

Grote elektromotoren

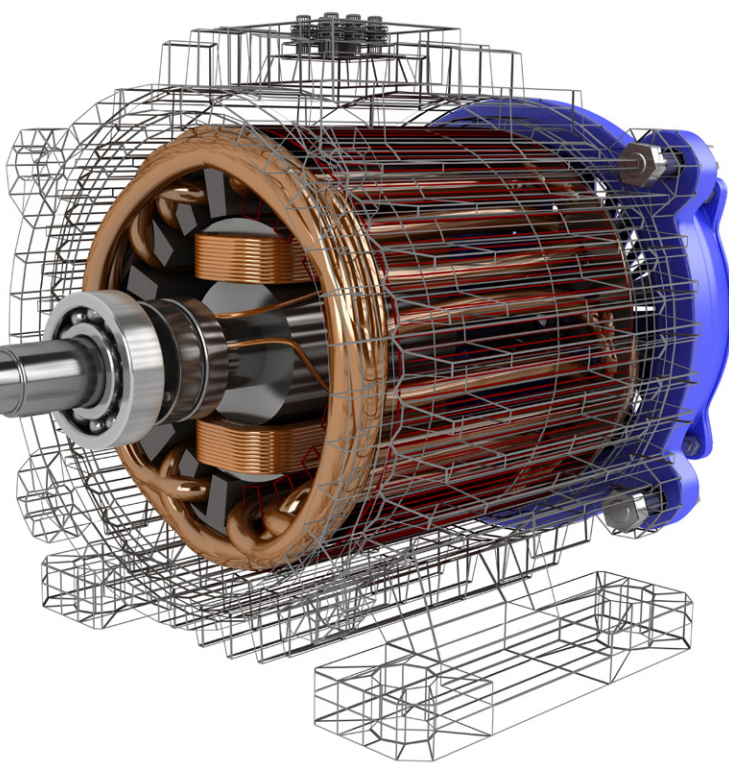
basisprincipes en
nuttige informatie



Dr. Thomas Scherer (Elektor)

Elektromotoren zijn er in soorten en maten en worden al tientallen jaren gebruikt in een breed scala aan toepassingen. Met de voorzienbare vervanging van verbrandingsmotoren door elektrische aandrijfliijnen in voertuigen, zullen elektromotoren binnen afzienbare tijd de belangrijkste manier worden om mechanische beweging te creëren. Dat alleen al maakt het de moeite waard ze nader te bekijken.

Overal waar elektrische energie moet worden omgezet in mechanische energie in welke vorm dan ook, worden elektromotoren ingezet. Ze hebben veel voordelen ten opzichte van verbrandingsmotoren en andere niet-elektrische methoden voor het produceren van mechanische energie, zoals watermolens en windmolens. De belangrijkste hiervan zijn kleine afmetingen, een gering gewicht, een lange levensduur en een hoog rendement. Bij grotere machines kan het rendement veel meer dan 90% bedragen. De kleinste voorbeelden zijn te vinden in luxe niet-mechanische horloges. Voor vermogens tot 100 W komen we vooral conventionele 'universele' motoren tegen; ook speciale varianten zoals stappenmotoren, servo's, spleetpoolmotoren, kleine synchroon- en inductiemotoren en de steeds populairder wordende borstelloze DC-motoren (BLDC-motoren) komen veel voor. Elders in dit nummer van Elektor [1] beschrijft Mathias Claußen hoe kleinere motoren worden aangestuurd; en drie jaar geleden heb ik een artikel [2] geschreven over de aansturing van motoren in het algemeen. Hieronder concentreren we ons vooral op de principes achter de grotere motoren die steeds vaker niet alleen in apparaten zoals stofzuigers en wasmachines, maar ook in elektrische voertuigen en vooral in de industrie (bijvoorbeeld in gereedschapsmachines) worden aangetroffen.



Soorten motoren, en een paar vuistregels

Zoals we al zeiden, gaan we in dit artikel niet in op de bekendste en veelgebruikte laagvermogen-motoren (dat zijn spleetpool-, condensator-, stappen- en servomotoren). Ook besteden we geen aandacht aan lineaire motoren, hoewel die vaak worden toegepast in harde schijven voor het positioneren van de kop, en bij een wat hoger vermogen in andere soorten actuatoren. Krachtige lineaire motoren (in het megawatt-bereik) blijven eveneens buiten beschouwing: hun militaire toepassingen (bijvoorbeeld in railguns om projectielen te versnellen) vereisen zeer specifieke aansturingstechnieken. We laten dit exotische onderwerp voor wat het is. In plaats daarvan zullen we ons beperken tot de vier typen motoren die in **tabel 1** worden genoemd. In de praktijk dekken deze meer dan 90% van de toepassingen bij vermogens vanaf minder dan 1 kW tot tientallen of honderden MW. In principe kan elk motortype net zo goed in klein formaat als in groot formaat worden gemaakt, maar vanwege hun verschillende elektrische en mechanische eigenschappen is niet elk motortype geschikt voor elk toepassingsgebied; de verschillen in dit opzicht kunnen aanzienlijk zijn. Het is interessant om te zien welke mythes over elektromotoren nog steeds de ronde doen onder ingenieurs die op dit terrein niet



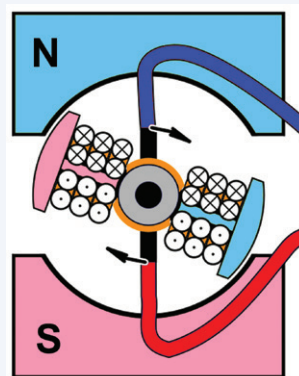
Tabel 1. Typen grotere elektromotoren.

Type	Kenmerken
Universele motor	Een mechanische commutator creëert een wisselveld; veel varianten, serie- en shuntgewikkeld; hoog startkoppel.
Driefase-inductiemotor	Passieve rotor (geen sleepingen); rotor loopt achter op statorveld; bescherming tegen hoge inschakelstroom (ster/driehoek-schakeling of aandrijving met variabele frequentie) vereist.
Driefase-synchroommotor	Permanent of elektrisch bekrachtigingsveld vereist; rotor beweegt synchroon met draaiveld; kan variabele frequentieaandrijving gebruiken; kan als generator worden gebruikt; kan worden geconfigureerd met interne of externe polen.
BLDC-motor	Variant van synchroommotor met elektronische commutatie; geschikt voor aandrijflijnen; zeer betrouwbaar; met permanente magneten; vaak toegepast in applicaties met een laag tot gemiddeld vermogen.

gespecialiseerd zijn. Neem bijvoorbeeld de overdreven geïdealiseerde stelling dat elektromotoren bij het opstarten (dat wil zeggen bij een toerental van 0 rpm) in theorie een 'oneindig' koppel zouden hebben. Deze redenering gaat mis bij het 'in theorie': bij afwezigheid van extreme stromen, extreme magnetische velden, verwaarloosbare wikkelingsweerstand, hyperstabele metalen en ideale aansturingselektronica is zoiets onmogelijk. In de werkelijke wereld hebben al deze parameters hun praktische beperkingen; het enige wat van de mythe overblijft is de vuistregel dat (de meeste typen) elektromotoren inderdaad een hoog startkoppel kunnen bieden als de sturelektronica en voeding navenant zijn ontworpen. Bij elektrische voertuigen heeft deze eigenschap ten opzichte van verbrandingsmotoren het voordeel dat een versnellingsbak met verschillende overbrengingsverhoudingen (handgeschakeld of automatisch) doorgaans achterwege kan blijven. Dat verbetert de betrouwbaarheid en eenvoud van de aandrijflijn en vermindert het gewicht: dit laatste aspect is belangrijk, ook al worden de besparingen weer ruimschoots tenietgedaan door het gewicht van een groot accupakket.

Een andere vuistregel komt van pas voor iedereen die niet bekend is met het onderwerp: in een elektromotor is het verband tussen koppel en bedrijfsstroom bij een gegeven belasting uiterst lineair, omdat de stroom die loopt evenredig is met het magnetische veld dat wordt gegenereerd in de windingen; en dit is evenredig met de resulterende magnetische aantrekkings- of afstotingskracht, die op zijn beurt evenredig is met het koppel.

En dan nog zoiets (in dit geval meer vuist dan regel): de maximaal mogelijke onbelaste rotatiesnelheid is (afgezien van mechanische overwegingen) afhankelijk van de voedingsspanning. Waarom? Wanneer een elektromotor draait, ontstaat er een zogenaamde 'tegen-EMK' die, afgezien van constructieve aspecten, in grote lijnen evenredig is met de rotatiesnelheid. De term 'EMK' (elektromotorische kracht) werd historisch gebruikt om een door een motor opgewekte spanning te beschrijven; met 'tegen-EMK' bedoelen we een spanning die wordt geïnduceerd door de rotatie van een motor en die de neiging heeft om de voedingsspanning tegen te werken. Als we zelfinducties en verliezen verwaarlozen, is de resulterende effectieve spanning over de motorwikkelingen het verschil tussen de aangelegde spanning en de tegen-EMK. De resulterende stroom hangt bijna uitsluitend af van dit verschil en van de ohmse

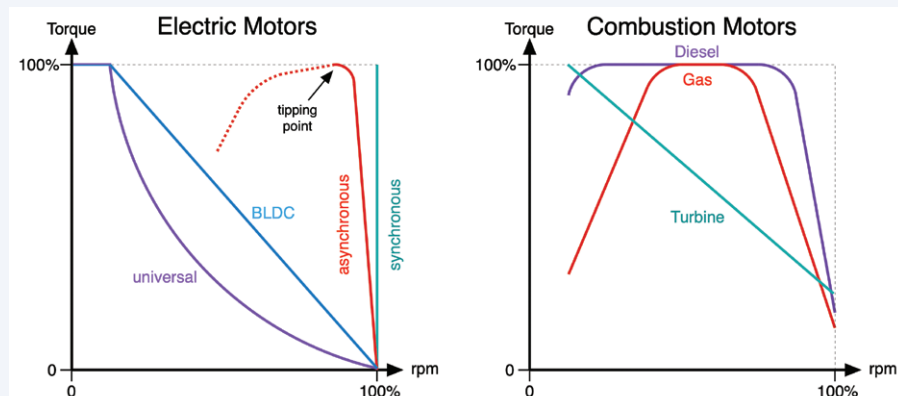


Figuur 1. Werkingsprincipe en constructie van een eenvoudige permanent bekrachtigde elektromotor. Bovenaan de stator bevindt zich de noordpool en onderaan de zuidpool. De rotor is een elektromagneet die wordt aangestuurd via een commutator die uit een sleepkring en koolborstels bestaat (tekening: Michael Frey, CC 3.0 [3]).

weerstand van de wikkelingen. Als dit verschil 0 V bedraagt, is het maximaal mogelijke toerental bereikt: de kleine reststroom die dan loopt, is net genoeg om wrijvingsverliezen te compenseren.

Werkingsprincipes

Het historisch eerste (en meteen eenvoudigste) type motor is de permanentmagneet-motor van **figuur 1**. De rotor bestaat uit een elektromagneet die op een lager is gemonteerd zodat die kan draaien. De zwarte stip in het midden stelt de rotatie-as voor en de grijze ring het lager. De aangelegde gelijkspanning wordt door een commutator geleid die bestaat uit een sleepkring met koperen contacten en koolborstels. De polariteit van de op de elektromagneet aangelegde spanning, en dus van het magnetische veld, hangt zodoende af van de positie van de rotor. Als de polariteit van de aangelegde spanning wordt omgekeerd, zal ook de draairichting omkeren. Het is ook duidelijk dat dit type motor als generator kan werken als de rotor mechanisch wordt aangedreven: in dat geval verschijnt er een gepulsd gelijkstroomsignaal op de aansluitingen. Als de commutator wordt weggelaten, verandert de machine in een AC-generator; en door een wisselspanning aan te leggen krijgen we een enkelfasige synchroommotor – die vanwege aanloopproblemen echter niet werkelijk praktisch is.



Figuur 2. Geïdealiseerd verloop van het koppel als functie van toerental voor verschillende typen elektromotoren, vergeleken met drie typen verbrandingsmotoren (afbeelding: dr. Thomas Scherer).

Uit dit eenvoudige motorontwerp kunnen we praktisch alle andere motortypen afleiden. Als de permanente magneet van de stator wordt vervangen door een wikkeling (waardoor een elektromagneet ontstaat), staat het resulterende ontwerp bekend als ‘universele’ motor. Als de motor is uitgerust met meerdere fasen, kunnen we inductie-, synchrone en BLDC-motoren bouwen die gebruikmaken van een elektrisch gegenereerd draaiveld. De enkelvoudige motor heeft slechte vrijloopeigenschappen wanneer er geen spanning is aangelegd, aangezien de veldlijnen van de permanente magneten altijd een remwerking veroorzaken. Afzonderlijk bekrachtigde motoren vertonen dit probleem in mindere mate.

De belangrijkste eigenschappen van deze motortypen zijn (in geïdealiseerde vorm) weergegeven in **figuur 2**, inclusief een vergelijking met moderne verbrandingsmotoren. Het contrasterende gedrag van het koppel als functie van de rotatiesnelheid is bijzonder opmerkelijk. Deze vergelijking is verre van volledig en de betreffende kenmerken hebben een significante invloed op de geschiktheid van verschillende typen motoren in verschillende toepassingsscenario's.

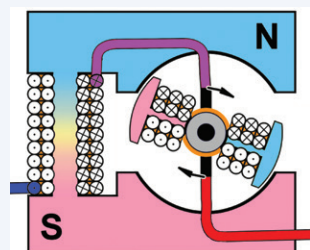
De universele motor

Figuur 3 toont de universele motor, meer dan 117 jaar geleden uitgevonden, die van alle motoren nog het dichtst bij de eenvoudige motor van figuur 1 staat. Hier is gewoon de permanente magneet vervangen door een extra wikkeling die als elektromagneet fungeert. De voordelen van de universele motor komen het beste tot uiting in ontwerpen voor grote vermogens, waar de permanente magneten die in het eenvoudiger type nodig zouden zijn,

niet alleen kostbaar maar ook erg groot en zwaar worden. Bij de klassieke universele motor is de veldwikkeling in de stator in serie geschakeld met de rotorwikkeling, waardoor een zogenaamde seriegewikkelde motor ontstaat. Het belangrijkste voordeel van de seriegewikkelde universele motor ten opzichte van de minder gebruikte shuntgewonden motor (niet afgebeeld), waarbij de statorwikkeling parallel aan de rotorwikkeling is geschakeld, is dat deze een zeer hoog startkoppel heeft.

Beide varianten kunnen zowel met gelijkstroom als met wisselstroom worden gevoed. Ontwerpen die zijn geoptimaliseerd voor AC-bedrijf bij hoge rotatiesnelheden gebruiken voor stator en rotor een kern die bestaat uit gestapelde metalen platen die van elkaar zijn geïsoleerd om verliezen ten gevolge van wervelstromen en hysteresis te verminderen. Ompolen van de aangelegde spanning tijdens bedrijf heeft bij beide varianten geen invloed op de draairichting. Om dit te bereiken, moet de polariteit van ofwel de statorwikkeling of de rotorwikkeling worden omgekeerd (niet van beide tegelijk).

Grotere universele motoren (in de orde van grootte van kW) hebben een hoge aanloopstroom, en om de motor zelf te beschermen (en om het doorslaan van de zekeringen te voorkomen!) wordt daarom een aanloopcontroller gebruikt. In het eenvoudigste geval voedt deze in eerste instantie de motor via een serieweerstand om de inschakelstroom te verminderen. Na korte tijd, of bij het bereiken van een bepaald toerental, wordt de voeding direct naar de motoraansluitingen doorgeschakeld. Niet alleen moet de waarde van de serieweerstand worden gekozen in overeenstemming met de specifieke bedrijfsomstandigheden, maar ook de belastbaarheid ervan moet voldoende zijn om de integraal van de stroomcurve tijdens de opstartperiode aan te kunnen. De benodigde opstartweerstand kan fysiek behoorlijk groot worden en er kunnen speciale constructies of zelfs apparaten zoals vloeistofreostaten worden gebruikt. Voor zeer grote universele motoren is een enkele weerstand niet voldoende: in plaats daarvan worden meerdere weerstanden in serie gebruikt. Als het toerental een reeks drempels bereikt, worden deze weerstanden één voor één overbrugd. De eenvoudigste vorm van een aanloopcontroller is de vertragingsschakeling van **figuur 4**. Intelligentere benaderingen meten de rotatiesnelheid, waarbij de beveiligingsweerstand indien nodig worden overbrugd, eventueel in combinatie met het



Figuur 3. Werkingsprincipe en constructie van een universele motor, waarbij de permanente magneet van de eenvoudige motor is vervangen door een elektromagneet (aanpassingen van figuur 1: dr. Thomas Scherer).

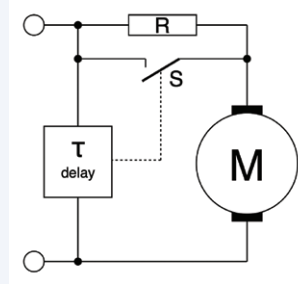
langzaam verhogen van de voedingsspanning met behulp van een elektronische controller.

Zoals eerder opgemerkt, kunnen universele motoren worden aangesloten op een AC- of DC-voeding. Het toerental (onder belasting en onbelast) is afhankelijk van de constructie van de motor en de aangelegde spanning. Het uitgangsvermogen onder belasting en het toerental kunnen daarom worden geregeld met behulp van een PWM-aanstuuring. Als zo'n PWM-stuurschakeling al beschikbaar is, kan die eenvoudig worden gebruikt in combinatie met de daarin aanwezige microcontroller om een aanloopbeveiliging te bieden. Dit kan worden gedaan door op te starten met een PWM-sigitaal met een zeer kleine puls/pauze-verhouding, en deze vervolgens geleidelijk te verhogen. Als de motor door een overmatige belasting tot stilstand komt, maar ook bij een eenvoudige overbelasting, kunnen er zeer grote en potentieel destructieve stromen lopen. Het wordt daarom aanbevolen om niet alleen het toerental van de motor te bewaken, maar ook de motorstroom, vooral bij grotere motoren. In eenvoudige gevallen kan dit laatste worden gerealiseerd met een thermische overstroombeveiliging. Als de snelheid onder de minimumdrempel komt of als de stroom een bovengrens overschrijdt, wordt de motor uitgeschakeld, waardoor de motor zelf, de stuurlektronika en alle aangedreven machines worden beschermd. Zo'n beveiliging heeft het voordeel ten opzichte van een simpele zekering dat de stroom naar andere machines die op dezelfde groep zijn aangesloten, niet wordt onderbroken.

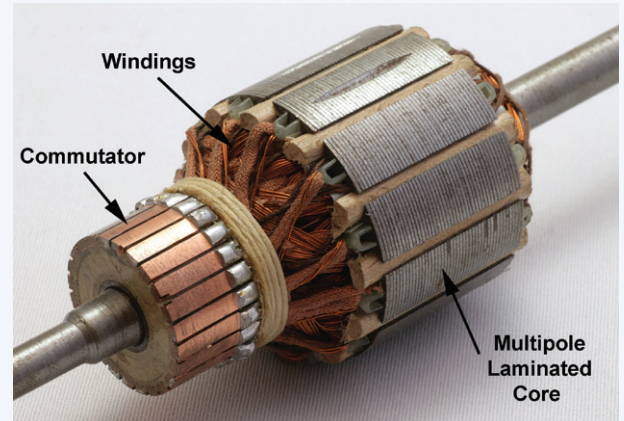
Zoals de naam al aangeeft, worden universele motoren gebruikt in een breed scala aan toepassingen, van huishoudelijke apparaten en gereedschap zoals boormachines van minder dan 100 W tot motoren in elektrische locomotieven en treinstellen met een vermogen in de orde van grootte van MW, met AC- of DC-voeding. De eenvoudige variant van figuur 3 heeft last van een ongelijkmatig koppel als functie van de rotatiepositie. Meer verfijnde ontwerpen zijn daarom natuurlijk de regel. Meerpolige enkelfase-ontwerpen met een verscheidenheid aan verschillende stator- en rotorconstructies komen vaak voor (zie **figuur 5**) met verschillende soorten compensatiewikkelingen die niet alleen het koppelgedrag beïnvloeden, maar ook de mate waarin de borstels vonken veroorzaken. Dit heeft op zijn beurt ook invloed op de betrouwbaarheid van de commutator en andere eigenschappen. Kijkend naar de relatie tussen koppel en rotatiesnelheid in figuur 2, zien we dat bij een gegeven spanning de snelheid varieert met de belasting. Om de snelheid te stabiliseren is een actieve regeling nodig in combinatie met een snelheidssensor.

De inductiemotor

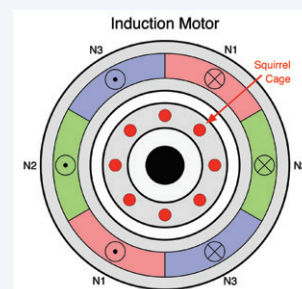
De inductiemotor, waarvan de basisconstructie in **figuur 6** is getekend, heeft enkele doorslaggevende voordelen ten opzichte van de universele motor. De belangrijkste is wel de volledige afwezigheid van een commutator: afgezien van de lagers is het ontwerp slijtagevrij en dus uiterst betrouwbaar. Grotere inductiemotoren zijn bijna altijd driefase-ontwerpen; meerpolige uitvoeringen van dit type leveren een constant koppel bij elke omwenteling. Het populaire ontwerp met interne rotor, zoals afgebeeld, maakt gebruik van het roterende magnetische veld van de stator: onder belasting draait de rotor iets langzamer dan het statorveld en dit induceert een stroom in zijn wikkelingen, en dus ook een magnetisch veld. De corresponderende tegen-EMK induceert op zijn beurt een verhoogde stroom in de rotorwikkeling: vandaar de benaming



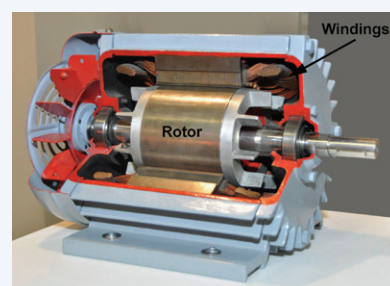
Figuur 4. Eenvoudige aanloopbeveiliging met een serieweerstand om de inschakelstroom te beperken.



Figuur 5. Rotor van een typische universele enkelfase-motor. Het aantal contacten op de commutator komt overeen met het aantal wikkelingen en polen (foto: Sebastian Stabinger, CC 3.0 [4]).



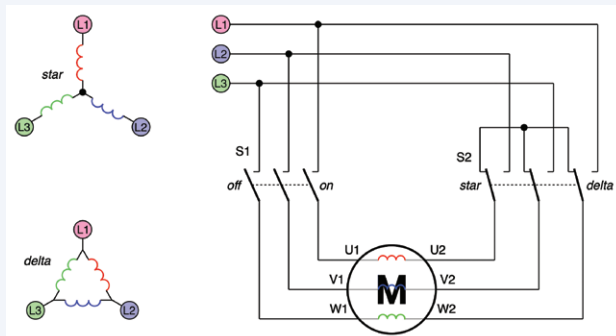
Figuur 6. Constructie van een driefase-inductiemotor (met interne rotor). De rotor bestaat uit een 'hamsterkooi' met kortgesloten wikkelingen (afbeelding: dr. Thomas Scherer).



Figuur 7. Opengewerkte inductiemotor voor vermogens van een paar kW. De statorwikkelingen en de kortgesloten rotor zijn goed te zien (foto: SJ de Waard, CC 3.0 [5]).

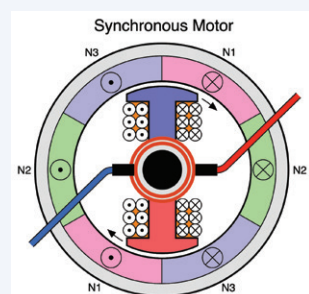


Figuur 8. Een kleine frequentieregelaar voor inductiemotoren met een nominaal vermogen van een paar kW. Met deze elektronische schakeling kan het toerental worden ingesteld. Er zijn ook grotere versies beschikbaar, die meer geavanceerde functies bieden (foto: C.J. Cowie, CC 3.0 [6]).



Figuur 9. Ster/driehoek-beveiliging. Deze biedt een eenvoudige manier om grote aanloopstromen bij het opstarten van de motor te voorkomen.

‘inductiemotor’. **Figuur 7** toont een opengewerkte tekening van een inductiemotor met een nominaal vermogen van enkele kW. Het aantal polen in het ontwerp bepaalt het nominale toerental van de motor: een verdubbeling van het aantal polen halveert het motortoerental bij een gegeven frequentie van de driefasevoeding. Zoals te zien is in de grafiek van figuur 2 vertoont het koppel van



Figuur 10. Constructie van een eenvoudige driefase-synchrone motor. De rotor kan ook worden uitgerust met permanente magneten om een commutator overbodig te maken (afbeelding: dr. Thomas Scherer).

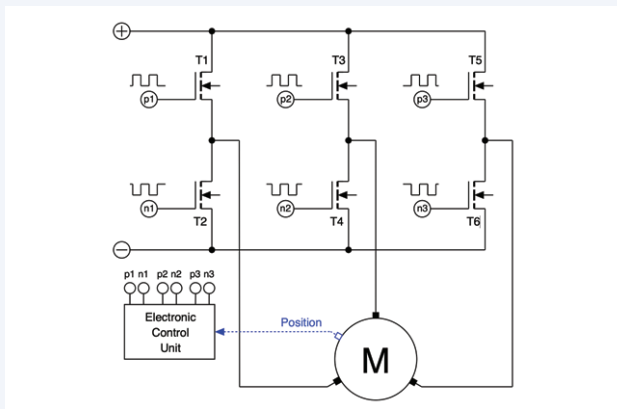
de inductiemotor een zeer steil verloop en draait de rotor altijd net onder de rotatiesnelheid van het aangelegde veld. Dit staat bekend als ‘slippen’; de hoeveelheid slip is afhankelijk van de belasting maar hangt niettemin nauw samen met de rotatiesnelheid van het veld (en dus de frequentie van de AC-voeding). Naarmate de belasting van de motor toeneemt, wordt uiteindelijk een drempel bereikt waarna het koppel sterk daalt. De motor staat dan stil en de stroom neemt snel toe. Het bruikbare toerentalbereik kan over een aanzienlijk bereik worden aangepast (hoger of lager) door aansturing met variabele frequentie (zie **figuur 8**). Dergelijke aansturingen zijn vooral populair voor industriële machines.

Grotere inductiemotoren trekken een grote aanloopstroom die tot tienmaal groter kan zijn dan de nominale stroom tijdens bedrijf. Er zijn verschillende manieren om die aanloopstroom te reduceren. In eenvoudiger gevallen, tot 11 kW, wordt een ster-driehoekschakelaar (**figuur 9**) gebruikt: de stroom, en dus het opgenomen vermogen, bedraagt bij de sterconfiguratie een derde van die in de driehoekconfiguratie. De ster-naar driehoek omschakeling vindt meestal plaats zodra de motor ten minste 75% van zijn nominale toerental heeft bereikt. Er moet op worden gelet dat de belasting tijdens de aanlooperperiode niet te groot is, zodat de motor niet kan stilvallen. Bij gebruik van een frequentieregelaar is deze voorzorgsmaatregel niet nodig omdat de aansturingsfrequentie en dus de snelheid bij het opstarten geleidelijk kan worden verhoogd.

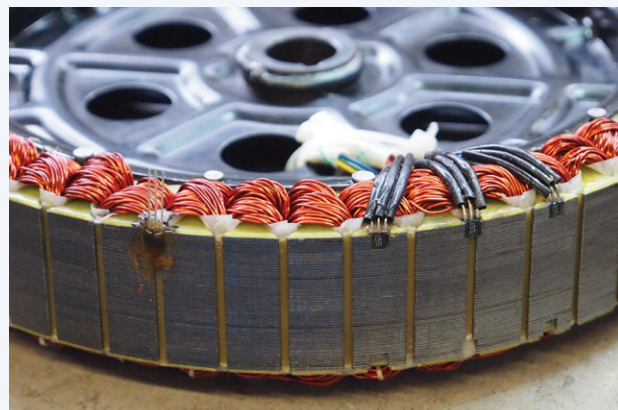
Vanwege hun extreme robuustheid en hoge rendement komen we dit type motor in allerlei soorten industriële productiemachines en in aandrijflijnen voor elektrische voertuigen. Tesla gebruikt in zijn huidige modellen compacte high-speed inductiemotoren met een vertraging, waardoor het vereiste zeer brede toerentalbereik wordt bereikt met behulp van een slim motorbesturingssysteem dat stroom- en snelheidsbewaking combineert. Het gebruik van een elektronische besturing vormt meestal een oplossing voor het belangrijkste nadeel van deze motor, namelijk dat de snelheid nauw gekoppeld is aan de frequentie van de AC-voeding. Als de rotor sneller draait dan het roterende statorveld, dan functioneert de inductiemotor als generator: dit kan energierugwinning mogelijk maken, wat zowel in voertuigen als in vaste machines belangrijk is.

Synchrone- en BLDC-motoren

In wezen is een synchrone motor een universele motor met een driefase-voeding. In een populair ontwerp wordt de rotorwikkeling gevoed via afzonderlijke slepringen: in tegenstelling tot de universele motor is een commutator niet nodig; de ringen zijn ononderbroken waardoor de wrijving wordt verminderd. **Figuur 10** toont een ontwerp; het is ook mogelijk om permanente magneten op de rotor te monteren, waardoor slepringen helemaal niet meer nodig zijn. Voor grotere vaste motoren is het afzonderlijk bekrachtigde ontwerp van figuur 10 zuiniger en betrouwbaarder vanuit thermisch oogpunt: permanente magneten kunnen gemakkelijk worden beschadigd, zelfs bij korte blootstelling aan hoge temperaturen. Er zijn ook uitvoeringen met een buitenrotor, waarbij het binnendeel vast zit en de buitenrotor is voorzien van permanente magneten, waardoor slepringen niet nodig zijn. Deze uitvoeringen hebben een lange levensduur en zijn onderhoudsvrij. Zoals blijkt uit de grafiek van het koppel als functie van de rotatiesnelheid, blijft de snelheid constant en is deze star gekoppeld aan de snelheid van



Figuur 11. Principe van elektronische commutatie bij een BLDC-motor. Elke halve brug-driver ontvangt complementaire stuursignalen met een geschikt faseverschil.



Figuur 12. Stator van een 2-kW BLDC-naafmotor met externe rotor. De vierpolige wikkelingen en lamellen zijn duidelijk te zien, evenals de locatie van de Hall-effectsensoren die worden gebruikt om de hoekpositie van de rotor te detecteren (foto: dr. Thomas Scherer)

het roterende veld. De rotor slipt niet onder belasting; in plaats daarvan blijft hij achter met een fasehoek ten opzichte van het roterende veld, in een mate die afhankelijk is van de belasting. Net als de andere typen kan deze motor als generator worden gebruikt. Synchronmotoren hebben meerdere polen om een stabiel koppel te produceren gedurende elke omwenteling; ook hier is het aantal polen omgekeerd evenredig met de rotatiesnelheid.

Het grote voordeel van de synchronmotor blijkt uit de naam: het is mogelijk om een zeer nauwkeurig, constant en belastingonafhankelijk toerental te bereiken zonder regelaar. Omdat, in tegenstelling tot bij een universele motor, de sleepringen ononderbroken zijn en de bekrachtigingsenergie relatief gering is, slijten de koolborstels zeer weinig. Als permanente magneten in de rotor worden gebruikt, is het mogelijk om uiterst robuuste motoren met een kleine vormfactor te bouwen. Een nadeel is dat het relatief moeilijk kan zijn om de motor te starten: daarom hebben grotere synchronmotoren soms een extra (kortgesloten) rotorwikkeling, zodat de motor op toeren kan worden gebracht alsof het een inductiemotor is. Bij het opstarten kunnen (en moeten in sommige gevallen) dezelfde beveiligingstechnieken worden gebruikt als bij de inductiemotor, inclusief de beveiligingsfuncties die worden geboden door moderne frequentieregelaars.

Het draaiveld in de statorwikkelingen van een synchronmotor kan worden opgewekt door de wikkelingen aan te sturen met behulp van drie halve brug-drivers vanuit een DC-voeding, in plaats van via een driefase-wisselstroomvoeding (zie **figuur 11**). De halve brug-drivers worden elektronisch aangestuurd om de driefasige golfvorm te creëren, net als bij een frequentieregelaar. Het resultaat wordt een borstelloze DC-motor of BLDC-motor genoemd. In dit geval hebben we een sensor nodig om de hoekpositie van de rotor te detecteren; we gebruiken deze informatie om de halve brug-stuurschakeling te klokken. Dit vormt een quasi-synchrone motor die autonoom zijn eigen draaiveld creëert en waarvan het toerental afhankelijk is van de voedingsspanning en van de belasting. In tegenstelling tot de universele motor is de constructie eenvoudig en bij gebruik

van permanente magneten is de motor praktisch onderhoudsvrij. De koppel/snelheids-karakteristiek is ook superieur. Als een PWM-controller wordt toegevoegd, kan de onbelaste rotatiesnelheid worden aangepast door de puls/pauze-verhouding van de stuursignalen te wijzigen. Als het PWM-signaal wordt geregeld met de voedingsstroom als referentiesignaal, zal de stroom zeer lineair correleren met het koppel bij een bepaalde belasting en snelheid. Beide typen motoren worden binnen een groot vermogensbereik toegepast in vaste machines. BLDC-motoren zijn over het algemeen beter geschikt voor aandrijflijnen van voertuigen vanwege de mogelijkheid om commutatorvrije oplossingen te bouwen en omdat geavanceerde besturingen beschikbaar zijn. Een bijzondere variant is de 'naafmotor' (**figuur 12**) die veel wordt toegepast bij elektrische fietsen en andere toepassingen met gering tot middelgroot vermogen. Deze motoren hebben een externe rotor, meestal uitgerust met permanente magneten. Het grote aantal polen resulteert in een laag toerental en hoog koppel. Het koppel is constant als functie van de rotatiepositie en de betrouwbaarheid is uitstekend. Voor toepassingen met een groter vermogen zijn de benodigde permanente magneten echter zowel duur als zwaar. Een naafmotor vertegenwoordigt een aanzienlijke niet-geveerde massa, wat ten koste gaat van het rijcomfort. Het is om deze reden dat elektrische voertuigen meestal gebruik maken van snelle en compacte inductiemotoren die de wielen via flexibele koppelingen aandrijven.

En dan nog zoiets...

Hoewel elektromotoren op grote schaal worden gebruikt en waarschijnlijk alle andere motortechnologieën zullen vervangen, zijn er nog een paar dingen waar u op moet letten bij het gebruik ervan. Moderne elektromotoren zijn zeer verfijnd en er lijkt geen ruimte te zijn voor verdere significante innovaties. Optimalisatie is en blijft echter mogelijk: niet alleen ten gevolge van verbeteringen aan bestaande materialen en van constructie- en fabricagetechnologie, maar vooral ook van intelligente elektronische besturingen.



Tabel 2: Top-20 fabrikanten van elektromotoren (stand 2019) [8].

Rangnummer	Fabrikant	Land
1	Siemens	Duitsland
2	Toshiba	Verenigde Staten
3	ABB	Zwitserland
4	Nidec Motor	Japan
5	Rockwell Automation	Verenigde Staten
6	Ametek	Verenigde Staten
7	Regal Beloit	Verenigde Staten
8	Johnson Electric	Hong Kong
9	Franklin Electric	India
10	Allied Motion	Verenigde Staten
11	Faulhaber	Duitsland
12	General Electric	Verenigde Staten
13	Danaher Motion	Verenigde Staten
14	WEG	Brazilië
15	maxon motor	Zwitserland
16	TECO Westinghouse	Taiwan
17	Hitachi	Japan
18	Lincoln Electric	Verenigde Staten
19	Piela Electric	Verenigde Staten
20	Dumore Corporation	Verenigde Staten

Vermogenshalfgeleiders worden voortdurend beter, sneller en efficiënter, en rekenkracht wordt steeds goedkoper. Dat betekent dat complexe algoritmen kunnen worden geïmplementeerd, waardoor de efficiëntie van de overall-combinatie van elektromechanische motor en elektronische besturing wordt verbeterd.

Uiteindelijk is de keuze van een elektromotor voor een bepaalde toepassing altijd een zoektocht naar een optimale balans tussen een groot aantal factoren. Het maken van die keuze vereist veel knowhow; klanten verwachten hoogwaardige ondersteuning en specialistisch advies van de fabrikanten van elektromotoren. En dat

zijn er honderden; het is moeilijk om een duidelijk overzicht van de markt te krijgen. De totale omzet van alle elektromotorfabrikanten in 2020 bedroeg zo'n 150 miljard dollar [7] en analisten verwachten dat de markt de komende jaren met 6% per jaar zal groeien.

Tabel 2 geeft een overzicht van de twintig grootste fabrikanten: in de VS gevestigde bedrijven domineren, maar de marktleider is een Duits bedrijf. En als u op zoek bent naar iets ongebruikelijks, dan hebt u meer nodig dan alleen enige basiskennis: u zult zich werkelijk in de materie moeten verdiepen! 

210555-03

Een bijdrage van

Tekst: dr. Thomas Scherer

Redactie: Jens Nickel

Vertaling: Hans Adams

Layout: Giel Dols

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com



GERELATEERDE PRODUCTEN

- **SmartPi 2 – Smart Meter for Raspberry Pi (including three current probes) (SKU 18165)**
www.elektor.nl/18165
- **Current Probe for SmartPi 2 (SKU 18167)**
www.elektor.nl/18167
- **PeakTech 4350 Clamp Meter (SKU 18161)**
www.elektor.nl/18161

WEBLINKS

- [1] M. Claußen, "Motoren aansturen met H-bruggen", Elektor januari/februari 2022: <https://www.elektormagazine.nl/210491-03>
- [2] T. Scherer, "Elektromotoren aansturen", Elektor januari/februari 2019: <https://www.elektormagazine.nl/180558-03>
- [3] Eenvoudige elektromotor: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Animation_einer_Gleichstrommaschine.gif
- [4] Rotor van een universele motor: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kommutator_universalmotor_stab.jpg
- [5] Opengewerkte inductiemotor: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotterdam_Ahoy_Europort_2011_\(14\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotterdam_Ahoy_Europort_2011_(14).JPG)
- [6] Variabele frequentieregelaar: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Small_variable-frequency_drive.jpg
- [7] De markt voor elektromotoren: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-motor-market>
- [8] Fabrikanten van elektromotoren: <https://blog.technavio.com/blog/top-20-electric-motor-companies>