

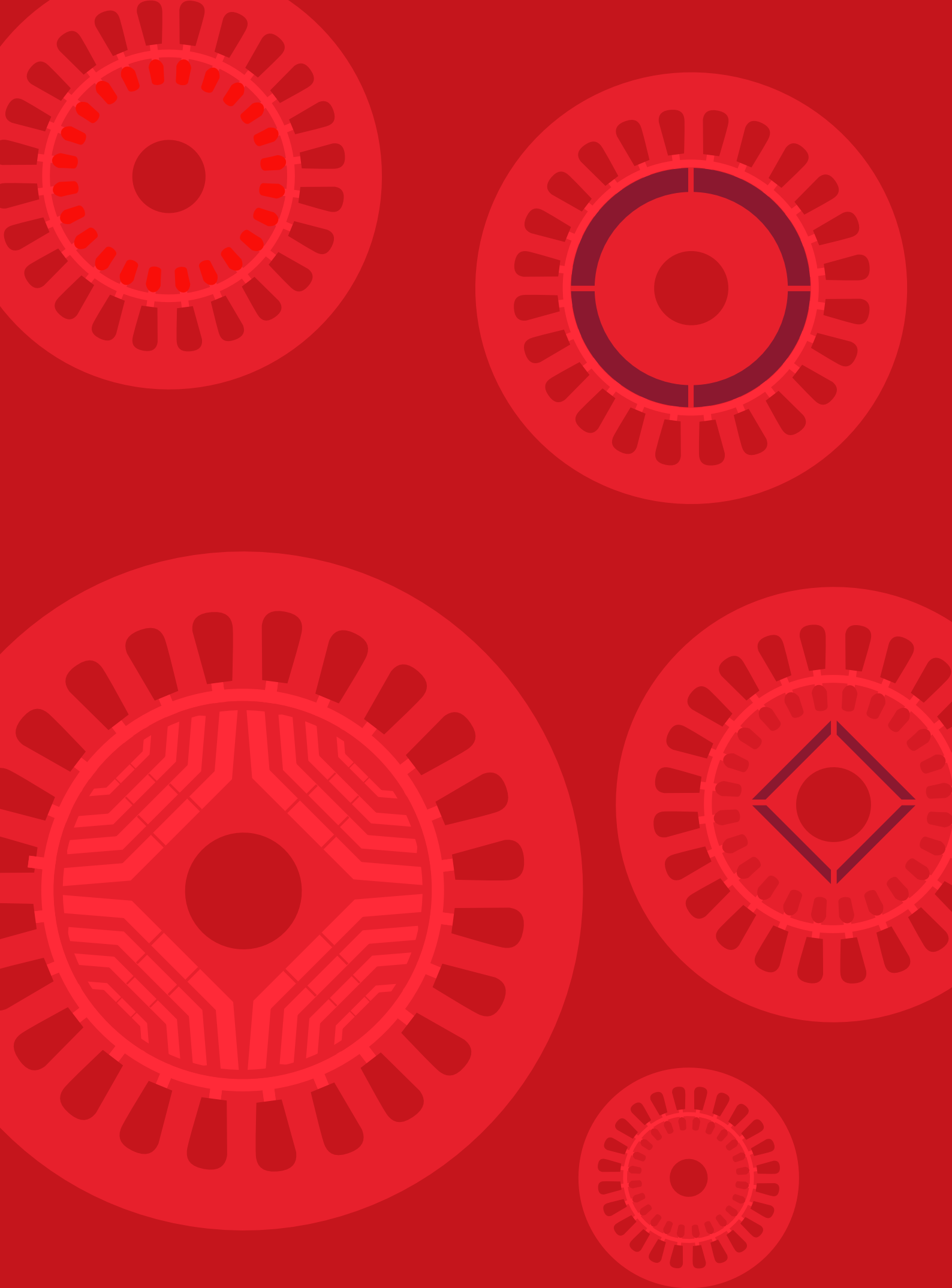
# Motortechnologieën voor **hogere energie-efficiëntie** in toepassingen

Een overzicht van trends en toepassingen.



**Keuze  
vrijheid**

- aansturen van  
breed scala motor  
types



# Eén VLT<sup>®</sup> voor alle toepassingen

Meerdere nieuwe technologieën voor de opbouw van driefasedraaistroommotoren claimen de hoogste energie-efficiëntie in commerciële en industriële toepassingen. Deze brochure geeft een overzicht van de technologieën en hun toepassingen, plus de voor- en nadelen van de afzonderlijke oplossingen.

## Aangepaste algoritmes maximaliseren het systeemrendement

Motorfabrikanten passen verschillende concepten toe om hoge energie-efficiëntie te behalen in elektromotoren voor industriële en commerciële toepassingen. Hoewel de verschillende motortechnologieën in dezelfde rendementsklasse een vergelijkbare energie-efficiëntie behalen in het nominale werkpunt, verschillen ze op meerdere punten, zoals het startgedrag en de eigenschappen in deellastbedrijf. Voor gebruikers betekent de ruime keuze aan motortechnologieën dat de juiste technologie geselecteerd moet worden om daadwerkelijk het hoogste systeemrendement en de bijbehorende besparingen te realiseren.

In principe kunnen bijna alle motoren worden gebruikt met een vast geprogrammeerde curve die voor elk toerental (of elke frequentie) de vereiste spanning definieert, de zogenaamde spanning-frequentiekarakteristiek. Het theoretische rendement van elke motortechnologie kan in de praktijk echter alleen worden gerealiseerd met besturingsalgoritmes die specifiek zijn aangepast aan de individuele technologie. Het is anders niet mogelijk de aandrijving in elk werkpunt, ook bij variërende belasting, te optimaliseren.

## Minder verscheidenheid in de installatie

Bijna alle gangbare motortechnologieën die in deze brochure worden beschreven, vereisen een elektronische besturing of kunnen door een elektronische besturing worden gevoed. Dit roept ook een vraag op: kunnen al deze motoren met dezelfde besturing worden gebruikt? Gebruikers en operators lopen anders het risico te moeten werken met een grote verscheidenheid aan technische oplossingen. In de praktijk leidt dit tot hogere trainingskosten voor ontwerpers, operators en onderhoudspersoneel. Aanschaf en beheer van reserveonderdelen voor meerdere systemen werkt eveneens kostenverhogend.

Voor gebruikers is het voordelig alle motortypen met één type frequentieomvormer te kunnen aansturen, aangezien dit de genoemde extra kosten en inspanningen sterk verlaagt. Als onafhankelijke fabrikant van frequentieomvormers levert Danfoss een oplossing die alle standaardmotoren in de industrie en gebouwautomatisering kan besturen.

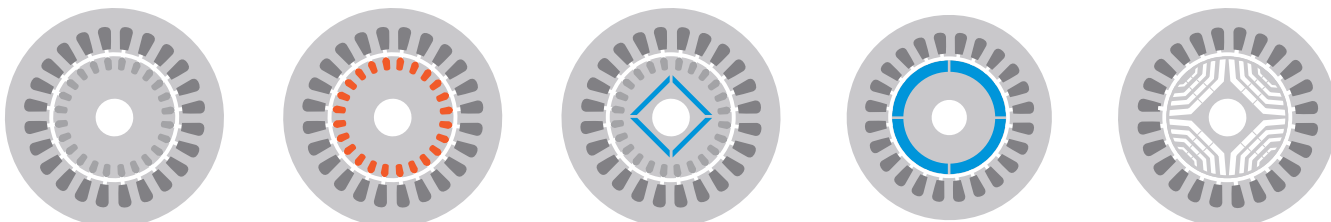
Operators kunnen over het hele vermogensbereik vertrouwen op een systeem met één gebruikersinterface, dezelfde aansluitingen, dezelfde uit-

breidingsopties en bewezen, betrouwbare techniek. Beheer van reserveonderdelen en onderhoud worden vereenvoudigd en trainingskosten worden verlaagd.

## Eenvoudige inbedrijfstelling en algoritmes voor optimale energie-efficiëntie

Als onafhankelijke fabrikant van aandrijfoplossingen zet Danfoss in op ondersteuning van alle gangbare motortypen en continue ontwikkeling.

Danfoss frequentieomvormers bieden regelalgoritmes voor een hoog rendement van standaard inductiemotoren en permanentmagneetmotoren (PM-motoren), en ondersteunen nu ook synchrone reluctantiemotoren, te beginnen met de VLT<sup>®</sup> Automation-Drive FC 302. Bovendien maakt de VLT<sup>®</sup> frequentieomvormer inbedrijfstelling even eenvoudig als bij een standaard inductiemotor door de combinatie van gebruiksgemak met aanvullende functies, zoals automatische aanpassing van de motorgegevens (AMA), die de motor doormeet en de motorparameters vervolgens optimaliseert. De motor zal altijd met het hoogste rendement draaien, waardoor gebruikers energie besparen en kosten reduceren.



# Redenen om energie-efficiëntie te verbeteren

Uitputting van fossiele brandstoffen, klimaatverandering en wereldwijde opwarming zijn slechts enkele van de motieven om het energieverbruik drastisch te reduceren, en hebben politieke consequenties. Wereldwijd hebben bijvoorbeeld veel landen – niet alleen in de EU – verplichte rendementsklassen voor elektromotoren ingevoerd, aangezien motoren de schakel vormen tussen de toegevoerde elektrische energie en de mechanische processen in de industrie en de commerciële sector, en daarmee verantwoordelijk zijn voor een groot deel van het energieverbruik.

Machines die worden aangedreven door elektromotoren, zijn verantwoordelijk voor twee derde van het totale industriële energiever-

bruik. Jaarlijks kan alleen al in Duitsland 38 miljard kilowattuur (kWh) worden bespaard in de industriële en commerciële sectoren en in openbare instellingen wanneer de aandrijvingen van tientallen jaren oud worden vervangen door moderne aandrijftechnologie. Wanneer dit wordt vertaald naar Europese schaal kan het energieverbruik worden verlaagd met 135 miljard kWh, wat gelijkstaat aan een reductie van 69 miljoen ton CO<sub>2</sub> (bron: ZVEI, "Motoren en geregelde aandrijvingen").

De minimumrendementseisen voor elektromotoren zijn in de EU vastgelegd in Verordening (EG) nr. 640/2009. Verordening (EU) nr. 4/2014 voorziet in een uitbreiding van de elektromotoren waarop de richtlijn betrekking heeft.

## Motortechnologieën voor de nieuwe rendementsklassen

De genoemde richtlijnen specificeren nieuwe rendementsklassen, waarbij de huidige grenzen voor IE1 (laagste klasse) t/m IE3 zijn overgenomen uit de norm EN 60034-30. De norm EN 60034-30-1 definieert de limieten voor IE4, die echter nog niet in de wet zijn vastgelegd. Nieuwe motortechnologieën, naast nieuwe en herontdekte technologieën, waren noodzakelijk om de minimumrendementseisen van de verschillende rendementsklassen te behalen. Als gevolg daarvan worden gebruikers geconfronteerd met een verscheidenheid aan markttrends. Wat betekent deze terminologie en technologie voor de gebruiker? Is elk motortype geschikt voor elke toepassing?

## Rendementsklasse IE5

De norm EN 60034-30-1 vermeldt ook een rendementsklasse IE5 met mogelijke grenswaarden. Daarnaast wordt ook vermeld dat de technische implementatie zeer complex zal zijn.

Uit praktische overwegingen moet de afweging worden gemaakt of het

zinvol is nog stringenter rendementsklassen te definiëren en of de steeds kleinere verbeteringen in de praktijk een merkbaar of meetbaar effect zullen hebben. Overdimensionering en verschuiving van het nominale motor-toerental leiden ertoe dat de motoren in deellast draaien, wat niet is gedefinieerd in de IE-classificaties, aangezien deze zijn gebaseerd op nominale bedrijfspunten.

Om deze reden wordt de IE5-klasse niet besproken in deze brochure.

## In een notendop

Het doel van deze brochure is een compact overzicht te bieden van de afzonderlijke motortechnologieën. De technologieën worden op een toegankelijke manier beschreven, evenals hun eigenschappen, toepassingsgebieden en voor- en nadelen. Hierdoor kunnen gebruikers geschikte motortechnologieën beoordelen en fabrikanten vragen stellen die voor hun toepassing essentieel zijn. De volgende motortypen worden in deze brochure beschreven:

- Standaard inductiemotor (asynchroon)
- Motor met koperen rotor
- Permanentmagneetmotor (PM-motor)
- EC-motor (speciale uitvoering)
- Line-start PM-motor
- Synchrone reluctantiemotor

Veel elektromotoren en aandrijvingen verspillen energie omdat ze niet in hun optimale werkgebied draaien. Om die reden besteden ontwerpers van elektromotoren meer aandacht aan optimale milieuprestaties, met name aan de energie-efficiëntie.

Het Fraunhofer Instituut voor Systemen en Innovatieonderzoek (ISI) rapporteert dat elektromotoren en bijbehorende systemen verantwoordelijk zijn voor 40 procent van het wereldwijde elektriciteitsverbruik en 6 miljard ton CO<sub>2</sub>-emissie wereldwijd, wat overeenkomt met 20 procent van de totale kooldioxide-emissie.

Een ander aspect van de milieuprestaties van een elektromotor is de dimensionering. Een compacte motor kost minder grondstof tijdens de



Deze selectie van huidige en toekomstige minimumeisen laat zien dat rendement van elektromotoren een wereldwijd thema is.

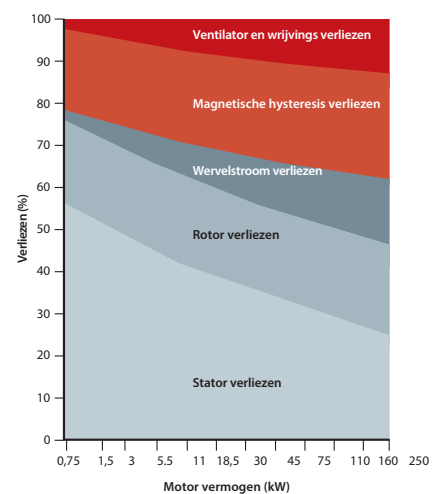
productie en heeft lagere afvoerkosten. Tegenwoordig zijn veel motoren overgedimensioneerd vanwege een “onzekerheidstoeslag” in ontwerp en selectie, waardoor ze in de praktijk met een belasting draaien die lager is dan de nominale belasting. Ze draaien eveneens op gereduceerd toerental met gereduceerd koppel.

### Verhoogde energie-efficiëntie bij motoren

EU-verordening 640/2009 dwingt motorfabrikanten te voldoen aan specifieke rendementsklassen vóór bepaalde deadlines en overeenkomstige motoren te leveren (zie tabel 1).

Dat roept de vraag op hoe energie-efficiëntie verbeterd kan worden om hogere rendementsklassen te realiseren en te respecteren. Een aspect waar fabrikanten zich op concentreren, is het terugdringen van verliezen in de rotor en/of stator. Eén aanpak is het gebruik van betere magnetische geleiders, dat wil zeggen het blikpakket van stator en rotor. Een andere aanpak is het gebruik van betere elektrische geleiders, zoals koperen rotorstaven als alternatief voor

het goedkopere aluminium. Wanneer de fabrikant geen verdere maatregelen treft, verandert hierdoor de stroomopname, zowel tijdens bedrijf als bij de start. Bij vervanging van een elektromotor moeten gebruikers per geval beoordelen of andere oplossingen noodzakelijk zijn.



Bron: Standards for the efficiency analysis of electric motors – permanently excited synchronous motor technology, 2011. De Almeida, Ferreira en Fong.

Tabel 1

	Vermogen	MEPS	Alternatieven MEPS
Sinds 16 juni 2011	0,75 – 375 kW	IE2	–
Vanaf 1 januari 2015	0,75 – 7,5 kW	IE2	–
	7,5 – 375 kW	IE3	IE2 met frequentieomvormer
Vanaf 1 januari 2017	0,75 – 375 kW	IE3	IE2 met frequentieomvormer



# Standaard driefase-inductiemotoren – het werkpaard van de industrie

Driefase-inductiemotoren, ook wel asynchrone draaistroommotoren genoemd, zijn oorspronkelijk in 1889 door AEG ontwikkeld en zijn nog steeds het werkpaard van de industrie en geschikt voor veel toepassingen. De populariteit van driefase-inductiemotoren is versterkt door de ontwikkeling van softstarters en frequentieomvormers. Softstarters leiden tot een significante verlaging van de startstroom en koppelen de motor na het starten meestal direct aan het voedende net. Daarnaast maken frequentieomvormers een nauwkeurige en energie-efficiënte toerenregeling mogelijk. Hierdoor worden de motoren geschikt voor procesoptimalisatie.

## Technologie

De motor werkt op basis van de Lorentzkracht die ervoor zorgt dat elektrisch geladen deeltjes gaan bewegen in een magnetisch veld. Magnetische krachten leiden tot een draaiende beweging als gevolg van de magnetische velden die worden opgewekt in de stator (het stilstaande deel van de motor) en de rotor (het draaiende deel).

De statorwikkeling bestaat uit koper, terwijl de rotor is uitgevoerd als een kortgesloten rotorwikkeling bestaande uit een kooi van aluminium staven.

## Realiseerbare IE-klassen

De norm EN 60034-30-1 voor motoren gaat ervan uit dat de IE4-rendementsklasse mogelijk is met driefase-inductiemotoren die rechtstreeks uit het net worden gevoed.

## IEC-frames

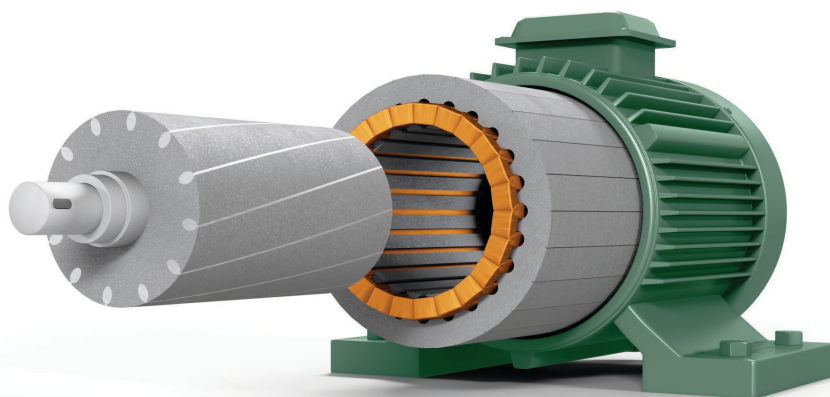
Om de energie-efficiëntie te verbeteren, gebruiken fabrikanten beter materiaal of méér materiaal voor het blikpakket van stator en rotor. In de praktijk leidt dit in een aantal gevallen tot een toename van de motorafmetingen. Alle fabrikanten streven ernaar de IEC-bouwmaten toe te passen om compatibiliteit met veel toegepaste motoren in oudere systemen te waarborgen. Om die reden blijven de hoofdmaten (onderlinge afstand montagevoeten, ashoogte en asdiameter) meestal gelijk, maar kan de diameter van de stator gedeeltelijk afwijken.

## Gebruik met een frequentieomvormer

Frequentieomvormers verzorgen een storingsvrij bedrijf en een optimale toerenregeling. In de praktijk ontstaan alleen problemen wanneer de motorisolatie niet geschikt is voor de geschakelde uitgangsspanning van de frequentieomvormer.

## Aandachtspunten

Voordat een elektromotor wordt vervangen vanwege rendementsverbetering, moet men eerst nagaan of dit noodzakelijk is. Een 10 jaar oude draaistroommotor is niet per se inefficiënt. De Danfoss VLT® DriveMotor FCM 300 bijvoorbeeld, leverbaar in een breed vermogensbereik, bereikte het rendementsniveau van de huidige IE2-klasse al toen deze aandrijving meer dan 10 jaar geleden werd geïntroduceerd en zal ook na 2017 aan de wettelijke eisen voldoen. Als vervanging van de motor echter noodzakelijk is of een andere motor moet worden toegepast in een standaard productiemachine, moet de gebruiker nagaan of de efficiëntere motor voldoet aan de standaard IEC-maten of dat wellicht constructieve aanpassingen nodig zijn.



Driefase-inductiemotor

# Motoren met koperen rotor: verbeterd rendement in standaard inductiemotoren

## Technologie

Motoren met koperen rotor zijn in de basis standaard inductiemotoren. Ze hebben dezelfde opbouw en hetzelfde werkingsprincipe, maar hebben rotorstaven uit een ander materiaal. In plaats van de gebruikelijke aluminium rotorkooi, heeft de rotor een koperen rotorkooi. Koper heeft een lagere weerstand dan aluminium, waardoor de rotorverliezen worden verlaagd. Dit voordeel leidt echter ook tot hogere productiekosten. Het hoge smeltpunt van koper (ca. 1100 °C) in vergelijking tot aluminium (ca. 660 °C) leidt tot hogere slijtage van de productiemiddelen. Daarnaast is koper aanzienlijk duurder dan aluminium.

## Realiseerbare IE-klassen

Deze motoren kunnen normaliter een IE3- of IE4-rendement realiseren.

## IEC-frames

Het frame kan tot klasse IE4 volgens IEC-normen worden uitgevoerd. In veel gevallen zijn uitvoeringen met een kleiner frame leverbaar.

## Gebruik met een frequentieomvormer

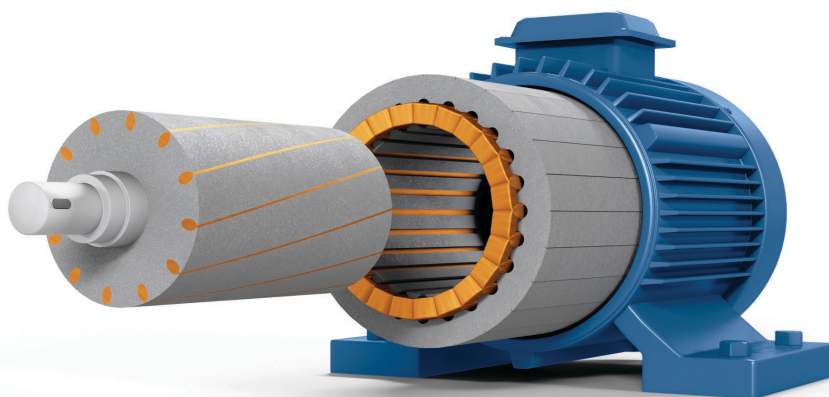
Net als standaard inductiemotoren kunnen motoren met koperen rotor door een frequentieomvormer worden geregeld. Wanneer de motorisolatie niet geschikt is voor de geschakelde uitgangsspanning van een frequentieomvormer kunnen problemen ontstaan, net als bij standaard inductiemotoren.

## Aandachtspunten

Voor wat betreft de toepassing moeten gebruikers in gedachten houden

dat motoren met koperen rotor vaak een duidelijk hogere aanloopstroom hebben en daardoor een hoger startkoppel, vanwege de lagere rotorweerstand. Dit moet bij het ontwerp van een aandrijving in acht worden genomen, evenals bij het vervangen van een bestaande driefase-inductiemotor. In de praktijk is het al voorgekomen dat het hogere startkoppel of koppelstoten, tijdens de start, tot schade hebben geleid.

De motorslip is ook lager vanwege de lagere verliezen. Dit betekent dat het nominale toerental hoger is, en daardoor ook het toerental van de aangedreven machine. Afhankelijk van de specifieke toepassing kan dit ertoe leiden dat de aangedreven machine niet met optimaal rendement functioneert.



*Driefase-inductiemotor met koperen rotor*





# Permanentmagneetmotoren (PM-motoren)

Permanentmagneetmotoren (PM-motoren) kennen een groeiende populariteit. De technologie is bekend en wordt al lange tijd toegepast, bijvoorbeeld in servomotoren. Nieuw is dat PM-motoren, dankzij hun hoge rendement, voldoen aan de bouwmaten volgens de IEC-norm.

## Technologie

In tegenstelling tot driefase-inductiemotoren hebben PM-motoren (zoals de naam al suggereert) geen rotorwikkelingen maar permanentmagneten, die op het rotoroppervlak zijn gemonteerd of zijn “verzonken” in de rotorconstructie. In de eenvoudigste situatie heeft de stator dezelfde vorm als die van een inductiemotor, maar motorfabrikanten werken ook aan geoptimaliseerde ontwerpen.

PM-motoren zijn synchrone motoren, wat betekent dat er geen slip is tussen de magnetische draaivelden van rotor en stator, zoals bij de asynchrone driefase-inductiemotor wel het geval is. De benodigde rotormagnetisering wordt verzorgd door permanentmagneten, zonder dat daar verliezen bij optreden. Dit reduceert de rotorverliezen en verhoogt het motorrendement.

PM-motoren hebben bij lagere toerentallen een aanzienlijk beter rendement dan inductiemotoren.

## Realiseerbare IE-klassen

In de praktijk realiseren de huidige PM-motoren rendementsniveaus tussen IE3 en IE4.

## IEC-frames

In vergelijking met inductiemotoren met vergelijkbaar rendement (bijv. IE3) kunnen PM-motoren aanzienlijk kleiner zijn.

## Gebruik met een frequentieomvormer

De motoren kunnen zonder problemen met een frequentieomvormer worden gebruikt. In feite is een elektronische regelaar zelfs noodzakelijk voor de werking.

## Aandachtspunten

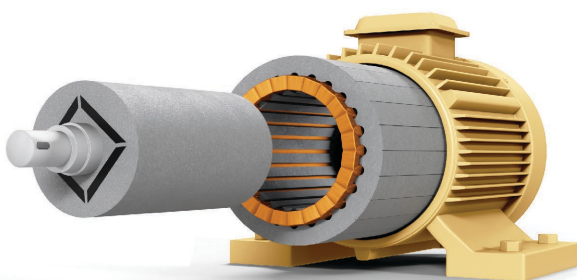
Een duidelijk nadeel van PM-motoren is de noodzaak voor een frequentieomvormer of regelaar tijdens bedrijf. De elektronische regelaar heeft een rotorpositieterugkoppelingssignaal

nodig om het magnetische veld optimaal aan te passen aan de positie van de rotormagneten en zo een draaiende beweging te realiseren. Om die reden hebben dergelijke aandrijvingen vaak een encoder. Er zijn daarentegen ook fabrikanten (inclusief Danfoss) die PM-motoren kunnen aansturen zonder encoder of andere positieterugkoppeling.

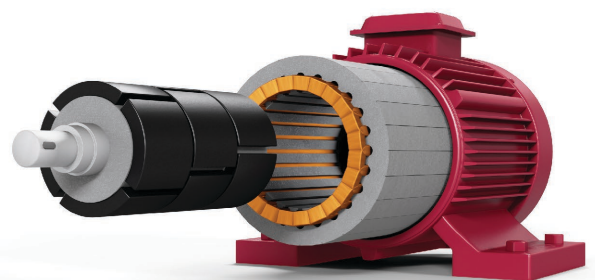
Twee andere nadelen van deze motoren zijn het risico van demagnetisering bij hoge stromen of hoge temperaturen, wat in de praktijk echter zelden voorkomt, en het uitvoeren van onderhoud. Vanwege de sterke magneten in de rotor is het lastig om de rotor uit de stator te verwijderen en zijn speciale gereedschappen vereist.

## Prijsonwikkeling van PM-motoren

Voor het produceren van de magneten zijn zeldzame delfstoffen nodig die de laatste tien jaar flink duurder zijn geworden, vanwege een sterk gestegen vraag en een teruglopend aanbod. De afgelopen twee jaar zijn de prijzen duidelijk gedaald, deels vanwege de opening van nieuwe mijnen voor deze grondstoffen.



PM-motor met “verzonken” magneten



PM-motor met oppervlaktemagneten

# Line-start PM-motoren

## Technologie

Een line-start PM-motor is een hybride combinatie van een driefase-inductiemotor en een PM-motor. Er is een kooirotor aanwezig, maar er zijn ook verzonken magneten binnen de kooi. Het resultaat is een complexe rotoropbouw, die de rotor duurder maakt. Er is echter een belangrijk voordeel ten opzichte van gewone PM-motoren. De motor kan rechtstreeks op het voedende net draaien zonder regelaar. De rotorkooi is actief tijdens de start. Nadat de motor is aangelopen naar een toerental dat wordt bepaald door de netfrequentie, zal de rotor zich synchroniseren en heeft de motor hetzelfde hoge rendement als een PM-motor.

## Realiseerbare IE-klassen

Wanneer de motor direct vanuit het net wordt gevoed, realiseren line-start PM-motoren een rendement tussen IE3 en IE4.

## IEC-frames

Beschikbare uitvoeringen voldoen aan de bouwmaten volgens de IEC-norm. Kleinere uitvoeringen zijn leverbaar.

## Gebruik met een frequentieomvormer

Alle line-start PM-motoren kunnen ook met een frequentieomvormer worden gebruikt. Het rendement zal bij frequentieomvormerbedrijf echter lager zijn: 5 tot 10 procent lager dan bij netbedrijf. Dit wordt veroorzaakt door het dempende effect van de rotorkooi.

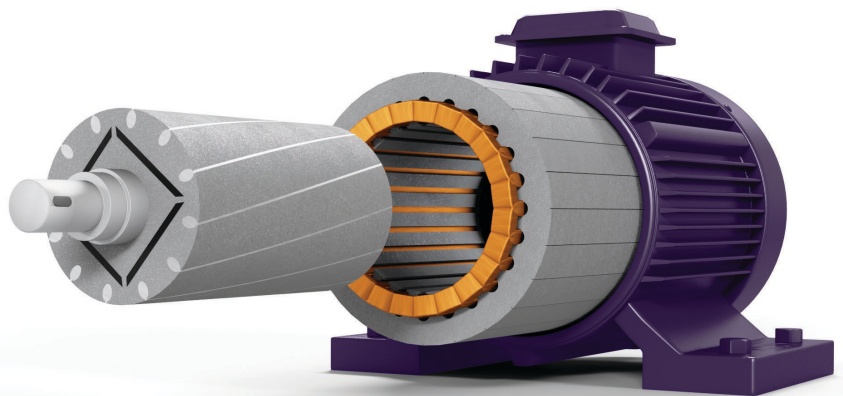
## Aandachtspunten

Het eerste nadeel treedt op tijdens de start: de motor kan korte tijd achteruit draaien. Dit fluctuerende startkoppel is ook aanwezig bij een netgevoede asynchrone motor, maar is bij line-start PM-motoren veel sterker. Het fluctuerende koppel kan pieken bereiken van 7 tot 17 maal het nominale koppel.

Toch kan de motor niet starten met een zware belasting en beschikt deze niet over sterke dynamische eigenschappen. Spanningsschommelingen en belastingsschokken kunnen ertoe leiden dat de motor niet langer synchron loopt en met een lager rendement zal draaien.

De motor draait bij netvoeding op het synchrone toerental, waardoor een verschuiving van het bedrijfstoerental van het werktuig ontstaat.

De afwegingen betreffende zeldzame delfstoffen gelden ook voor deze motor, aangezien deze motor ook permanentmagneten toepast.



Line-start PM-motoren met verzonken magneten en rotorkooi

# Synchrone reluctantiemotoren

Synchrone reluctantiemotoren passen een technologie toe die al geruime tijd bekend is. In het verleden werden deze motoren geoptimaliseerd voor koppel of framegrootte, maar nu ligt de nadruk op de energie-efficiëntie.

## Technologie

Deze motoren gebruiken de reluctantiemotor die ontstaat door een verandering in de magnetische weerstand (reluctantie). Nieuwe, speciaal ontworpen rotoruitsnedes geleiden de magnetische veldlijnen door het binnenste van de rotor en produceren zo een reluctantiemotor, met een hoge energie-efficiëntie.

Er zijn ook uitvoeringen van de synchrone reluctantiemotoren beschikbaar die geschikt zijn voor netstart. Net als line-start PM-motoren beschikken ze over een extra kortgesloten rotorwikkeling. Deze motoren hebben een zeer goede energie-efficiëntie. Het rendement daalt echter met 5 tot 10 procent bij toepassing van een frequentieomvormer (vergelijkbaar met line-start PM-motoren), vanwege het dempende effect van de extra rotorwikkeling.

## Realiseerbare IE-klassen

Rendementsklassen van IE2 tot IE4 zijn in de praktijk haalbaar, maar ligt bij de lagere vermogens dicht bij IE2. Vanaf vermogens van 11-15 kW ligt het rendement dicht bij IE4. Vanaf deze vermogens hebben deze motoren ook bijzonder goede loopeigenschappen bij lage toerentallen.

## IEC-frames

Beschikbare uitvoeringen voldoen aan de bouwmaten volgens de IEC-norm. Kleinere frames zijn ook leverbaar.

## Gebruik met een frequentieomvormer

Synchrone reluctantiemotoren hebben een frequentieomvormer nodig voor normaal gebruik, met uitzondering van de direct-on-line (DOL) versie, die rechtstreeks op het voedende net gestart kan worden.

## Uitvoering voor aanloop rechtstreeks op het net

Evenals bij de line-start PM-motor combineert de fabrikant het principe van de synchrone reluctantiemotor met de

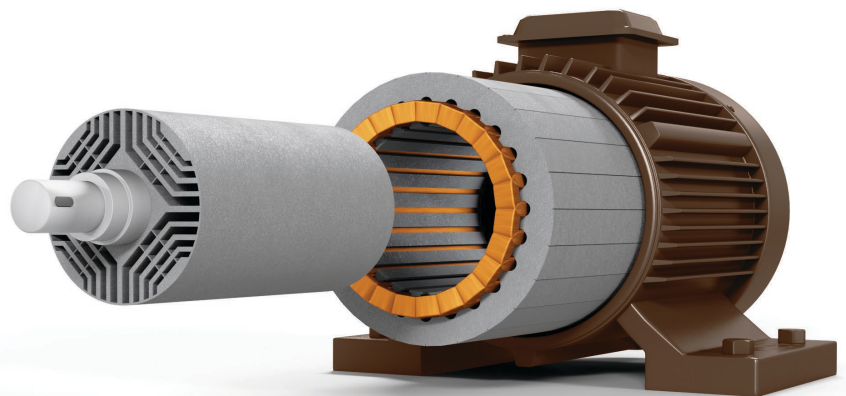
rotorkooi van een asynchrone motor. Om dit te realiseren worden de holtes in de rotor gevuld met aluminium staven die aan beide uiteinden worden kortgesloten. In deze uitvoering start de motor rechtstreeks op het voedende net, en biedt deze een betere cosinus-phi na aanloop.

Het nadeel is dat de extra demping van de kooiwikkeling extra verliezen oplevert bij frequentieomvormerbedrijf.

## Aandachtspunten

Afhankelijk van de bouwvorm zorgen de uitsparingen in het rotorblikpakket voor een slechtere cosinus-phiwaarde, wat afhankelijk van het type frequentieomvormer leidt tot een overdimensionering van één of twee vermogensstappen. Instabiliteit vanwege de rotorconstructie is op dit moment niet bekend.

De eerder genoemde vermogensafhankelijke beperkingen betreffende rendement en deellastbedrijf moeten in acht worden genomen.



Synchrone reluctantiemotor

# EC-motoren

In de praktijk zijn er veel verschillende typen EC-motoren, zoals servomotoren van enkele watts, maar ook uitvoeringen voor gebouwautomatisering. Deze motoren hebben de reputatie over een bijzonder hoog rendement te beschikken. Deze reputatie is met name terecht bij bijzonder kleine aandrijvingen – het oorspronkelijke toepassingsgebied van deze motoren – waar de universeel- en spleetpoolmotoren (rendement ca. 30%) duidelijk worden overtroffen.

## Technologie

Net zoals bij PM-motoren is de rotor uitgevoerd met magneten en zijn de wikkelingen ondergebracht in de stator. EC-motoren worden in het oorspronkelijke concept aangestuurd met een gecommuteerde (geschakelde) DC-spanning. Om deze reden worden ze ook wel borstelloze DC-motoren (BLDC, brushless DC) of “elektronische commutatie”-motoren (ECM) genoemd.

Op basis van de technologie zijn BLDC-motoren AC-motoren, waardoor de benaming BLDC enigszins verwarrend is.

Om de nadelen van het BLDC-concept, zoals een relatief hoge fasestroom en koppelrimpel, tegen te gaan, hebben fabrikanten verbeterde besturingsalgoritmes ontwikkeld. Zo zijn er nu ook sensorloze algoritmes beschikbaar. In toepassingen in de gebouwautomatisering verschillen EC-motoren vooral van de eerder beschreven PM-motoren door hun constructie als buitenrotor-motoren, bijvoorbeeld bij ventilator-motoren.

## Realiseerbare IE-klassen

Het rendement van de huidige EC-motoren ligt tussen IE2 en IE4, afhankelijk van de uitvoering.

## IEC-frames

EC-motoren die voldoen aan de gestandaardiseerde IEC-maten zijn zeldzaam. EC-motoren met hogere vermogens (boven enkele honderden watts) worden voornamelijk in ventilatoren toegepast.

## Gebruik met een frequentieomvormer

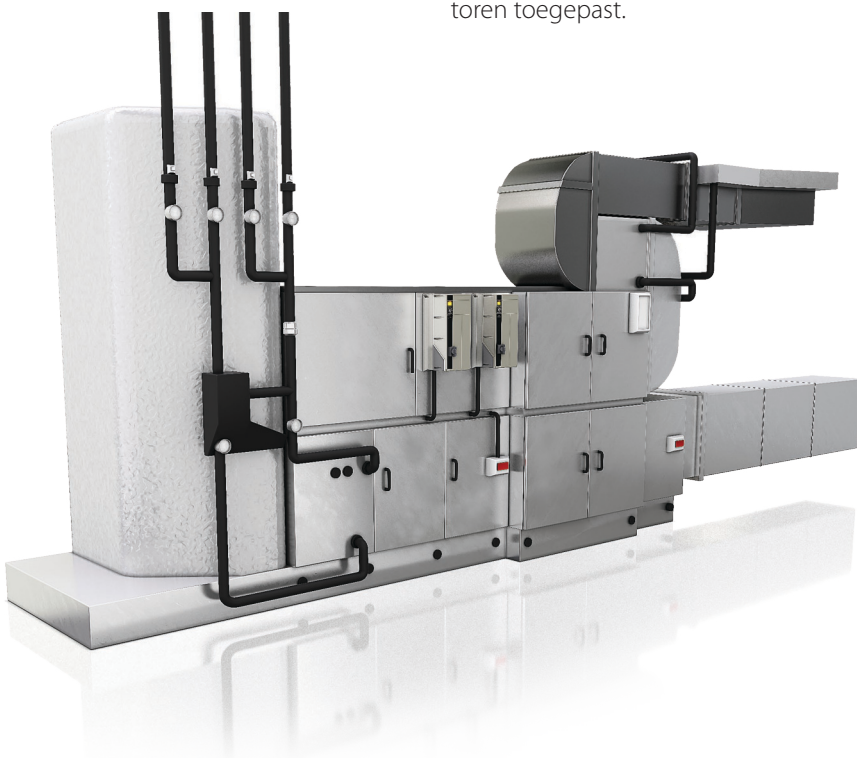
EC-motoren hebben altijd een elektronische regelaar nodig, onafhankelijk van de vraag of ze werken volgens het originele of het geoptimaliseerde concept.

## Typische toepassingen

EC-motoren worden vaak toegepast in ventilatoren voor gebouwautomatisering, veelal in de vorm van buitenrotormotoren, en in de lage vermogens als servo- of stelmotoren.

## Aandachtspunten

De benaming “EC-motor” wordt vaak gebruikt voor een range aan concepten. Voor gebruikers is het lastig om onderscheid te maken tussen conventionele BLDC-motoren en de verbeterde uitvoeringen met hoger rendement, die een gelijkenis vertonen met PM-motoren. Vanwege de toepassing van permanentmagneten gelden voor EC-motoren dezelfde afwegingen als voor PM-motoren voor wat betreft het gebruik van zeldzame delfstoffen.





# Systeemoptimalisatie: analyse van het systeem en het potentieel

Volgens de Duitse organisatie van elektrotechniek- en elektronicafabrikanten (ZVEI) kan ongeveer 10% van de potentiële besparingen in aandrijfsystemen worden gerealiseerd door toepassing van motoren met een hogere energie-efficiëntie. Toepassing van toerenregeling heeft een besparingspotentieel van ca. 30%. De grootste potentiële besparing (ca. 60%) is echter haalbaar door optimalisatie van het totale aandrijfsysteem. Om die reden moeten gebruikers bij alle maatregelen telkens beoordelen wat de invloed is op het totale systeem en nagaan of het mogelijk is meerdere vormen van energiebesparing met elkaar te combineren. Hiertoe behoren

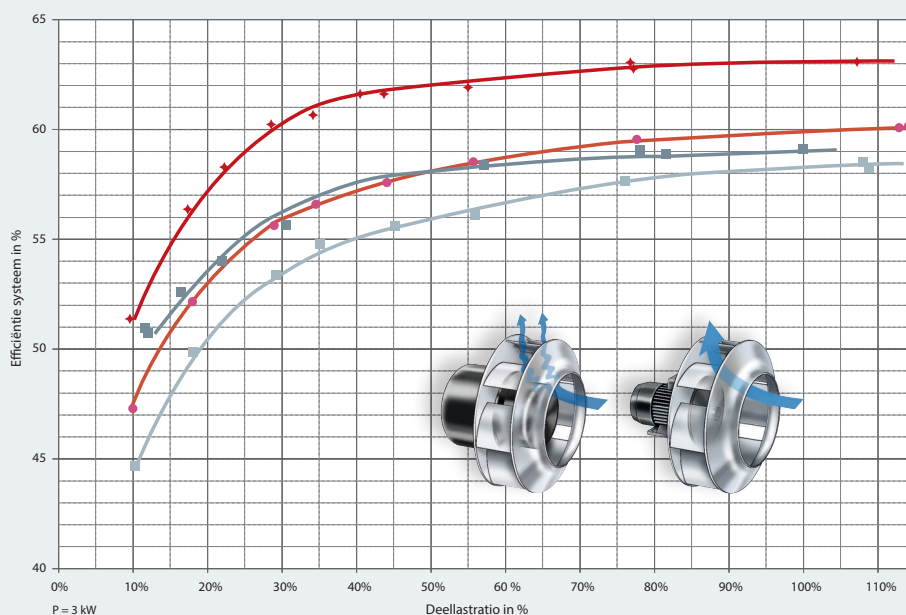
geoptimaliseerd leidingontwerp bij ombouwwerkzaamheden, evenals de mogelijke inzet van softwarefuncties in moderne frequentieomvormers.

De potentiële besparingen op de verschillende energievormen variëren sterk van sector tot sector. De industriële sector heeft bijvoorbeeld veel meer proceswarmte nodig dan de handelssector. De grootste potentiële besparingen worden meestal gevonden in de sectoren met het hoogste energieverbruik. De industriële sector is bijvoorbeeld verantwoordelijk voor 43% van het elektriciteitsverbruik, terwijl de handels-, commerciële- en dienstensector "slechts" 23% verbruikt.

Gedetailleerde kennis van installaties en technieken is noodzakelijk om de potentiële besparingen te kunnen bepalen. Alleen dan is het mogelijk te beoordelen welke maatregelen al dan niet economisch haalbaar zijn.

Ongeacht de vraag of het nieuwe of bestaande installaties of machines betreft, moeten gebruikers eerst een analyse maken voordat maatregelen voor energiebesparing worden doorgevoerd. Dat vereenvoudigt het bepalen van oplossingsrichtingen en de latere verificatie of toegepaste maatregelen effectief zijn en de gewenste besparingen worden gerealiseerd.

## Systemrendement – de combinatie is bepalend



Metingen van het Duitse Instituut voor luchtbehandeling en koudetechniek bevestigen dat een maximaal systeemrendement alleen kan worden gerealiseerd door de beste componenten te combineren. Bijvoorbeeld, het Danfoss EC+ systeem reduceert de verliezen in een ventilatorsysteem met tot wel 11% door een optimale combinatie van frequentieomvormer, motor en ventilatorwaaier.

Het zeer goede motorrendement van een EC-ventilator wordt tegengewerkt door een minder gunstige geometrie van de waaier, wat resulteert in een systeemrendement dat 3-5% lager ligt.

- + EC+ ventilator met PM-motor
- EC-ventilator
- Ventilator met standaardmotor (IE3)
- Ventilator met standaardmotor (IE2)

# Samenvatting

Zoals de beschrijvingen van de verschillende motortypen laten zien, hebben de wettelijke en commerciële vraag naar hogere energie-efficiëntie de markt voor elektromotoren sterk veranderd. Diverse varianten, op basis van zowel conventionele als nieuwe technologieën, staan te dringen op de markt om de gunst van de gebruikers te winnen. Het zal interessant zijn om te zien welke motortechnologie of -technologieën op de lange termijn zullen doorzetten.

De ontwikkeling van elektromotoren is in ieder geval nog lang niet ten einde.

Motorfabrikanten zijn bijvoorbeeld al experimenten gestart met ferrietmaterialen in plaats van conventionele magneten. De resultaten van de eerste tests zijn veelbelovend.

Voor gebruikers is het belangrijk elke situatie zorgvuldig te beoordelen om na te gaan of de inzet van hoog-efficiënte motoren zinvol is. Inzet van IE4-motoren is bijvoorbeeld niet altijd de optimale oplossing, vanwege de hoge kosten, of in het geval van periodieke belastingcycli, de hogere massatraagheid.

Tot slot kunnen de nadelen van verschillende motoren verminderd worden door optimalisaties in het concept, zoals de line-start PM-motoren die rechtstreeks op het net kunnen draaien. Deze aanvullende voorzieningen kunnen echter ook nieuwe nadelen introduceren. Het doel van deze brochure is om gebruikers in staat te stellen beter met fabrikanten te communiceren en vervolgens gezamenlijk de beste aandrijfoplossingen te selecteren of voor de betreffende toepassing te ontwikkelen.

Motor	Haalbare efficiëntie	IEC-type	Gebruik met een frequentieomvormer	Toepassingen	Opmerkingen
<b>Inductiemotor</b>	IE3/IE4	IE3, of beter, soms moeilijk	Geen moeilijkheden	Bijna alle toepassingen.	IE3/IE4 voldoet mogelijk niet aan IEC-bouwmaten.
<b>Inductiemotor met koperen rotor</b>	IE3/IE4	Compatibel. Kan ook kleiner zijn.	Geen moeilijkheden	Bijna alle toepassingen.	Koppelstoten tijdens start. Moet worden beoordeeld tijdens systeemontwerp en bij retrofit.
<b>PM</b>	IE3/IE4	Compatibel. Kan ook kleiner zijn.	Heeft altijd een regelaar nodig. Sommige frequentieomvormers hebben rotorpositieterugkoppeling nodig. Betere efficiëntie bij lagere toerentallen dan inductiemotor.	Bijna alle toepassingen.	Incidenteel hoge prijzen vanwege benodigde zeldzame delfstoffen. Huidige prijstrend is dalend.
<b>Line-start PM</b>	IE3/IE4	Compatibel. Kan ook kleiner zijn.	Mogelijk. Rendement ongeveer 5 tot 10% lager dan bij netbedrijf.	Kan niet met zware belasting starten, lage dynamische prestaties, problemen bij zwakke netvoeding en koppelstoten.	Zeer goed motorrendement wanneer beperkingen in de toepassing acceptabel zijn. Problematiek met zeldzame delfstoffen vergelijkbaar met PM-motoren.
<b>EC</b>	IE3/IE4	Nee	Heeft altijd een regelaar nodig.	Laag vermogen, EC-ventilatoren, servomotoren	Hogere efficiëntie dan andere technologieën bij relatief laag vermogen (onder 750 W). Systeemrendement wordt vaak nadelig beïnvloed door een ventilatorontwerp waarbij de motor wordt geïntegreerd in de naaf. Problematiek met zeldzame delfstoffen vergelijkbaar met PM-motoren.
<b>SynRM</b>	IE2-IE4	Compatibel. Kan ook kleiner zijn.	Heeft altijd een regelaar nodig. Beter rendement bij vermogens boven ca. 11-15 kW; vergelijkbaar met PM bij relatief lage toerentallen. Vaak grotere frequentieomvormer nodig vanwege ongunstige cosinus-phi.	Nu voornamelijk pomp-ventilatoroepassing van ongeveer 11-15 kW.	Motoren nog relatief nieuw op de markt. Voordelen nu hoofdzakelijk in het gebied vanaf 11-15 kW.

Inductiemotor      Driefase-inductiemotor  
 PM                    Permanentmagneet  
 Line-start PM      Line-start PM  
 EC                    Elektronische commutatie  
 SynRM              Synchronreluctantie  
 FC                    Frequentieomvormer

# Gebruik van de motor met frequentieomvormer

## Geschiktheid, efficiëntie, optimalisatie

### Waarom frequentieomvormers toepassen?

Het gebruik van motoren met hogere efficiëntie voegt een aspect toe aan het gebruik van frequentieomvormers. Ten eerste biedt de toerenregeling met een frequentieomvormer een enorm potentieel voor de reductie van energieverbruik en kosten. Ten tweede kunnen sommige motortechnologieën alleen met deze techniek worden gebruikt.

### Welke motoren zijn geschikt voor gebruik met een frequentieomvormer?

De voornaamste belasting voor een elektromotor is de pulsformige uitgangsspanning van de frequentieomvormer, die de frequentieomvormer gebruikt om de uitgangsspanning te vormen. De stijgsnelheid van de uitgangsspanning belast het isolatiesysteem van de motor. Door het gebruik van moderne isolatiematerialen heeft deze belasting de afgelopen 10-15 jaar nauwelijks problemen meer veroorzaakt. Bij toepassing van oudere motoren kan de belasting op de motorwikkelingen tot uitval leiden wanneer geen geschikte uitgangsfilters zijn toegepast in de frequentieomvormer. In dit geval worden du/dt- of sinusfilters aangeraden om spanningsspieken te verminderen en de isolatie te beschermen.

### Thermische belasting

Door een geoptimaliseerde aansturing kunnen veel moderne frequentieomvormers, waaronder die van Danfoss, de ingangsspanning zonder spanningsverlies aan de uitgang leveren. De motoropwarming voor standaardmotoren (t/m framegrootte 315) ligt in de orde van grootte van de extra

opwarming als gevolg van nettoleranties en is daarom verwaarloosbaar. Bij frequentieomvormers met een matige DC-tussenkring, die niet in staat zijn om de volledige ingangsspanning op de uitgang te leveren bij de nominale frequentie, wordt motorisoliatieklasse "F" aanbevolen, aangezien de motortemperatuur met tot wel 10 K extra kan stijgen.

### Lagerbelasting

Ongunstige omstandigheden (netspanning, aarding, afscherming) kunnen bij elektromotoren (gewoonlijk pas vanaf framegrootte 132) die door een frequentieomvormer worden gevoed, leiden tot lagerschade als gevolg van lagerstromen. Dit kan bijvoorbeeld ontstaan door impulsformige ontlaadingsstromen in de smeerfilm van het lager die na langere tijd het lager beschadigen. Eenvoudige maatregelen (goede aardverbinding, afgeschermd motorkabels, geïsoleerde lagers, speciaal lagervet enz.) reduceren de lagerstromen en daarmee het risico op uitval.

### Ontwerp van het aandrijfsysteem

Bij de combinatie van frequentieomvormer en motor geven de vermogensgegevens in kW een eerste indicatie. Voor de fijnafstemming moeten de benodigde stromen of schijnbare vermogens worden afgestemd (dit geldt met name voor synchrone reluctantiemotoren). Het is belangrijk dat de frequentieomvormer in staat is de benodigde overbelasting van de toepassing te leveren. Dit is meestal 110% voor pompen en ventilatoren en 160% voor transportbanden en hijstoepassingen.

### Optimalisatie

Wanneer een frequentieomvormer een maat groter wordt gekozen dan daadwerkelijk in een toepassing wordt gebruikt, bijvoorbeeld om een hogere overbelasting mogelijk te maken, heeft dit vanwege het hoge efficiëntieniveau geen nadelige effecten voor het energieverbruik. Voor een motor is dit anders, aangezien overdimensionering een duidelijk grotere invloed heeft. Bij een grotere motor kan, afhankelijk van het motorontwerp, de efficiëntie bij het bedrijfspunt van de toepassing zelfs hoger zijn dan bij vollast.

Frequentieomvormers met besturingsmethodes die zijn aangepast aan de motortechnologie, bieden tijdens bedrijf optimale magnetisering, ook bij deellast. Dit geldt eveneens voor (sterk) wisselende belastingen. Danfoss-frequentieomvormers voor PM-motoren hanteren het MTPA (maximum torque per ampere)-concept, dat bij elke motorconstructie de beste energie-efficiëntie oplevert.

### Aanvullende informatie

De meerderheid van de standaard driefasemotoren op de markt kan probleemloos worden gebruikt met moderne frequentieomvormers. In het selectie- en installatieproces moeten gebruikers aandacht besteden aan de eigenschappen van de verschillende technologieën. Met de juiste vakkennis is dit echter geen bijzonder grote uitdaging. De voorgaande secties bieden een overzicht van dit thema. Aanvullende informatie voor een betrouwbare en energie-efficiënte aandrijfoplossing vindt u op de Danfoss-website en in de Danfoss-documentatie.

# De visie achter VLT®

Danfoss is marktleider in de ontwikkeling en productie van frequentieomvormers – en verwelkomt nog elke dag nieuwe klanten.

## Verantwoordelijkheid voor het milieu

### Danfoss VLT®-producten – met oog voor mens en milieu

Alle productielocaties voor VLT®-frequentieomvormers zijn gecertificeerd volgens ISO 14001 en ISO 9001. De activiteiten van Danfoss houden rekening met medewerkers, werkgelegenheid en het milieu. Productieprocessen hebben minimale uitstoot, minimale invloed op het milieu en een zo laag mogelijke geluidsproductie. Bovendien beschermt Danfoss het milieu bij de verwerking van reststoffen en de afvoer van gebruikte aandrijvingen.

### Wereldwijd VN-convenant

Danfoss heeft het wereldwijde VN-convenant inzake sociale en milieugebonden verantwoordelijkheden ondertekend. Al onze bedrijfs-onderdelen houden rekening met lokale waarden en normen.

### Energiebesparing door VLT®

De energiebesparing van de VLT®-frequentieomvormers die in één jaar worden geproduceerd, komt overeen met de jaarlijkse productie van één grote energiecentrale. Verbeterde procesregeling optimaliseert productkwaliteit en vermindert afval en slijtage van productielijnen.



## Gespecialiseerd in frequentieomvormers

Danfoss VLT Drives is wereldwijd leider op het gebied van drive-engineering en -productie. In 1968 introduceerde Danfoss de eerste in serie geproduceerde frequentieomvormers voor driefasemotoren en het bedrijf heeft zich sindsdien gespecialiseerd in aandrijfoplossingen. Tegenwoordig staat VLT® voor betrouwbare motor-technologie, innovatie en expertise voor aandrijfoplossingen binnen veel verschillende industriële sectoren.

## Innovatieve en intelligente frequentieomvormers

Danfoss VLT Drives, met het hoofdkantoor in Graasten, Denemarken, is met 2500 medewerkers actief in de ontwikkeling, productie, advisering, verkoop en onderhoud van Danfoss-aandrijfoplossingen in meer dan 100 landen.

De modulaar opgebouwde frequentieomvormers worden volgens klantspecificatie geproduceerd en worden volledig gemonteerd geleverd. Zo wordt uw VLT® steeds met de meest actuele techniek geleverd.

## Vertrouw op wereldwijde experts

Om de hoge kwaliteitsstandaard van onze producten te waarborgen, stuurt en bewaakt Danfoss VLT Drives de ontwikkeling van alle belangrijke productonderdelen. De groep heeft eigen afdelingen voor research en softwareontwikkeling, evenals moderne productiefaciliteiten voor hardware, vermogensmodules, printkaarten en accessoires.

VLT®-frequentieomvormers worden wereldwijd in zeer uiteenlopende toepassingen toegepast. De experts van Danfoss VLT Drives ondersteunen klanten met uitgebreide specialistische kennis van de specifieke toepassingen. Gericht advies en snelle service zorgen voor een optimale oplossing met een hoge betrouwbaarheid en beschikbaarheid. Een project is pas afgerond wanneer de klant 100% tevreden is met de aandrijfoplossing.



Danfoss VLT Drives, Vareseweg 105, 3047 AT Rotterdam., Nederland, Tel. +31 (0)10 2492050, Fax +31 (0)10 2492041, E-mail: vltsales@danfoss.nl, www.danfoss.nl/vlt

Danfoss kan niet verantwoordelijk worden gesteld voor mogelijke fouten in catalogi, handboeken en andere documentatie. Danfoss behoudt zich het recht voor zonder voorafgaande kennisgeving haar producten te wijzigen. Dit geldt eveneens voor reeds bestelde producten, mits zulke wijzigingen aangebracht kunnen worden zonder dat veranderingen in reeds overeengekomen specificaties noodzakelijk zijn. Alle in deze publicatie genoemde handelsmerken zijn eigendom van de respectievelijke bedrijven. Danfoss en het Danfoss-logo zijn handelsmerken van Danfoss A/S. Alle rechten voorbehouden.