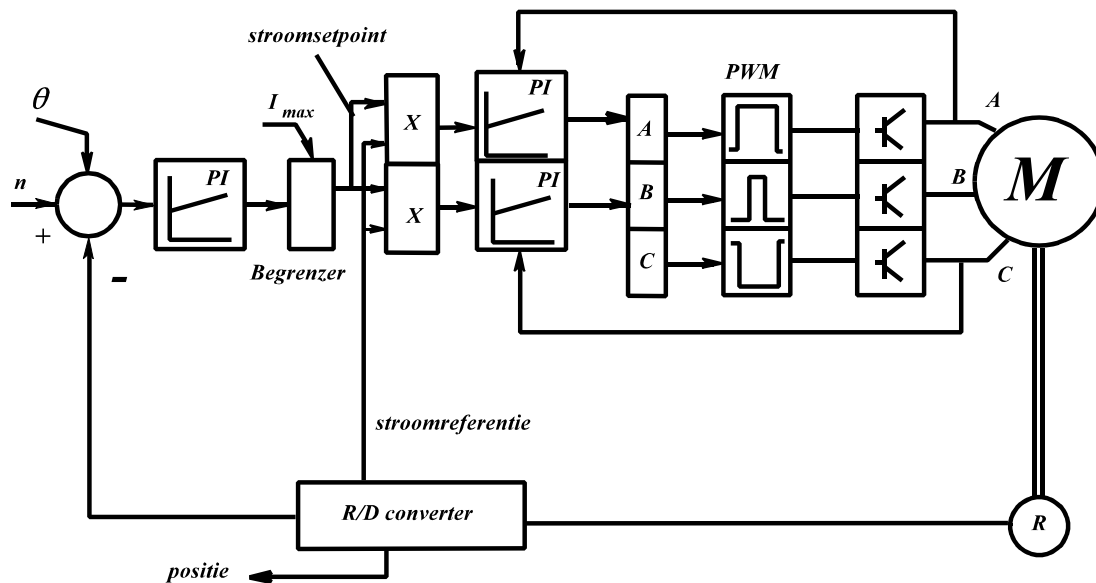
- de absolute rotorpositie t.b.v. de commutatie
- een tachosignaal voor de snelheidsterugkoppeling
- encodersimulatie signaal voor de positieterugkoppeling.

De absolute positie wordt digitaal aangeboden, waaruit een geheugenadres van een Eprom berekend wordt. In de Eprom zijn de waarden van een sinus-tabel opgeslagen. De data van de Eprom wordt na vermenigvuldiging met het setpointsignaal van de stroomregelaar aan twee D/A converters aangeboden.

Na conversie wordt de wenswaarde van de fasestroom A en B op de stroomregelaar gezet. De derde fasestroom C is de vectoriële som van de stromen in A en B. De fasestroom signalen worden aan een pulsbreedte modulator toegevoerd. In figuur 8.17 is een blokschema van een sinusgecommuteerd systeem getekend.

De momentane waarde van de fasestromen zijn zodanig dat ten alle tijde het statordraaiveld loodrecht staat op het permanente magneetveld van de rotor.

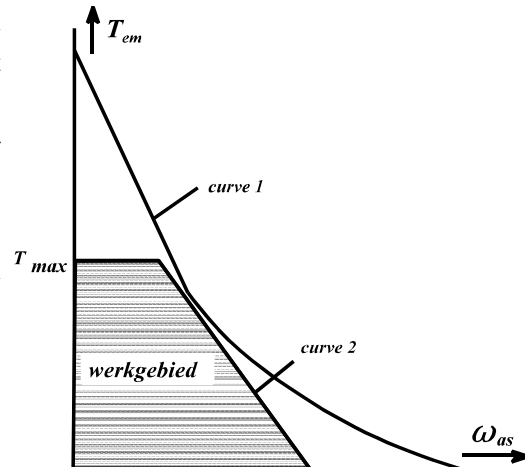
De bandbreedte van de stroomregelaar bedraagt ca. 2 kHz bij een motor zelfinductie van 3 mH.



Figuur 8.17: Blokschema van een AC-motor met servoversterker.

De voordelen van een AC-borstelloze motor:

- het aantal opnemers is beperkt. De resolver kan zowel een positie-sig-naal als een snelheidssig-naal afgeven.
- door het ontbreken van Hall-sensoren mogen hogere temperaturen bereikt worden.
- lage rimpel van het tachosig-naal, maar een hoog toerental regelbereik is mogelijk. Een grote lineariteit van de tachospanning over het hele toeren bereik.
- constant koppel. Geen koppelrimpel t.g.v. het schakelen van de fasestromen.



Figuur 8.18: Werkgebied van een borstelloze motor

In figuur 8.18 is nogmaals het koppel tegen de hoeksnelheid uitgezet (curve 1). Deze kromme geeft het maximale haalbare koppel bij een bepaald toerental weer. De stroom mag de demagnetisatiestroom niet overschrijden, daarom wordt de maximale motorstroom van de servoversterker begrensd. De maximale toegestane stroom $I_{\max}$ levert het piekkoppel op. Piekkoppels mogen ca. 4 keer het nominale koppel zijn. Curve 2 in figuur 8.18 is de koppeltoerental karakteristiek zoals die door de fabrikanten wordt opgegeven. Servomotoren hebben geen vast werkpunt, maar het werkpunt moet wel binnen het werkgebied liggen.

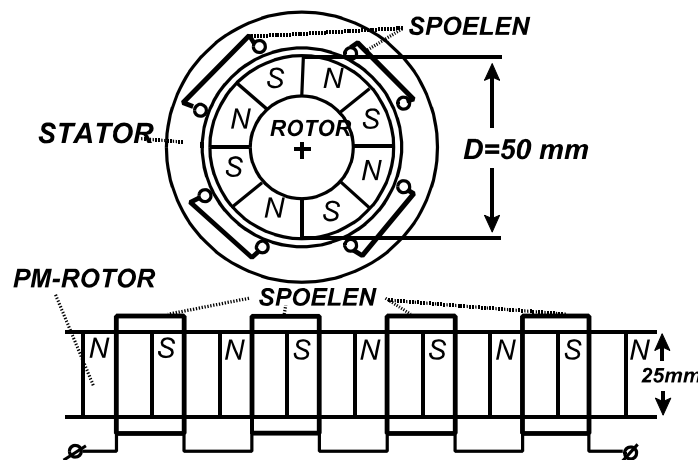
8.5. OPGAVEN.

8.5.1. Waarom is de actuator beschreven op blz 8.3 t.m. 8.7 t.a.v. het koppel niet optimaal benut?

8.5.2. Gegeven een PM-DC-motor (borstelloos) met de afmetingen zoals aangegeven in figuur 8.OP.1. De inductie B in de statorspoelen t.g.v. de permanente magneet-rotor is $0,1 \text{ T}$. De 4 statorspoelen hebben elk 60 windingen en staan in serie. De spoelzijden mogen elk geconcentreerd gedacht worden in één gleuf van de stator. De spoelbreedte is gelijk aan de poolbreedte

a. Bepaal de koppelconstante K_{em} .

b. Hoe kan deze motor verbeterd worden t.a.v. een betere continue koppelontwikkeling te krijgen? Wat is hier het gevolg van? Motiveer het antwoord?



Figuur 8.OP.1.: Een PM-DC-motor.

8.5.3. Een 3-fase borstelloze motor met trapeziumverdeelde windingen wordt d.m.v. stroomsturing blokvormig gevoed met een frequentie van 1000 Hz . en heeft een rotor met $p = 4$ (8 polen). De motor wordt blokvormig aangestuurd zoals is behandeld in de les. Per fase geldt: weerstand $R = 1,5 \Omega$, $K_{em} = 0,12 \text{ Nm/A}$ of Vs/rad en een nominale stroom van 10 A . De motor wordt nominaal belast.. De nullastverliezen bedragen 200 W .

- Hoe groot is de hoeksnelheid?
- Hoe groot is het koppel T_{em} dat de motor opwekt?
- Wat is de maximale klemspanning per fase?
- Welk rendement heeft de motor bij nominale belasting?

8.5.4. Een 3-fase motor met sinusvormig verdeelde windingen wordt met een blokvormig stroom van 10 A gestuurd, $p = 4$ (8 polen), weerstand fase spoel, $R_s = 2 \Omega$, inductie $L_s = 5 \text{ mH}$, de maximale spanning per fase van de voedingsbron $U_{klem} = 60 \text{ volt}$, $K_{em} = 0,4 \text{ Nm/A}$. Het koppel heeft ook een sinusvormig verloop als functie van de rotor positie.

- Hoe ziet het koppel verloop eruit als de commutatie hoek 60° is?
- Hoe groot is het gemiddelde koppel?
- Waarom wordt er niet over de volledige periode gestuurd? (denk aan het rendement).
- Waarom wordt het koppel geregeld met de stroom en niet met de commutatiehoek?
- Bereken bij bovenstaande stroom, het gemiddelde koppel, de koperverliezen voor

commutatatie hoeken van 0, 30, graden.

- 8.5.5. Een 3-fase motor met sinusverdeelde wikkelingen wordt sinusvormig gevoed, $p = 4$ (8 polen), Weerstand fase-spoel $R_s = 2 \Omega$, inductie fasespoel $L_s = 5 \text{ mH}$, $K_{em} = 0,1 \text{ Nm/A}$ of Vs/rad , maximale voedingspanning $U_{klem} = 60 \text{ volt}$.
- Geef de formule voor de koppeltoerental kromme en schets deze kromme voor een niet gecompenseerde δ aansturing. Geef de waarden van het aanloop koppel en de nullast-snelheid aan.
 - Bereken de maximale te compenseren δ .
 - Geef de formule voor de koppeltoerental kromme en schets deze kromme. Geef de waarde van het aanloopkoppel. Voor een gecompenseerde δ aansturing.
- 8.5.6. Een 3-fase borstelloze motor met sinusverdeelde wikkelingen wordt sinusvormig gevoed en heeft een rotor met $p = 3$ (6 polen). Per fase geldt: weerstand $R_s = 2 \Omega$, inductie $L_s = 6 \text{ mH}$, $K_{em} = 0,12 \text{ Nm/A}$ of Vs/rad en een maximale voedingspanning $U_{klem} = 80 \text{ volt}$.
- Bereken de waarden van het aanloop koppel en de nullasthoek-snelheid. Geef een schets van de koppel-toerental karakteristiek.
 - Bereken de te compenseren δ , indien men een gecombineerde spanning/stroomsturing wil toepassen bij een mechanische hoeksnelheid van de rotor van 500 rad/s .