

HOOFDSTUK 6

GEBRUIK EN CONSTRUCTIE VAN SYNCHRONE MACHINES

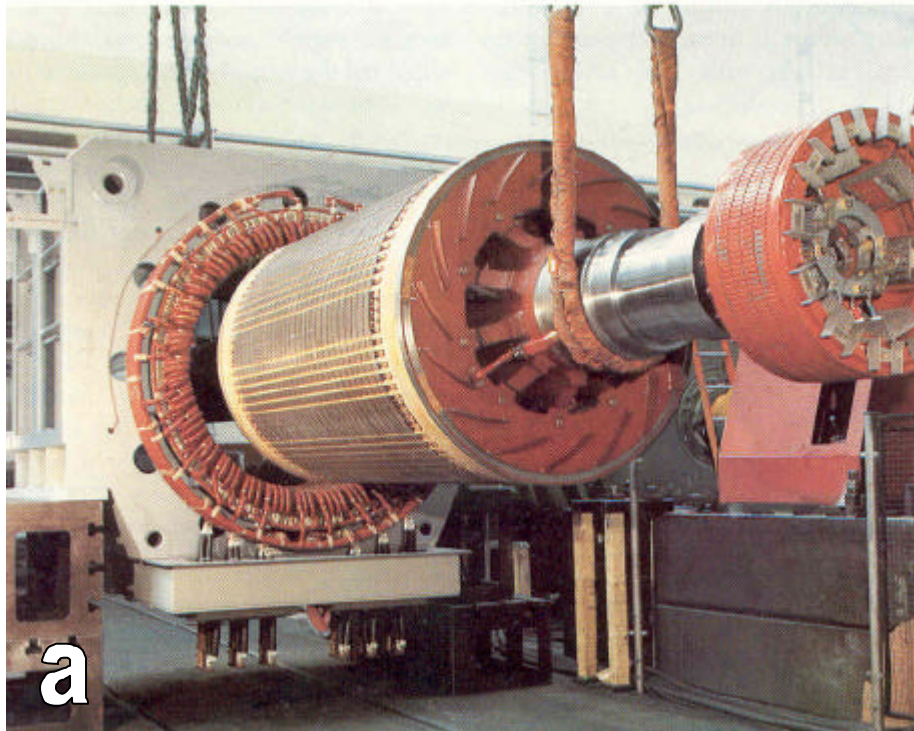
Alhoewel elke elektrische machine in principe kan werken als generator en als motor, worden heel wat (synchrone) machines gebouwd om uitsluitend te worden gebruikt in een van beide modes. Bovendien wordt de constructiewijze van synchrone generatoren en motoren in grote mate bepaald door de toepassing (snelheid, vermogen, ...). De synchrone generator of alternator voor een klassieke thermische centrale verschilt totaal van de generator voor een waterkrachtcentrale. Ook synchrone motoren bestaan in tal van uitvoeringen: elektrisch bekrachtigd, motoren met permanente magneten en reluctantiemotoren.

6.1 Elektrisch bekrachtigde generator

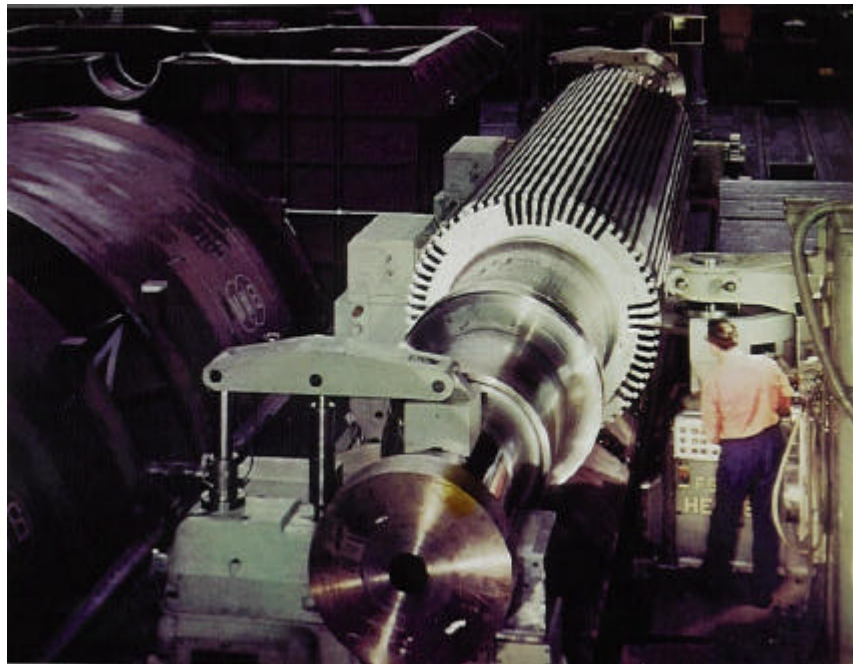
De synchrone generatoren kunnen globaal in twee klassen ingedeeld worden: alternatoren met gladde of cilindrische rotor en alternatoren met uitspringende polen. De eersten worden gebruikt in thermische centrales en draaien aan hoge snelheid (3000 of 1500 tr/min). Synchrone generatoren met cilindrische rotor worden ook turbogeneratoren genoemd. Generatoren met uitspringende polen draaien op lage snelheden en komen onder andere voor in waterkrachtcentrales.

6.1.1 Turbogeneratoren

De stoomturbine draait op een hoge snelheid en drijft de alternator aan. De snelheid wordt bepaald door de frequentie van het elektrisch net. Voor Europa bedraagt deze 50 Hz, zodat een tweepolige synchrone generator aangedreven wordt op 3000 tr/min. De spanning aan de klemmen van een alternator bedraagt typisch 20 kV. Wegens de hoge snelheid hebben turbo-generatoren een lange, smalle rotor, zodat de inertie en de centrifugale krachten beperkt blijven.



a



b

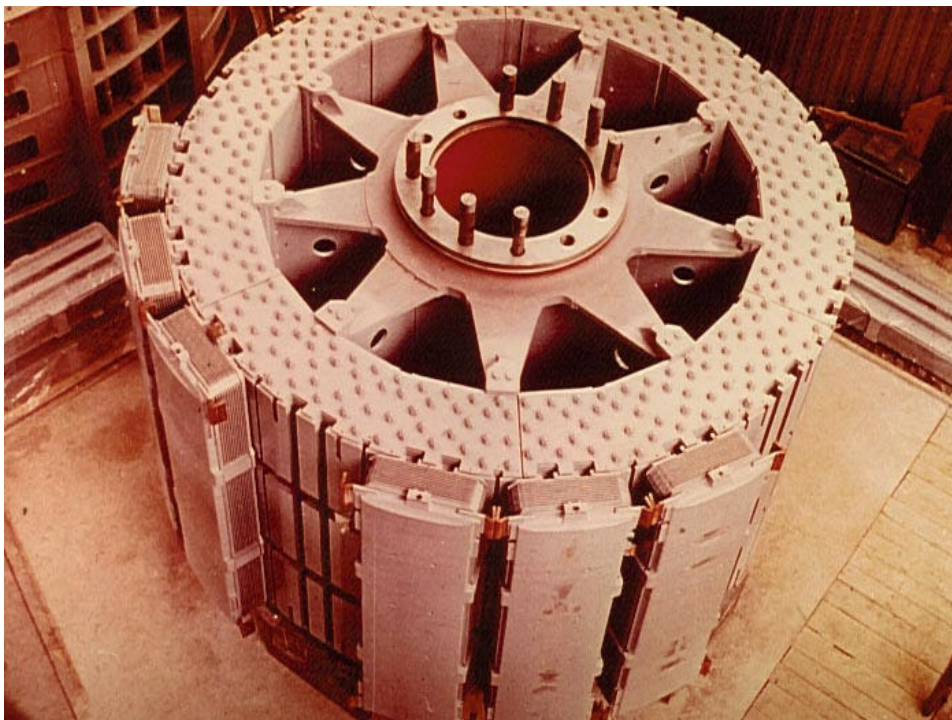
figuur 6.1 *Inschuiven van een gladde rotor in zijn stator (a) en aanbrengen van de rotorgleuven in de rotor van een turbo-alternator (b) (Foto Siemens)*

6.1.2 Generator met uitspringende polen

Waterkrachtturbines draaien trager dan de stoomturbines. Vermits de frequentie van het elektriciteitsnet vast ligt, moet de generator in een waterkrachtcentrale een groot aantal polen hebben. Deze generatoren voor lage toerentallen worden gekenmerkt door een grote diameter, een beperkte axiale lengte en uitspringende polen op de rotor. Generatoren met uitspringende polen kunnen ook aangewend worden in noodaggregaten, waar ze worden aangedreven door traaglopende dieselmotoren.

De stator van een machine met uitspringende polen is analoog aan die van een turbomachine. Er werden reeds alternatoren gebouwd met een vermogen van 170 MVA, 85,7 tr/min met een diameter van 15,4 m en een lengte van slechts 2,3 m. Bij zulke afmetingen is het onmogelijk de stator in zijn geheel te transporteren. Bovendien zijn waterkrachtcentrales, zeker bij de constructie, over het algemeen slecht bereikbaar, zodat deze generatoren ter plaatse gemonteerd worden.

De constructie van de rotor is totaal verschillend van deze bij turbomachines. De rotor bestaat uit een gelaste vliegwielconstructie in plaats van een massieve cilinder (figuur 6.2). Op de centrale as worden spaken gemonteerd die een ring ondersteunen, waarop de poolkernen gemonteerd zijn met zwaluwstaarten of bouten. De ring kan massief of gelamelleerd zijn. Hetzelfde geldt voor de poolkernen. Bij montage ter plaatse wordt steeds een gelamelleerde constructie toegepast. Rond de poolkernen worden de bekrachtigingswikkelingen geplaatst.



figuur 6.2 *Rotorconstructie van een synchrone machine met uitspringende polen (Foto Siemens)*

Tabel 6.1 geeft de voornaamste verschillen tussen een turbogenerator en een generator met uitspringende polen. Tabel 6.2 tenslotte duidt het vermogenbereik aan, de aandrijving en de wijze van koeling.

Tabel 6.1 *Vergelijking turbogeneratoren en generatoren met uitspringende polen*

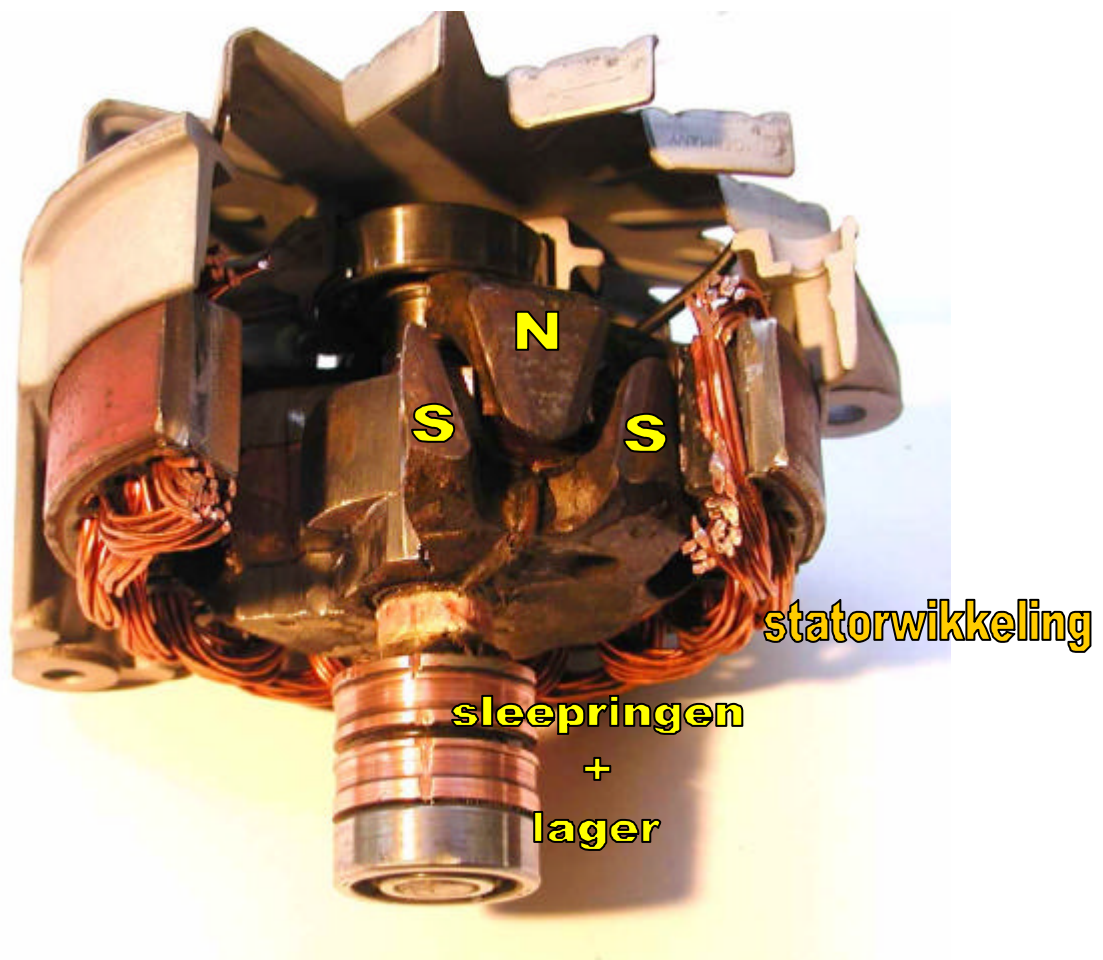
	TURBOGENERATOR	GENERATOR MET UITSPRINGENDE POLEN
Lengte / diameter	Groot	Klein
Snelheid	Hoog	Laag
Rotor	Massief	Gelamelleerd
Bekrachtiging	In gleuven	Spoelen rond polen
Dempwikkeling	Gleufspieën	In poolschoenen
Aandrijving	Stoomturbine	Waterturbine

Tabel 6.2 *Verschillende klassen grote generatoren*

AANTAL POLEN	AANDRIJVING	VERMOGEN (MVA)	KOELING
2	Stoomturbine	70 - 150	Lucht
2	Stoomturbine	150 - 700	Waterstof
4	Stoomturbine	1000 - 1500	Waterstof en/of water
6 tot 8	Dieselmotor	60 - 100	Lucht
6 tot 20	Waterturbine	5 - 600	Lucht, waterstof of water

6.2 Klauwpoolgenerator

Een speciale synchrone generator met uitspringende polen is de klauwpoolgenerator. De alternator in een wagen is van dit type. Hij bestaat uit een driefasige stator, een rotor met klauwpolen die in elkaar passen, met een cirkelvormige bekrachtigingswikkeling, die tegelijk alle polen magnetiseert. Deze constructiewijze is goedkoop en zeer geschikt voor massa-productie. De flux verloopt in de rotor axiaal en radiaal, in de stator zoals in een normale machine. De stator is verbonden met een diodegelijkrichter en een transistorregelaar. De spanning wordt in een breed toerentalbereik van 1 op 10 door de spanningsregelaar en de bekrachtiging constant gehouden. figuur 6.3 stelt de alternator van een wagen voor.



figuur 6.3 *Klauwpoolalternator van een wagen (Electa)*

6.3 Synchrone motor

Er bestaan tal van uitvoeringen van synchrone motoren, elk geschikt voor een specifieke toepassing. Er wordt een beperkt overzicht gegeven. Grote motoren worden elektrisch bekrachtigd. Motoren voor kleinere vermogens worden uitgerust met permanente magneten of hebben zelfs helemaal geen bekrachtigingssysteem.

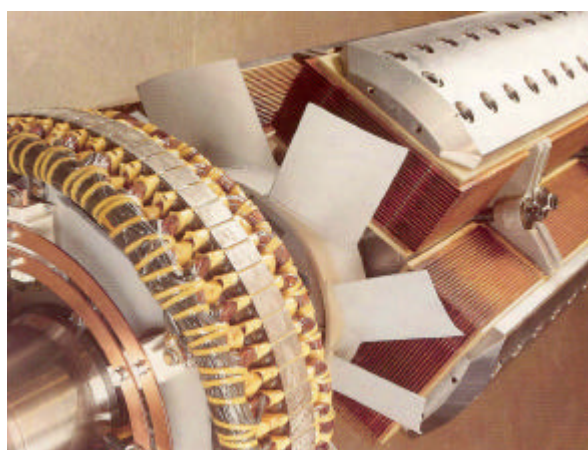
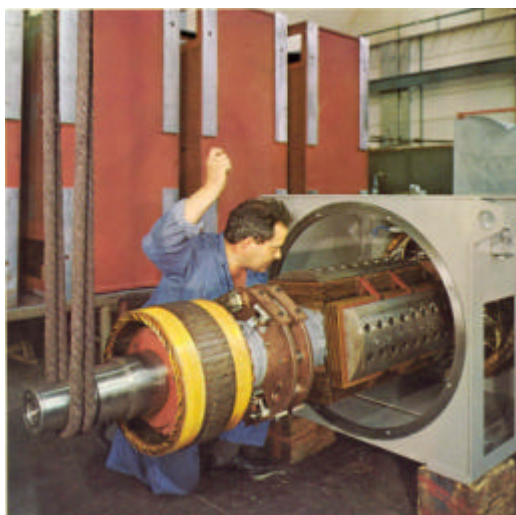
6.3.1 Elektrisch bekrachtigde motor

Zeer grote motoren zijn nagenoeg steeds elektrisch bekrachtigde synchrone motoren. Hun constructie is in principe dezelfde als bij de elektrisch bekrachtigde generatoren. Machines met gladde rotor worden aangewend voor het aandrijven van grote pompen, compressoren en ventilatoren (hoog toerental), bijvoorbeeld in de petroleum en de petrochemische industrie of bij het transport van aardgas en de fabricage van vloeibare zuurstof, stikstof, lucht, enz.. Machines met uitspringende polen worden bijvoorbeeld toegepast in cementmolens (laag toerental).

Met een invertor met belastingscommutatatie kan de voedingsfrequentie geregeld worden zodat een aandrijving bekomen wordt met regelbare snelheid.

Een bijkomend voordeel van het gebruik van een synchrone machine is de mogelijkheid om via de bekrachtiging de arbeidsfactor te wijzigen. Zo kan een synchrone motor die een compressor aandrijft, tegelijk gebruikt worden om de arbeidsfactor te verbeteren, d.w.z. de andere aanwezige inductieve lasten (bijvoorbeeld inductiemachines) te compenseren.

Sommige synchrone machines worden enkel aangewend om de arbeidsfactor van een net te wijzigen zonder actieve energie te leveren. Men spreekt in dit geval van synchrone compensatoren. Ze hebben een kleine asdiameter, vermits praktisch geen koppel geleverd wordt.



figuur 6.4 *Rotor met uitspringende polen (vierpool) met een bekrachtigingswikkeling rond de poolschoenen en het anker van de bekrachtigingsgenerator op dezelfde as (ABB)*

6.3.2 Synchrone motor zonder elektrisch bekrachtiging

6.3.2.1 Permanent magneetmotor

Synchrone machines met permanente magneten worden vooral gebruikt in servo-aandrijvingen. Deze machines zien er van buiten en van binnen niet meer uit zoals de klassieke machine. Er bestaan zeer uiteenlopende bouwvormen.

De opgave van een servo-aandrijving bestaat erin onderdelen van een productiemachine langs een bepaalde weg binnen een voorgeschreven tijd te bewegen en ze met een welbepaalde nauwkeurigheid op hun eindbestemming te positioneren. Daarbij worden aan de dynamica vaak heel hoge eisen gesteld.

De toepassingsgebieden voor servo-aandrijvingen zijn te vinden in werktuigmachines voor de positionering en voor de verplaatsing van de werkstukken, in robots en positionerings-toestellen, in ventielen en afsluiters.

Voor deze toepassingen ligt het vereiste koppel tussen ongeveer 0,1 en 100 Nm bij toerentallen gaande tot 10.000 toeren per minuut. De nominale vermogens gaan van ongeveer 100 W tot 20 kW. Vaak wordt met een mechanische transmissie het toerental van de motor naar beneden gebracht.

Tot voor enkele jaren werden elektrische servo-aandrijvingen zonder uitzondering met gelijkstroom uitgevoerd, dit wil zeggen gelijkstroommachines met permanent magneetbekrachtiging, waarbij het voordeel van de eenvoudige regeling bekomen werd en waarbij de nadelen van de mechanische commutator erbij genomen werden.

Door de ontwikkelingen in de vermogenhalfgeleiders, de microprocessoren en de permanente magneten is de situatie op dit ogenblik helemaal anders. Borstelloze wisselstroommotoren met hoog dynamische regelingen lossen de gelijkstroom-aandrijvingen af.

De drie thans meest gebruikte permanent magneetmaterialen zijn ferrieten, Al-Ni-Co en samarium-cobalt, wat meer en meer vervangen wordt door Nd-Fe-B. Voor hetzelfde vermogen in een bepaalde bedrijfstoestand zijn motoren met ferrieten heel wat groter en wegen zij veel meer dan een equivalente Sm-Co motor. Voor servomotoren komen ferrieten dan ook niet in aanmerking.

a) Synchrone machine met Nd-Fe-B magneten

Figuur 6.4 toont een synchrone motor met radiaal veld en een cilindrische rotor die gebruikt wordt voor werktuigmachines en meer bepaald voor de aandrijving van het werkstuk.

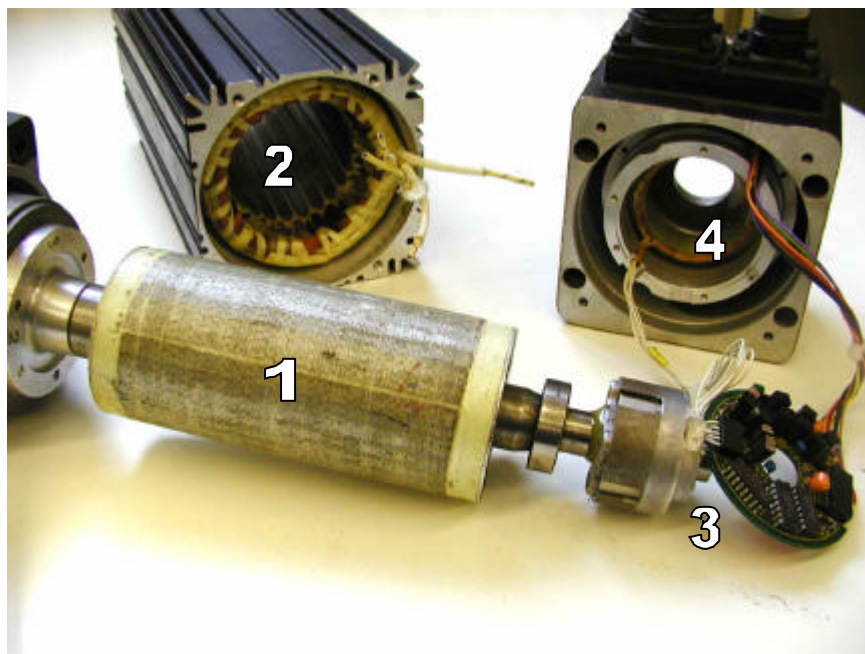
De uitvoering is naargelang de bouwvorm vier- of zespolig. Het huis is een persgietlegering met koelribben. Hierdoor kunnen hoge beschermingsgraden bereikt worden en wordt de warmte-afvoer verbeterd. Het statorblikpakket wordt met lak samengekleefd en wordt in het huis gekrompen. De

statorwikkeling wordt uitgevoerd met twee gleuven per pool en per fase als een eenlaagswikkeling en wordt met speciale naaldwerktuigen in de machine getrokken.

Een rotorpositiegever wordt voor de sturing van de statorstromen aan de overzijde van de last op de as geïntegreerd.

De slechts 2 mm dikke Nd-Fe-B magneten kunnen omwille van hun hoge coërcitieve veldsterkte onmiddellijk tegen de luchtspleet aangebracht worden, dit vooral met het oog op de beperking van de motorinductantie. Om de wervelstroomverliezen in de magneet te beperken, worden deze als smalle stukjes uitgevoerd, die met kleefstof of glasband op de rotor aangebracht worden.

De magnetisering van de magneten gebeurt bij een volledig afgewerkte rotor in een magnetisatiejuk met uiterst hoge veldsterkte via impulsstromen uit een condensator-batterij.



1. Rotor met permanente magneten.
2. Stator met driedfasige wikkeling
3. Tachoanker en encoder
4. Lagerschild met tachowikkeling en aansluitstekkers

figuur 6.5 *Borstelloze servomotor met permanent magneetbekrachtiging (Bosch)*

b) Borstelloze motor met schijfvormige rotor

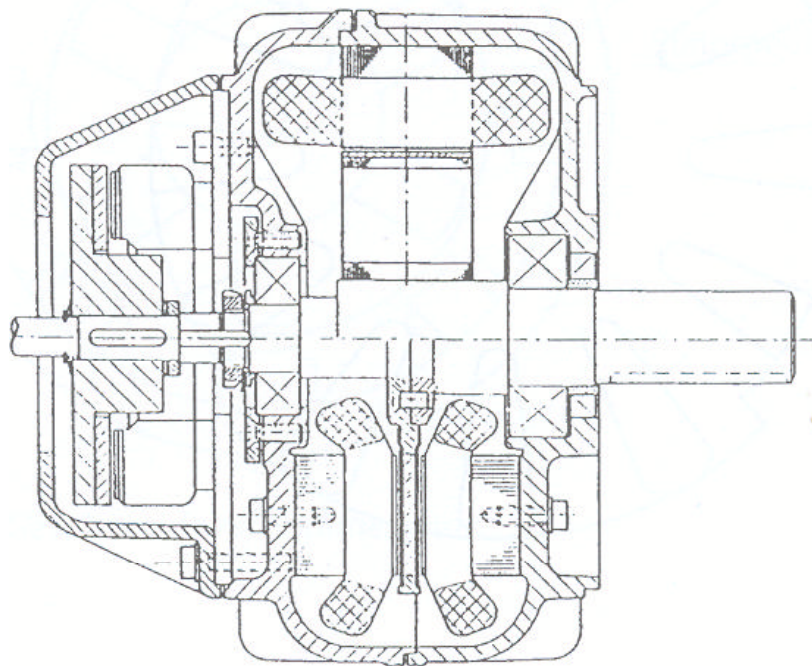
Voor robots worden borstelloze motoren met schijfvormige rotor aangewend. Op figuur 6.6 wordt een machine met dubbele stator en axiale magnetisering voorgesteld, waarbij het veld door roterende magneten op basis van zeldzame aarden opgewekt wordt. Hierdoor wordt een gering traagheidsmoment bekomen en een goede warmte-afvoer van de statorwikkeling.

Omwillen van de axiale lengte en de demagnetisatievastheid werd voor een achtpolige uitvoering gekozen. De statorwikkeling is, zoals bij een conventionele machine, in gleuven ondergebracht. In tegenstelling met een normale stator, wordt het blikpakket spiraalvormig uit stroken blik gewikkeld, waarin de gleuven met een steeds toenemende afstand geponst worden. Het blikpakket wordt langs de buitenzijde gelast. De wikkeling is een eenlaags-wikkeling met $q = 1$.

De roterschijf wordt bij impulsstromen tot de tienvoudige nominale stroom aan hoge mechanische krachten onderworpen. Daarom worden de magneten met een sandwich-constructie in roestvrijstaal ingebed. Hierbij moet aandacht geschonken worden aan het feit dat de magnetisch werkzame luchtspleet door dit wapeningsmateriaal niet onnodig vergroot wordt.

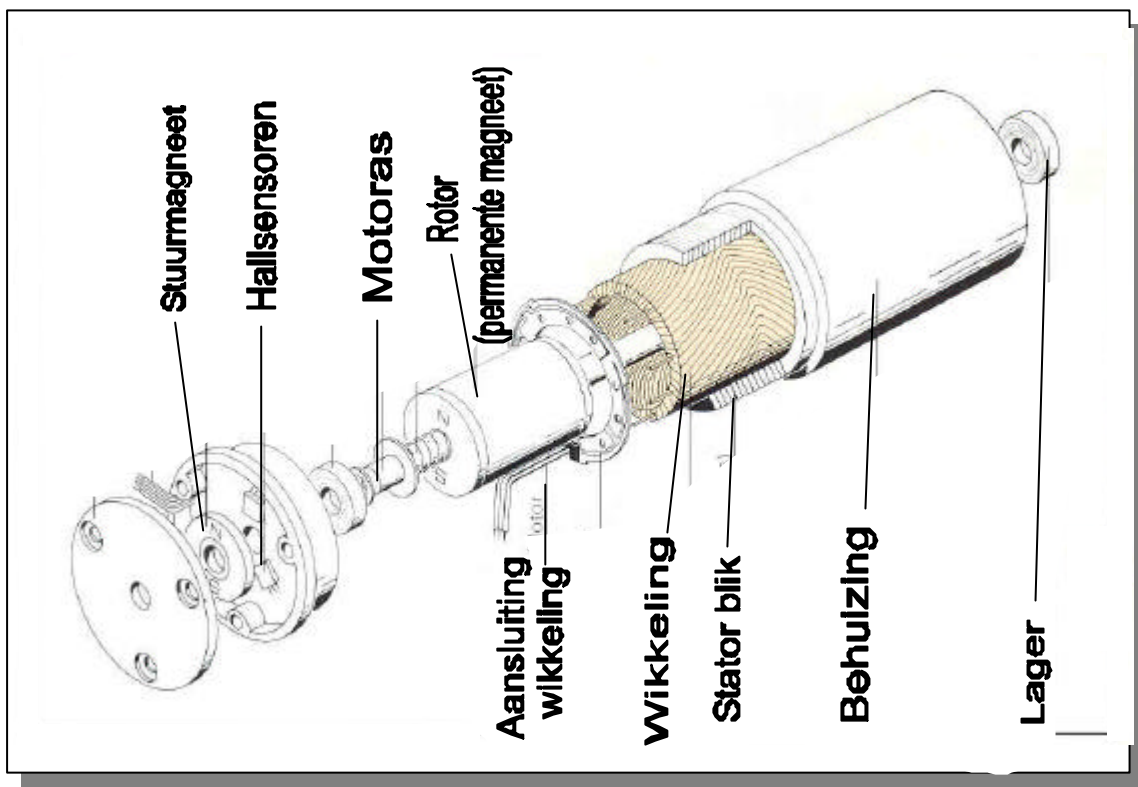
Het huis van de motor met schijfvormige rotor bestaat uit aluminium spuitgietlegering met koelribben.

Als permanent magneetmateriaal werd hier neodymium-ijzer-bor gebruikt. Hierdoor worden ongeveer 10 % hogere spanningen als met Sm-Co₅ bekomen.



figuur 6.6 *Borstelloze schijfrotermotor, 1,5kW, Nd-Fe-B magneten*

In figuur 6.7 is een mini borstelloze motor voorgesteld. Op de motoras is een ronde permanente magneet aangebracht. Met Hallsensoren wordt de rotorpositie gemeten. Verder is in de stator een klokvormige wikkeling geplaatst zonder wikkelspleuven toe te passen, wat een lage elektrische tijdconstante tot gevolg heeft.

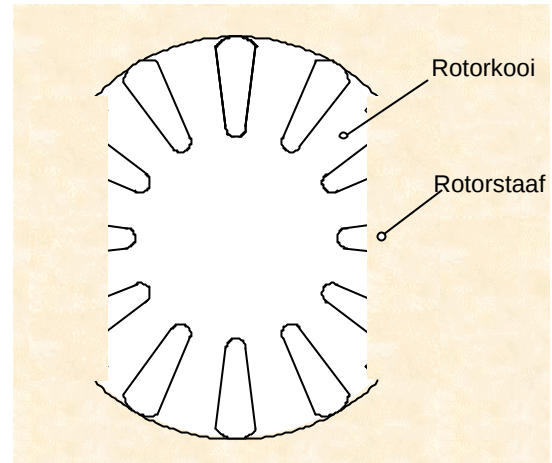


figuur 6.7 *Maxon borstelloze motor met Neodymiummagneet (50mW tot 100W)*

6.3.2.2 Reluctantiemotoren

a) Reluctantiemotor

Bij een reluctantiemotor is de luchtspleetlengte niet constant over de omtrek. Zelfs zonder bekrachtiging levert de machine een koppel, vermits de magnetisch anisotrope rotor (figuur 6.8) zich probeert te oriënteren, zodanig de magnetische energie minimaal wordt. Dit koppel noemt men het reluctantiemotor. Voor het starten bezit deze motor een rotorkooi. Hij komt op toeren zoals een inductiemotor.

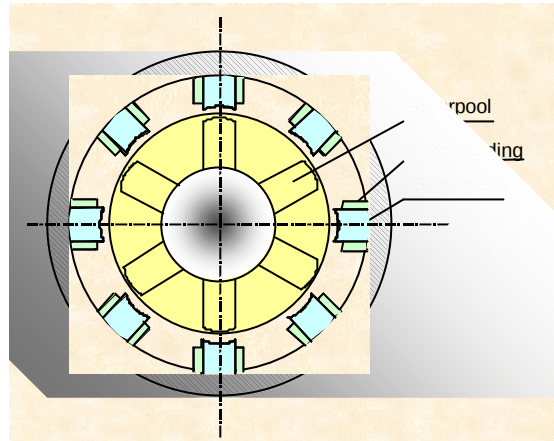


figuur 6.8 *Reluctantiemotor (Electa - ELEN)*

b) Geschakelde reluctantiemotor

De geschakelde reluctantiemotor (SRM, Switched Reluctance Motor) bezit evenmin een rotor-wikkeling. De statorwikkeling bestaat uit geconcentreerde windingen op uitspringende polen. Het aantal polen op stator en rotor is verschillend. Daardoor kan de motor enkel een constant koppel ontwikkelen indien de statorpolen gevoed worden door stromen in synchronisme met de rotatie van de rotor. Een positiegever is noodzakelijk om de rotorpositie door te geven aan de regelenheid. De eenvoudige lay-out van de machine (figuur 6.9) dient vervuld te worden met een controlesysteem en de nodige vermogenelektronische stuurschakelingen.

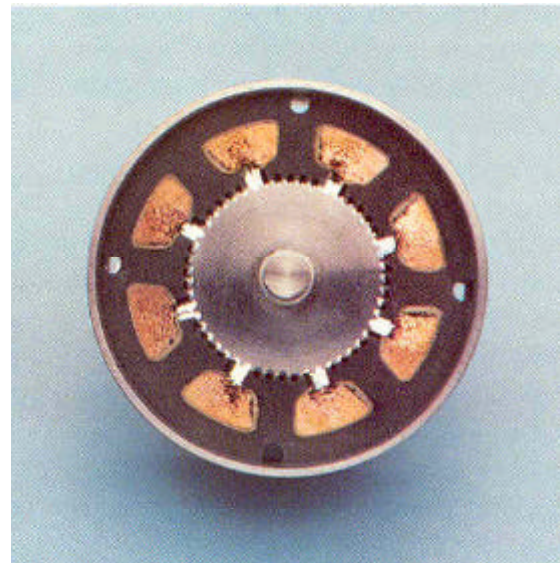
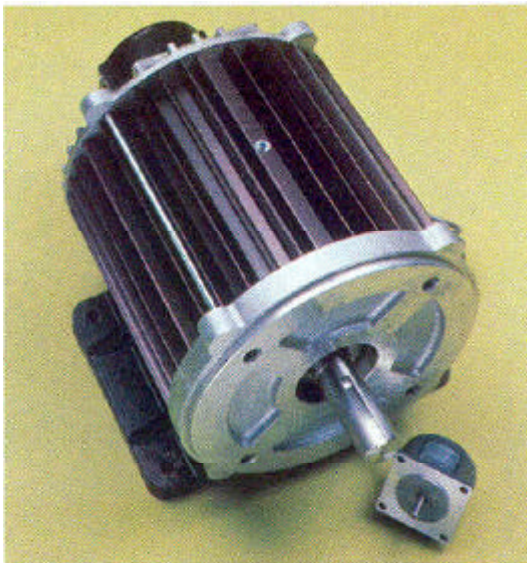
De motor kan op zeer hoge snelheid draaien en de verhouding koppel / traagheidsmoment is relatief groot zodat deze machine geschikt is voor servo-toepassingen. Koppelpulsaties en geluid blijven een nadeel voor deze aandrijving.



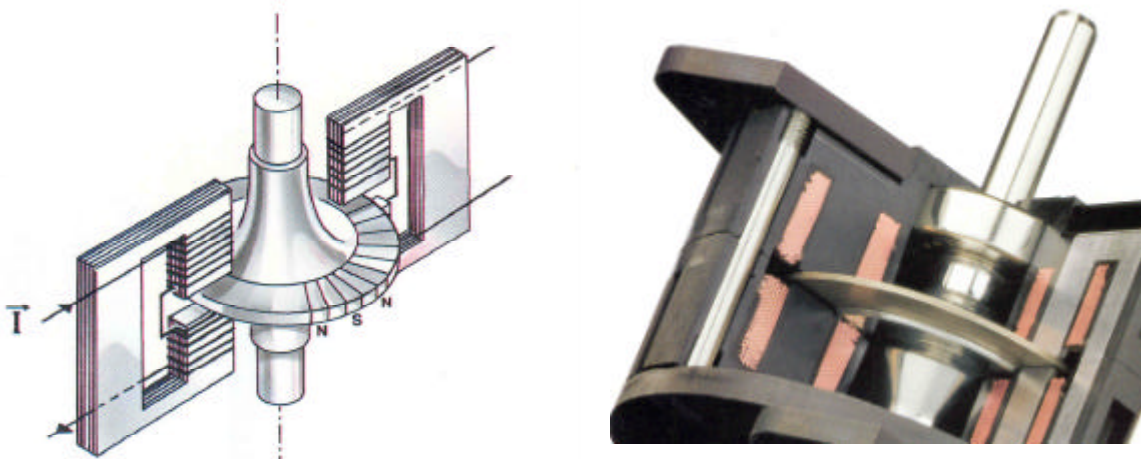
figuur 6.9 *Geschakelde reluctantiemotor*

6.3.2.3 Stappenmotor

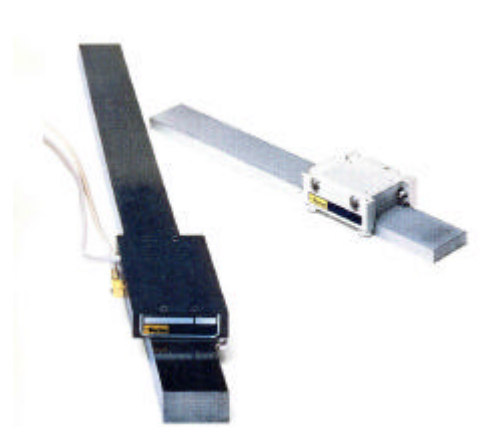
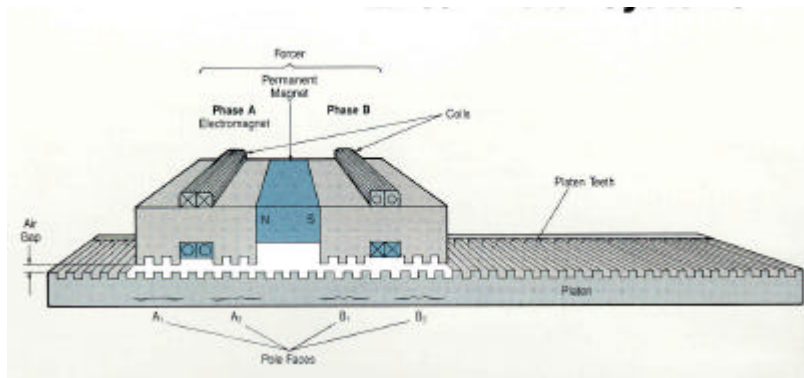
Deze motoren worden speciaal ontworpen om in een aandrijving bepaalde posities in te nemen. Een stappenmotor (figuur 6.8) roteert over een bepaalde hoek als respons op een elektrische puls. In de praktijk worden heel wat variaties aangetroffen, maar allemaal zijn ze gebaseerd op een correcte koppeling tussen rotor en statorsignaal. In dit opzicht kan de stappenmotor ondergebracht worden bij de synchrone machines. In de volgende figuren worden enkele types stappenmotor voorgesteld.



figuur 6.10 *Stappenmotor (BRON Compumotor)*



figuur 6.11 “Disc magnet” stappenmotor (BRON Escap)



figuur 6.12 Lineaire stappenmotor (BRON Digiplan)

