

Populair dankzij

Permanente-magneetmotoren worden steeds meer toegepast. Dit artikel geeft een overzicht van hun belangrijkste karakteristieken en de ontwikkelingen daarin. Dat zal duidelijk maken waarom deze motoren steeds populairder worden: de prestaties zijn groot en de prijzen dalen. Eerst worden de belangrijkste karakteristieken van permanente magneten besproken. Vervolgens komen verschillende typen permanente-magneetmotoren aan de orde, met de belangrijkste voor- en nadelen van verschillende bouwvormen. Na enkele voorbeelden van toepassingen wordt besloten met een aantal belangrijke aandachtspunten bij het toepassen van permanente-magneetmotoren.

• H. Polinder en J.C. Compter •

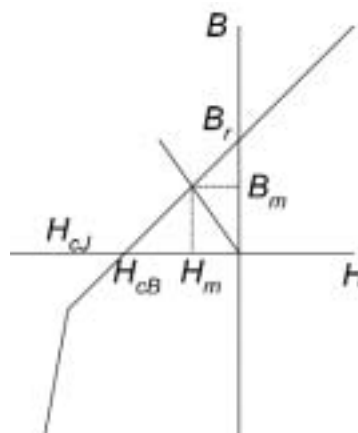
Permanente magneten

Een permanente magneet heeft een BH -karakteristiek zoals gegeven in Figuur 1. Figuur 2 toont een magnetisch circuit met een magneet en een luchtspleet. De belangrijkste eigenschappen van de permanente magneet zijn:

- De remanente magnetische fluxdichtheid B_r [T, Tesla] is de fluxdichtheid in de magneet aanwezig als die in een kortgesloten magnetisch circuit zit (als de luchtspleet l_g in Figuur 2 nul is en de magnetische weerstand van het ijzer verwaarloosbaar is). Deze remanente fluxdichtheid kan oplopen tot ongeveer 1,47 T voor NdFeB-magneten.
- De coërcitief veldsterkte H_{cB} [A/m, Ampere/meter], de magnetische veldsterkte in de magneet als de fluxdichtheid gelijk is aan nul. Deze kan oplopen tot ongeveer -1100 kA/m voor NdFeB-magneten.
- De relatieve magnetische permeabiliteit van de magneet μ_{rm} .
- De magnetische veldsterkte H_{cJ} waarbij de magneet gaat demagnetiseren ter plaatse van de knik in the BH -karakteristiek.

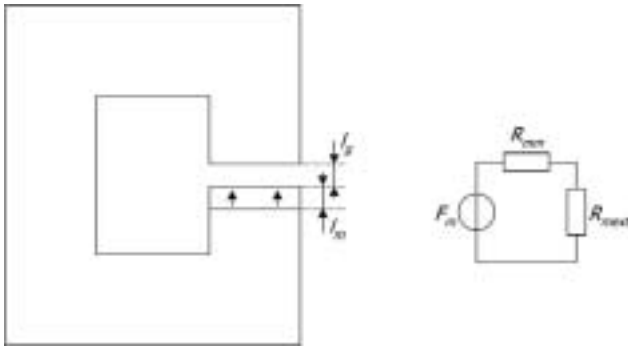
Als de BH -karakteristiek in het tweede kwadrant een rechte lijn is (zoals in Figuur 1), dan kan deze karakteristiek worden geschreven als:

$$B_m = \mu_0 \mu_{rm} H_m + B_r = \mu_0 \mu_{rm} H_m - \mu_{rm} H_{cB}$$



Figuur 1. BH -karakteristiek van een permanente magneet.

prijs en prestatie



Figuur 2. Magnetisch circuit met magneet en vervangingschema.

Tabel 1 geeft een overzicht van de belangrijkste magneetmaterialen en hun eigenschappen.

Tabel 1. Belangrijkste permanente-magneetmaterialen en hun eigenschappen.

	B_r (T)	H_{CB} (kA/m)	dB_r/dT (%/K)	dH_{CB}/dT (%/K)	ρ ($\mu\Omega\text{m}$)	Kostprijs (€/kg)
Ferriet	0,4	250	-0,2	+0,34	10^{12}	2
Alnico/ Ticonal	1,2	130	-0,05	-0,25	0,5	20
SmCo	1,0	750	-0,02	-0,03	0,5	100
NdFeB	1,47	1000	-0,12	-0,55	1,4	25

In Figuur 2 is ook een magnetisch vervangingschema weergegeven. Hier wordt de permanente magneet gerepresenteerd door een soort magnetische spanningsbron, een magnetomotorische kracht F_m en een magnetische weerstand of reluctantie R_{mm} . Deze kunnen worden afgeschat als:

$$F_m = l_m H_{CB}$$

en

$$R_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_{rm} H_m}$$

De rest van het magnetisch circuit heeft een reluctantie R_{mext} . Als we de reluctantie van het ijzer in het magnetische circuit verwaarlozen, vanwege de grote permeabiliteit van ijzer, en als we ook spreiding verwaarlozen, dan kan de reluctantie van de luchtspleet worden berekend als:

$$R_{mext} = \frac{l_g}{\mu_0 A_g}$$

De flux in het circuit kan dan worden berekend als:

$$\Phi_m = \frac{F_m}{R_{mm} R_{mext}}$$

De aanname dat spreiding verwaarloosbaar is, leidt in het algemeen tot bruikbare schattingen, maar niet tot exacte resultaten. Om preciezere resultaten te bereiken, zijn meestal eindige-elementen-methode berekeningen nodig.

Ontwikkelingen

Belangrijke ontwikkelingen in het gebruik van permanente-magneetmaterialen zijn:

- De maximale remanente fluxdichtheid van NdFeB-magneten is opgelopen van ongeveer 1,05 T in 1990 naar 1,47 T rond 2002, maar lijkt nu nabij het theoretisch maximum te zitten. Het zoeken is naar een nieuwe doorbraak.
- De kostprijs, vooral van NdFeB-magneten, kent al vijftien jaar een dalende tendens en is in die tijd teruggelopen van 500 €/kg naar ongeveer 25 €/kg, dankzij de opkomst van Chinese producenten. Er zijn geen aanwijzingen dat deze trend stopt, dus een verdere kostprijsverlaging is te verwachten.
- Het is te verwachten dat ferrietmagneten verdwijnen omdat hun voordeel ten opzichte van NdFeB-magneten, namelijk hun lage kostprijs, aan het verdwijnen is, terwijl hun energiedichtheid veel lager is dan die van NdFeB-magneten.

De eerste twee ontwikkelingen zijn de belangrijkste redenen voor het toenemend gebruik van permanente-magneetmotoren.

Typen permanente-magneetmotoren

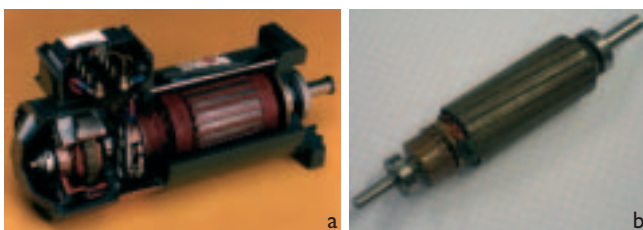
Als belangrijkste onderscheid in permanente-magneetmotoren zouden we dat tussen motoren met borstels en commutator en borstelloze motoren kunnen hanteren.

De bekendste typen permanente-magneetmotoren met borstels en commutator en met magneten op de stator zijn:

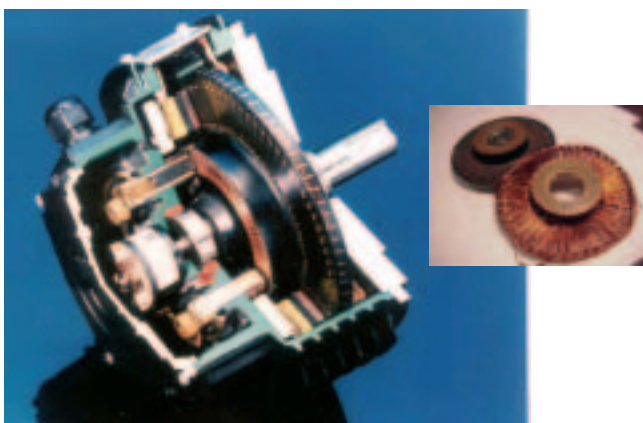
- De ijzerankermotor (Figuur 3), de meestgebruikte roterende motor met radiale flux en met wikkelingen in groeven.
- De schijfankermotor (Figuur 4) met axiale flux en een luchtspleetwikkeling of een PCB (printed circuit board) wikkeling.

- De holle-rotormotor (Figuur 5) met radiale flux en een luchtspleetwikkeling waarin alleen de wikkeling draait.

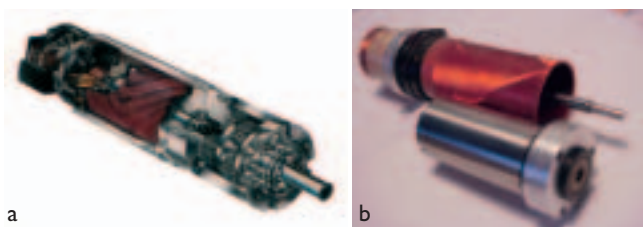
Voor motoren met borstels is deze indeling redelijk compleet; andere typen komen nauwelijks voor.



Figuur 3. IJzerankermotor.
(a) Van Parvex (Elmeq Nederland).
(b) Rotor met scheve groeven.



Figuur 4. Schijfankermotor met luchtspleetwikkeling en in de inzet een tweetal schijfankers, van Mavilor.



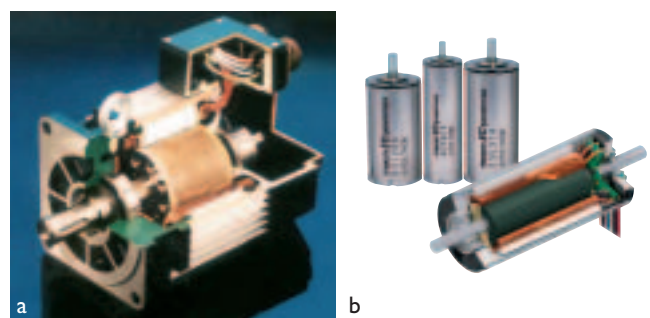
Figuur 5. Een holle-rotormotor met luchtspleetwikkeling.
(a) Van maxon motor benelux.
(b) Van Portescap.

De borstelloze permanente-magneetmotoren (Figuur 6) met magneten op de rotor worden vaak onderverdeeld in de volgende typen.

- Borstelloze gelijkstroommotoren (BDCM's) met blok-vormige stromen als functie van de rotorpositie.
- Permanente-magneet AC synchrone motoren (PMSM's) met sinusvormige stromen als functie van de rotorpositie.

Beide typen worden met wisselstroom bedreven; de frequentie is afhankelijk van de motorsnelheid en de amplitude is gekoppeld aan het koppel. Deze indeling is niet erg compleet. Borstelloze permanente-magneetmotoren zijn verder onder te verdelen op de volgende manieren:

- Motoren met wikkeling in groeven of met luchtspleetwikkeling.
- Roterende of lineaire motoren:
 - Voor roterende motoren: motoren met radiale flux of axiale flux.
 - Voor lineaire motoren:
 - + het deel met spoelen is groter dan het deel met magneten, of andersom;
 - + motoren met bewegende spoelen of met bewegende magneten.



Figuur 6. Borstelloze permanente-magneetmotoren
(a) Met wikkeling in groeven, van Mavilor.
(b) Met luchtspleetwikkeling, van maxon motor benelux.

Voor- en nadelen

Permanente-magneetmotoren zijn zo ongeveer in alle mogelijke combinaties verkrijgbaar en dat maakt het moeilijk alle mogelijke typen te beschrijven met hun voor- en nadelen. Daarom worden hieronder de belangrijkste voor- en nadelen van de verschillende bouwvormen besproken.

(a) Met borstels of borstelloos

Motoren met borstels en commutator hebben magneten op de stator. Borstelloze motoren hebben magneten op de rotor. Motoren met borstels en commutator hebben vooral de volgende voordelen ten opzichte van borstelloze motoren:

- Een eenvoudige DC-voeding is voldoende.
- De kosten van de combinatie motor en elektronica zijn meestal lager.

Borstelloze motoren hebben vooral de volgende voordelen ten opzichte van motoren met borstels:

- Er is geen slijtage van borstels en commutator, hetgeen leidt tot langere levensduur.
- Er is geen borstelspel en borstelwrijving, hetgeen leidt tot hogere positioneer-nauwkeurigheden.
- De warmteontwikkeling is in de stator, die meestal gemakkelijker kan worden gekoeld, hetgeen bijdraagt aan een hogere krachtdichtheid.
- Het veilige werkgebied (safe operating area) is groter, doordat er geen beperkingen ten gevolge van de mechanische commutator zijn.
- Borstelloze motoren kunnen op meer plaatsen worden toegepast (bijvoorbeeld ook in vacuüm en in cleanrooms).

(b) Met wikkeling in groeven of met luchtspleetwikkeling

Gewoonlijk worden de spoelen in motoren in groeven gelegd tussen tanden die uit gelamineerd ijzer bestaan, maar er zijn ook motoren verkrijgbaar met een luchtspleetwikkeling. Dit is mogelijk dankzij sterke magneten die ook een behoorlijk magnetisch veld produceren in een grote luchtspleet.

De belangrijkste voordelen van motoren met de wikkeling in groeven ten opzichte van motoren met luchtspleetwikkeling zijn:

- hogere vermogensdichtheid;
- goedkoper;
- betere warmteoverdracht van wikkeling naar ijzer;
- hogere thermische capaciteit;
- robuuster, goede overdracht van kracht op de mechanische structuur.

De belangrijkste voordelen van motoren met luchtspleetwikkeling ten opzichte van motoren met wikkelingen in groeven zijn:

- de afwezigheid van kleefkrachten en -koppels tussen tanden en magneten;
- de kleine elektrische tijdsconstante ten gevolge van de kleine waarde van de inductiviteit van de wikkeling;
- minder ijzerverliezen.

In het geval van gelijkstroommotoren met borstels komen daar bij een luchtspleetwikkeling (schijfankermotoren met

axiale flux of holle-rotormotoren met radiale flux) nog de volgende voordelen bij:

- minder commutatieproblemen in motoren met borstels ten gevolge van de kleine waarde van de inductiviteit van de wikkeling;
- kleine massa-traagheid in het geval dat alleen de luchtspleetwikkeling draait (zoals bij de schijfankermotor en de holle-rotormotor het geval is);
- geen ijzerverliezen.

(c) Radiale flux of axiale flux

De keuze tussen axiale flux en radiale flux wordt vooral bepaald door inbouwruimte in de toepassing.

Radiale flux heeft het volgende voordeel vergeleken met axiale flux:

- goedkoper.

Axiale flux heeft de volgende voordelen vergeleken met radiale flux:

- kortere axiale inbouwruimte;
- hogere krachtdichtheid (T/m^3) mogelijk (bij hetzelfde type wikkeling).

(d) Roterend of lineair

Voor een roterende beweging wordt altijd een roterende motor gebruikt. Voor een lineaire beweging is het meestal het goedkoopst om een roterende motor met een overbrenging te gebruiken.

Bij een lineaire beweging heeft een lineaire motor de volgende voordelen ten opzichte van een roterende motor met een overbrenging:

- er zijn hogere nauwkeurigheden mogelijk omdat de wrijving en eventuele speling uit de overbrenging wordt geëlimineerd;
- er zijn hogere prestaties mogelijk;
- er is minder slijtage en onderhoud.

(e) Borstelloze gelijkstroommotoren (BDCM's) of permanente-magneet AC synchrone motoren (PMSM's)

BDCM's werken met blokvormige stromen als functie van de positie, PMSM's werken met sinusvormige stromen als functie van de positie. Voor blokvormige stromen is er maar zes keer per elektrische periode positie-informatie nodig, hetgeen leidt tot een goedkoper regelsysteem. De keerzijde is dat er sprake is van een kracht- of koppelrimpel met een frequentie van zes keer de elektrische fre-

quentie, omdat echte blokvormige stromen niet te maken zijn. PMSM's hebben continu positie-informatie nodig, hetgeen leidt tot een duurder systeem, maar wel een systeem met minder kracht- of koppelrimpel.

(f) Deel met spoelen groter dan deel met magneten, of andersom, en met bewegende spoelen of met bewegende magneten in lineaire motoren

Vaak is het deel met magneten in lineaire motoren langer dan het deel met spoelen, omdat dat leidt tot minder verliezen. Meestal is het kortste deel van de lineaire motor het bewegende deel. Daarom zijn er nogal wat lineaire motoren met bewegende spoelen. Dat heeft weer als nadeel dat er kabels en eventueel koeling naar deze bewegende spoelen moeten, hetgeen leidt tot stoorkrachten.

Toepassingen

Aanvankelijk werden permanente magneten vooral toegepast in kleine motortjes of in motoren waaraan zulke extreme eisen gesteld werden dat kosten nauwelijks een rol speelden.

In kleine motortjes met elektrische bekrachtiging is er niet genoeg ruimte voor wikkelingen, waardoor de fluxdichtheid en de krachtdichtheid in deze motoren erg laag is. Met permanente magneten kunnen wel hoge fluxdichtheden worden gehaald in kleine afmetingen, waardoor deze motortjes met permanente magneten veel compacter kunnen worden. Daarom worden permanente magneten hier al lang toegepast.

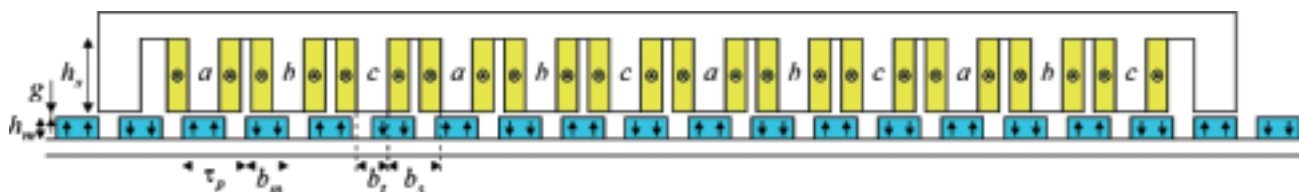
Een voorbeeld van een toepassing met extreme eisen is in wafersteppers en waferscanners van ASML, waar extreme nauwkeurigheden (in de orde van 1 nm) moeten worden gehaald tegelijk met extreme prestaties. Dit is haalbaar met luchtspleetwikkelingen die zonder ijzer in een magnetisch veld worden geplaatst. De lineaire motor van Figuur 7

wordt niet alleen toegepast in waferscanners, maar ook in componentplaatsingsmachines met positioneer-nauwkeurigheden in de orde van 5 µm. De piekwaarde van de krachtdichtheid van deze motor ligt in de orde van 10 N/cm², hetgeen erg hoog is.

Figuur 8 geeft een experimentele opstelling van een onderdeel van een 'optical disc mastering device' gebouwd door de sectie Mechatronics van de faculteit 3mE, Werktuigbouwkunde, aan de TU Delft. Dit apparaat is bedoeld voor gebruik in het productieproces van optical disks. Ook hier worden nauwkeurigheden in de orde van 1 nm vereist. Om het roterende deel ongevoelig te maken voor trillingen in het stilstaande deel, wordt voor de aandrijving een permanente-magneetmotor gebruikt met een luchtspleetwikkeling zonder dat daar ijzer omheen zit.



Figuur 8. Experimentele opstelling van de rotor voor een 'optical disk mastering device' en de permanente-magneetmotor (de inzet) die de rotor moet aandrijven.



Figuur 7. Doorsnede van een lineaire motor zoals toegepast in wafersteppers en componentplaatsingsmachines.

Met het dalen van de prijzen van permanente magneten komen er steeds meer toepassingen in beeld met minder extreme eisen. Argumenten om permanente-magneetmotoren te gebruiken zijn dan: hoog rendement, hoge krachtdichtheid en robuustheid (in geval van borstelloze motoren). In veel industriële aandrijvingen is de asynchrone motor tientallen jaren het werkpaard geweest. Echter, met de huidige prijzen van permanente magneten hoeft een permanente-magneetmotor nauwelijks duurder te zijn dan een asynchrone motor. Daarbij kunnen de verliezen in een motor van hetzelfde toerental en hetzelfde koppel ruwweg halveren. Een gewone asynchrone motor van 1 kW heeft typisch een rendement van 80%, een permanente-magneetmotor van 90%. Bij continu gebruik betekent dat een energiebesparing in de orde van € 100 per jaar, zodat eventuele meerkosten van een permanente-magneetmotor kunnen worden terugverdiend. Daarom is de verwachting dat de trend van toenemend gebruik van permanente magneten zich voorlopig voortzet.

In de Nuna, een auto op zonne-energie ontwikkeld door studenten van de TU Delft (Figuur 9), wordt een permanente-magneetmotor gebruikt vanwege het hoge rendement en de hoge krachtdichtheid. De Nuna haalt met gemiddeld 2 kW aan zonne-energie als input een gemiddelde snelheid van 100 km/uur.



Figuur 9. De Nuna, een auto op zonne-energie, is uitgerust met een permanente-magneetmotor.

Aandachtspunten

- Als hoge nauwkeurigheden nodig zijn, kunnen kleefkrachten in motoren met wikkelingen in groeven problematisch zijn. Dit kan worden gereduceerd door de groeven en magneten ten opzichte van elkaar scheef te zetten; zie Figuur 3. De tendens is om motoren zonder kleefkrachten, dus met luchtspleetwikkeling, te gebruiken (maxon, Mavilor, Aerotech).

- De sterkte van magneten, vooral van NdFeB, is temperatuurafhankelijk. Bij het ontwerp van de motor moet hiermee terdege rekening worden gehouden.
- Er is een risico dat de magneten demagnetiseren. In de *BH*-karakteristiek wordt dan het punt H_{cJ} gepasseerd. Demagnetisatie ten gevolge van stromen in de stator bij normaal gebruik of tijdens een kortsluiting in het aandrijfsysteem, moet door middel van een goed motorontwerp voorkomen kunnen worden. Er zijn nogal wat voorbeelden bekend van magneten die demagnetiseerden ten gevolge van oververhitting, dus ook dat is een aandachtspunt. Demagnetisatie ten gevolge van verouderingseffecten is voor zover tot nu toe bekend verwaarloosbaar.
- NdFeB-magnetten zijn erg corrosief, dus er moet voldoende aandacht worden besteed aan bescherming (coatings). Epoxy wordt steeds meer gebruikt.
- Veldverzwakking is in motoren met permanente magneten lastig, hetgeen ze minder geschikt maakt voor toepassingen waar veldverzwakking veel wordt gebruikt (zoals tractie).
- Er is meer aandacht nodig voor wervelstroomverliezen in permanente-magneetmotoren. Reduceren daarvan kan door magneten te segmenteren, door blik (SiFe) met een hogere soortelijke weerstand te gebruiken of door dunner blik te gebruiken.
- Magnetten hebben toleranties in sterkte van 2% en in magnetisatiehoek van $2,5^\circ$. De consequentie is dat de motorconstante [Nm/A] in het algemeen een tolerantie kent van 5%.

Auteursnoot

Dr.ir. H. Polinder is universitair hoofddocent in de afdeling Electrical Power Processing van de faculteit Elektrotechniek, Wiskunde & Informatica van de TU Delft. Prof.dr.ir. J.C. Compter is chieft technologist bij de afdeling Mechatronica Technologies van Philips Applied Technologies in Eindhoven.

Informatie

h.polinder@tudelft.nl
j.c.compter@philips.com