

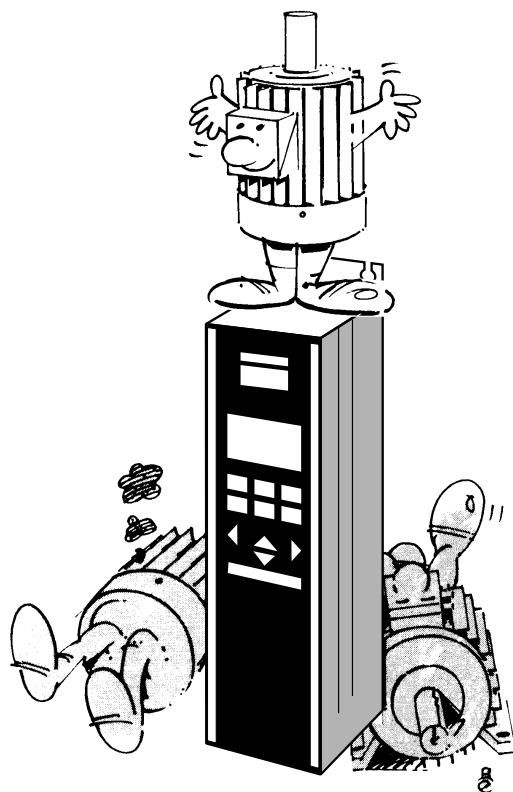
Inhoud

Hoofdstuk 0:	Inleiding
Hoofdstuk 1:	Draaistroommotoren
Hoofdstuk 2:	Frequentie-omvormers
Hoofdstuk 3:	Frequentie-omvormers en draaistroomm.
Hoofdstuk 4:	Bescherming en Veiligheid
Bijlage I:	Algemene Mechanische Theorie
Bijlage II:	Algemene Wisselstroomtheorie
Bijlage III:	Vaak gebruikte Afkortingen
Literatuurverwijzingen	
Trefwoordenregister	

0. Inleiding

Een statische frequentie-omvormer is een elektronisch apparaat waarmee het toerental van draaistroommotoren traploos geregeld wordt door de vaste netspanning en frequentie in meer of mindere mate te veranderen. Er is een wereld van verschil tussen de eerste, met thyristors uitgeruste frequentie-omvormers en de huidige microprocessorgestuurde digitale apparaten.

Door de voortdurend toenemende automatisering heeft de industrie een groeiende behoefte aan automatisch werkende apparatuur en verlangt steeds hogere productiesnelheden. Aan de lopende band worden steeds betere methoden voor nog doelmatiger productiesystemen ontwikkeld. In die systemen spelen elektromotoren een belangrijke rol. Wat hun constructie betreft zijn die motoren berekend op een vast toerental en er wordt sinds jaar en dag gewerkt aan systemen om hun toerental optimaal te regelen. Het vaste toerental van draaistroommotoren kan op verschillende manieren traploos verستeld worden, maar men moet daarbij wel rekenen op enig vermogensverlies of een grotere investering.

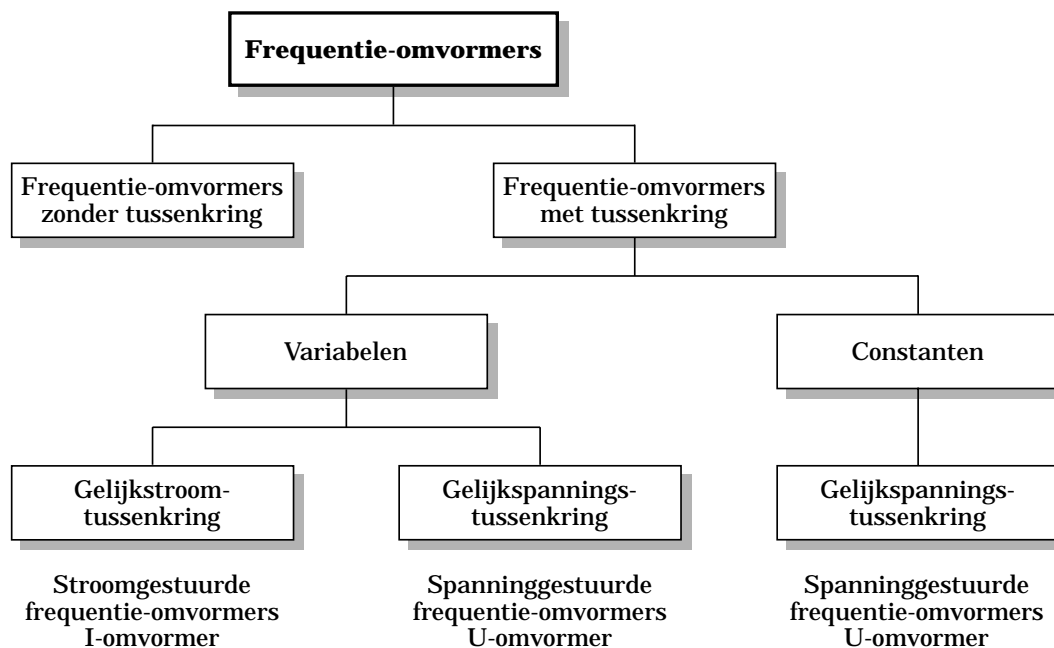


Afb. 0.01

Pas na de komst van de statische frequentie-omvormer – waarvan uiteenlopende principes ten grondslag kunnen liggen – werd het mogelijk efficiënt gebruik te maken van draaistroommotoren met een traploos variabel toerental.

De op dit moment in de industrie meest gebruikte statische frequentie-omvormers ter besturing of regeling van het toerental van draaistroommotoren berusten in hoofdzaak op twee onderling verschillende principes (zie afb.0.02):

- frequentie-omvormers zonder tussenkring (ook wel directe frequentie-omvormers genoemd), en
- frequentie-omvormers met een variabele of constante tussenkring.



Afb. 0.02 Regelmethode

Frequentie-omvormers met tussenkring hebben òf een gelijkstroomtussenkring òf een gelijkspanningstussenkring. Ze worden respectievelijk stroomgestuurde en spanninggestuurde frequentie-omvormers genoemd.

Vergeleken met directe frequentie-omvormers bieden regelaars met tussenkring een aantal voordelen zoals:

- een beter reactief-vermogensgedrag
- ontkoppeling van hogere harmonische
- grootte van de uitgangsfrequentie. Deze wordt slechts begrensd door de besturing en de eigenschappen van de componenten. Voor hoge uitgangsfrequenties worden daarom altijd frequentie-omvormers met tussenkring gebruikt.

Wat de totale kosten betreft zijn directe regelaars iets voordeliger dan regelaars met tussenkring. Eén van de nadelen is de minder goede ont koppeling van hogere harmonische.

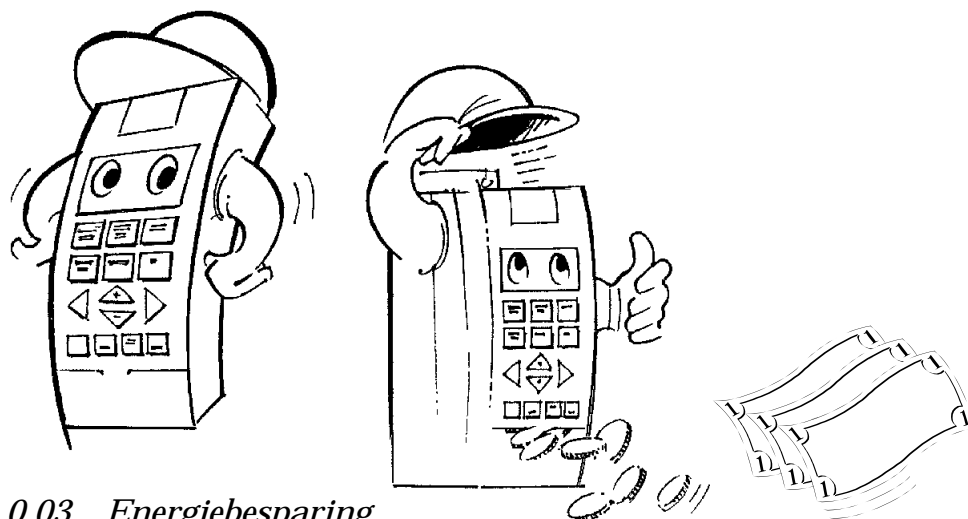
Omdat frequentie-omvormers met gelijkspanningstussenkring het meest voorkomen wordt hierop in dit boek de nadruk gelegd.

Voordelen van traploze toerentalregeling

Draaistroommotoren die met een frequentie-omvormer gestuurd worden vormen tegenwoordig een standaardonderdeel van iedere geautomatiseerde installatie. Behalve dat daardoor de goede eigenschappen van de draaistroommotor volledig benut kunnen worden – en overigens aan traploze regeling van de snelheid in tal van installaties niet te ontkomen valt – biedt deze regelmogelijkheid nog een reeks andere voordelen.

Energiebesparing

Zolang het toerental en koppel van de motor precies voldoet aan de behoefte van de belasting wordt energie bespaard. Dat geldt in het bijzonder voor centrifugaalpompen en ventilatorsystemen. Hier daalt het energieverbruik met de derde macht van het toerental. Een aandrijving die op de helft van zijn toerental draait neemt slechts 12,5% van zijn nominale vermogen op.



Afb. 0.03 *Energiebesparing*

Optimalisering van het proces

Aanpassing van de snelheid aan het productieproces biedt een aantal voordelen. De productie kan worden opgevoerd met de mogelijkheid tegelijkertijd het materiaalverbruik, de slijtage en het percentage uitschot te verminderen.

Zuiniger gebruik van machines

Het aantal keren dat gestart en gestopt wordt door het toerental maximaal te verstellen kan drastisch gereduceerd worden. Door het aanlopen en stoppen geleidelijk te doen verlopen wordt vermeden dat de machine onnodig zwaar belast wordt.

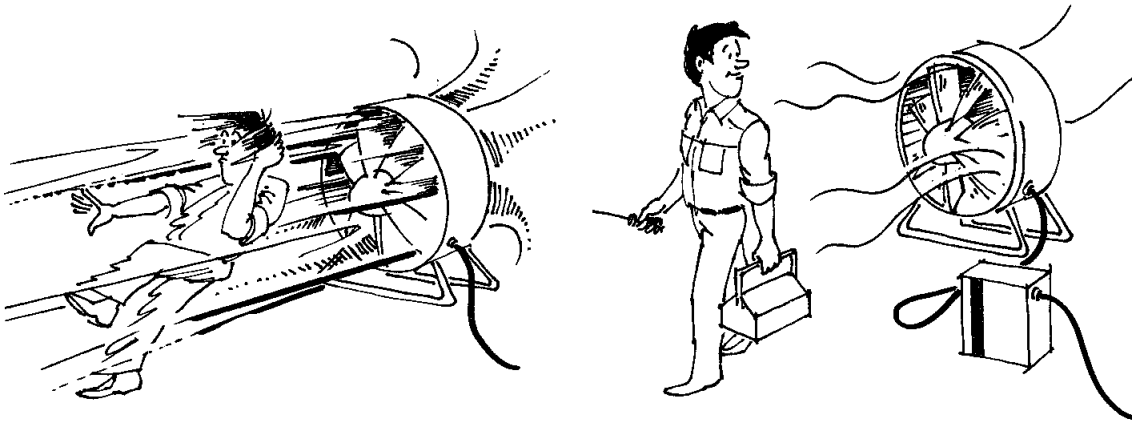
Geringe onderhoudskosten

Frequentie-omvormers vragen geen onderhoud. Door met gereduceerde toerentallen te werken wordt de standtijd van een installatie langer. Watervoorzieningssystemen hebben niet langer te kampen met drukstoten die ontstaan bij het rechtstreeks inschakelen van pompmotoren, zodat beschadiging van de leidingen voorkomen wordt.

Betere werkomstandigheden

De snelheid van transportbanden kan exact worden aangepast aan de snelheid van werken. Flessen op de transportband van een vulinrichting veroorzaken aanzienlijk minder lawaai als bij opeenhopingen de bandsnelheid verlaagd kan worden.

Door aanpassing van het toerental van een ventilator vermindert de geluidshinder voor de omgeving en worden koude luchtstromingen vermeden.



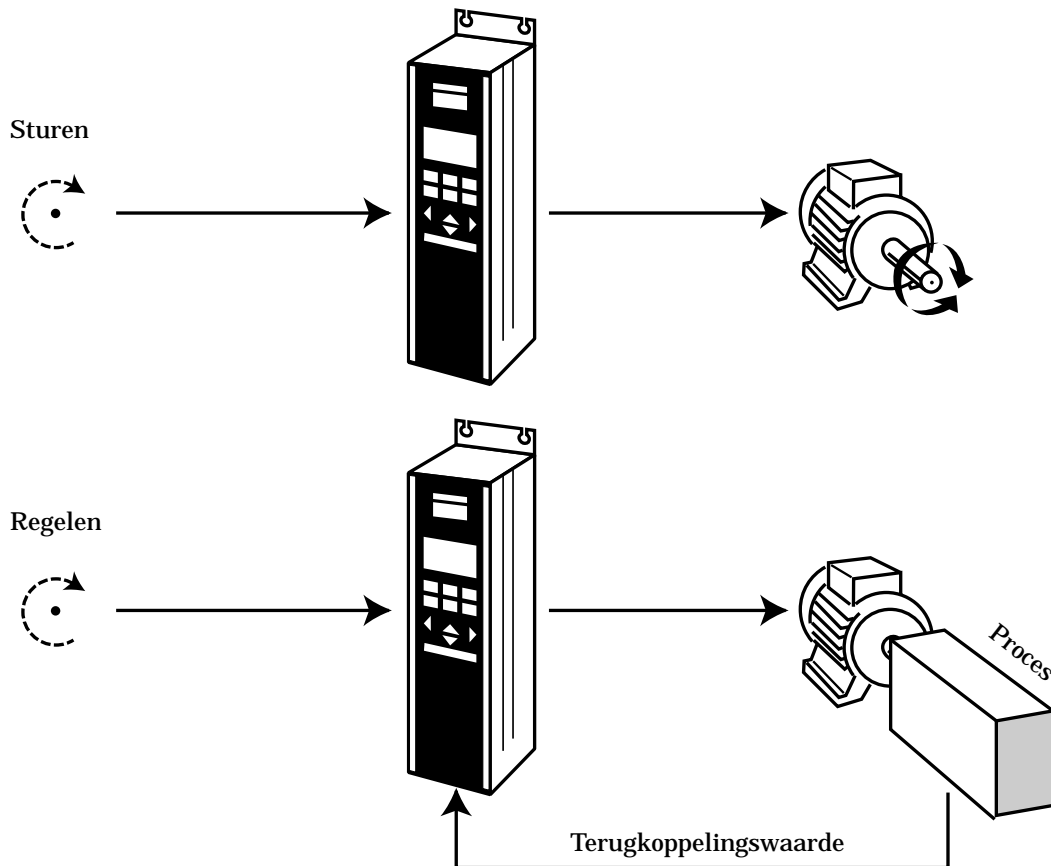
Afb. 0.04 Betere werkomstandigheden

Ontlasten van de procesbesturing

Met behulp van intelligente frequentie-omvormers kan een deel van de taken van onafhankelijk programmeerbare besturingen decentraal door de aandrijfunit overgenomen worden. Omdat kleine afstellings- en bewakingsopdrachten door de aandrijving worden uitgevoerd heeft de centrale besturing minder geheugenruimte nodig en kan daardoor kleiner gekozen worden en sneller reageren.

Sturen of regelen?

De woorden sturen en regelen worden vaak gebruikt naar het uitkomt. De ontwikkelingen in de automatiserings- en aandrijvingstechniek dwingen ons echter een duidelijk onderscheid tussen deze beide begrippen te maken.



Afb. 0.05 Het verschil tussen sturen en regelen

Of er sprake is van sturing of regeling hangt af van de structuur van een installatie. 'Sturen' is het naar de aandrijving zenden van een signaal waarvan verwacht wordt dat het in het gewenste, binnen toelaatbare grenzen liggende toerental resulteert. 'Regelen' houdt in dat het proces via een signaal meldt wat het werkelijke toerental is. Zodra er een verschil geconstateerd wordt tussen het gewenste en het werkelijke toerental wordt het systeem automatisch opnieuw geregeld tot het juiste toerental bereikt is.

1. Draaistroommotoren

De eerste elektromotor – een gelijkstroommotor – dateert van 1833. Het toerental van dit type motor is eenvoudig te regelen en de motor is daarom voor tal van toepassingen bruikbaar.

De eerste draaistroommotor werd in 1889 gebouwd. In vergelijking met gelijkstroommotoren zijn draaistroommotoren aanzienlijk eenvoudiger en sterker. Draaistroommotoren hebben echter een vast toerental en vaste koppelcurve. Het bleef om die reden lang onmogelijk ze in bepaalde bijzondere installaties te gebruiken. Draaistroommotoren zijn elektromagnetische energie-omvormers. Ze zetten door middel van elektromagnetische inductie elektrische energie om in mechanische energie (motorvermogen) en omgekeerd (generatorwerking).

Principe van elektromagnetische inductie:

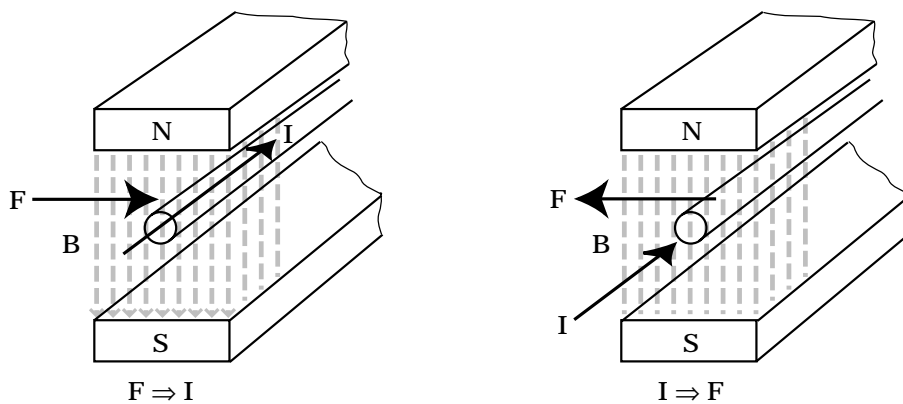
In een dwars door een magneetveld (B) bewogen geleider wordt een spanning geïnduceerd. Als de geleider onderdeel vormt van een gesloten stroomkring dan beweegt zich daarin een stroom (I). Op de bewegende geleider werkt een kracht (F) loodrecht op het magneetveld en de geleider zelf.

a) Principe van de generator (inductie door beweging)

Generatoren berusten in principe op het verschijnsel dat het magneetveld en de verplaatsing van een geleider een spanning genereren (afb.1.01a).

b) Principe van de motor

In motoren vindt inductie in principe in 'omgekeerde' volgorde plaats: een stroomvoerende geleider wordt in een magneetveld



a) Principe van generatoren

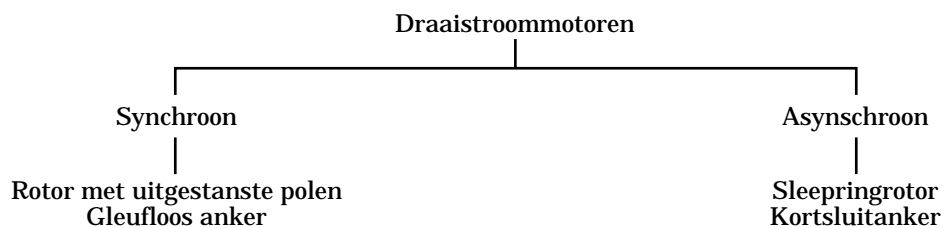
b) Principe van motoren

Afb. 1.01 Het principe van elektromagnetische inductie

geplaatst. Op de geleider wordt daardoor een kracht (F) uitgeoefend die poogt de geleider uit het magneetveld te verdrijven. In een motor veroorzaken het magneetveld en de stroomvoerende geleider beweging (afb.1.01b).

Het magneetveld wordt in het vaste gedeelte van de motor (de stator) opgewekt. De geleiders die door de elektromagnetische kracht worden beïnvloed bevinden zich in het roterende deel (de rotor). Draaistroommotoren kunnen in twee hoofdgroepen worden verdeeld: asynchroon- en synchroommotoren.

De stator werkt in principe in beide typen op dezelfde manier. Het verschil zit hem in de rotor. Beslissend zijn de constructie van de rotor en hoe deze zich ten opzichte van het magneetveld beweegt. Synchroon betekent 'gelijktijdig' of 'gelijk' en asynchroon 'ongelijktijdig' of 'ongelijk'. Met andere woorden: de snelheden van rotor en magneetveld zijn òf gelijk aan elkaar òf verschillen van elkaar.



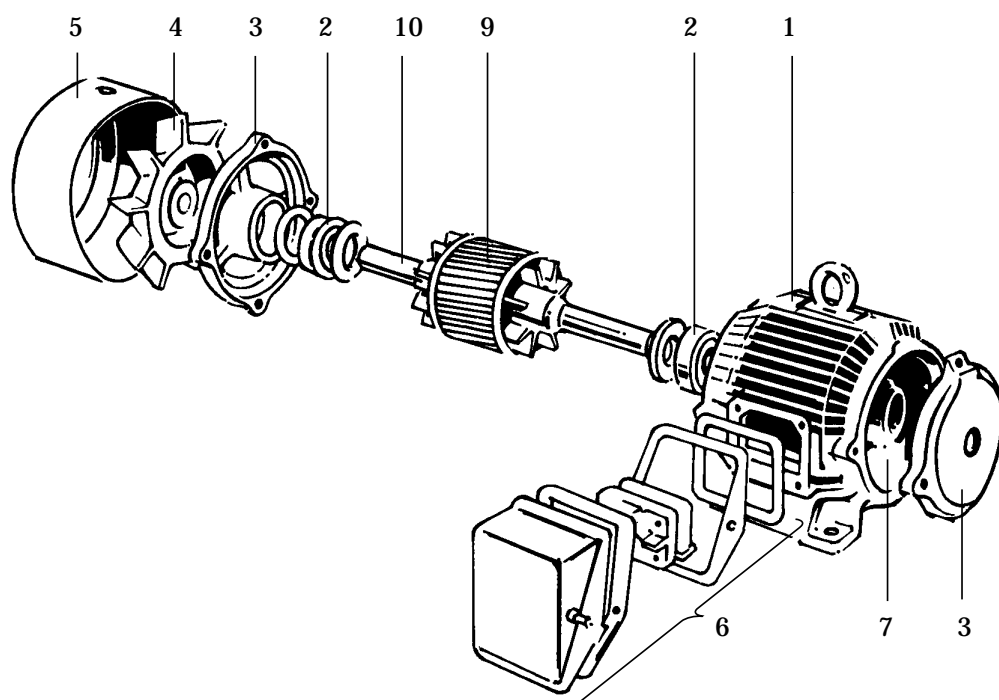
Afb. 1.02 Onderverdeling draaistroommotoren

Asynchroonmotoren

De asynchroonmotor is de motor die het meest gebruikt wordt. Onderhoud vergt deze motor vrijwel niet. De mechanische constructie is genormeerd zodat een geschikte leverancier altijd snel te vinden is. Er zijn weliswaar verschillende typen asynchroonmotoren, maar hun werking berust in alle gevallen op hetzelfde principe.

De twee hoofdbestanddelen van de asynchroonmotor zijn de stator en de rotor.

De stator



Afb. 1.03 De onderdelen van de asynchroonmotor

De stator behoort tot het onbeweeglijke deel van de motor. Hij bestaat uit een statorhuis (1), kogellagers (2) waarin de rotor (9) opgehangen is, lagerkappen (3) voor de lagers en tenslotte aan het eind van het statorhuis een ventilator (4) om de motor te koelen en een ventilatorkap (5) als bescherming tegen de draaiende ventilator. Aan de zijkant van het statorhuis is een kastje (6) voor de elektrische aansluiting gemonteerd.

In het statorhuis bevindt zich een ijzeren kern (7) bestaande uit 0,3-0,5 mm dunne lamellen. De lamellen zijn uitgestanst voor de drie fasenwikkelingen. De fasenwikkelingen en stator kern zorgen voor het magnetveld.

De omloopsnelheid van het magneetveld wordt bepaald door het aantal poolparen (of polen). Als een motor op zijn nominale frequentie is aangesloten wordt de omloopsnelheid van het magneetveld het synchrone toerental (n_0) van de motor genoemd.

Poolparen (p)	1	2	3	4	6
Aantal polen	2	4	6	8	12
n_0 [1/min]	3000	1500	1000	750	500

Tabel 1.01 Poolparen (p) - resp. het aantal polen - en het synchrone toerental van de motor

Het magneetveld

Het magneetveld roteert in de luchtspleet tussen stator en rotor. Na aansluiting van één van de fasenwikkelingen op één fase van de voedingsspanning wordt een magneetveld geïnduceerd.

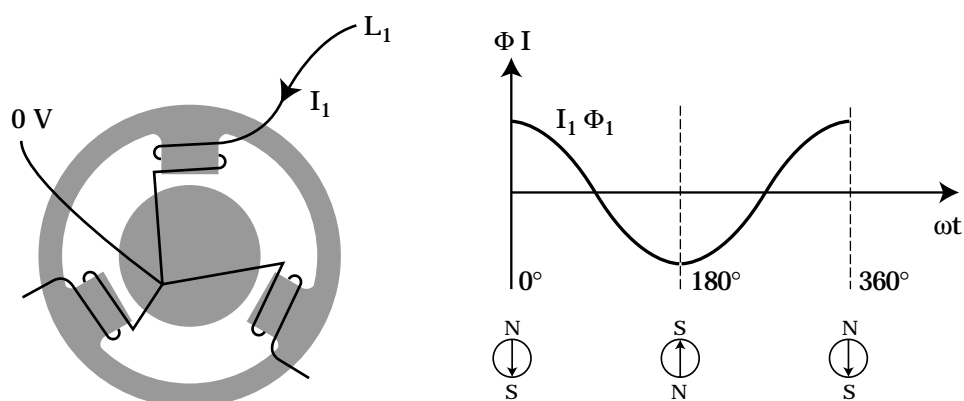
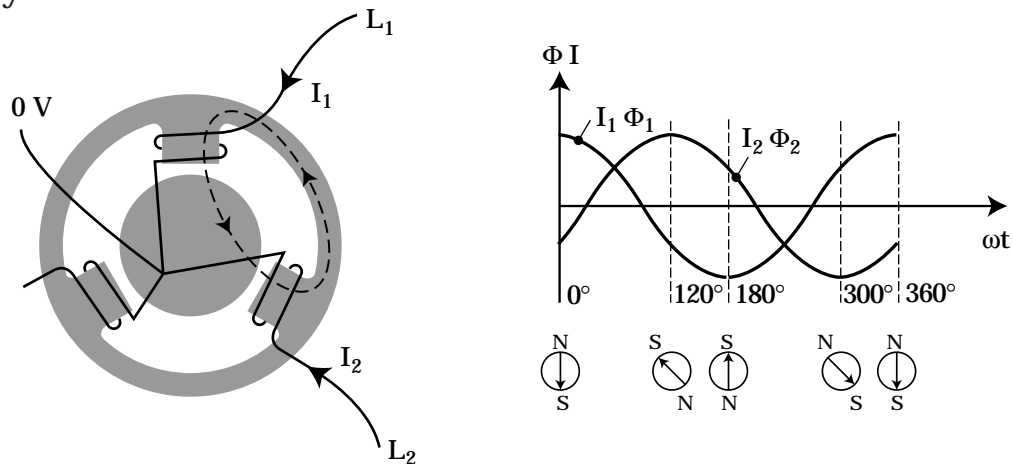


Fig 1.04 Eén fase resulteert in een wisselveld

Het magneetveld neemt een vaste plaats in de statorkern in, maar de richting ervan verandert voortdurend. De snelheid waarmee dat gebeurt wordt bepaald door de frequentie van de voedingsspanning. Bij een frequentie van 50 Hz verandert het wisselveld 50× per seconde van richting.

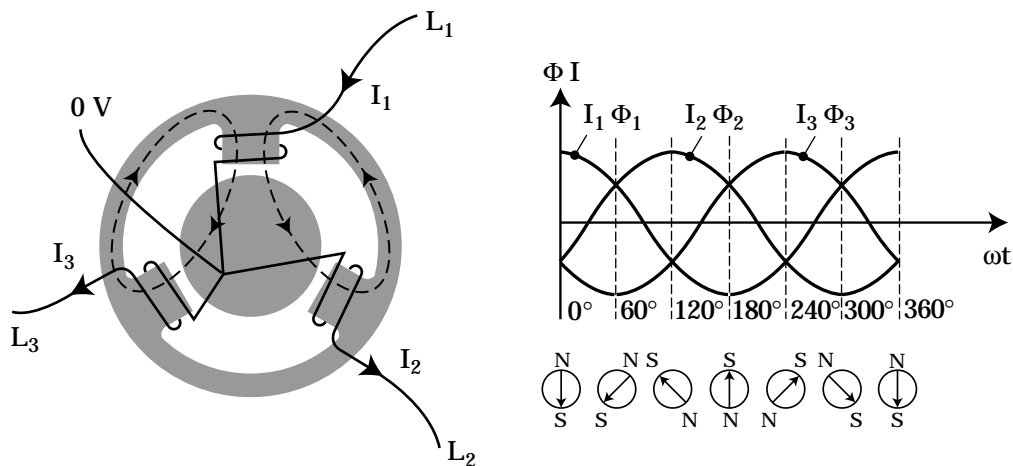
Worden tegelijkertijd twee fasenwikkelingen op de betreffende fase aangesloten dan ontstaan er twee magneetvelden in de statorkern. In een tweepolige motor is het ene veld ten opzichte van het andere 120° verschoven. De maximale waarden van de velden zijn ook in tijd verschoven.

Hierdoor ontstaat een magneetveld dat in de stator roteert. Dit veld is tot het koppel dat de derde fase wordt aangesloten zeer asymmetrisch.



Afb. 1.05 Twee fasen resulteren in een asymmetrisch draaiveld

Na aansluiting van de derde fase ontstaan er drie magneetvelden in de stator kern. In tijd zijn de drie fasen 120° ten opzichte van elkaar verschoven.



Afb. 1.06 Drie fasen resulteren in een symmetrisch draaiveld

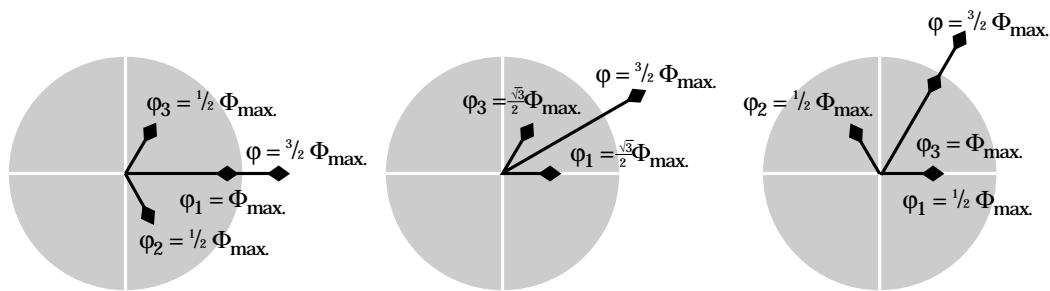
De stator is nu op de driefasenvoedingsspanning aangesloten. De magneetvelden van de afzonderlijke fasenwikkelingen vormen samen één symmetrisch, roterend magneetveld. Dit magneetveld wordt het draaiveld van de motor genoemd.

De amplitude van het draaiveld is constant en bedraagt 1,5 maal de maximale waarde van de wisselvelden. De omloopsnelheid van het draaiveld is:

$$n_0 = \frac{(f \times 60)}{p} \text{ [1/min]}$$

f = frequentie
 n_0 = synchrone toerental
 p = aantal poolparen

De omloopsnelheid is dus afhankelijk van het aantal poolparen (p) en de frequentie (f) van de voedingsspanning. De onderstaande tekening toont de grootte van de magnetische velden (Φ) op drie verschillende tijdstippen.



Afb. 1.07 De grootte van het magnetisch veld blijft constant

In de tekening van het draaiveld met een vector en overeenkomstige hoeksnelheid beschrijft deze een cirkel. Als functie van de tijd in een coördinatenstelsel beschrijft het draaiveld een sinuslijn. Het draaiveld wordt elliptisch als de amplitude in de loop van een omwenteling verandert.

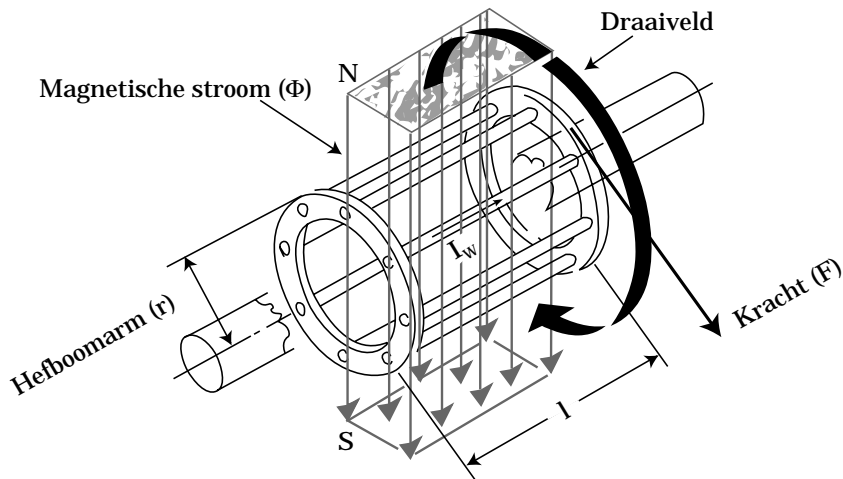
De rotor

De rotor (9) is op de motoras (10) gemonteerd (zie afb.1.03). Net als de stator is ook de rotor opgebouwd uit dunne ijzeren lamellen met uitgestante gleuven. Er zijn twee typen rotor: sleep-ringrotoren en kortsluitrotoren. Ze onderscheiden zich doordat de wikkelingen in de gleuven van elkaar verschillen.

Een sleep-ringrotor bestaat net als de stator uit gewikkelde spoelen die in de gleuven liggen. Er zijn spoelen voor iedere fase die naar de sleepringen gevoerd wordt. Na kortsluiting van de sleepringen gedraagt de rotor zich als kortsluitrotor.

Een kortsluitrotor heeft in de gleuven ingegoten aluminium staafjes. Deze staafjes zijn aan de beide uiteinden van de rotor met behulp van een aluminium ring kortgesloten.

De kortsluitrotor wordt het meest toegepast. Daar beide rotortypen in principe op dezelfde manier werken volgt hierna alleen een beschrijving van de kortsluitrotor.



Afb. 1.08 Draaiveld en kortsluitrotor

Door een rotorstaaf in het draaiveld te plaatsen loopt door de staaf een magnetische pool. Het magneetveld van de pool induceert een werkstroom (I_w) in de rotorstaaf die nu door een kracht (F) beïnvloed wordt (zie afb.1.08 en 1.09a). De grootte van deze kracht wordt bepaald door de fluxdichtheid (=sterkte van het magneetveld)(B), de geïnduceerde werkstroom (I_w), de lengte (l) van de rotor en de faseverhouding (q) tussen de kracht en de fluxdichtheid.

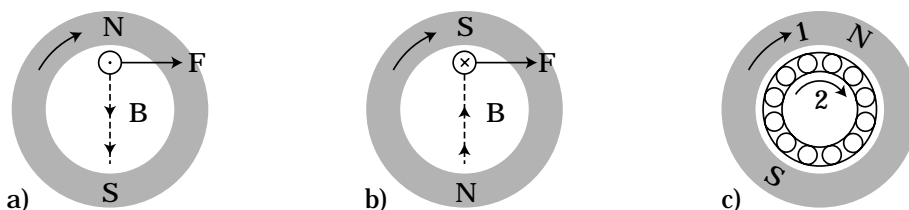
$$F = B \times I_w \times l \times \sin \theta$$

Als we aannemen dat $\theta = 90^\circ$ dan is de kracht

$$F = B \times I_w \times l \dots\dots\dots 1.01$$

De volgende pool die de rotorstaaf doorloopt heeft tegenovergestelde polariteit. Dit induceert een stroom in tegenovergestelde richting. Omdat de richting van het magneetveld intussen ook veranderd is blijft de kracht echter in dezelfde richting als tevoren werken (afb.1.09b).

Bevindt de complete rotor zich in het draaiveld (afb.1.09c) dan doen de op de rotorstaven werkende krachten de rotor draaien. De omwentelingssnelheid (2) van de rotor bereikt niet die van het draaiveld (1), omdat bij gelijke draaisnelheid geen stroom in de rotorstaven geïnduceerd wordt.



Afb. 1.09 Inductie in de rotorstaven

Slip, koppel en toerental

Onder normale omstandigheden is de omwentelingssnelheid n_n van de rotor iets kleiner dan de omloopsnelheid n_0 van het draaiveld.

$$n_0 = \frac{(f \times 60)}{p} \text{ [1/min]} \quad p = \text{aantal poolparen van de motor}$$

Het verschil tussen de snelheden van draaiveld en rotor heet slip (s):

$$s = n_0 - n_n$$

Slip wordt meestal uitgedrukt in een percentage van het synchrone toerental:

$$s = \frac{n_0 - n_n}{n_0} \times 100[\%]$$

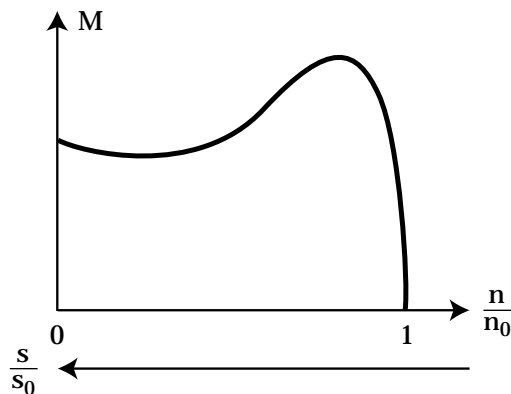
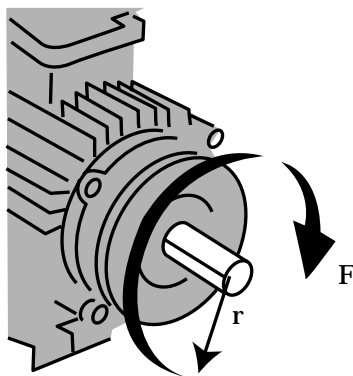
Normaal gesproken bedraagt de slip 4 – 11%. De fluxdichtheid (B) is gelijk aan de flux (Φ) per dwarsdoorsnede (A). Daaruit resulteert met behulp van formule 1.01 de kracht:

$$F = \frac{\Phi \times I_w \times l}{A} \dots\dots\dots 1.02$$

$$F \sim \Phi \times I_w$$

De kracht waarmee de stroomvoerende geleider zich verplaatst is evenredig aan de magnetische stroom (Φ) en de stroomsterkte (I_w) in de geleider.

Het magneetveld induceert een spanning in de rotorstaafjes. Deze spanning veroorzaakt een stroom (I_w) in de kortgesloten rotorstaafjes. De krachten van de rotorstaafjes worden op de as van de motor gebundeld tot het koppel M.



Afb. 1.10 Het koppel is 'kracht maal hefboomarm'

De relatie tussen het koppel en het toerental van de motor toont een karakteristiek verloop dat afhankelijk is van de vorm van de rotorgroeven.

Met het koppel van de motor wordt de kracht (de 'draaiing') aangegeven die aan de motoras ontstaat.

Het is de kracht die bijv. ontstaat aan de omtrek van een op de as gemonteerd vliegwiel. Het koppel van de motor (M) is $F \times r$, waarin F de kracht is en r de straal van het vliegwiel.

De door de motor verrichte arbeid (W) is $F \times d$, waarin d de afstand is waarover een motor een bepaalde belasting trekt en n het aantal omwentelingen: $d = n \times 2 \times \pi \times r$.

Arbeid kan ook worden aangeduid als het product van het afgegeven vermogen (P) en de tijd (t) waarin dat vermogen werkzaam is: $W = P \times t$.

Het koppel is dan:

$$M = F \times r = \frac{W}{d} \times r = \frac{(P \times t \times r)}{n \times 2 \pi \times r}$$

$$M = \frac{P \times 9550}{n} \quad (t = 60 \text{ sec.})$$

Deze formule geeft de relatie aan tussen het toerental n [omw/min], het koppel M [Nm] en het door de motor afgegeven vermogen P [kW].

Gebruiken we formule voor de n -, M - en P -waarden die op een bepaald werkpunt van toepassing zijn (n_r , M_r en P_r) dan weten we onmiddellijk het effectief vermogen. Het werkpunt is in de regel het nominale werkpunt van de motor en de formule luidt dan:

$$M_r = \frac{P_r}{n_r} \quad \text{d.w.z.} \quad P_r = M_r \times n_r,$$

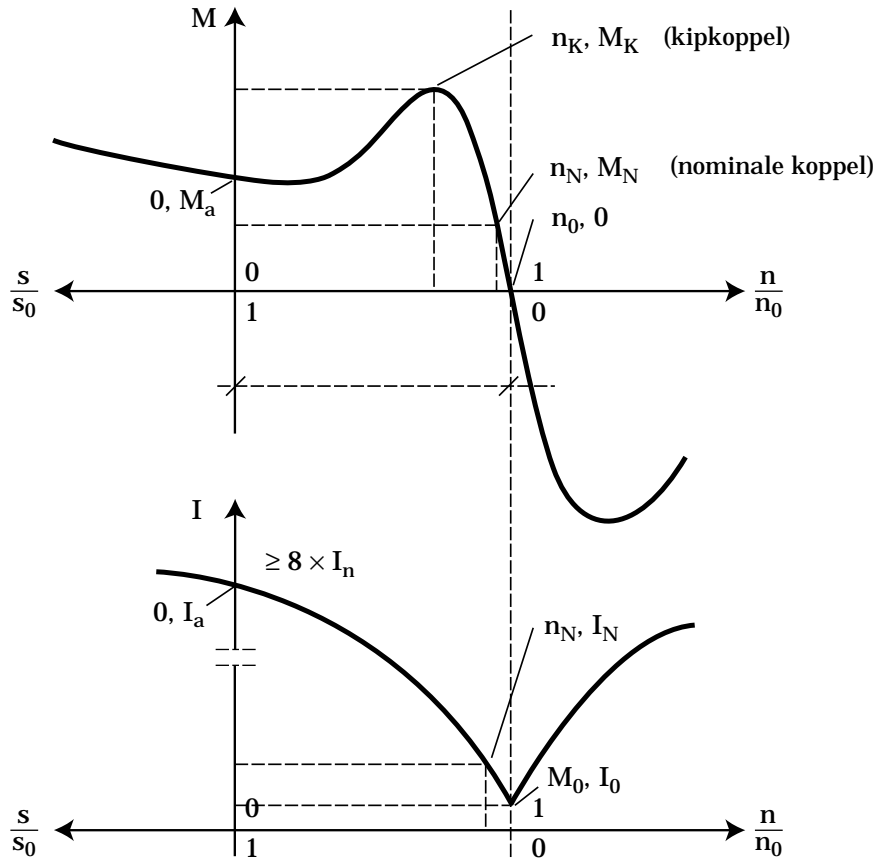
$$\text{waarin } M_r = \frac{M}{M_n}, \quad P_r = \frac{P}{P_n} \quad \text{en } n_r = \frac{n}{n_n}$$

De constante 9550 vervalt in deze berekening.

Voorbeeld:

De belasting is 15% van de nominale belasting en het toerental 50% van het nominale toerental. Het afgegeven vermogen is dan 7,5% van het nominale afgegeven vermogen, omdat $P_r = 0,15 \times 0,50 = 0,075$.

Behalve met het normale werkbereik van de motor hebben we ook te maken met twee rembereiken.



Afb. 1.11 Stroom- en koppelkrommen van de motor

Bi $\frac{n}{n_0} > 1$, wordt de motor door de belasting over zijn synchrone toerental getrokken en werkt dan als generator. De motor levert in dat geval een invers koppel en geeft vermogen terug aan het voedingsnet.

Het remmen bij $\frac{n}{n_0} < 0$ heet remmen met tegenstroom.

Als twee fasen van een motor plotseling verwisseld worden verandert het draaiend van loopricting. Direct daarop wordt de toerentalverhouding $\frac{n}{n_0} = 1$.

De motor die tot dat ogenblik met het koppel M belast was remt nu met een remkoppel. Wordt de motor niet bij $n = 0$ uitgeschakeld dan blijft hij lopen in de nieuwe omlooprichting van het draaiveld.

Bij $0 < \frac{n}{n_0} < 1$ functioneert de motor binnen zijn normale werkbereik.

Het werkbereik van de motor is in twee delen te splitsen: het aanloopbereik $0 < \frac{n}{n_0} < \frac{n_k}{n_0}$ en het werkbereik $\frac{n_k}{n_0} < \frac{n}{n_0} < 1$

Binnen het werkgebied van de motor liggen enkele belangrijke koppels:

M_a is het startkoppel van de motor, d.w.z. het koppel dat de motor opbouwt als bij stilstand de nominale spanning en frequentie worden aangelegd.

M_k is het kipkoppel van de motor, d.w.z. het maximale koppel dat de motor kan leveren bij nominale spanning en frequentie.

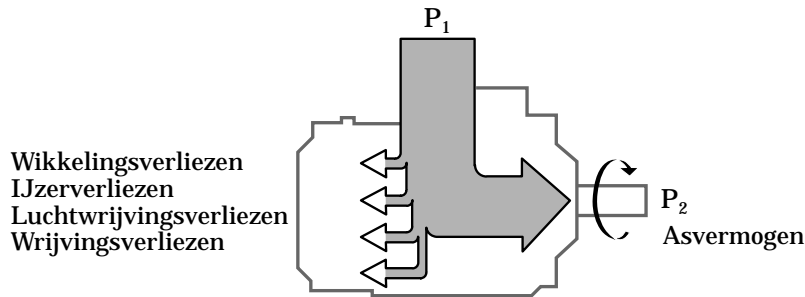
M_N is het koppel waarbij de motor met nominale snelheid loopt. De op het motorplaatje vermelde nominale waarden zijn die mechanische en elektrische grootheden waarvoor de motor volgens norm IEC 34 ontworpen is. De nominale waarden van de motor geven aan wat het optimale werkpunt van de motor is bij rechtstreekse aansluiting op het voedingsnet.

Rendement en verlies

De motor ontvangt elektrisch vermogen van het voedingsnet. Dit vermogen is bij constante belasting groter dan de mechanische energie die de motor kan afgeven aan de as. Dit wordt veroorzaakt door diverse verliezen die in de motor optreden. De verhouding tussen het afgegeven en het opgenomen vermogen bepaalt het rendement η van de motor:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\text{afgegeven vermogen}}{\text{opgenomen vermogen}}$$

Het rendement van een motor ligt – afhankelijk van zijn grootte en het aantal polen – tussen 0,7 en 0,9.



Afb. 1.12 Verliezen in de motor

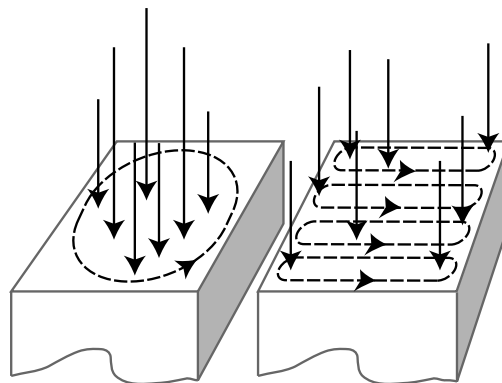
De verliezen in de motor bestaan uit:

Wikkelingsverliezen in de ohmse weerstanden van de stator- en rotorwikkelingen.

IJzerverliezen bestaande uit hysteresis- en wervelstroomverliezen. Hysteresisverliezen ontstaan als het ijzer door een wisselstroom gemagnetiseerd wordt. Het ijzer moet voortdurend gdemagnetiseerd worden: bij een voedingsspanning van 50 Hz 100 maal per seconde. Zowel het magnetiseren als het demagnetiseren kost energie. De motor neemt vermogen op ter compensatie van de hysteresisverliezen die toenemen met de frequentie en de magnetische inductie.

Wervelstroomverliezen ontstaan doordat de magneetvelden elektrische spanningen induceren in de ijzerkern en alle overige geleiders. Deze spanningen veroorzaken stromen die rond de magneetvelden cirkelen en tot warmteverlies leiden.

Wervelstroomverliezen worden beduidend geringer als de ijzerkern opgebouwd is uit dunne lamellen.



Afb. 1.13 Door de lamellenconstructie van de ijzerkern worden de wervelstroomverliezen kleiner

Luchtwrijvingsverliezen zijn te wijten aan de luchtweerstand die de ventilator van de motor ondervindt.

Wrijvingsverliezen ontstaan in de kogellagers van de rotor. In de praktijk worden bij het bepalen van het rendement en afgegeven vermogen van de motor de verliezen in de motor van het toegevoerde vermogen afgetrokken.

Het toegevoerde vermogen wordt gemeten, de verliezen berekend of experimenteel vastgesteld.

Het magneetveld

De motor is ontworpen voor de vaste spanning en frequentie van het voedingsnet. De mate van magnetisering van de motor wordt bepaald door de verhouding tussen die spanning en frequentie.

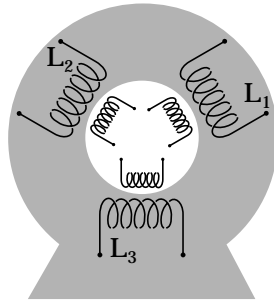
Als de spanning/frequentie-verhouding groter wordt raakt de motor overgemagnetiseerd. Wordt de verhouding kleiner dan wordt hij ondergemagnetiseerd. Een ondergemagnetiseerde motor heeft een zwak magneetveld. Het koppel dat de motor kan ontwikkelen is dus kleiner. Dit kan tot gevolg hebben dat de motor niet aanloopt of stopt. De tijd nodig om op toeren te komen kan langer worden en de motor overbelast raken.

Een overgemagnetiseerde motor wordt tijdens normaal bedrijf overbelast. Het vermogen voor de extra magnetisering wordt in de motor in warmte omgezet en kan in het ergste geval de isolatie beschadigen. Draaistroommotoren – en asynchroonmotoren in het bijzonder – zijn echter zeer robuust gebouwd. Met het probleem van onjuiste magnetisering en de overbelasting die er het gevolg van is behoeft daarom alleen rekening te worden gehouden bij continubedrijf.

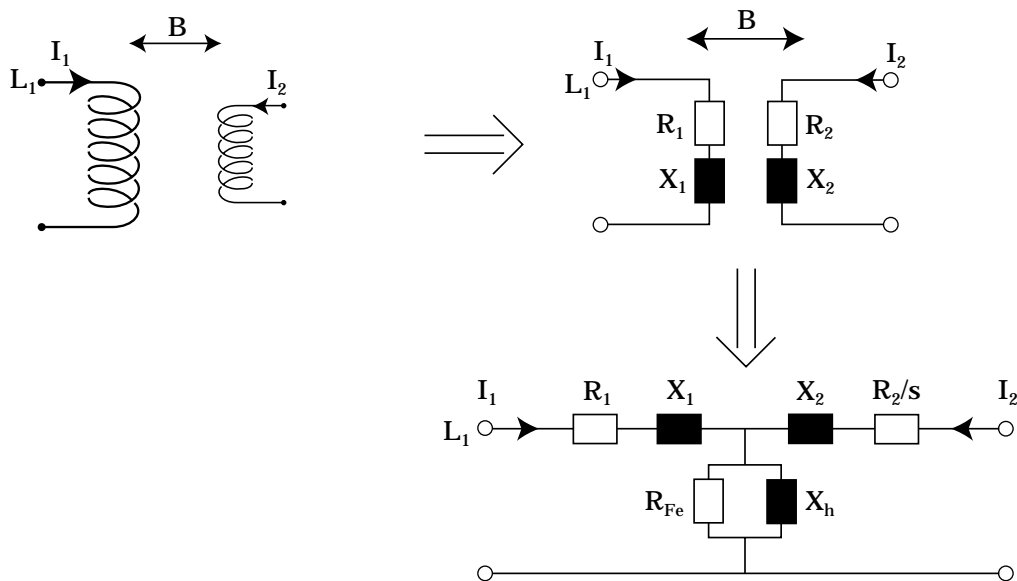
Of de magnetiseringsverhouding slecht is blijkt uit de manier waarop de motor loopt (bij wisselende belasting zakt het toeren-tal, de motor hapert, e.d.).

Vereenvoudigd schakelschema

Asynchroonmotoren hebben in principe zes spoelen. Drie spoelen in de stator en drie in de kortsluitrotor (die zich magnetisch gedraagt alsof hij uit drie spoelen bestaat). Hoe de motor zich gedraagt als bijv. de frequentie van de voedingsspanning verandert kan duidelijk gemaakt worden met behulp van een elektrisch schema gebaseerd op slechts één stel spoelen.



Afb. 1.14a Stator en rotor



Afb. 1.14b Vereenvoudigd motorschakelingsschema (voor fase L_1)

De stroom van de statorspoel wordt niet alleen door de ohmse weerstand van de spoel begrensd. In iedere spoel waarop een wisselspanning wordt aangelegd ontstaat een wisselstroomweerstand. Deze weerstand – reactantie' genoemd en in Ohms [Ω] gemeten – is $X_R = 2 \times \pi \times f \times L$ waarin f de frequentie is en $2 \times \pi \times f$ de radiaalfrequentie ω per sec vertegenwoordigt.

L is de inductiviteit van de spoel en wordt in Henry [H] gemeten. De afhankelijkheid van de frequentie heeft een beperkende invloed op de werkstroom.

De spoelen beïnvloeden elkaar wederzijds door magnetische inductie (B). De rotorespoel wekt een stroom op in de statorspoel en omgekeerd (afb.1.14b). Deze wederzijdse beïnvloeding betekent dat een koppelverbinding tussen beide elektrische

kringen aangebracht kan worden via een gemeenschappelijk element. Dat gemeenschappelijke element bestaat uit de inverse weerstand R_{Fe} en de inverse reactantie X_h . Hierdoor verplaatst zich de stroom die door de motor opgenomen wordt voor het magnetiseren van de stator en rotor. De spanningsval over dit 'inverse element' wordt inductiespanning genoemd.

Bedrijfsvoorwaarden voor de motor

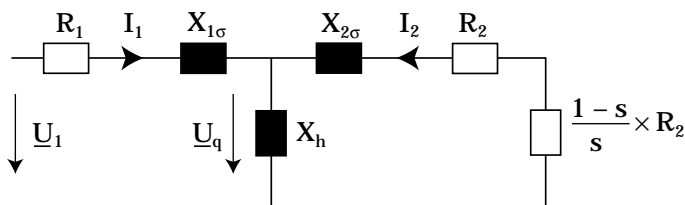
Met een belasting van de motor hebben we tot nu nog geen rekening gehouden. Als de motor binnen zijn normale werkbereik gebruikt wordt is de rotorfrequentie kleiner dan de frequentie van het draaiveld. Hierbij wordt X_2 met de factor s (slip) verkleind.

Het effect van het veranderen van de rotorweerstand R_2 met de factor $\frac{1}{s}$ wordt in het vereenvoudigde schakelschema getoond.

$\frac{R_2}{s}$ kan worden vervangen door $R_2 + R_2 \times \frac{1-s}{s}$ waarin $R_2 \times \frac{1-s}{s}$ de mechanische belasting van de motor vertegenwoordigt.

De grootheden R_2 en X_2 hebben betrekking op de rotor.

R_2 is de oorzaak van het warmteverlies dat in de rotorstaafjes ontstaat als de motor belast wordt.



Afb. 1.15 Vereenvoudigd schakelschema voor een belaste motor

In een onbelast draaiende motor is de slip klein (in de buurt van nul).

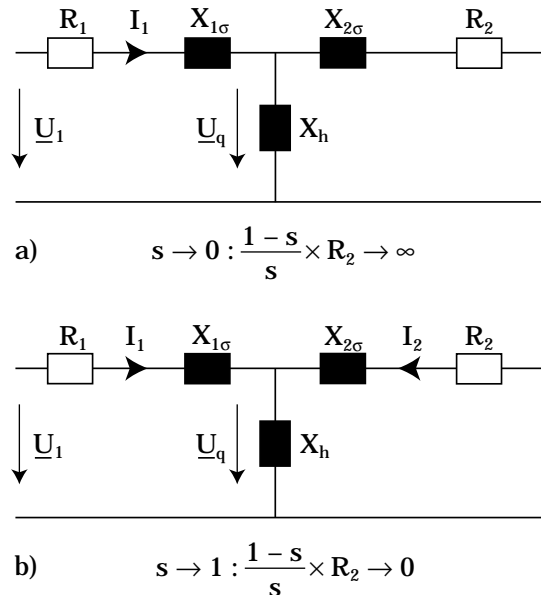
Dit betekent dat $R_2 \times \frac{1-s}{s}$ groter wordt en er vrijwel geen stroom in de rotor kan vloeien. Theoretisch zou dit probleem opgelost kunnen worden door de weerstand die voor de mechanische belasting zorgt uit het vereenvoudigde schakelschema te verwijderen.

Zodra de motor belast wordt neemt de slip toe.

Het gevolg is dat $R_2 \times \frac{1-s}{s}$ kleiner wordt.

Met het groter worden van de belasting neemt ook de stroom I_2 in de rotor toe.

Het vereenvoudigde schakelschema geeft dus inderdaad de omstandigheden weer waarmee de asynchroonmotor in de praktijk te maken heeft en kan in allerlei gevallen dienst doen om duidelijk te maken wat er in de motor gebeurt.



Afb. 1.16 Schema onbelast (a) en bij geblokkeerde rotor (b)

De inductiespanning (\underline{U}_q) wordt dikwijls verwisseld met de klemmenspanning van de motor. Oorzaak daarvan is de vereenvoudiging van het schakelschema, bedoeld om een beter inzicht te verschaffen in factoren die voor de motor een rol spelen. De inductiespanning komt echter alleen bij nullast bij benadering overeen met de klemmenspanning.

Als de belasting groter wordt neemt I_2 – en dus ook I_1 – toe en moet rekening worden gehouden met spanningsval. Dat is van belang, zeker in het geval van een motor die met een frequentieomvormer gestuurd wordt.

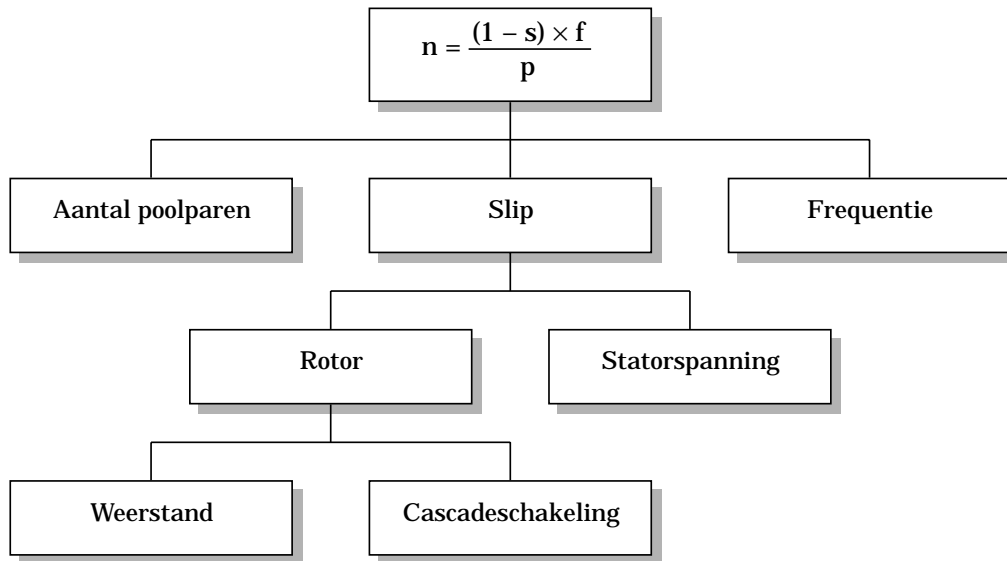
Toerentalregeling

Het toerental n van de motor hangt samen met de omloopsnelheid van het draaiveld. Dit kan worden uitgedrukt in de volgende formule:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad \text{waarin} \quad n = \frac{(1 - s) \times f}{p}$$

Het toerental van de motor kan dus veranderd worden door wijziging van:

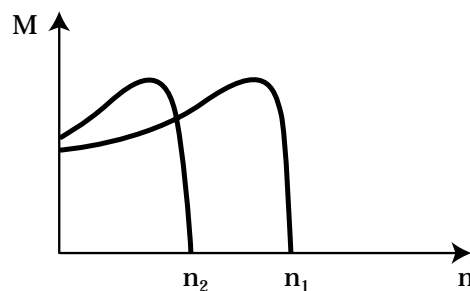
- het aantal poolparen p van de motor (zoals bijv. in poolomschakelbare motoren)
- de slip van de motor (zoals bijv. in motoren met een sleepringrotor)
- de frequentie f van de voedingsspanning van de motor.



Afb. 1.17 Mogelijkheden om het toerental van de motor te veranderen

Wijziging van het aantal polen

De omloopsnelheid van het draaiveld wordt bepaald door het aantal poolparen van de stator. In een tweepolige motor bedraagt de omloopsnelheid van het draaiveld 3000 omw/min als de motorvoedingsfrequentie 50 Hz is. Bij een vierpolige motor is de omloopsnelheid van het draaiveld 1500 omw/min.



Afb. 1.18 Koppelenkrommen bij verandering van het aantal poolparen

Motoren kunnen voor twee verschillende aantallen poolparen gebouwd worden. Dit gebeurt door de statorwikkelingen op een speciale manier in de groeven te leggen: als Dahlander-wikkeling of als twee gescheiden wikkelingen. In motoren met meerdere aantallen polen worden deze manieren van wikkelen gecombineerd.

De snelheidsverandering geschiedt door de statorwikkelingen om te schakelen waardoor het aantal poolparen in de stator gewijzigd wordt.

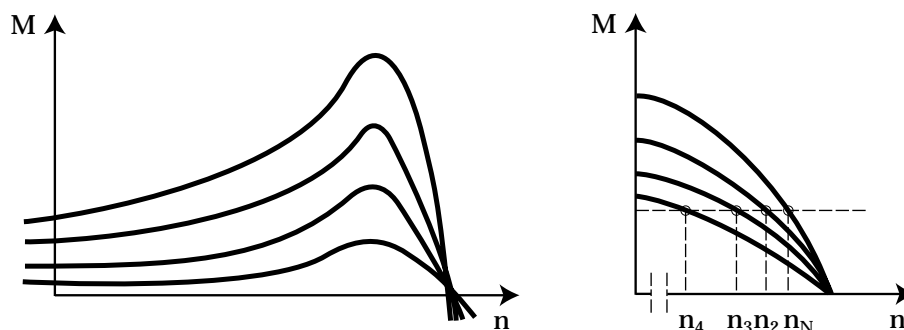
Door van een klein aantal poolparen (grote snelheid) over te schakelen op het maximum aantal poolparen (lage snelheid) loopt het werkelijke toerental van de motor in één klap terug van bijv. 1500 naar 750 omw/min. Bij snel omschakelen passeert de motor zijn generatorgebied, hetgeen zowel voor de motor als het mechanisme van de aangedreven installatie een zware belasting betekent.

Slipregeling

Het toerental van de motor kan op twee manieren met slip geregeld worden: door de voedingsspanning van de stator te wijzigen of door een ingreep aan de rotor.

Wijziging van de statorspanning

Het toerental van asynchroonmotoren kan gestuurd worden door de motorvoedingsspanning te wijzigen (bijv. met een soft-starter) zonder de frequentie te veranderen. Dit kan, omdat het koppel van de motor kwadratisch met de spanning omlaag gaat.



Afb. 1.19 Koppelkrommen bij wijziging van de statorspanning en dus ook de slip

In de koppelkrommen is te zien dat stabiele werkpunten uitsluitend in het werkbereik ($n_k < n < n_0$) bereikbaar zijn. Bij sleepringrotormotoren worden, door in de rotorwikkelingen weerstanden bij te schakelen, ook tijdens het aanlopen ($0 < n < n_k$) stabiele werkpunten bereikt.

Rotorsturing

Er zijn twee mogelijkheden om in te grijpen in de rotor. De eerste methode is het bijschakelen van ohmse weerstanden in de rotorkring.

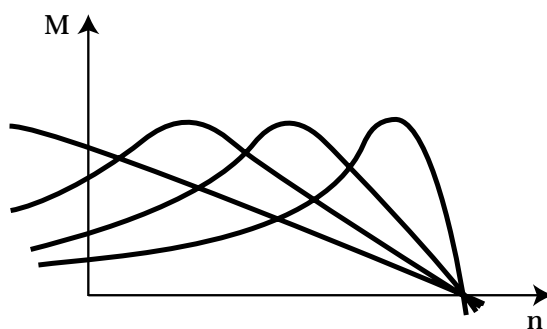
Bij de tweede methode wordt de rotorkring via cascadeschakelingen met andere elektrische machines of gelijkrichterkringen verbonden.

Rotorsturing is alleen mogelijk bij sleepringmotoren, omdat de rotorwikkelingen aan de sleepringen van die motoren bereikbaar zijn.

Verandering van de rotorweerstand

De snelheid van de motor wordt gestuurd door de sleepringen met ohmse weerstanden te verbinden. Het toerental van de motor verandert onder invloed van het toenemende vermogensverlies in de rotor. Als het vermogensverlies in de motor groter wordt neemt de slip toe en het toerental af.

De ohmse weerstanden zijn over het algemeen variabelen het is dan ook belangrijk dat de bedrijfstemperatuur wordt gehandhaafd.



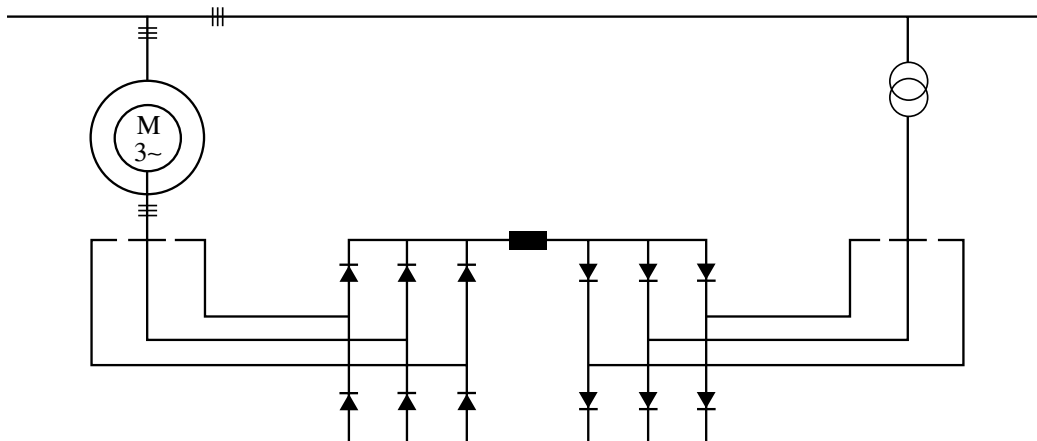
Afb. 1.20 Koppelkrommen bij wijziging van de rotorweerstand en dus ook de slip

Zoals afb.1.20 laat zien behoudt het kipkoppel zijn grootte. Verschillende afstellingen bij gelijkblijvende belasting resulteren in uiteenlopende toerentallen. Een ingesteld toerental is dus afhankelijk van de belasting. Als de belasting op de motor afneemt stijgt het toerental tot ongeveer het synchrone toerental. De ohmse weerstanden zijn meestal variabel en dienen thermisch aan de werkomstandigheden te zijn aangepast.

Cascadeschakelingen

In plaats van met ohmse weerstanden wordt de rotorkring via de slepringen verbonden met gelijkstroommachines of gestuurde gelijkrichterkringen.

Gelijkstroommachines verschaffen de rotorkring van de motor een bijkomende regelbare spanning. Dit maakt het mogelijk invloed uit te oefenen op het toerental en de magnetisering van de rotor. Deze wijze van sturen van de snelheid van motoren werd vroeger hoofdzakelijk gebruikt voor elektrische spoorwegnetten.



Afb. 1.21 Een typische cascadeschakeling

In plaats van gelijkstroommachines kunnen ook gestuurde gelijkrichterschakelingen gebruikt worden. Het toepassingsbereik blijft dan beperkt tot installaties met bijv. pompen of ventilatoren.

Frequentieverandering

Een variabele voedingsfrequentie maakt het mogelijk het toerental van de motor te sturen zonder dat verliezen optreden. Door de frequentie te veranderen verandert ook de omloopsnelheid van het draaiveld.

Het toerental van de motor verandert evenredig met de omloopsnelheid van het draaiveld.

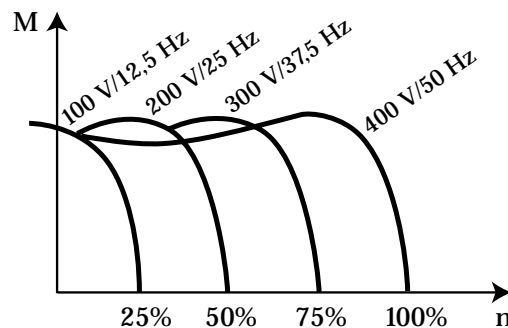
Om te zorgen dat het koppel behouden blijft dient met de frequentie ook de motorspanning gewijzigd te worden.

Bij een gegeven belasting geldt:

$$M = \frac{P \times 9550}{n} = \frac{\eta \times \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi \times 9550}{f \times \frac{60}{p}} = k \times \frac{U}{f} \times I$$

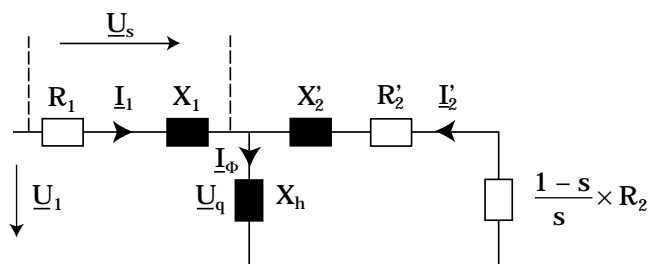
$$M \sim \frac{U}{f} \times I$$

Als de tussen de voedingsspanning van de motor en de frequentie constant is blijft ook de magnetisering binnen het nominale werkbereik van de motor constant.



Afb. 1.22 Koppelkrommen bij spanning/frequentiesturing

De magnetisering is in twee gevallen niet optimaal: bij opstarten en erg lage frequenties, in welk geval aanvullende magnetisering nodig is, en als de belasting varieert, zodat de magnetisering aan de belasting aangepast moet kunnen worden.



Afb. 1.23 Vereenvoudigd motorschakelingschema

Aanvullende startmagnetisering

Van belang is de verhouding tussen de spanningsval \underline{U}_s en de inductiespanning \underline{U}_q .

Klemmenspanning: $\underline{U}_1 = \underline{U}_s + \underline{U}_q = \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{X1} + \underline{U}_q$

Statorreactantie: $X_1 = 2 \times \pi \times f \times L$

De motor is gebouwd voor zijn nominale waarden. De magnetiseringsspanning \underline{U}_q voor een motor kan b.v 370 V zijn bij $U_1 = 400$ V en $f = 50$ Hz. Bij die nominale waarden vindt optimale magnetisatie plaats.

De verhouding tussen spanning en frequentie is $\frac{400}{50} = 8 \frac{[V]}{[Hz]}$

Wordt de frequentie verlaagd tot 2,5 Hz dan bedraagt de spanning 20 V. Door de lagere frequentie wordt de statorreactantie X_1 kleiner. De spanningsverlaging heeft geen invloed op de totale spanningsverlaging in de stator, want die wordt uitsluitend door R_1 bepaald. Naar de nominale waarden gemeten komt dat op ca. 20 V neer, omdat de motorstroom afhangt van de belasting.

De klemmenspanning komt nu overeen met de spanningsverlaging via statorweerstand R_1 . Er is geen spanning beschikbaar voor het magnetiseren van de motor. De motor kan bij lage frequenties geen koppel afgeven als de verhouding tussen spanning en frequentie in het gehele bereik constant wordt gehouden. Bij het opstarten en bij lage frequenties moet de spanningsverlaging dus gecompenseerd te worden.

Belastingafhankelijke magnetisering

Na aanpassing van de motor met aanvullende startmagnetisering bij lage frequenties doet zich bij werken met geringe belasting overmagnetisering voor. In dat geval daalt de statorstroom I_1 en stijgt de inductiespanning \underline{U}_q .

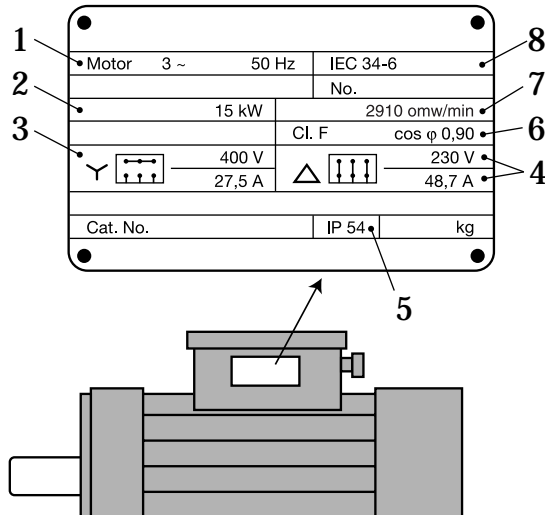
De motor neemt een te grote blindstroom op en wordt onnodig heet. Voor het magnetiseren van de motor is dus nodig dat de spanning naar de motor automatisch aangepast wordt aan de belasting.

De motor wordt optimaal gemagnetiseerd als rekening wordt gehouden met de frequentie en wisselende belasting.

Motorgegevens

De motor is voorzien van een daarop vast gemonteerd motorplaatje. Hierop staan alle essentiële gegevens van de motor vermeld.

Verdere gegevens treft u in de motorcatalogus aan.



Afb. 1.24 Het motorplaatje bevat veel gegevens

Voorbeeld

Het motorplaatje (afb.1.24) van een tweepolige motor bevat de navolgende gegevens:

1. De motor heeft drie fasen en is bestemd voor een voedingsnet met een frequentie van 50 Hz.
2. Het nominale vermogen van de motor is 15 kW, d.w.z. dat hij bij aansluiting op het aangegeven voedingsnet een asvermogen van minimaal 15 kW kan leveren. Het nominale vermogen van asynchroonmotoren is vastgelegd in een gestandariseerde reeks. Dit biedt de gebruiker de vrije keus uit alle fabrikanten die een motor voor de gewenste toepassing kunnen leveren. De standaardreeks omvat de volgende vermogens:

kW	0,06	0,09	0,12	0,18	0,25	0,37	0,55	0,75	1,10	1,50	2,20	3,00
kW	4,00	5,50	7,50	11,0	15,0	18,5	22,0	30,0	37,0	45,0	55,0	75,0

Tabel 1.02 Motorvermogensreeks

Het afgegeven vermogen van motoren werd vroeger in paardenkrachten (pk) uitgedrukt. Komt u die eenheid nog ergens tegen dan geldt de omrekeningsformule:

$$1 \text{ pk} = 0,736 \text{ kW.}$$

3-4. De statorwikkelingen kunnen in 'ster' of 'driehoek' geschakeld worden.

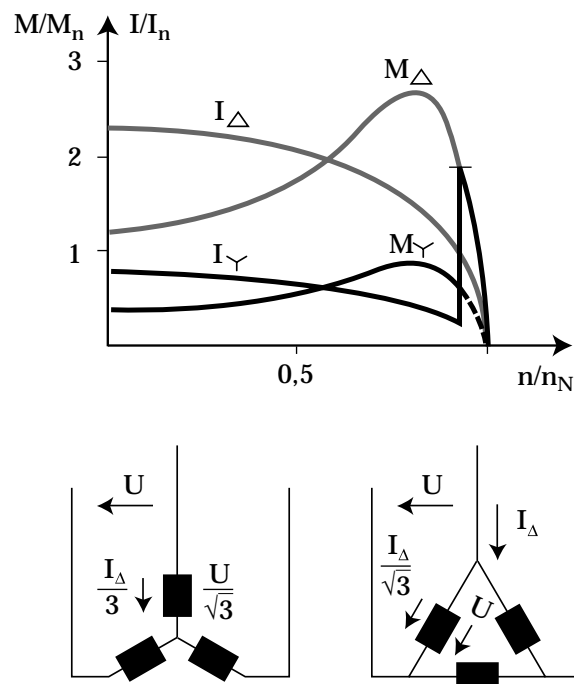
Bij een aansluitspanning van 400 V moeten de wikkelingen in 'ster' geschakeld zijn. De motorstroom bedraagt dan 27,5 A per fase.

Bij een aansluitspanning van 230 V moeten de wikkelingen in 'driehoek' geschakeld zijn. De motorstroom bedraagt dan 48,7 A per fase.

Op het koppel van opstarten, als de stroom 4-10 maal groter dan de nominale stroom is, kan het leidingnet overbelast raken.

Elektriciteitsbedrijven schrijven daarom voor zwaardere motoren een gereduceerde startstroom voor.

Die reductie van de startstroom is bijv. te realiseren door de motor in ster te laten aanlopen en pas daarna over te gaan tot driehoeksschakeling.



Afb. 1.25 Koppel en stroom van de motor bij ster(Y)- en driehoek(Δ)-schakeling

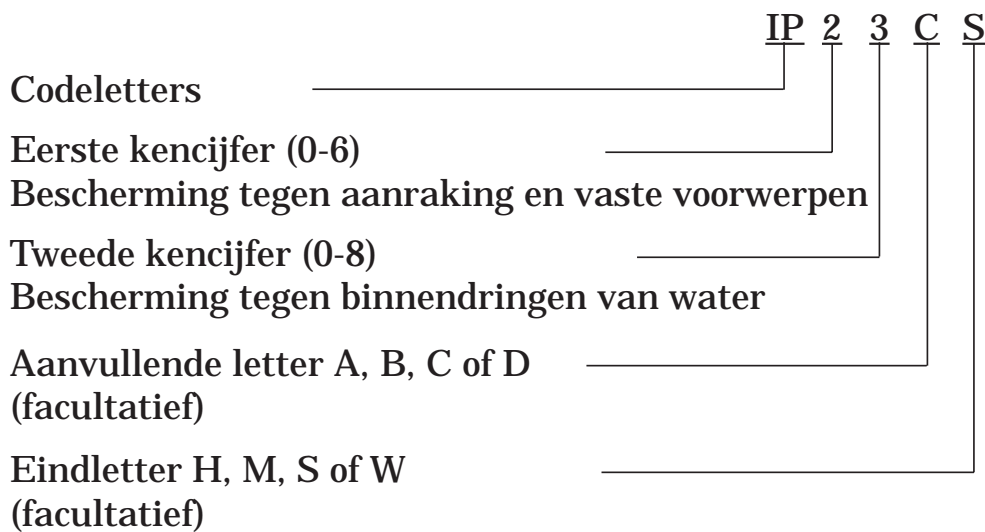
Vermogen en koppel worden tot op $1/3$ teruggebracht. De motor kan dus niet bij vollast aanlopen.

Een voor driehoeksschakeling ontworpen motor wordt overbelast als bij volle belasting niet op driehoekbedrijf wordt omgeschakeld.

5. De beschermingscode van de motor geeft de mate van bescherming aan tegen het binnendringen van vloeistoffen en vaste voorwerpen.

De codering in afb.1.26 is gebaseerd op de internationale norm IEC Publicatie 34-5.

Het type bescherming (omhulsel) wordt aangegeven met de letters IP (International Protection) en twee cijfers, resp. voor de bescherming tegen aanraking en vaste voorwerpen (eerste kencijfer) en tegen het binnendringen van water (tweede kencijfer). Zo nodig kunnen hieraan andere (aanvullende) letters en/of eindletters worden toegevoegd. Een IP-code ziet er in principe dus zo uit:



Ten aanzien van de opbouw en toepassing van de IP-code valt het volgende op te merken:

- Als er geen noodzaak is een bepaald kencijfer te vermelden dient op de opengebleven plaats de letter 'X' te worden ingevuld.
- Aanvullende en/of eindletters kunnen vervallen zonder dat er iets anders hoeft te worden ingevuld.
- Als er meer dan één aanvullende letter nodig is dienen ze in alfabetische volgorde te worden ingevuld.

Het bereik van de verschillende beschermingsvormen is verkort in afb.1.26 weergegeven.

Ken- ciffer	Eerste cijfer		Tweede cijfer
	Aanraking	Bescherming tegen:	
		Vaste voorwerpen	Water
0	geen	geen	geen
1	met de handrug	vaste voorwerpen Ø50 mm	loodrecht druppelend water
2	met de vingers	vaste voorwerpen Ø12,5 mm	schuin (15°) druppelend water
3	met gereedschap	vaste voorwerpen Ø2,5 mm	sproeiwater onder hoeken tot 60°
4	met een draad	vaste voorwerpen Ø1 mm	spatwater uit elke richting
5	met een draad	stofvrij	waterstralen
6	met een draad	stofdicht	krachtige waterstralen
7	–	–	tijdelijke onderdompeling in water
8	–	–	langdurige onderdompeling in water

Afb. 1.26 Beschermingscode voor motoren vlg. IEC 34-5

De aanvullende (facultatieve) letter geeft de mate aan waarin personen beschermd zijn tegen aanraking van gevaarlijke onderdelen met:

- de handrug letter A
- vingers letter B
- gereedschap letter C
- draad letter D

De (facultatieve) eindletter betreft de bescherming van de motor en verschaft aanvullende informatie met name ten aanzien van:

- hoogspanningsapparatuur letter H
- waterdichtheid tijdens bedrijf letter M
- waterdichtheid bij stilstand letter S
- weersomstandigheden letter W

Bij motoren die stofvrij zijn (eerste kencijfer: 5) is het binnendringen van stof niet totaal uitgesloten, maar mag slechts mogelijk zijn in een hoeveelheid die een bevredigend functioneren van de motor niet belemmert en de veiligheid niet in gevaar brengt.

Bescherming tegen water houdt tot kencijfer 6 in dat ook voldaan wordt aan de eisen voor de lagere kencijfers. Een motor code IPX7 (tijdelijke onderdompeling) of IPX8 (langdurige onderdompeling) behoeft niet noodzakelijkerwijs eveneens beschermd te zijn tegen waterstralen (IPX5) of krachtige waterstralen (IPX6). Als wel aan die beide eisen wordt voldaan dient dat te worden aangegeven met een dubbele code, bijv. IPX5/IPX7.

Voorbeeld: IP 65 geeft aan dat de motor stofdicht is en beveiligd tegen aanraking en straalwater.

6. De door een motor opgenomen nominale stroom I_s wordt 'schijnstroom' genoemd en kan in twee stromen verdeeld worden: werkstroom I_w en blindstroom I_B . $\cos \varphi$ geeft aan in welke mate de werkstroom bij nominale belasting bijdraagt tot de motorstroom.

De werkstroom wordt omgezet in asvermogen terwijl de blindstroom het vermogen is dat voor het opbouwen van een magneetveld in de motor nodig is. Wordt het magneetveld later opgebouwd dan wordt magnetiseringsstroom teruggeleverd aan het voedingsnet.

'Blind' betekent dat de stroom zich heen en weer verplaatst in de leidingen zonder tot het asvermogen bij te dragen.

De schijnstroom die door de motor wordt opgenomen uit het net is geen eenvoudige optelsom van werkstroom en blindstroom, want deze beide stromen zijn in tijd verschoven. De grootte van de verschuiving hangt af van de frequentie van het voedingsnet. Bij een frequentie van 50 Hz is de verschuiving tussen blind- en werkstroom 5 milliseconden. We moeten ze dus geometrisch bij elkaar optellen:

$$I_s = \sqrt{I_w^2 + I_B^2}$$

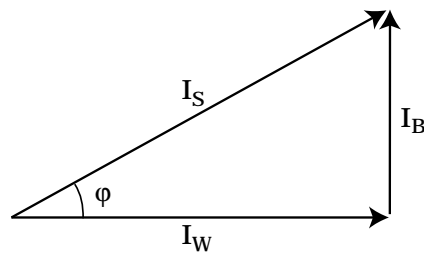
Werk- en blindstroom kunnen worden gezien als de korte zijden van een rechthoekige driehoek. De hypotenusa is gelijk aan de vierkantswortel van de som der kwadraten van de korte zijden (stelling van Pythagoras).

φ is de hoek tussen schijn- en werkstroom.
 Cos φ geeft aan hoe schijn- en werkstroom zich in grootte tot elkaar verhouden:

$$\cos \varphi = \frac{I_W}{I_S}$$

Cos φ geeft ook de verhouding aan tussen het effectief vermogen P en het schijnbaar vermogen S :

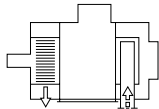
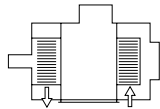
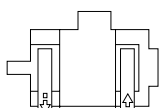
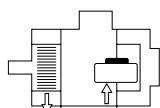
$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$



Afb. 1.27 Relatie tussen de schijn-, blind- en werkstroom

‘Schijnbaar vermogen’ betekent dat slechts een deel van de schijnstroom vermogen genereert, n.l. het deel I_W : de werkstroom.

7. Het nominale toerental van de motor is het toerental bij nominale spanning, nominale frequentie en nominale belasting.
8. Hoe elektromotoren gekoeld worden hangt af van hun vormgeving. De wijze van koelen wordt meestal aangegeven volgens een internationale norm: IEC Publicatie 34-6. Wat deze norm inhoudt is te zien in afb.1.28 (IC = International Cooling).

<p>IC01 Zelfkoelend De motor wordt van binnen rechtstreeks door de omgevingslucht gekoeld.</p>		<p>IC17 Uitwendige koeling Motor met ingebouwde ventilator voor de aanvoer van koellucht.</p>	
<p>IC06 Uitwendige koeling Motor met gescheiden koelluchttoevoer.</p>		<p>IC37 Uitwendige koeling Motor met gescheiden koelluchtafvoer en gescheiden koelluchttoevoer</p>	

Afb. 1.28 Aanduiding van het motorkoelingsysteem vlg. IEC 34-6






Bij het kiezen van een motor speelt dus niet alleen de toepassing een rol, maar ook de plaats van opstelling.

In de internationale norm IEC 34-7 wordt de bouwvorm van motoren aangegeven met de letters IM (International Mounting) en vier cijfers.

Afb.1.29 toont enkele van de meest gebruikelijke bouwvormen. Met behulp van de gegevens op het motorplaatje kunnen andere motorgegevens berekend worden:

Het nominale koppel van de motor met behulp van de formule:

$$M = \frac{P \times 9550}{n} = \frac{15 \times 9550}{2910} = 49 \text{ Nm}$$

Motoren met eindplaten, horizontale opstelling								
Bouwvorm				Toelichting				
Afb.	Codering vlg. DIN 42 950		DIN IEC 34 Part 7 Code I	Code II	Lagers	Grondplaat (housing)	Algemene uitvoering	Bevestiging of opstelling
	B 3	IM B 3	IM 1001	2 lager- schilden	met voeten	–	–	opstelling op fundering
	B 3/B 5	IM B 35	IM 2001	2 lager- schilden	met voeten	montage- flens	–	opstelling op fundering met extra flens
	B 3/B 14	IM B 34	IM 2101	2 lager- schilden	met voeten	montage- flens	–	opstelling op fundering met extra flens
	B 5	IM B 5	IM 3001	2 lager schilden	zonder voeten	montage- flens	–	flens- montage
	B 6	IM B 6	IM 1051	2 lager- schilden	met voeten	als B3; lager- schilden zo nodig 90° gedraaid	–	bevestiging aan de muur; voeten vanaf de aandrijfzijde gezien: links

Afb. 1.29 Aanduiding van de bouwvorm van motoren vlg. IEC 34-7

Het rendement η van een motor wordt bepaald door de verhouding tussen het nominale effectief vermogen en het toegevoerde elektrische vermogen:

$$\eta = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi} = \frac{15000}{\sqrt{3} \times 380 \times 29 \times 0.9} = 0.87$$

De slip van een motor kan berekend worden, omdat het motorplaatje het nominale toerental en de nominale frequentie vermeldt. Deze twee gegevens maken duidelijk dat de motor tweepolig is. Het synchrone toerental van een tweepolige motor is 3000 omw/min.

De sliptoerental (n_s) is dus $3000 - 2910 = 90$ omw/min.

Slip wordt meestal in een percentage uitgedrukt.

$$s = \frac{n_s}{n_0} = \frac{90}{3000} = 0.03 = 3\%$$

Vanzelfsprekend staan de gegevens van het motorplaatje voor een deel ook in de motorcatalogus vermeld. De catalogus bevat trouwens ook nog andere informatie:

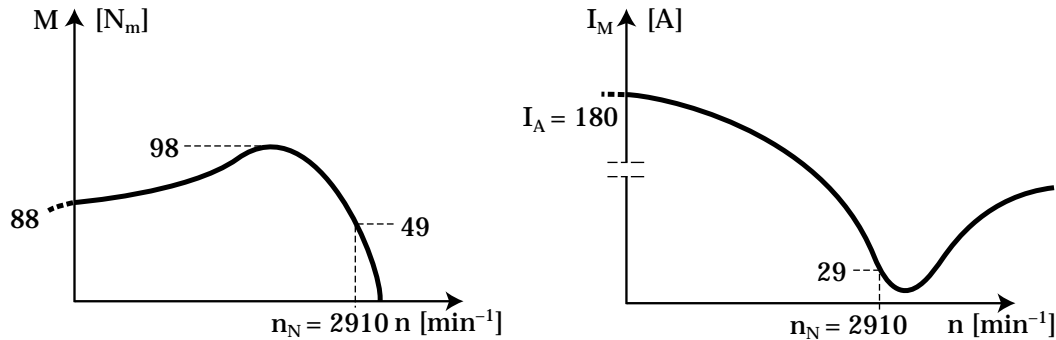
Type	Ver- mogen kW	Bij nominale belasting				Stroom bij 380 V A	$\frac{I_a}{I}$	M Nm	$\frac{M_a}{M}$	$\frac{M_{max}}{M}$	Traag- heids- moment kgm ²	Ge- wicht kg
		Toeren- tal min ⁻¹	Rende- ment %	cos φ								
160 MA	11	2900	86	0.87	25	6.2	36	2.3	2.6	0.055	76	
160 M	15	2910	88	0.90	29	6.2	49	1.8	2.0	0.055	85	
160 L	18.5	2930	88	0.90	33	6.2	60	2.8	3.0	0.056	96	

Afb. 1.30 De motorcatalogus bevat meer gegevens

Het motorplaatje vermeldt het asvermogen, toerental, $\cos \varphi$ en de motorstroom. Met behulp daarvan kunnen het rendement en koppel berekend worden.

Uit de motorcatalogus blijkt voorts dat de aanloopstroom I_a van de 15 kW motor 6,2 maal zo groot is als de nominale stroom I_N .
 $I_a = 29 \times 6.2 = 180$ A.

Het aanloopkoppel (M_a) van de motor is 1,8 maal het nominale koppel: $T_a = 1.8 \times 49 = 88 \text{ Nm}$. Dit aanloopkoppel vraagt om een aanloopstroom van 180 A. Het maximale koppel van de motor – het kipkoppel M_k – is tweemaal zo groot als het nominale koppel: $M_k = 2 \times 49 = 98 \text{ Nm}$.



Afb. 1.31 Koppel en stroom van de motor

Tenslotte vermeldt de catalogus ook het traagheidsmoment en gewicht van de motor. Het traagheidsmoment wordt gebruikt in versnellingsberekeningen en het gewicht kan van belang zijn voor transport en montage.

Sommige motorenfabrikanten vermelden in plaats van het traagheidsmoment het aandrijfmoment GD^2 .

Omrekening is mogelijk met:

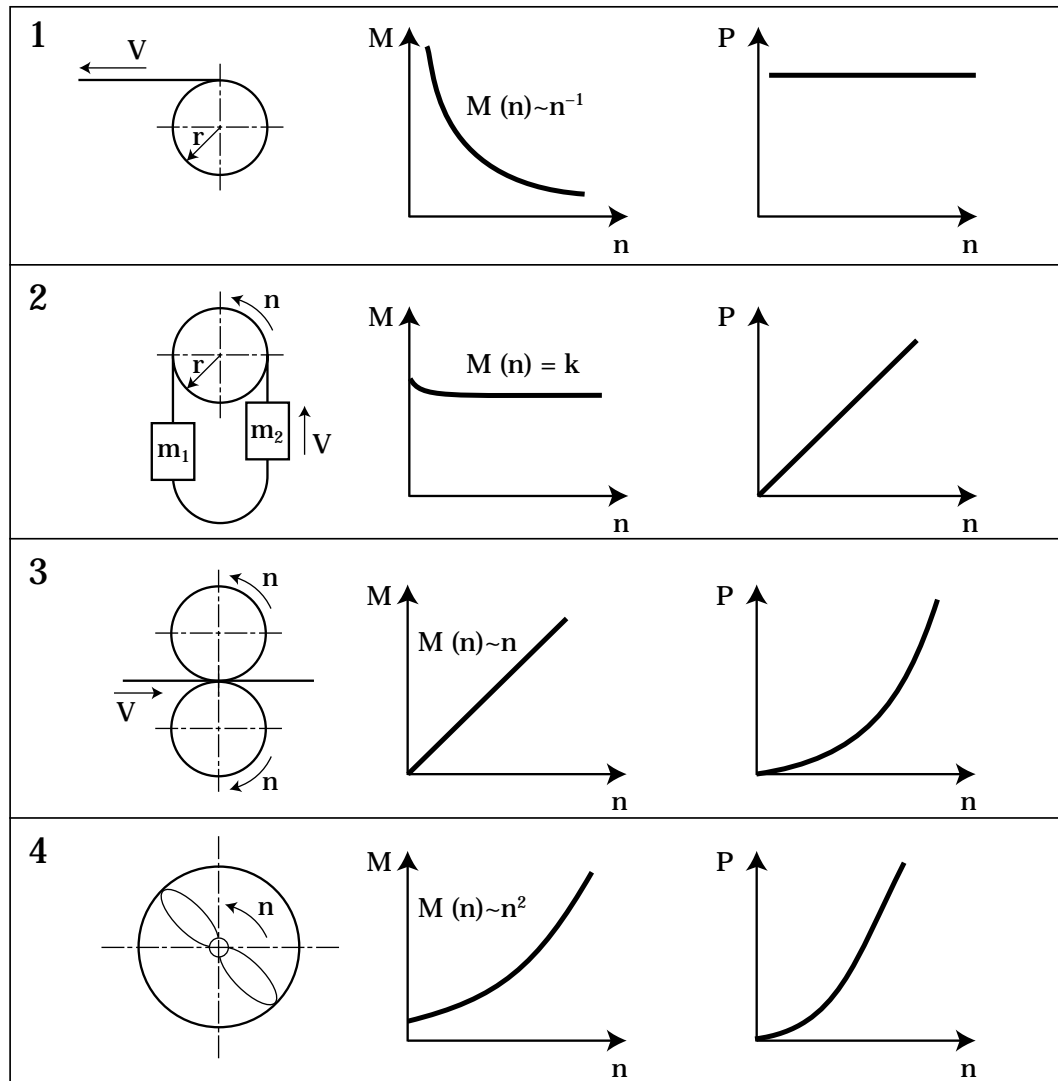
$$J = \frac{GD^2}{4 \times g}$$

waarin g de versnelling ten gevolge van de zwaartekracht is, het aandrijfmoment GD^2 wordt uitgedrukt in Nm^2 en het traagheidsmoment J in kgm^2 .

Belastingskarakteristieken

De toestand is stationair wanneer het door de motor gegenereerde koppel en het belastingskoppel even groot zijn. Koppel en toerental zijn in deze toestand constant.

De karakteristieken voor motoren en machines worden bepaald door de verhouding tussen toerental en koppel of vermogen. De koppelkrommen hebben we al genoemd. De karakteristieken voor machines kunnen in vier groepen worden verdeeld.



Afb. 1.32 Typische belastingskrommen

Groep 1 omvat machines voor het oprollen van materiaal met constante trekkracht. Tot deze groep behoren tevens verspanende machines, bijv. voor het schillen van fineer uit boomstammen.

Groep 2 bestaat uit verschillende machines: transportbanden, diverse soorten kranen, verdringerpompen en werktuigmachines.

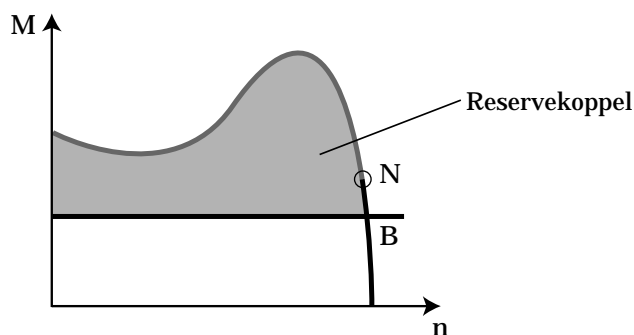
Groep 3 heeft betrekking op machines zoals walzen, vlakmachines en andere materiaalbewerkingsmachines.

Groep 4 omvat machines die met centrifugaalkrachten werken zoals centrifuges, circulatiepompen en ventilatoren.

De stationaire toestand ontstaat wanneer het koppel van motor en machine aan elkaar gelijk zijn (afb.1.33). De karakteristieken snijden elkaar in punt B.

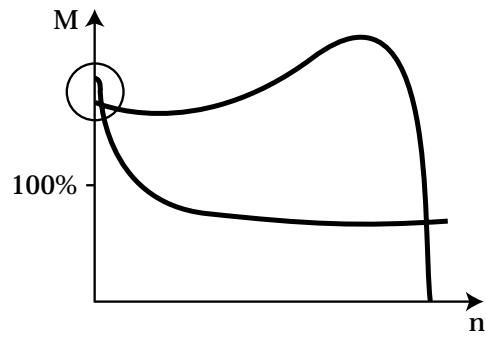
Bij het dimensioneren van een motor voor een bepaalde machine dient dit snijpunt zo dicht mogelijk bij punt N voor de nominale waarden van de motor liggen. Dan wordt de motor optimaal benut.

Het is van belang dat binnen het gehele bereik van stilstand tot snijpunt een reservekoppel beschikbaar is. Is dat niet het geval dan wordt het bedrijf onstabiel en kan de stationaire toestand bij een te laag toerental ontstaan. Het reservekoppel is onder andere nodig voor het versnellen.



Afb. 1.33 De motor heeft een reservekoppel nodig om te kunnen versnellen

Met deze startvoorwaarde dient rekening te worden gehouden, met name bij machines die tot de groepen 1 en 2 behoren. Deze typen belasting kunnen een aanloopkoppel hebben dat wat grootte betreft gelijk is aan het aanloopkoppel van de motor. Als het aanloopkoppel van de belasting groter is dan het aanloopkoppel van de motor start de motor niet.



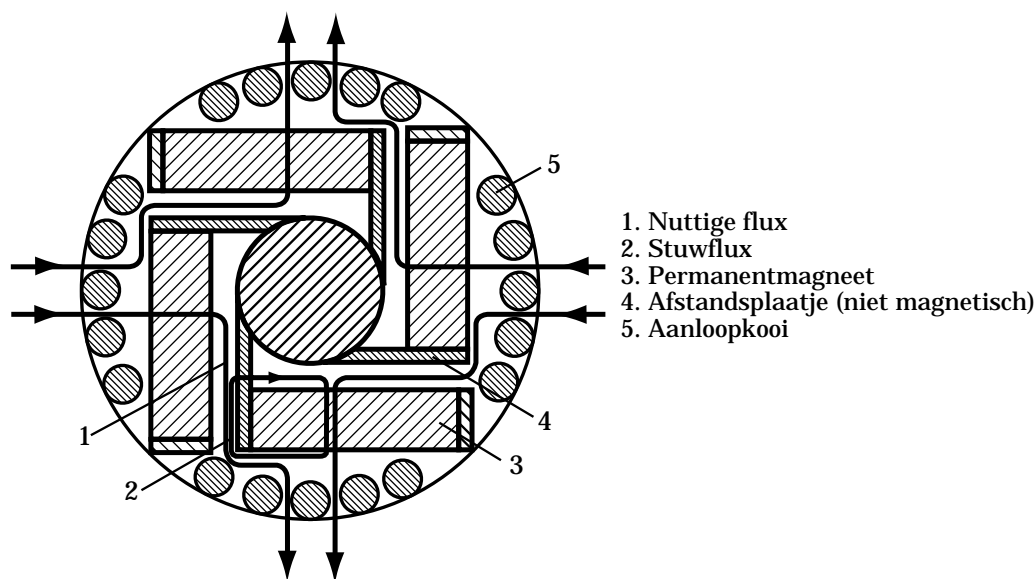
Afb. 1.34 In de aanlooffase kan een zeer groot koppel nodig zijn

Synchroonmotoren

De constructie van de stator is voor synchroon- en asynchroonmotoren dezelfde. Wat de rotor van synchroonmotoren (ook wel 'ankerster' genoemd) betreft zijn twee constructies mogelijk. De rotor heeft uitgestanste magneetpolen. Die magneten kunnen permanente magneten (voor kleinere motoren) of elektromagneten zijn. De rotor heeft twee of meer poolparen en is daarom ook bruikbaar in motoren met een laag toerental.

Synchroonmotoren lopen op netvoeding niet uit zichzelf aan. De reden daarvan is de traagheid van de rotor en de grote snelheid van het draaiveld. De rotor moet daarom op een op het draaiveld afgestemde snelheid gebracht worden.

Dit is mogelijk met bijv. een aanzetmotor of frequentie-omvormer. Kleine motoren worden gewoonlijk gestart met behulp van een startwikkeling (smoorwikkeling). De motor gedraagt zich dan als kortsluitrotormotor.



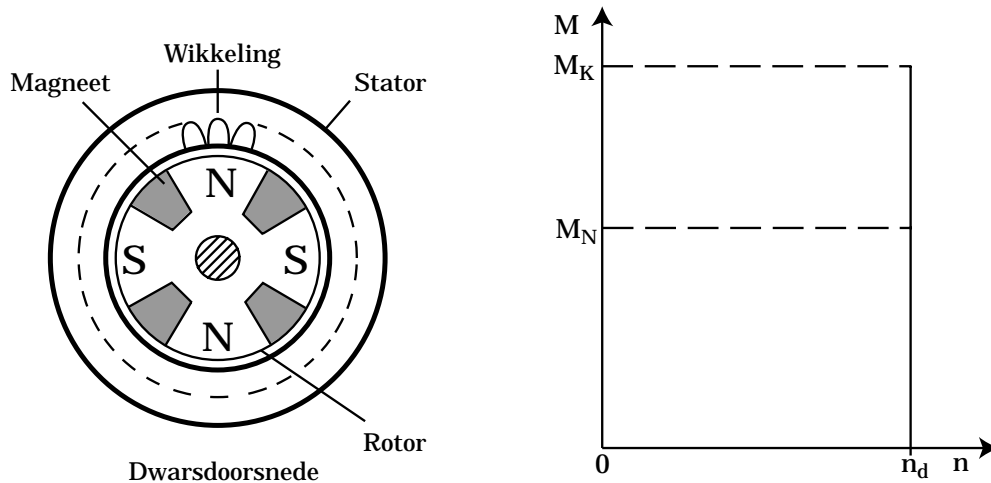
Afb. 1.35 De rotor van synchroonmotoren: permanentmagneet

Na het aanlopen draait de motor synchroon met het draaiveld. Wordt hij belast dan wordt de afstand van de rotorpolen tot de polen van het draaiveld groter. De rotor blijft met de belastingshoek (n) achter op het draaiveld en dus ook op zijn onbelaste positie (afb.1.38).

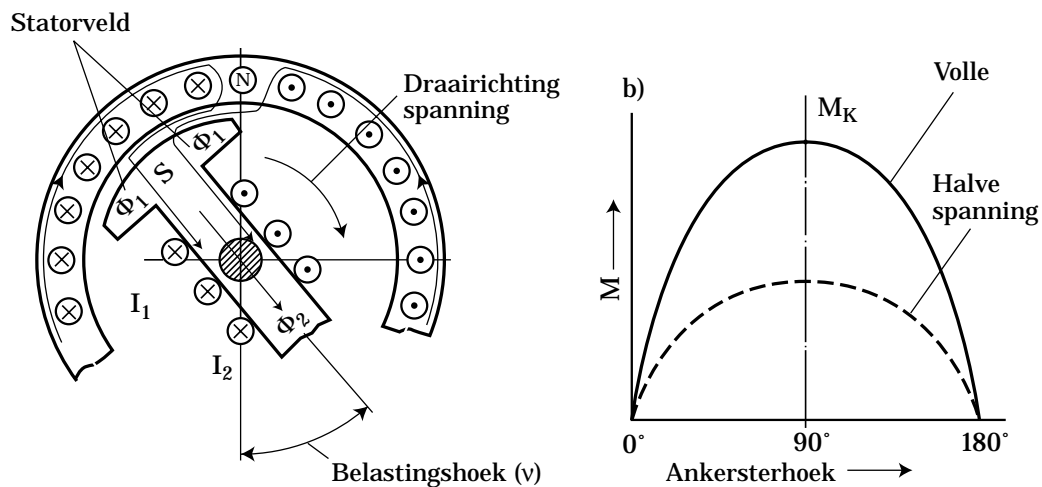
Synchroonmotoren hebben een constant toerental dat niet van de belasting afhankelijk is. De motor kan niet zwaarder belast worden dan wat de aantrekkingskracht tussen rotor en magneetveld verwerken kan.

Zodra de belasting de aantrekkingskracht overschrijdt wordt de synchronisatie onderbroken en staat de motor stil.

Synchroonmotoren worden o.a. toegepast in parallelinstallaties waarin een aantal mechanisch van elkaar onafhankelijke systemen synchroon aangedreven moeten worden.



Afb. 1.36 Rotor met uitgestanste polen en de koppelenkarakteristiek



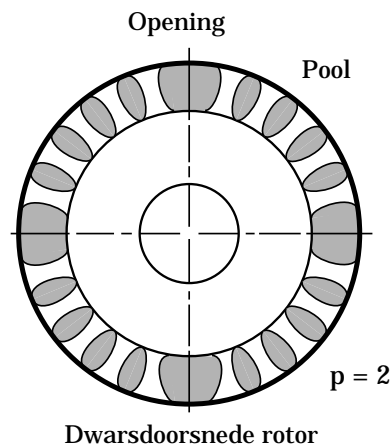
Afb. 1.37 Belastingshoek en koppel tegenover rotorhoek

Reluctantiemotoren

Draaistroom-reluctantiemotoren zijn draaiveldmotoren die op dezelfde wijze aanlopen als normale draaistroom-asynchroonmotoren met kooianker, daarna gesynchroniseerd worden en zich verder als synchronmotoren gedragen. Aangezien reluctantiemotoren, net als kooirotormotoren, een eenvoudige kooiwikkeling in hun rotor hebben zijn ze sterk, bedrijfszeker, onderhouds- en radiostoringvrij, en naar verhouding goedkoop in aanschaf. Nadelen zijn dat ze een hoog inductief reactief vermogen vragen en het rendement ongunstig is. Reluctantiemotoren hebben daarom slechts economische betekenis tot een vermogen van ca. 15 kW.

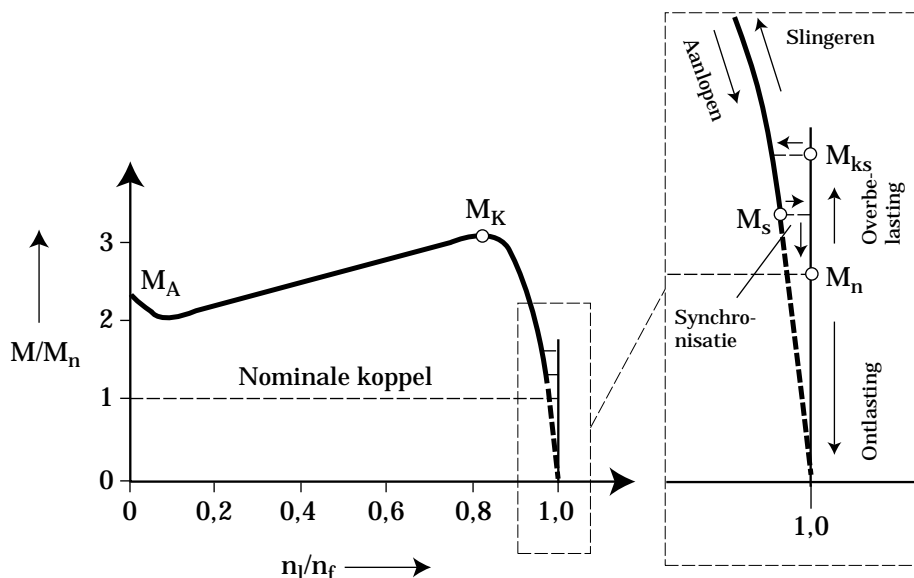
Constructie

De rotor van een draaistroom-reactantiemotor onderscheidt zich in niets van een normale draaistroom-asynchroonmotor met kooirotor. Ook deze rotor heeft een eenvoudige kooiwikkeling. In tegenstelling echter tot normale kooirotoren heeft de rotor van een reluctantiemotor uitgestanste polen waarvan het aantal overeenkomt met het aantal statorpolen. De polen ontstaan door aan de omtrek van het rotorpakket poolopeningen uit te frezen of door de vorm die het rotorblik gegeven wordt (zie afb.1.38a).



Afb. 1.38a Reluctantierotor

Door de poolopeningen – gevuld met hetzelfde materiaal als waaruit de rotorkooi bestaat – ontstaat aan de omtrek van de rotor een veranderlijke magnetische weerstand (reluctantie) die bij de polen het kleinst en bij de poolopeningen het grootst is.



Afb. 1.38b Koppelkromme van een reluctantiemotor

Bij aansluiting aan het draaistroomnet ontwikkelen reluctantiemotoren, net als normale kooirotormotoren, een koppel en loopt hun snelheid op tot in de buurt van het synchrone toerental zolang het motorkoppel gedurende dit gehele proces groter blijft dan het remkoppel. De aanloopstroom is meestal iets groter en het aanloopkoppel iets kleiner dan bij daarmee vergelijkbare kooirotormotoren, omdat de luchtspleet bij de poolopeningen groter is. Zodra de rotor ongeveer de snelheid van het draaiveld bereikt ontstaat door de magnetische koppeling van het stator draaiveld en de rotorpolen een synchroniserend koppel (tegenkoppel) dat de rotor synchroniseert. Na deze synchronisatie loopt de motor ondanks het ontbreken van rotorbekrachtiging met het synchrone toerental.

Een gesynchroniseerde reluctantiemotor gedraagt zich ongeveer als een synchronomotor. De rotor draait synchron met de snelheid van het stator draaiveld. Analogoos aan de wijze waarop de polen van het omlopende draaiveld van de stator de polen van de rotor beïnvloeden tracht de magnetische stroom van het stator draaiveld in een reactantiemotor de rotor de uitgestaanste polen te doen passeren. De kleine luchtspleet veroorzaakt op deze plaatsen een geringere magnetische weerstand dan bij de poolopeningen het geval is. De neiging die de magnetische stroom vertoont om de grotere magnetische weerstand bij de poolopeningen niet te overtreffen leidt tot een synchron koppel en tot het instandhouden van een synchron toerental bij belasting.

Gezien het ontbreken van gelijkstroombekrachtiging in de rotor is het synchrone koppel van een reluctantiemotor belangrijk kleiner dan dat van een daarmee vergelijkbare synchronomotor.

Is de synchronisatie eenmaal tot stand gekomen dan vertonen reluctantiemotoren een met normale synchronomotoren vergelijkbaar gedrag. De rotor draait met de snelheid van het draai-veld van de stator, die op zijn beurt afhangt van de netfrequentie en het aantal poolparen. Bij belasting blijven de uitgestanste rotorpolen met de belastingshoek achter op het statordraai-veld. Wordt de motor belast met een koppel dat groter is dan zijn synchrone kipkoppel dan gaat hij slingeren en loopt vanaf dat ogenblik verder als een asynchroonmotor met een van de belasting afhankelijk toerental (afb.1.38b). Zodra het belastingskoppel kleiner is dan het synchronisatiekoppel vindt vanzelf opnieuw synchronisatie plaats. Wordt de motor echter belast met een koppel groter dan zijn asynchroon kipkoppel dan komt de rotor tot stilstand.

Door de grotere luchtspleet bij de poolopeningen aan de rotoromtrek hebben reluctantiemotoren een naar verhouding grotere magnetische verstrooiing die een grote behoefte aan inductief reactief vermogen veroorzaakt met een evenredig aandeel daarin. Het gevolg daarvan is een ongunstige vermogensfactor die bij nominale belasting ongeveer 0,4 tot 0,5 kan bedragen. Bij het berekenen van aandrijvingen met reluctantiemotoren moet met deze behoefte aan reactief vermogen rekening worden gehouden.

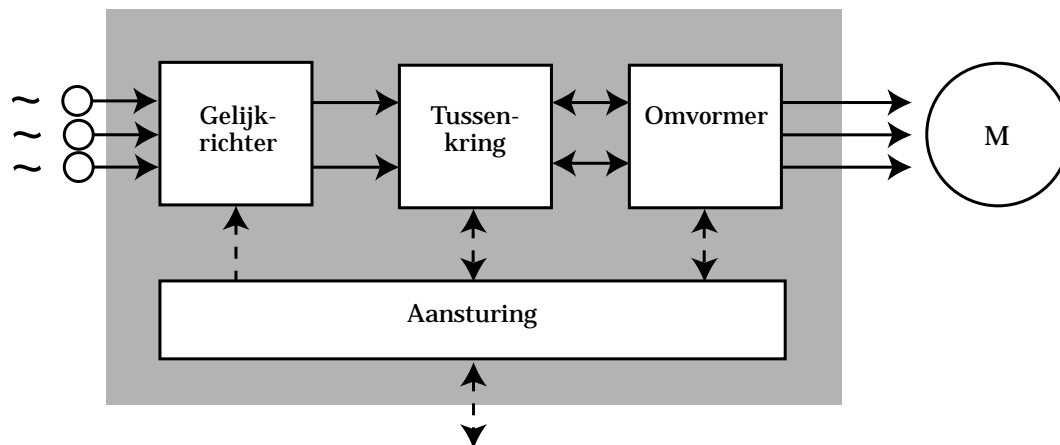
Draaistroom-reluctantiemotoren worden hoofdzakelijk daar ingezet waar een installatie op diverse plaatsen met exact hetzelfde toerental moet worden aangedreven en de toepassing van één enkele motor met mechanische overbrenging van het koppel naar de afzonderlijke aandrijfpunten te omslachtig of te duur zou zijn.

Toepassingsvoorbeelden daarvan vormen de aandrijving van spinmachines, pompen en transportinstallaties.

2. Frequentie-omvormers

Frequentie-omvormers hebben sinds het eind van de jaren zestig een stormachtige ontwikkeling doorgemaakt. Een belangrijke rol daarin speelde de vooruitgang die geboekt werd in microprocessor- en halfgeleidertechnieken en de prijs van deze componenten. Het principe van frequentieregeling is echter hetzelfde gebleven.

Frequentie-omvormers bestaan uit vier basiscomponenten:

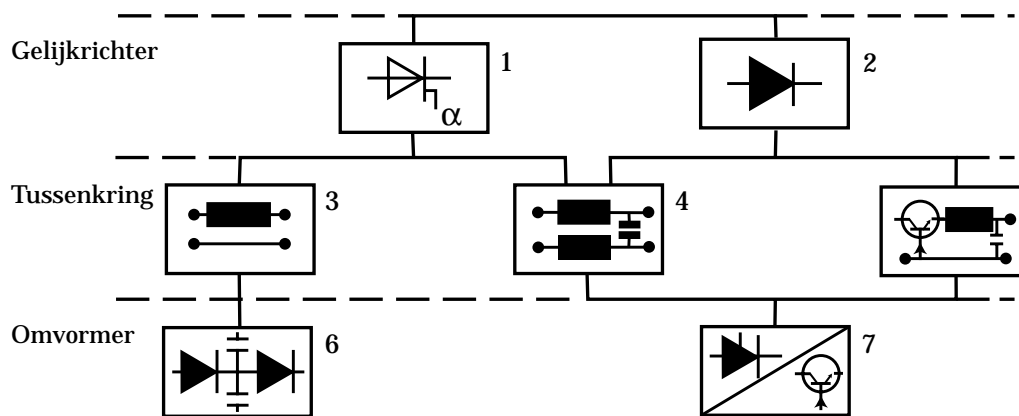


Afb. 2.01 Het basisschema van frequentie-omvormers

1. De gelijkrichter wordt op het wissel-/draaistroomnet aangesloten en produceert een pulserende gelijkspanning. Er zijn twee basistypen gelijkrichter: gestuurde en ongestuurde.
2. De tussenkring. Er zijn drie typen:
 - a) De tussenkring die de spanning van de gelijkrichter omvormt tot een gelijkstroom.
 - b) De tussenkring die de pulserende gelijkspanning stabiliseert, resp. afvlakt, en daarna aan de omvormer doorgeeft.
 - c) De tussenkring die de constante gelijkspanning van de gelijkrichter variabel maakt.
3. De omvormer produceert de frequentie van de motorspanning. Alternatief kan een tweede omvormertype de constante gelijkspanning bovendien tot een variabele wisselspanning omvormen.

4. De elektronica van de aansturing kan signalen overbrengen aan – en ontvangen van – de gelijkrichter, tussenkring en omvormer. Welke afzonderlijke onderdelen aangestuurd worden hangt af van de constructie van de frequentie-omvormer (zie afb.2.02).

Voor alle typen frequentie-omvormer geldt dat de aansturing de omvormer met signalen in- en uitschakelt. Dit schakelpatroon kan op verschillende principes gebaseerd zijn. Frequentie-omvormers worden ingedeeld op basis van het type schakelpatroon dat de voedingsspanning van de motor stuurt.



Stroomgestuurde regelaars: CSI

(1+3+6)

Impulsamplitude-modulerende frequentie-omvormers: PAM

(1+4+7)(2+5+7)

Impulsbreedte-modulerende (puls width modulation) frequentie-omvormers: PWM/VVC^{plus}

(2+4+7)

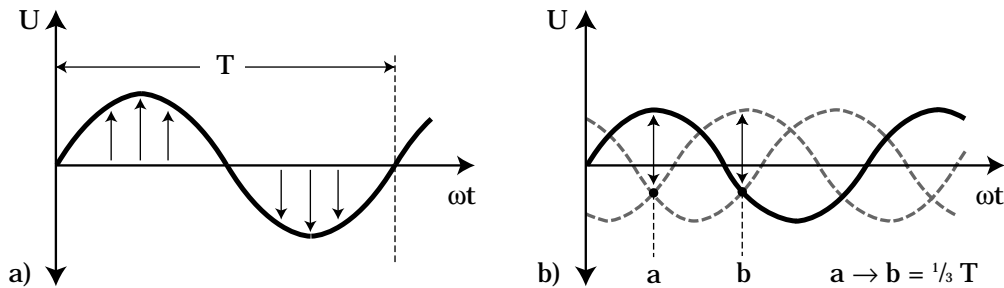
Afb. 2.02 Verschillende constructieprincipes

Volledigheidshalve dient ook het type regelaar zonder tussenkring (directe frequentie-omvormers) genoemd te worden. Dit type wordt toegepast in het middengolfvermogensgebied. Hierdoor wordt rechtstreeks uit het 50 Hz net een laagfrequent net geproduceerd. De maximale uitgangsfrequentie ligt in de buurt van 30 Hz.

Gelijkrichters

Voedingsspanning is een driefasenwisselspanning of een éénfasige wisselspanning met vaste frequentie (bijv. $3 \times 400 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ of $1 \times 240 \text{ V}/50 \text{ Hz}$).

De volgende afbeelding toont enkele karakteristieke grootheden:



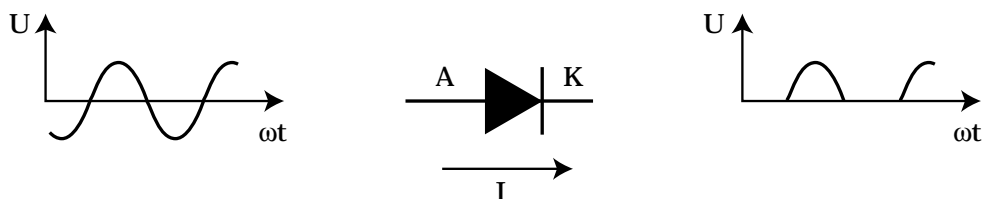
Afb. 2.03 Eén- en driefasenwisselspanning

Uit de afbeelding blijkt dat de drie fasen in tijd verschoven zijn. De fasespanning verandert voortdurend van richting en de frequentie geeft aan hoe vaak dat gebeurt. Een frequentie van 50 Hz betekent dat er 50 perioden per seconde zijn ($50 \times T$), d.w.z. dat één periode 20 milliseconden duurt.

De gelijkrichter van de frequentie-omvormer bestaat uit dioden, thyristors of een combinatie van deze halfgeleiders. Uit dioden bestaande gelijkrichters zijn ongestuurd. Uit thyristors bestaande gelijkrichters zijn gestuurd. Bij een combinatie van dioden en thyristors is de gelijkrichter gedeeltelijk gestuurd.

Ongestuurde gelijkrichters

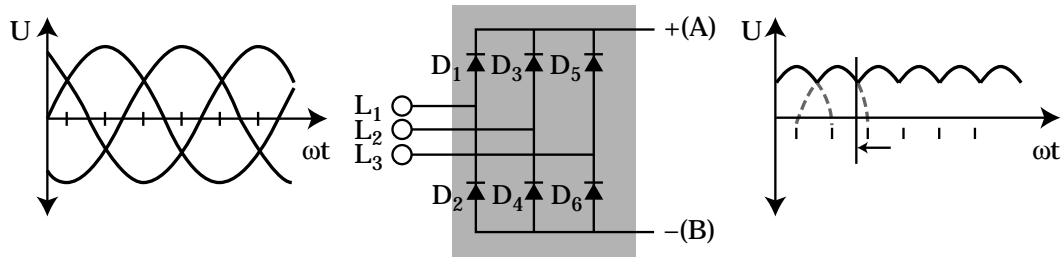
Ongestuurde gelijkrichters bestaan uit dioden.



Afb. 2.04 Werking van de diode

Een diode laat de stroom slechts in één richting door: van de anode (A) naar de kathode (K). De diode blokkeert een stroom die van de kathode naar de anode wil. In tegenstelling tot andere halfgeleiders kan met dioden de stroomsterkte niet gestuurd worden.

Een wisselspanning over een diode wordt omgezet in een pulserende gelijkspanning. Wordt een driefasenwisselspanning op een ongestuurde driefasen-gelijkrichter aangelegd dan pulseert de gelijkspanning nog steeds.

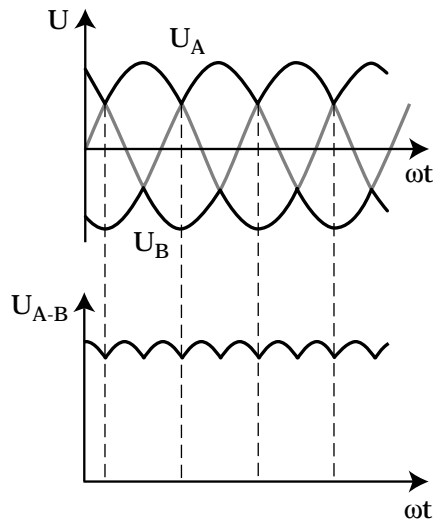


Afb. 2.05 Een ongestuurde gelijkrichter

Bovenstaande afbeelding toont een ongestuurde driefasengelijkrichter bestaande uit twee groepen dioden. De ene groep bestaat uit de dioden D_1 , D_3 en D_5 , de andere uit de dioden D_2 , D_4 en D_6 . Iedere diode geleidt gedurende $\frac{1}{3}$ van een periode (120°). In beide groepen wisselen de dioden elkaar om beurten af. Periodeën waarin beide groepen geleiden zijn in tijd $\frac{1}{6}$ van de periode T (60°) ten opzichte van elkaar verschoven.

De positieve spanning wordt geleid door de diodengroep $D_{1,3,5}$. Zodra de spanning in fase L_1 zijn positieve topwaarde bereikt neemt klem A de spanning van fase L_1 aan. De beide andere dioden zijn geblokkeerd door de tegenspanningen U_{L1-2} en U_{L1-3} . Dit geldt op vergelijkbare wijze voor de diodengroep $D_{2,4,6}$: daar krijgt klem B de negatieve fasespanning. Als op een bepaald moment L_3 zijn negatieve topwaarde bereikt geleidt diode D_6 . De beide andere dioden zijn dan geblokkeerd door de tegenspanningen U_{L3-1} en U_{L3-2} .

De uitgangsspanning van een ongeregelde gelijkrichter is gelijk aan het verschil van de spanningen van de beide diodengroepen. De gemiddelde waarde van de pulserende gelijkspanning is $1,35 \times$ de netspanning.



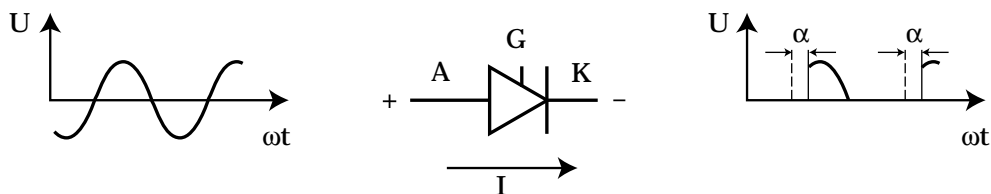
Afb. 2.06 De uitgangsspanning van een ongeregelde driefasengelijkrichter

Gestuurde gelijkrichters

In gestuurde gelijkrichters zijn de dioden vervangen door thyristors. Net als de diode laat ook de thyristor de stroom slechts door van de anode (A) naar de kathode (K). Het verschil met de diode is dat de thyristor een derde poort (G) heeft. Deze moet door een signaal aangestuurd worden voordat de thyristor stroom geleidt. Als zich eenmaal een stroom door de thyristor beweegt dan blijft deze geleiden tot de stroom nul geworden is.

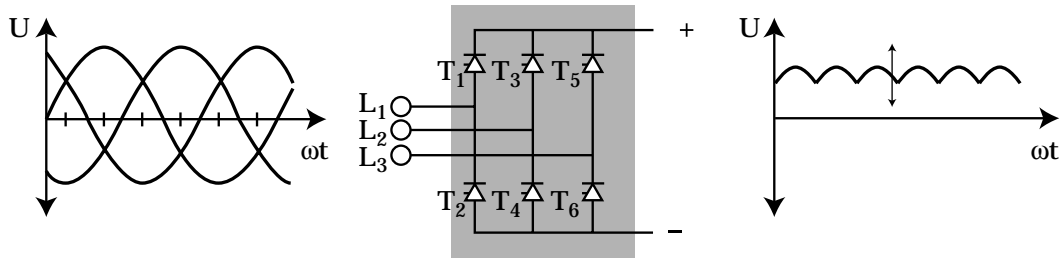
De stroom kan niet met een signaal naar de poort onderbroken worden. Thyristors worden zowel in gelijkrichters als in omvormers toegepast.

Het signaal waarmee de poort aangestuurd wordt is het stuur-sig-naal α van de thyristor. α is een in graden uitgedrukte vertragingstijd. Het aantal graden geeft de vertraging aan tussen de nuldoorgang van de spanning en het koppel waarop de thyristor ingeschakeld wordt.



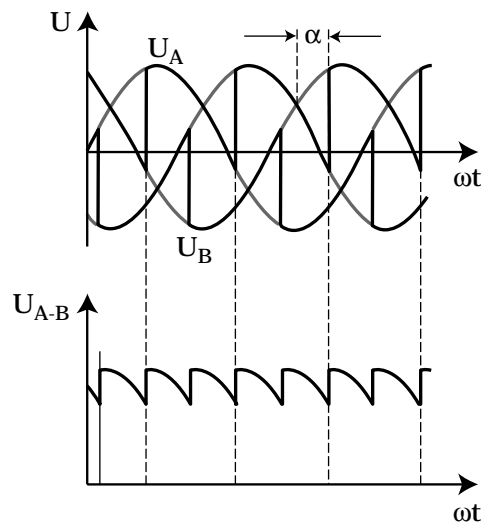
Afb. 2.07 De werking van een thyristor

Bij $\alpha = 0^\circ - 90^\circ$ functioneert de thyristor als gelijkrichter en bij $\alpha = 90^\circ - 300^\circ$ als omvormer.



Afb. 2.08 Een gestuurde driefasengelijkrichter

Gestuurde driefasengelijkrichters kunnen in twee groepen met de thyristors T_1, T_3 en T_5 en de thyristors T_2, T_4 en T_6 worden verdeeld. In gestuurde gelijkrichters wordt α gerekend vanaf het punt waarop de vergelijkbare diode van een ongeregelde gelijkrichter begint te geleiden. Dit punt bevindt zich op 30° na de nuldoorgang van de spanning. Voor het overige wordt verwezen naar de beschrijving van ongeregelde gelijkrichters.



Afb. 2.09 De uitgangsspanning van een gestuurde driefasengelijkrichter

De grootte van de gelijkgerichte spanning kan veranderd worden door α te veranderen. Een gestuurde gelijkrichter levert een gelijkspanning met een gemiddelde waarde van $1,35 \times$ de netspanning $\times \cos \alpha$.

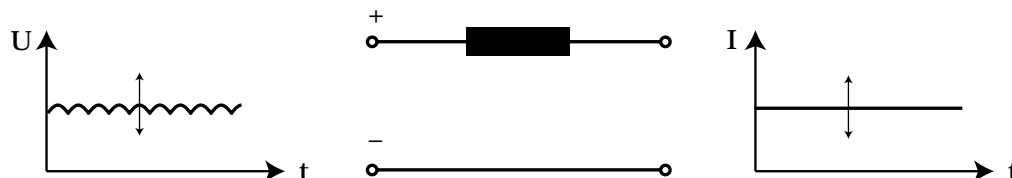
Vergeleken met ongeregelde gelijkrichters veroorzaken gestuurde gelijkrichters aanzienlijke verliezen en storingen in het voedingsnet, omdat ze gedurende de korte perioden dat de thyristors geleiden een grote blindstroom opnemen. Dit is één van de redenen dat thyristors voornamelijk in de omvormer van een frequentie-omvormer worden toegepast.

Gestuurde gelijkrichters hebben het voordeel dat het remvermogen in de tussenkring teruggedleid kan worden naar het voedingsnet.

De tussenkring

De tussenkring functioneert als een opslagplaats van waaruit de motor via de omvormer zijn energie kan betrekken. De tussenkring kan op drie verschillende principes gebaseerd zijn. Welk type gebruikt wordt hangt af van de gelijkrichter en omvormer waarmee hij gecombineerd wordt.

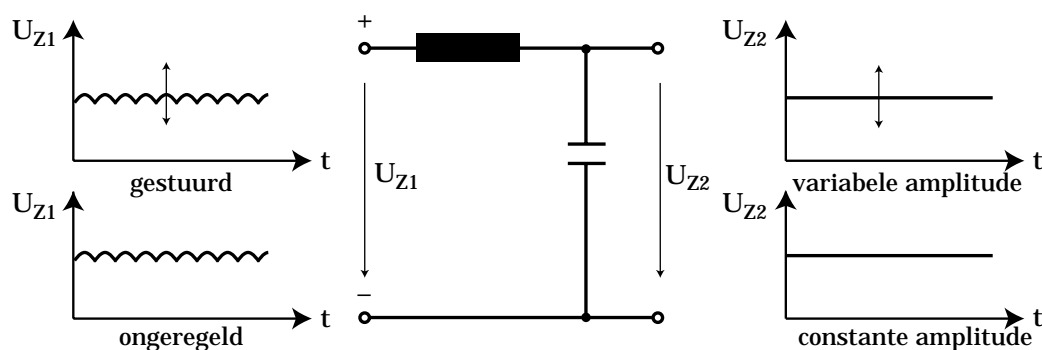
Stroomgestuurde frequentie-omvormers (I-regelaars)



Afb. 2.10 Variabele gelijkstroomtussenkring

Dit type tussenkring bestaat uit een zeer grote spoel en wordt alleen in combinatie met een gestuurde gelijkrichter toegepast. De spoel zet de variabele spanning van de gelijkrichter om in een variabele gelijkstroom. De grootte van de motorspanning wordt bepaald door de belasting. Deze tussenkring heeft het voordeel dat remvermogens aan het voedingsnet teruggegeven kunnen worden zonder dat daarvoor aanvullende componenten nodig zijn.

Spanninggestuurde frequentie-omvormers (U-regelaars)

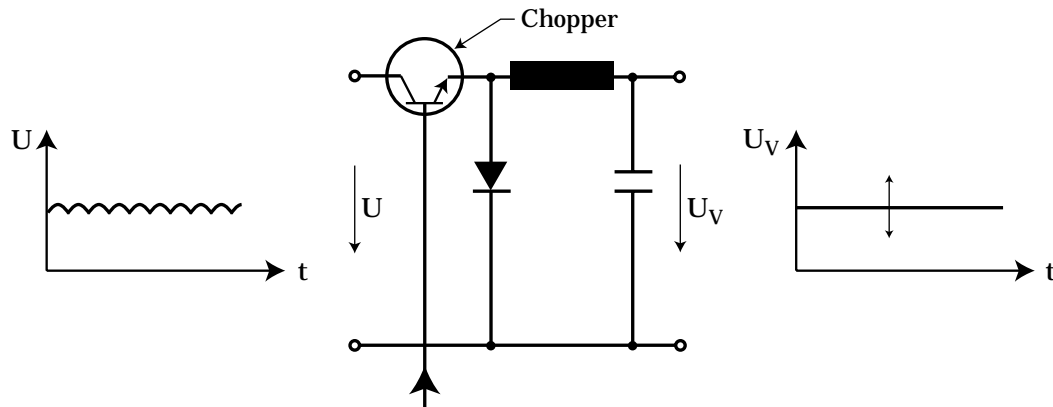


Afb. 2.11 Constante gelijkspanningstussenkring

De tussenkring kan een filter bestaande uit een condensator en een spoel zijn. Deze tussenkring kan met beide typen gelijkrichter gecombineerd worden. Het filter vakt de pulserende gelijkspanning (U_{Z1}) van de gelijkrichter af. Bij gestuurde gelijkrichters wordt de spanning bij een gegeven frequentie constant gehouden.

De spanning die aan de omvormer wordt doorgegeven is dus een zuivere gelijkspanning (U_{Z2}) met variabele amplitude. Bij ongeregelde gelijkrichters is de spanning aan de ingang van de omvormer een gelijkspanning met constante amplitude.

Variabele gelijkspanningstussenkring



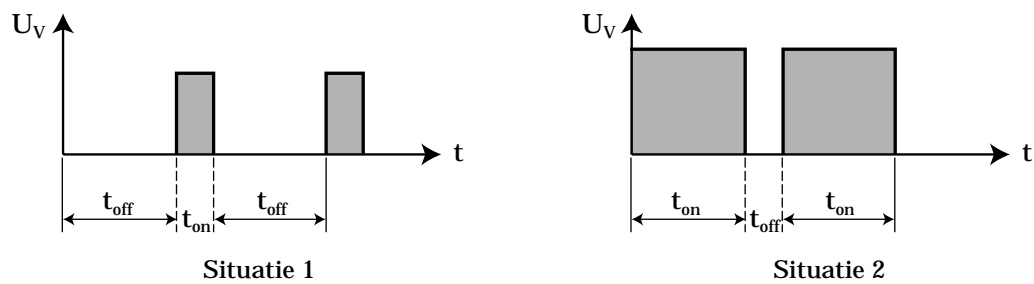
Afb. 2.12 Variabele tussenkringspanning

Tenslotte kan in de tussenkring vóór een filter als bovengenoemd een chopper worden opgenomen. De chopper heeft een transistor die als schakelaar functioneert en de gelijkgerichte spanning in- en uitschakelt. De aansturing regelt de chopper door de variabele spanning (U_V) achter het filter te vergelijken met het ingangssignaal.

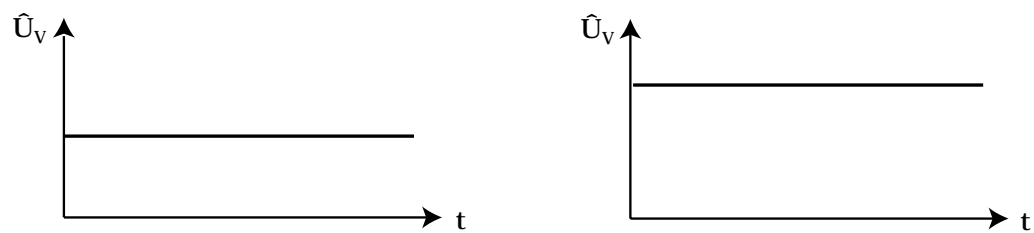
Is er een verschil dan wordt de verhouding gecorrigeerd met de tijd t_{on} dat de transistor geleidend is en de tijd t_{off} dat hij gesloten is. De effectieve waarde van de gelijkspanning wordt dus variabel en hangt af van de tijd dat de transistor geopend is:

$$U_V = U \times \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

Wanneer de choppertransistor de stroom blokkeert maakt de spoel van het filter de spanning over de transistor oneindig groot. Om dit te vermijden wordt de chopper beveiligd met een hersteldiode. Als de transistor opent en sluit zoals in afb.2.13a aangegeven is de spanning het grootst in situatie 2.



Afb.2.13a De choppertransistor regelt de tussenkringspanning



Afb.2.13b De effectieve waarde (U_V) van de variabele spanning

Het filter van de tussenkring dient de blokgolfspanning achter de chopper af te vlakken. De condensator en spoel van het filter houden de spanning bij een gegeven frequentie constant.

Behalve de reeds genoemde functies heeft de tussenkring nog enkele andere, van de structuur afhankelijke, functies zoals:

- ontkoppeling tussen gelijkrichter en omvormer,
- verkleining van netterugwerking,
- energieopslag voor het opvangen van schokbelastingen.

De omvormer

De omvormer is de laatste schakel in de frequentie-omvormer vóór de motor. Hierin vindt de laatste aanpassing van de uitgangsspanning plaats. Bij rechtstreekse aansluiting van de motor op het voedingsnet zijn de bedrijfsomstandigheden bij het nominale belastingspunt ideaal.

Door de uitgangsspanning aan te passen aan de belasting garandeert de frequentie-omvormer goede bedrijfsvoorwaarden binnen het gehele regelbereik. Dit houdt in dat de motor optimaal gemagnetiseerd blijft.

Van de tussenkring naar de omvormer loopt

- een variabele gelijkstroom, of
- een variabele gelijkspanning, of
- een constante gelijkspanning.

In alle gevallen moet er met behulp van de omvormer voor gezorgd worden dat de voeding van de motor een wisselgrootheid wordt. Met andere woorden: de omvormer dient om de frequentie van de motorspanning te genereren. Hoe de omvormer gestuurd wordt hangt er van af of deze een variabele of constante grootheid ontvangt. Bij een variabele stroom of spanning behoeft de omvormer alleen de frequentie te regelen. Bij een constante spanning moet de omvormer zowel de frequentie als de amplitude van die spanning genereren.

Ook al functioneren niet alle omvormers op dezelfde wijze, toch is hun opbouw in principe altijd dezelfde. De hoofdcomponenten zijn gestuurde halfgeleiders die paarsgewijs op drie aftakkingen aangesloten zijn.

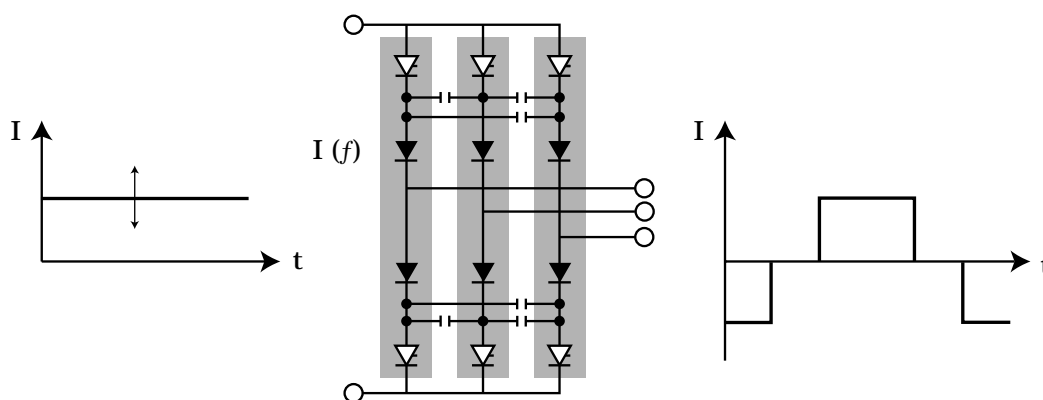
Sedert enkele jaren zijn de thyristors van de omvormer vervangen door modernere componenten zoals bipolaire transistors (LTR), unipolaire transistors (MOS) en bipolaire transistors met geïsoleerde poort (IGBT). Deze hebben het voordeel dat ze op elk gewenst koppel kunnen geleiden of blokkeren. Ze gaan onmiddellijk van geleiden naar blokkeren over en omgekeerd.

Thyristors kunnen uitsluitend met behulp van een wisschakeling uitgeschakeld worden, omdat ze pas wisselen als de spanning opnieuw nul geworden is. De maximale schakelfrequentie

voor thyristors ligt bij ongeveer 2 kHz en voor moderne componenten zoals IGBT's bij ca. 20 kHz.

Dit maakt het mogelijk de schakelfrequentie van de omvormer aanzienlijk te vergroten (van 300 Hz tot 20 kHz).

De halfgeleiders van de omvormer geleiden en blokkeren signalen afhankelijk van hun aansturing door de aansturing. Die signalen kunnen op verschillende manieren gestuurd worden. Moet de omvormer een stroom verwerken dan zijn in vergelijking met een type dat een spanning dient te verwerken enkele andere componenten nodig.

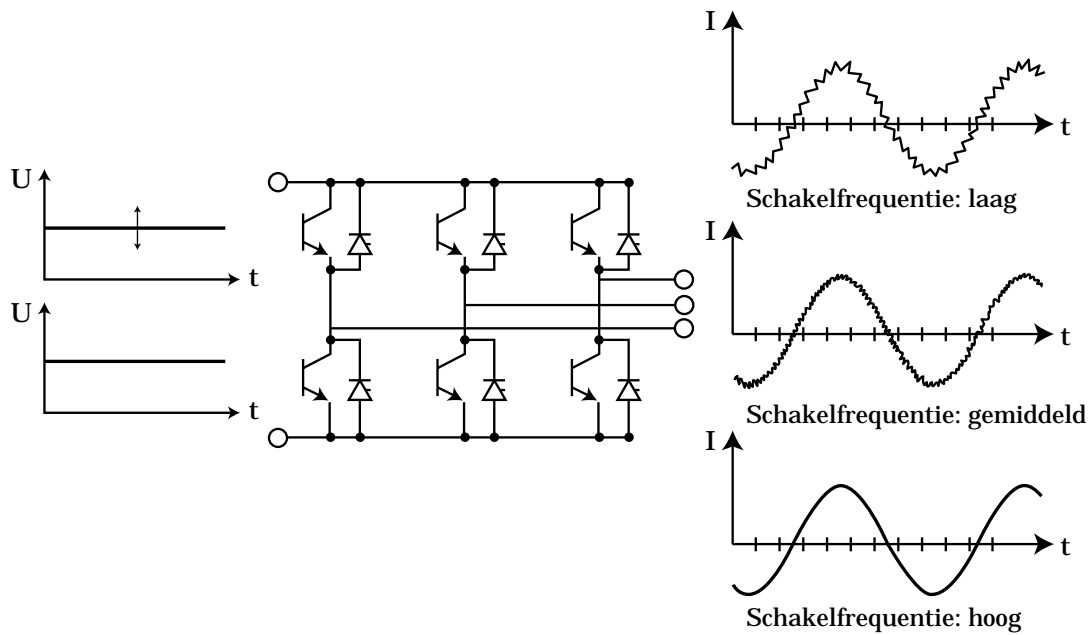


Afb. 2.14 Omvormer voor een variabele tussenkringstroom

In principe bestaat een omvormer uit zes dioden, zes thyristors en zes condensatoren.

De condensatoren moeten de elektrische lading vasthouden die voor het uitschakelen (wissen) van de thyristors nodig is en dienen daarom aan de grootte van de motor te zijn aangepast.

De condensatoren maken het de thyristors mogelijk in en uit te schakelen om de stroom in de fasenwikkelingen 120° te verschuiven. Door het periodieke en om beurten aanleggen van een stroom aan de motorklemmen U-V, V-W, W-U, U-V...verandert het draaiveld abrupt met de gewenste frequentie in de stator. Ook al wordt de motorstroom daardoor blokvormig dan blijft de motorspanning toch vrijwel sinusvormig. Telkens als de stroom in- of uitgeschakeld wordt is er echter wel een spanningspiek. De dioden scheiden de condensatoren van de belastingsstroom van de motor.



Afb. 2.15 Omvormer voor variabele of constante tussenkringspanning; de uitgangsstroom afhankelijk van de schakelfrequentie van de omvormer

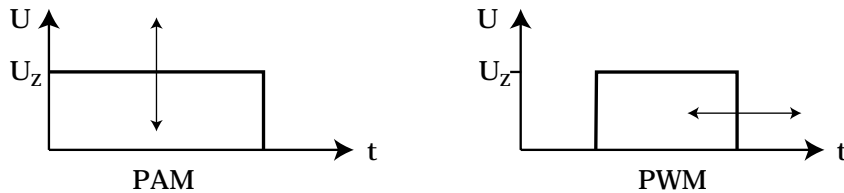
Deze omvormer bestaat uit zes thyristors, transistors of andere elektronische schakelcomponenten. Welk type halfgeleider ook gebruikt wordt, zijn functie blijft in principe steeds dezelfde. Het door de aansturing uit- en inschakelen van de halfgeleiders, waardoor de uitgangsfrequentie van de frequentie-omvormer verandert, kan op verschillende principes berusten.

Bij één daarvan wordt gebruik gemaakt van de variabele spanning of stroom in de tussenkring.

De tussenpozen waarmee de afzonderlijke halfgeleiders geleiden of blokkeren worden vastgelegd in een schakelpatroon dat afhankelijk van de gewenste uitgangsfrequentie doorlopen wordt.

Het schakelpatroon van de halfgeleiders wordt gestuurd door de grootte van de variabele spanning of stroom van de tussenkring. Met een spanninggestuurde oscillator volgt de frequentie steeds de amplitude van de spanning. Deze wijze van omvormerbesturing wordt impulsamplitudemodulatie genoemd.

Bij een tweede principe wordt gebruik gemaakt van een vaste tussenkringspanning. De motorspanning wordt variabel gemaakt door de tussenkringspanning gedurende kortere of



Afb. 2.16 Modulatie van de impulsamplitude of -breedte

langere tijd op de motorwikkelingen aan te leggen. De frequentie verandert doordat de spanningsimpulsen van de ene halve tijdbasisperiode positief en van de andere negatief in de tijd variabel zijn.

Dit heet pulsbreedtemodulatie, omdat bij dit principe de breedte van de spanningsimpuls veranderd wordt. Gebruikelijk is dat de aansturing de in- en uitschakelpunten van de halfgeleiders herkent als de snijpunten van een driehoekspanning en een onderdrukte sinusvormige referentiespanning (sinusgestuurde PWM).

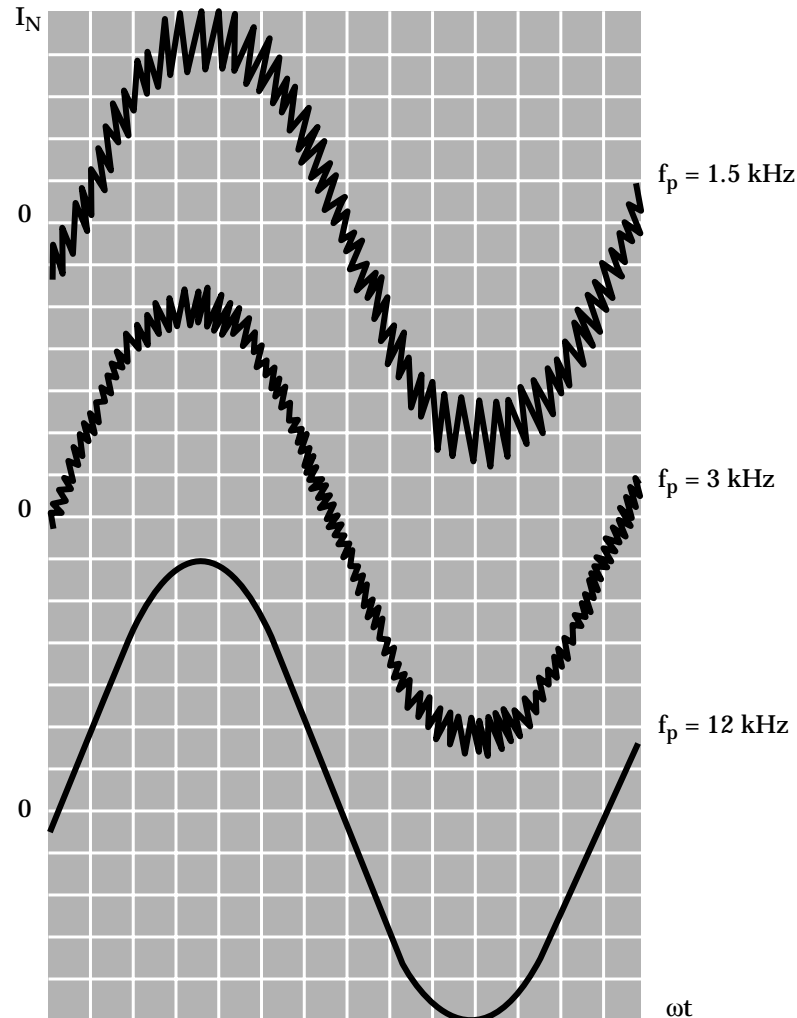
Er zijn ook andere mogelijkheden om de in- en uitschakelpunten van een halfgeleider te vinden. De Danfoss VVC- en VVC^{plus}-besturingssystemen berusten op door een microprocessor uitgevoerde berekeningen om de optimale schakelpunten van de halfgeleiders van de omvormer te vinden. Beide systemen worden op blz. 84 beschreven.

Transistors

Transistors – tegenwoordig zijn er ook transistors voor grote stromen en hoge spanningen en schakelfrequenties – hebben de plaats ingenomen van de thyristors die vroeger in de omvormers van frequentie-omvormers toegepast werden. In tegenstelling tot thyristors en dioden zijn transistors niet afhankelijk van de nuldoorgang van de stroom. Door de polariteit van de stuurklemmen te wijzigen kunnen transistors op ieder gewenst moment geleiden of blokkeren. Dankzij de ontwikkelingen die in de laatste jaren in de halfgeleidertechniek hebben plaatsgevonden is de schakelfrequentie van transistors aanzienlijk verhoogd. De bovenste schakelgrens ligt tegenwoordig bij enkele honderden kilohertz.

De magnetische storingen door ‘impuls’-magnetisering in de motor worden daardoor minder.

Een ander voordeel van de hoge schakelfrequentie is de variabele modulatie van de uitgangsspanning van de frequentie-omvormer. Op deze wijze kan een sinusvormige motorstroom verkregen worden. De aansturing van de frequentie-omvormer behoeft alleen maar de transistors van de omvormer volgens een passend patroon uit en in te schakelen.



Afb. 2.17 Invloed van de schakelfrequentie op de motorstroom

De schakelfrequentie van de omvormer is een compromis tussen de verliezen in de motor (sinusvorm van de motorstroom) en de verliezen in de omvormer. Bij een grotere schakelfrequentie stijgen de verliezen in de omvormer met het aantal malen dat de halfgeleiders geschakeld worden.

Hoogfrequenttransistors kunnen worden verdeeld in drie hoofdgroepen:

- bipolaire (LTR)
- unipolaire (MOS-FET)
- bipolaire met geïsoleerde poort (IGBT).

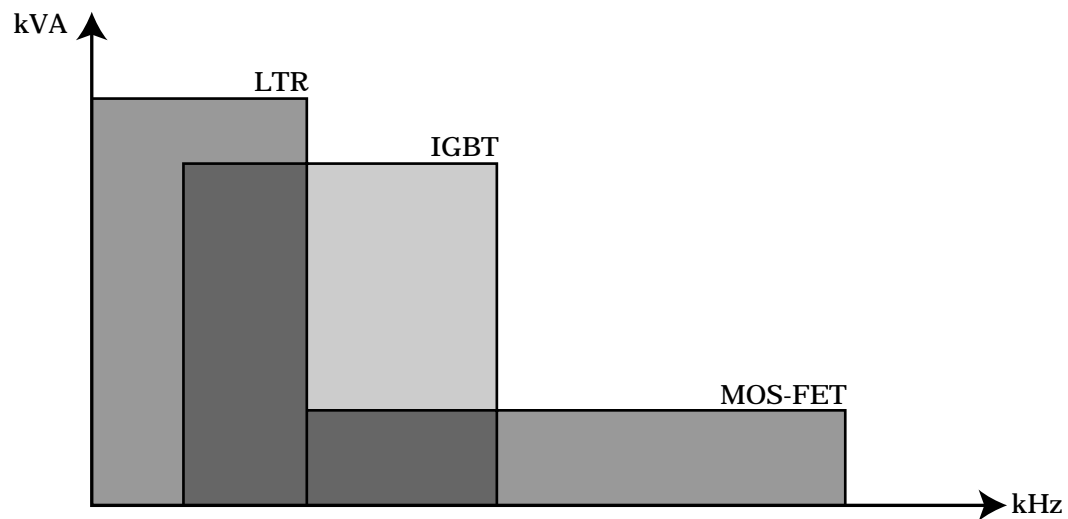
IGBT transistors combineren de eigenschappen van MOS-FET transistors met de uitgangseigenschappen van LTR transistors.

Tegenwoordig worden zowel de componenten als de stuurschakeling van omvormers in een module ingegoten dat wordt aangeduid met IPM ('Intelligent Power Module').

In onderstaande tabel zijn de belangrijkste verschillen aangegeven.

Halfgeleider		MOS-FET	IGBT	LTR
Eigenschap				
Symbol				
Schema				
Geleiden Stroomgeleiding Verliezen		laag groot	hoog gering	hoog gering
Blokkeren Bovengrens		laag	hoog	gemiddeld
Schakelen Inschakeltijd Uitschakeltijd Verliezen		kort kort gering	gemiddeld gemiddeld gemiddeld	gemiddeld gering groot
Sturen Vermogen Grootheid		gering spanning	gering spanning	groot stroom

Afb. 2.18 Vergelijking van vermogenstransistors



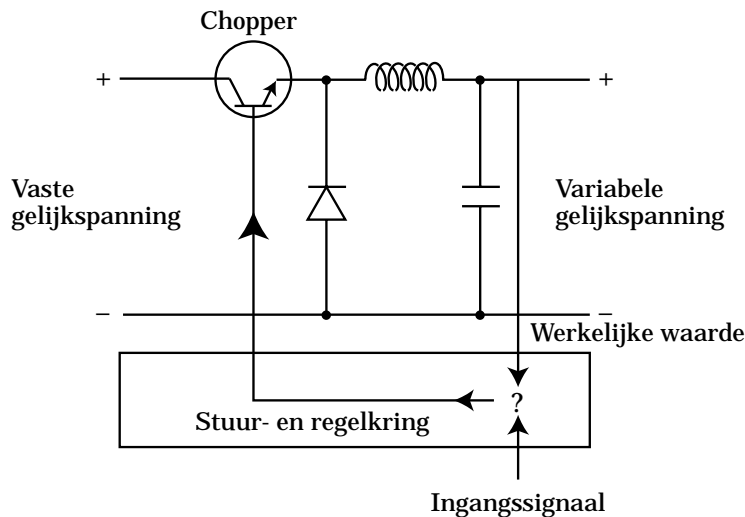
Afb. 2.19 Vermogens- en frequentiebereik van vermogenstransistors

De IGBT transistor past goed bij de frequentie-omvormer. Dat geldt zowel voor het vermogensbereik, de goede geleidbaarheid en de hoge schakelfrequentie als voor de ongecompliceerde aansturing.

Impulsamplitudemodulatie (PAM)

Impulsamplitudemodulatie wordt toegepast bij frequentie-omvormers met variabele tussenkringspanning. De amplitude van de uitgangsspanning wordt òf door de tussenkringchopper van een frequentie-omvormer met ongeregelde gelijkrichter gegenereerd òf rechtstreeks in een frequentie-omvormer met gestuurde gelijkrichter.

De spanningsopwekking in frequentie-omvormers met tussenkringchopper wordt hieronder nader toegelicht.



Afb. 2.20 Spanningsregeling

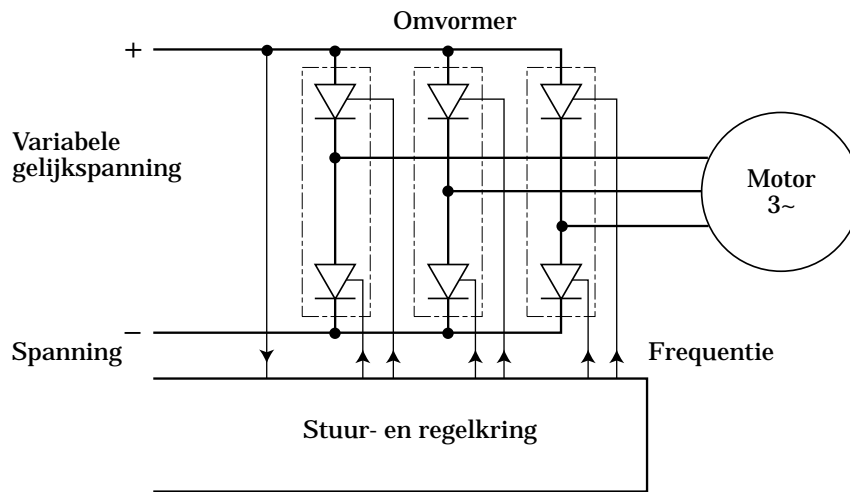
De transistor (chopper) in afb.2.20 wordt in- en uitgeschakeld door de stuur- en regelkring. De schakeltijdstippen zijn afhankelijk van de ingestelde waarde (het ingangssignaál) en het gemeten spanningssignaál (de werkelijke waarde). De werkelijke waarde wordt aan de condensator gemeten. De spoel en condensator functioneren als een filter die de golving van de spanning afvlakt. De hoogte van de spanning hangt af van de tijd waarin de transistor geopend is. Bij een verschil tussen de ingestelde en de werkelijke waarde wordt de chopper zo lang bijgesteld tot de na de chopper gewenste spanningshoogte bereikt is.

Sturing van de frequentie

De frequentie van de uitgangsspanning wordt in de omvormer gestuurd door de periode te veranderen. Binnen eenzelfde periode worden de halfgeleiderschakelcomponenten meermalen geschakeld.

De periode kan

1. rechtstreeks door het ingangssignaal, of
2. door de variabele gelijkspanning, die evenredig is aan het ingangssignaal, gestuurd worden.



Afb. 2.21 Frequentiebesturing via de tussenkringspanning

Pulsbreedtemodulatie (PWM)

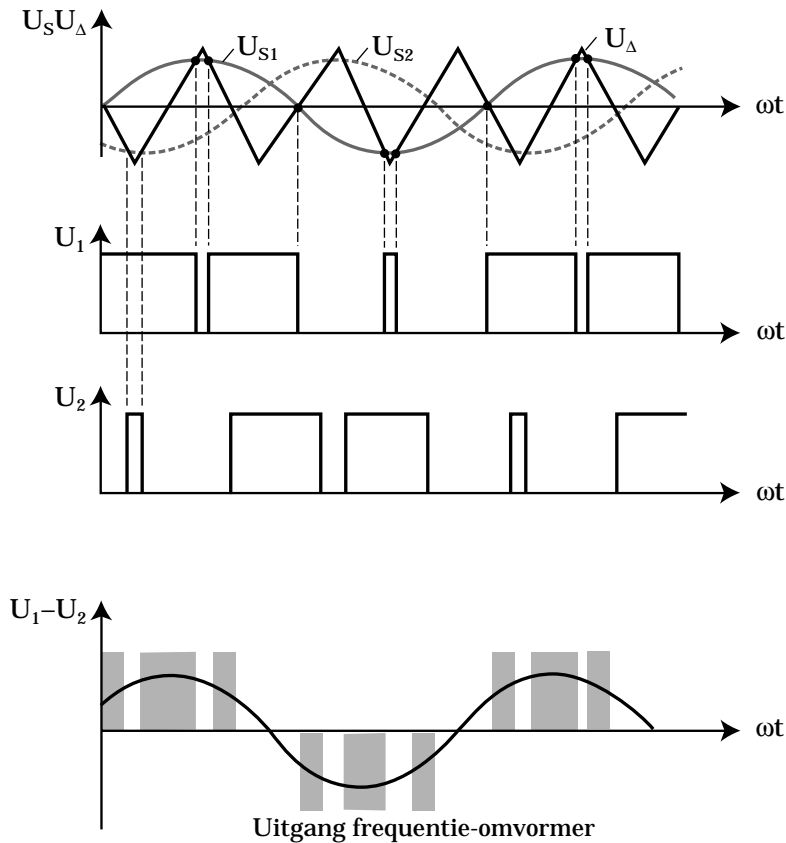
De meest gebruikelijke methode voor het genereren van een driefasenspanning met bijpassende frequentie is pulsbreedtemodulatie.

Hierbij wordt de volle tussenkringspanning ($\sim\sqrt{2} \times U_{\text{net}}$) via de elektronische vermogenscomponenten in- en uitgeschakeld. De impulsverhouding tussen de in- en uitschakeltijd is variabel en dit brengt de spanningsregeling teweeg.

Er zijn diverse mogelijkheden om de in- en uitschakeltijden van de omvormer te bepalen. Wij gaan hieronder nader in op het zogenaamde 'sinusgestuurde' PWM-systeem (kortweg PWM genoemd) en bovendien op andere moderne technologische methoden ter bepaling van de schakeltijdstippen van een omvormer.

Sinusgestuurde pulsbreedtemodulatie (PWM)

Dit besturingsprincipe maakt gebruik van een sinusvormige referentiespanning (U_S) voor iedere uitgang van de frequentie-omvormer. De periode van de sinusspanning komt overeen met de gewenste grondfrequentie van de uitgangsspanning. De drie referentiespanningen worden onderdrukt door een driehoekspanning (U_Δ ; zie afb.2.22).

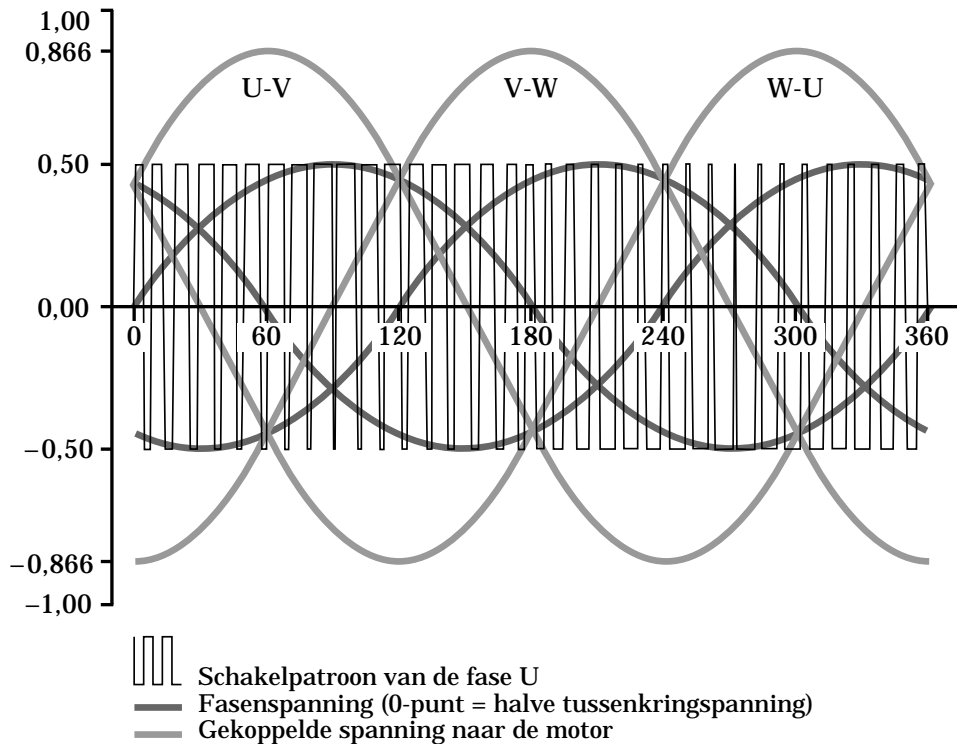


Afb. 2.22 Het principe van sinusgestuurde PWM
(met twee referentiespanningen: U_{S1} en U_{S2})

De halfgeleiders van de omvormer worden in- of uitgeschakeld in de snijpunten van de driehoekspanning en de sinusreferenties.

De snijpunten worden door de elektronica van de aansturing gecontroleerd. Als de driehoekspanning groter is dan de sinusspanning wordt de uitgangsimpuls negatief en bij een lagere driehoekspanning positief. De maximale uitgangsspanning van de frequentie-omvormer wordt dus door de tussenkringspanning bepaald. De uitgangsfrequentie wordt veranderd door de motor gedurende kortere of langere tijd aan de halve tussenkringspanning aan te leggen.

De uitgangsspanning wordt veranderd door de spanningsimpulsen van de uitgangsklemmen van de frequentie-omvormer met een reeks kortere enkelimpulsen met daartussen liggende intervallen op te heffen. De amplitude van de negatieve en positieve spanningsimpulsen komt daardoor overeen met de halve tussenkringspanning.



Afb. 2.23 Uitgangsspanning bij sinusgestuurde PWM

Bij lage statorfrequenties wordt de periode langer en kan zelfs zo groot worden dat het niet mogelijk is de frequentie van de driehoekspanning in toom te houden.

Hierdoor worden de spanningsvrije perioden te groot en loopt de motor onregelmatig. Om dit te vermijden kan de frequentie van de driehoekspanning bij lage frequenties verdubbeld worden.

Door de lage schakelfrequentie maakt de motor meer lawaai. Dit lawaai kan gereduceerd worden door de schakelfrequentie te verhogen. Dankzij nieuwe ontwikkelingen op het gebied van halfgeleiders kan een vrijwel sinusvormige uitgangsspanning gemoduleerd en een bijna sinusvormige stroom gegenereerd worden.

Een PWM frequentie-omvormer die uitsluitend met sinusvormige referentiemodulatie werkt kan tot 86,6% van de nominale spanning leveren (zie afb.2.23).

De fasespanning van de uitgangsklemmen van de frequentie-omvormer komt overeen met de halve tussenkringspanning gedeeld door $\sqrt{2}$ en is dus gelijk aan de halve spanning van het voedingsnet. De netspanning van de uitgangsklemmen is $\sqrt{3}$ maal de fasespanning, d.w.z. 0,866 maal de spanning van het voedingsnet.

De uitgangsspanning van de frequentie-omvormer kan de motorspanning niet uitsluitend via sinusmodulatie bereiken. De uitgangsspanning zou in dat geval ongeveer 13% te laag zijn.

De benodigde extra spanning wordt verkregen door de rimpelfrequentieverhouding te verkleinen zodra de frequentie groter wordt dan ca. 45 Hz. Deze methode heeft het nadeel dat de spanning trapsgewijs verandert en de motorstroom onstabiel wordt. Door het verkleinen van de rimpelfrequentieverhouding worden de hogere harmonischen aan de uitgang van de frequentie-omvormer groter. Dit veroorzaakt grotere verliezen in de motor.

Een andere methode is andere referentiespanningen dan de drie sinusreferenties te gebruiken. Dat kunnen bijv. trapeziumvormige spanningen, trapvormige spanningen of spanningen met een ander tijdsverloop zijn.

Een eenvoudig te genereren referentiespanning is die waarbij gebruik gemaakt wordt van de derde harmonische van de sinusreferentie. Door de amplitude van de sinusreferentie met 15,5% te verhogen en de derde harmonische toe te voegen verkrijgt men een schakelpatroon voor de halfgeleiders van de omvormer dat de uitgangsspanning van de frequentie-omvormer doet toenemen.

Synchrone pulsbreedtemodulatie (PWM)

Bij sinusgestuurde pulsbreedtemodulatie diende de spanningsbenutting geoptimaliseerd en het harmonische spectrum geminimaliseerd te worden. Als de modulatiefrequentie (d.w.z. de frequentie van de driehoekspanning) ten opzichte van de frequentie van het referentiesignaal erg groot wordt kunnen beide signalen asynchroon verlopen. Uiterlijk bij frequentieverhoudingen in de buurt van 10 en kleiner ontstaan storende resonanties. De beide signalen moeten dus gesynchroniseerd worden.

De synchronisatie is merkbaar bij de zogenaamde 'gangwissel-schakeling'.

Door de gunstige verhouding tussen de prijs en prestatie van microprocessors, geïntegreerde schakelingen en vermogens-elektronische componenten (bipolaire transistors en IGBT's) kunnen de schakeltijdstippen voor omvormers in eenvoudig uitgevoerde apparaten door een microprocessor (computer) bepaald worden.

Aangezien de software voor het berekenen van de schakeltijdstippen van leverancier tot leverancier verschilt wordt hierop niet nader ingegaan.

Als aan het bereik van de toerentalregeling en de rondloopeigenschappen van de aandrijving hoge eisen worden gesteld worden de schakeltijdstippen van de pulsbreedtemodulatie niet meer door de microprocessor bepaald, maar door een extra digitale schakelkring, bijv. een IC voor specifieke toepassingen (ASIC). Deze module bevat de know-how van de betreffende leverancier. De microprocessors nemen dan andere taken over.

Een principiële probleem bij pulsbreedtemodulatie is het bepalen van de optimale schakeltijdstippen en hoeken voor de spanning over een periode. Deze schakeltijdstippen moeten zo gekozen worden dat harmonischen minimaal optreden. Een daarop gebaseerd schakelpatroon geldt slechts voor een bepaald (begrensd) frequentiebereik. Buiten dit bereik is een nieuw schakelpatroon noodzakelijk. Dergelijke modulatietechnieken (synchroon) met 'gangwissel-schakeling' zijn bruikbaar voor draaistroomaandrijvingen met weinig dynamische eigenschappen waarbij spanning en frequentie (normale U/f-besturing) langzaam gewijzigd kunnen worden.

Asynchrone pulsbreedtemodulatie (PWM)

De eis dat een systeem snel dient te reageren wanneer het koppel, resp. het toerental, van een draaistroomaandrijving (anders dan een servomotor) met behulp van veldgerichte sturing worden veranderd, maakt het noodzakelijk de amplitude en hoek van de omvormerspanning tragsgewijs te wijzigen. Dat is niet mogelijk met 'normale' of 'synchrone' PWM-schakelpatronen. Asynchrone pulsbreedtemodulatie, waarbij de modulatiefrequentie en de ingestelde motorfrequentie niet gesynchroniseerd worden, biedt die mogelijkheid echter wel.

Hieronder worden twee asynchrone PWM-methoden besproken:

- SFAVM (statorfluxgerichte asynchrone vectormodulatie), en
- 60°AVM (asynchrone vectormodulatie).

Met deze twee systemen kunnen de amplitude en hoek van de omvormerspanning tragsgewijs veranderd worden.

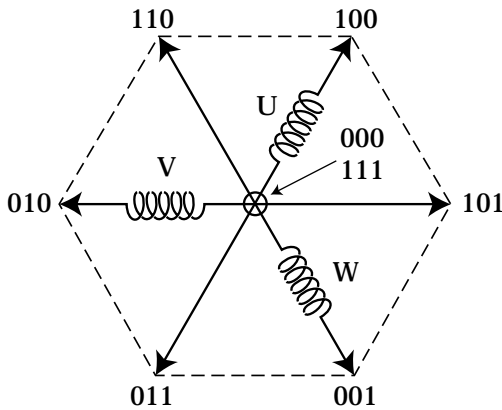
SFAVM

SFAVM is een ruimtevectormodulatiemethode die het mogelijk maakt de spanning van de omvormer willekeurig, zij het in stappen, binnen de schakeltijd te veranderen (asynchroon).

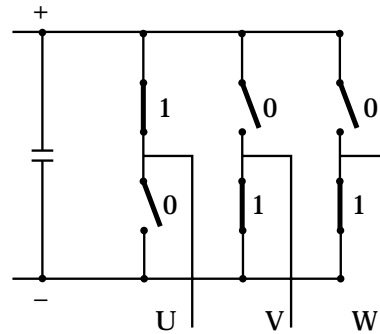
Hoofddoel van deze modulatie is de statorflux optimaal (zonder pulserend koppel) aan de statorspanning te koppelen. Vergeleken met de netvoeding doet zich bij 'normale' PWM-voeding een afwijking voor in de statorfluxvectoramplitude en de fluxhoek. Deze afwijkingen beïnvloeden het draaiveld (koppel) in de lichtspleet van de motor en veroorzaken een pulsatie van het koppel. Het effect van de afwijking van de amplitude is verwaarloosbaar klein en kan door verhoging van de schakelfrequentie verder gereduceerd worden. De afwijking van de hoek hangt af van de schakelvolgorde en kan tot grotere pulsatie van het koppel leiden. De schakelvolgorde dient daarom zo berekend te worden dat de afwijking van de vectorhoek minimaal blijft.

Iedere aftakking van een driefasige PWM-omvormer heeft twee schakelstanden (in of uit).

De drie schakelaars maken acht schakelcombinaties (2³) mogelijk en dus ook acht gescheiden spanningsvectoren aan de uitgang van de omvormer, resp. aan de statorwikkeling van de aangesloten motor. In afb.2.24a zijn de vectoren aan de hoeken van de zeshoekschakeling 100, 110, 010, 011, 001, 101, met 000 en 111 als nulvectoren.



Afb.2.24a
Spanningsvectoren



Afb.2.24b
De omvormer als schakelaar

Met de schakelcombinaties 000 en 111 krijgen alle drie de uitgangsklemmen van de omvormer dezelfde potentiaal, n.l. de positieve of negatieve potentiaal van de tussenkring (afb.2.24b). Dit heeft op de motor eenzelfde effect als een klemmenkortsluiting en daarom wordt de spanning 0 V aan de motorwindingen aangelegd.

Opwekken van de motorspanning

Wat stationair bedrijf betreft komt dit overeen met het langs een cirkelvormige baan leiden van de spanningsvector van de machine U_{wt} , zoals in afb.2.25b aangegeven.

De lengte van de spanningsvector is maatgevend voor de waarde van de motorspanning, terwijl de omloopsnelheid overeen komt met de actuele bedrijfsfrequentie.

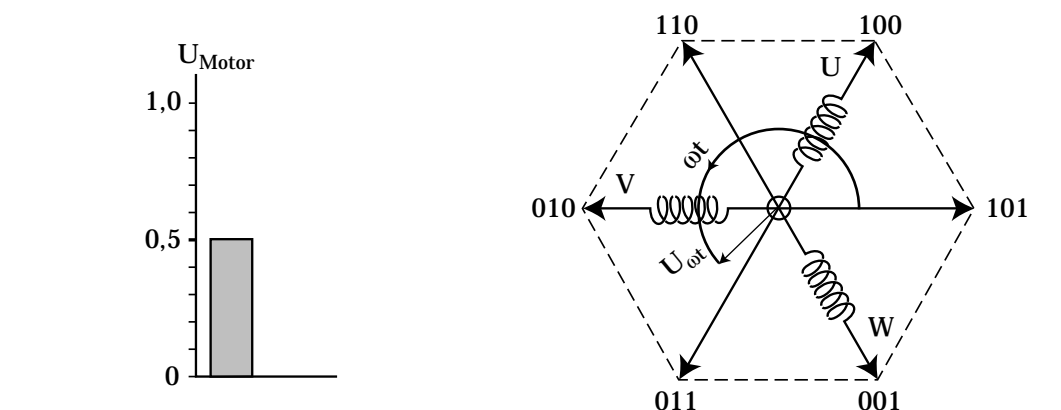
De motorspanning wordt opgewekt door de middelwaarde gevormd door kort pulseren van naastgelegen vectoren.

De Danfoss SFAVM beschikt o.a. over de volgende eigenschappen:

- De amplitude en hoek van de spanningsvector kunnen voor wat de ingestelde waarde betreft zonder afwijking geregeld worden.

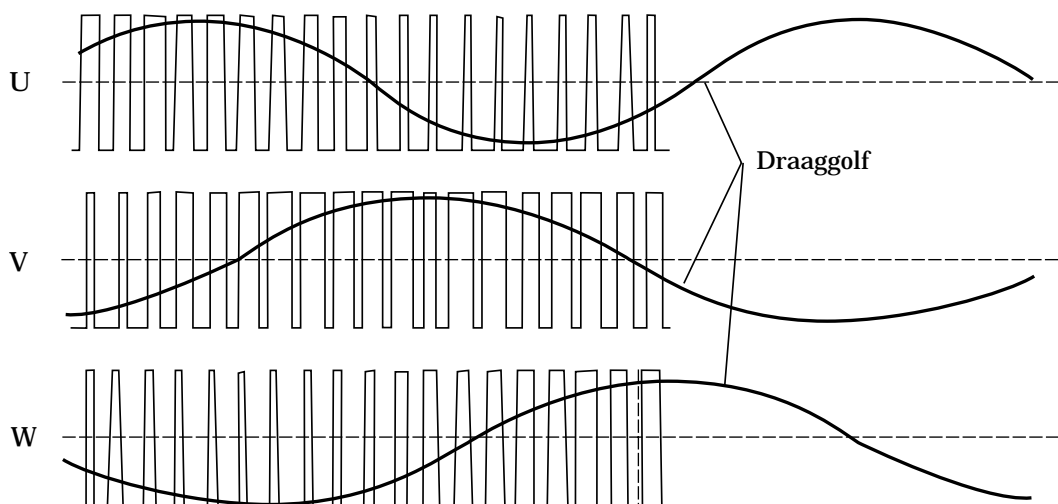
- Een schakelvolgorde begint altijd met 000 of 111. Daardoor kan elke willekeurige spanningsvector met drie schakelstanden gegenereerd worden.
- Middelwaardevorming van de spanningsvector vindt plaats door kort pulseren van naastgelegen vectoren en de nulvectoren 000 en 111.

Hoe de motorspanning wordt opgewekt wordt duidelijk gemaakt aan de hand van de voorbeelden in afb.2.25 en 2.26.



a) *Ingestelde uitgangsspanning (50% van de nominale spanning)*

b) *Creëren van de ideale spanningsvector U_{wt} door PWM tussen naastgelegen instelbare spanningsvectoren*

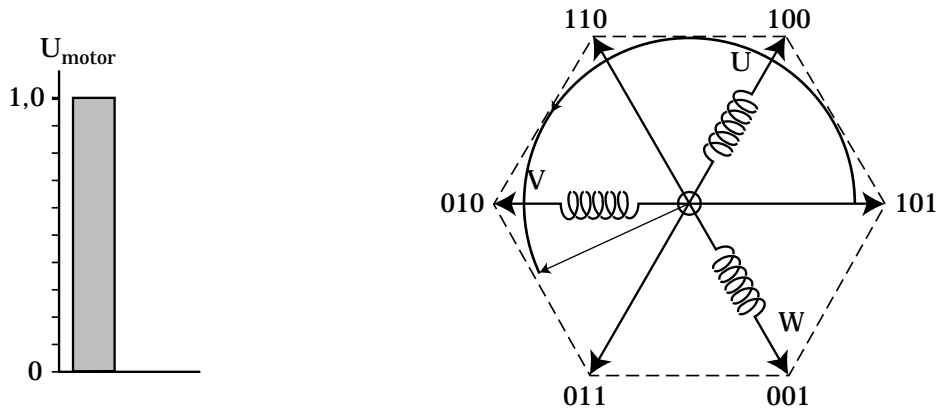


c) *Chronologisch verloop van de stuursignalen voor drie omvormerfasen U, V, W*

Afb. 2.25 Koppelopname PWM na ruimtevectormodulatie (SFVPM) voor 50% nominale motorspanning

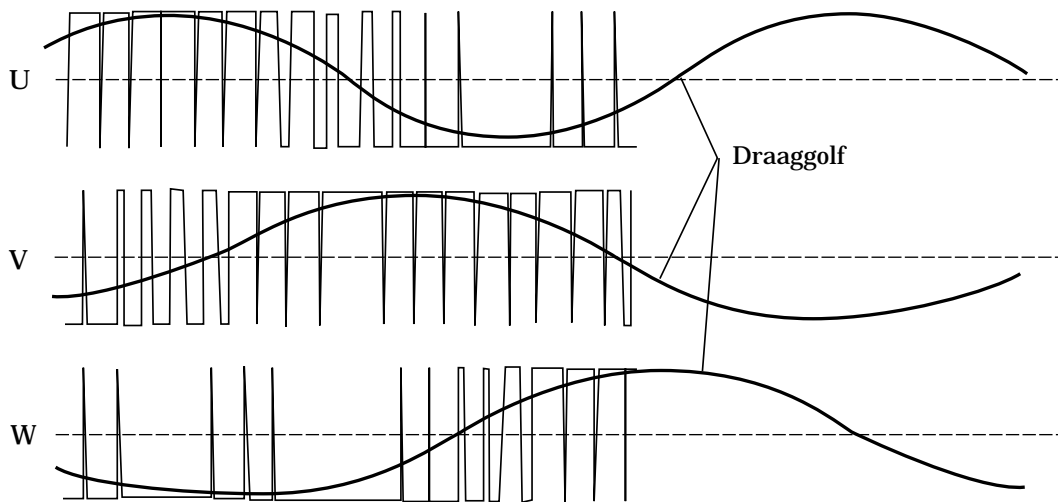
De ingestelde waarde (U_{wt}) in afb.2.25a is 50%. De uitgangsspanning wordt door kort pulseren van de naastgelegen vectoren – in dit geval 011 en 001 plus 000 en 111 – als middelwaarde gecreëerd (afb.2.25b).

Afb.2.26 illustreert het genereren van een motorspanning van 100%.



a) *Ingestelde uitgangsspanning (100% van de nominale spanning)*

b) *Creëren van de ideale spanningsvector U_{wt} door PWM tussen naastgelegen instelbare spanningsvectoren*



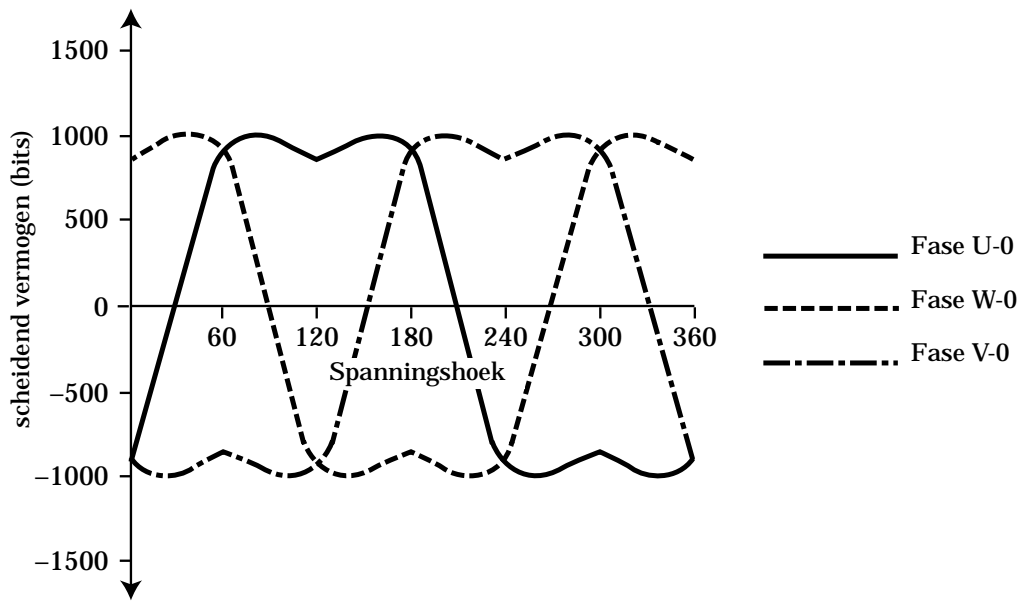
c) *Chronologisch verloop van de stuursignalen voor drie omvormerfasen U, V, W*

Afb. 2.26 Momentopname PWM na ruimtevectormodulatie (SFAVM) voor 100% nominale motorspanning

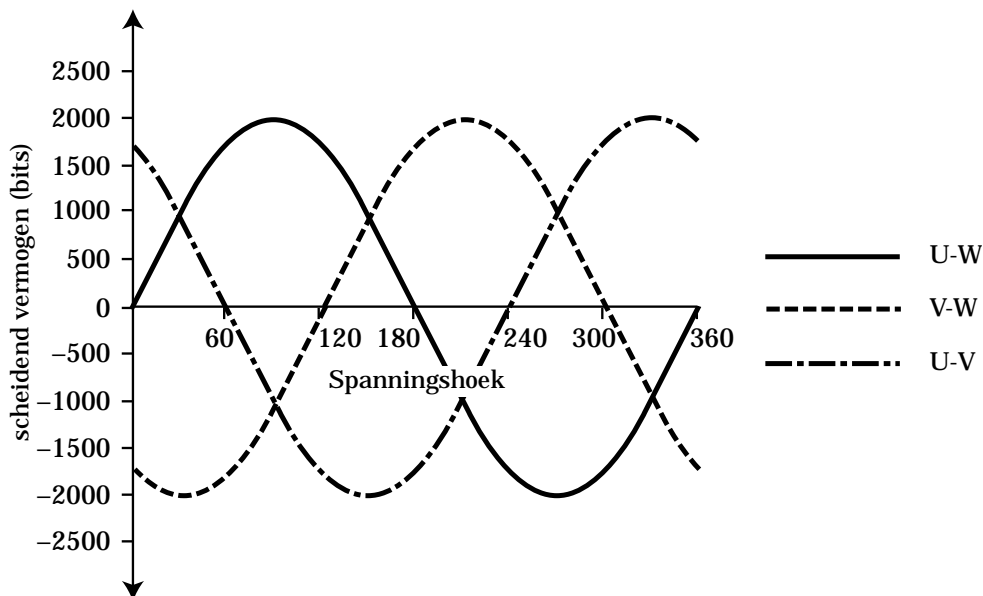
De SFAVM vormt de verbinding tussen het besturingssysteem en de vermogenskring van de omvormer. De modulatie verloopt synchron met de stuurfrequentie van de besturing (zie hfdst. VVC^{plus}) en asynchroon met de grondfrequentie van de motor-

spanning. De synchronisatie tussen besturing en modulatie is van belang voor de hoogvermogenbesturing (spanningsvector, fluxvector), omdat het besturingssysteem de spanningsvector rechtstreeks en zonder beperking kan controleren (de amplitude, hoek en hoeksnelheid zijn regelbaar).

Teneinde de online berekeningstijd drastisch te bekorten worden de spanningswaarden voor een reeks hoeken in een tabel vastgelegd. Afb.2.27 geeft een gedeelte weer van de vectormodulatietabel voor de Danfoss SFAVM en de uitgangsspanning (naar de motor).



Afb. 2.27 Gedeelte van een vectormodulatietabel (SFAVM)



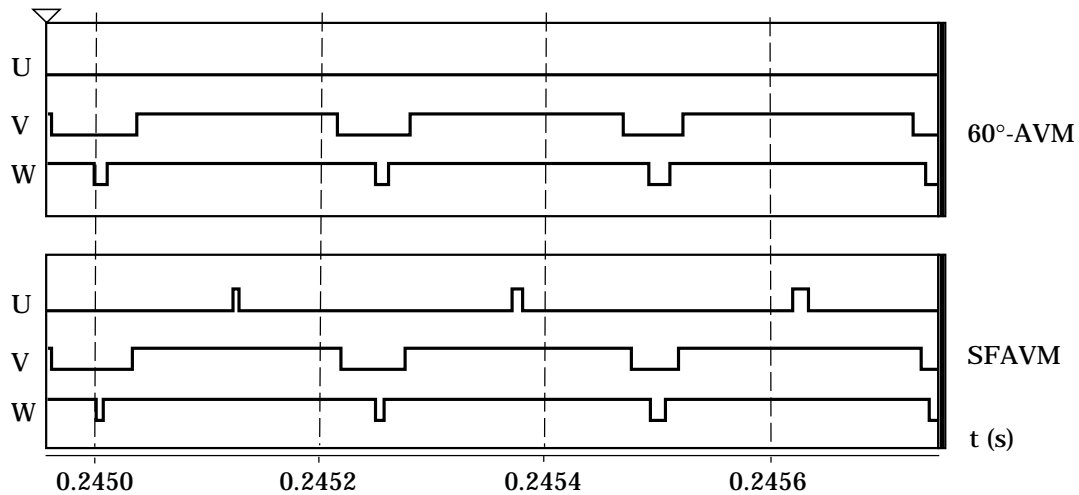
Afb. 2.28 Uitgangsspanning (motor) - (fase-fase)

60°AVM

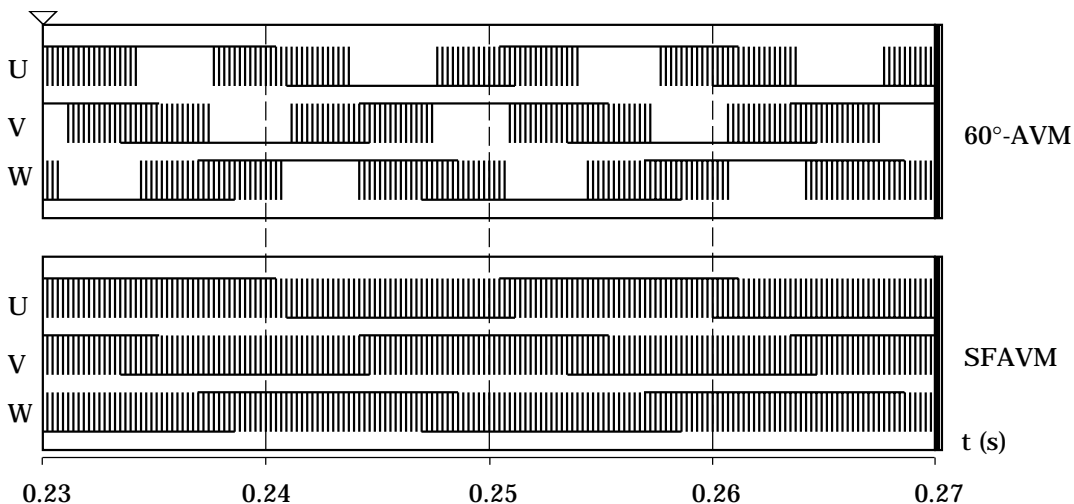
Anders dan bij SFAVM worden de spanningsvectoren bij 60° AVM (asynchrone vectormodulatie) als volgt bepaald:

- binnen een schakelperiode wordt slechts één nulvector (000 of 111) gebruikt;
- een schakelvolgorde begint niet altijd met een nulvector (000 of 111);
- binnen 1/6 periode (60°) wordt de omvormer in één fase niet geschakeld. De schakelstand (0 of 1) blijft dus gehandhaafd. In de twee andere fasen wordt normaal geschakeld.

In afb.2.29 wordt de schakelvolgorde bij 60° AVM vergeleken met die bij SFAVM, zowel voor een kort interval (a) als voor een aantal perioden (b).



Afb. 2.29a Schakelvolgorde bij 60° AVM en SFAVM voor enkele intervallen van 60°



Afb. 2.29b Schakelvolgorde bij 60° AVM en SFAVM voor een aantal perioden

De aansturing

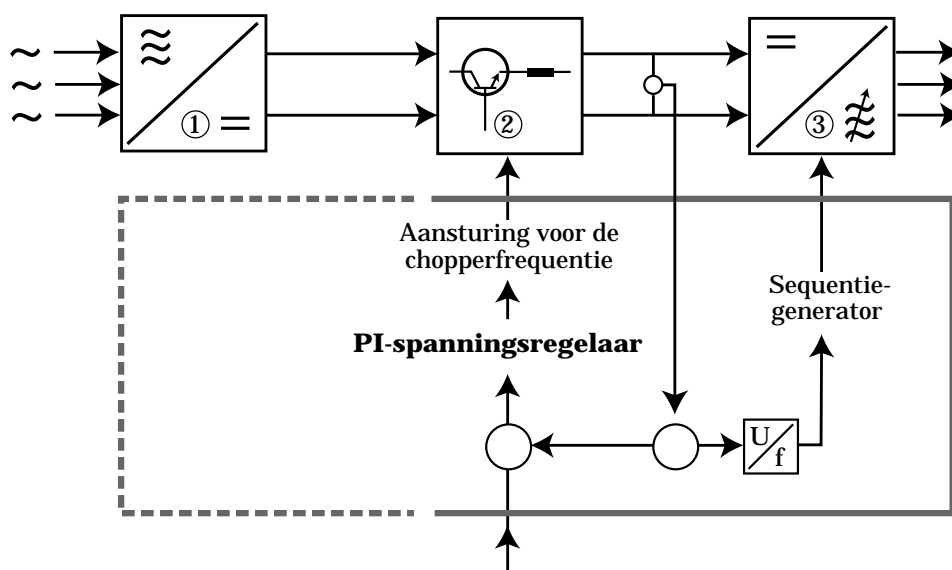
De aansturing – ook wel regelkring genoemd – is de vierde belangrijke component in de frequentie-omvormer. Deze component heeft vier hoofdtaken:

- het sturen van de halfgeleiders van de frequentie-omvormer,
- het uitwisselen van gegevens tussen de frequentie-omvormer en randapparatuur,
- het registreren en aangeven van storingsmeldingen, en
- het uitvoeren van functies ter bescherming van de frequentie-omvormer en motor.

De snelheid waarmee de aansturing functioneert kan met microprocestechnieken worden opgevoerd door gebruik te maken van kant-en-klare, in het geheugen opgeslagen impuls patronen. Dit reduceert het aantal noodzakelijke berekeningen aanzienlijk.

Dankzij deze methode van besturen kan de in de frequentie-omvormer ingebouwde computer voor iedere bedrijfstoestand het optimale impulspatroon voor de motor berekenen.

De aansturing van PAM-frequentie-omvormers



Afb. 2.30 Het principe van de aansturing in een choppergestuurde tussenkring

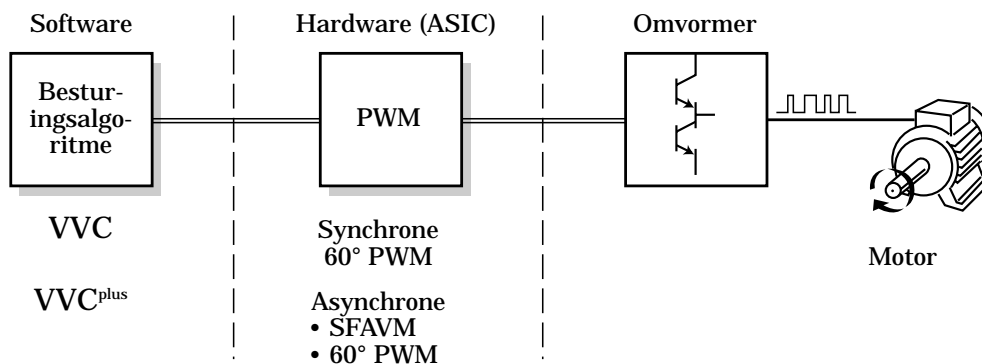
Afb.2.30 toont een PAM-gestuurde frequentie-omvormer met tussenkringchopper. De aansturing stuurt de chopper (2) en de omvormer (3) aan. Dit geschiedt op basis van de actuele waarde van de tussenkringspanning.

De tussenkringspanning stuurt een kring aan die als adresteller in het gegevensgeheugen functioneert. In het geheugen zijn de uitgangssequenties voor het impulspatroon van de omvormer opgeslagen. Bij oplopende tussenkringspanning verloopt het tellen sneller zodat de sequentie sneller doorlopen wordt en de uitgangsfrequentie stijgt.

Voor chopperbesturing wordt de tussenkringspanning eerst vergeleken met de ingestelde waarde van het referentiespanningsignaal. Van dit spanningssignaal wordt verwacht dat het tot een juiste uitgangsspanning en frequentie leidt. Is er verschil tussen een referentie- en een tussenkringsignaal dan meldt een PI-regelaar aan een regelkring dat de cyclustijd gewijzigd dient te worden. Het resultaat is dat de spanning van de tussenkring aangepast wordt aan het referentiesignaal.

Danfoss besturingen

Het Danfoss besturingssysteem voor de omvormer is in afb.2.31 weergegeven.



Afb. 2.31 Danfoss besturingssystemen

De PWM-schakelpatronen voor de omvormer worden berekend met behulp van het besturingsalgoritme. Dit systeem berust op de spanningsvectorbesturing ('Voltage Vector Control', afgekort tot **VVC**) van spanninggestuurde frequentie-omvormers.

Met VVC wordt de amplitude en frequentie van de spanningsvector gestuurd inclusief belasting- en slipcompensatie. De hoek van de spanningsvector wordt berekend aan de hand van de ingestelde motorfrequentie en de modulatiefrequentie.

Enkele eigenschappen van dit systeem:

- volle nominale motorspanning bij nominale motorfrequentie zodat het vermogen niet gereduceerd hoeft te worden;
- toerentalregelbereik: 1:25, zonder terugkoppeling;
- nauwkeurigheid van het toerental: $\pm 1\%$ van de nominale snelheid, zonder terugkoppeling;
- bestand tegen sterk wisselende belasting.

Met VVC^{plus} worden de amplitude en hoek van de spanningsvector en ook de frequentie rechtstreeks gestuurd.

Vergeleken met VVC kenmerkt VVC^{plus}-besturing zich behalve door de reeds genoemde voordelen door:

- betere dynamische eigenschappen bij lage toerentallen (0 Hz - 10 Hz);
- een betere magnetisering van de motor;
- het toerentalregelbereik: 1:100, zonder terugkoppeling
- de nauwkeurigheid van het toerental: $\pm 0,5\%$ van de nominale snelheid, zonder terugkoppeling;
- actieve resonantie-onderdrukking;
- koppelbesturing;
- bedrijf in de stroomgrens.

Het Danfoss VVC-besturingssysteem

Het Danfoss VVC-besturingsprincipe werkt op basis van een synchrone 60° PWM methode.

De aansturing werkt volgens een wiskundig model dat:

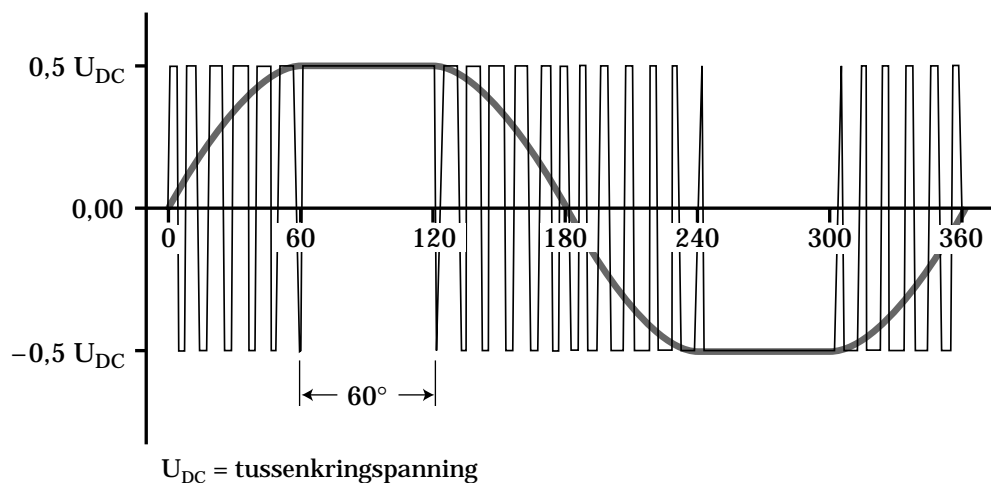
- met behulp van compensatieparameters de optimale motor-magnetisering bij wisselende belasting berekent.

De synchrone 60° PWM, die opgenomen is een ASIC-kring, bepaalt

- de optimale schakeltijdstippen voor de halfgeleiders (IGBT's) van de omvormer.

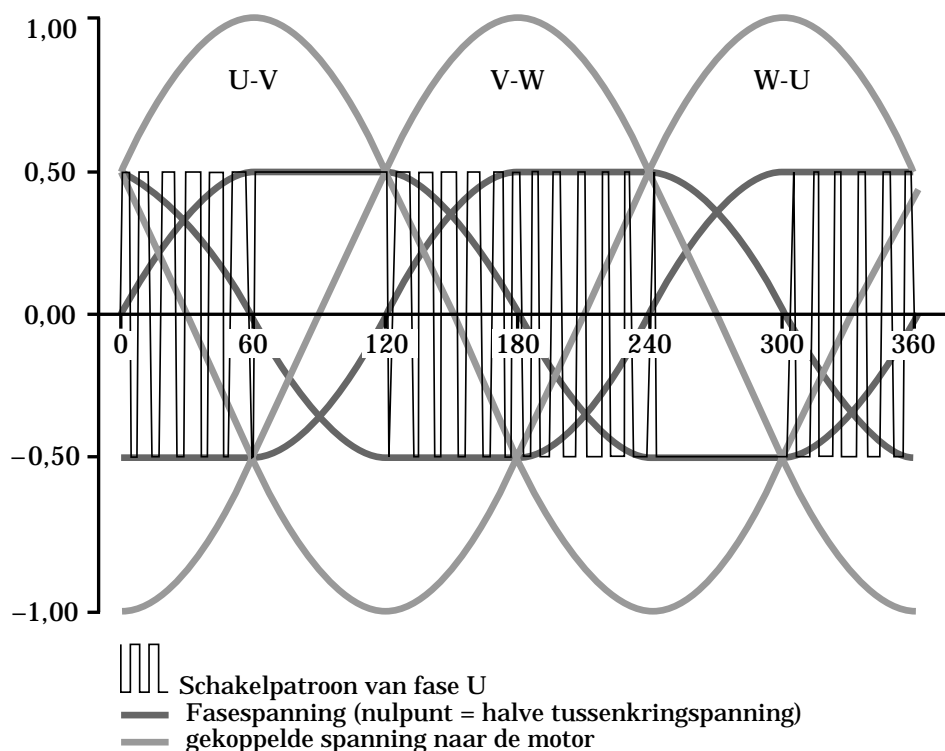
Deze schakeltijdstippen worden als volgt vastgesteld:

- De numeriek grootste fase wordt gedurende $\frac{1}{6}$ periode (60°) op de positieve of negatieve spanning gehouden.
- De beide andere fasen worden bovenproportioneel gewijzigd om te zorgen dat de resulterende uitgangsspanningen (fase-fase) opnieuw sinusvormig worden en de gewenste amplitude hebben (afb.2.32b).



Afb. 2.32a Synchrone 60° PWM (Danfoss VVC-besturing) van een fase

In tegenstelling tot sinusgestuurde PWM komt de gewenste uitgangsspanning bij VVC-besturing digitaal tot stand. Dit garandeert dat de uitgangsspanning van de frequentie-omvormer de volle hoogte van de voedingsspanning bereikt. De motorstroom wordt sinusvormig en de motoreigenschappen komen overeen met die bij rechtstreekse aansluiting op het net.



Afb. 2.32b Met synchrone 60° PWM-besturing wordt de volle uitgangsspanning onmiddellijk bereikt

De motor wordt optimaal gemagnetiseerd, omdat de frequentie-omvormer rekening houdt met de constanten van de motor (statorweerstand en -inductiviteit). Met behulp van deze gegevens berekent de frequentie-omvormer de optimale uitgangsspanning.

De frequentie-omvormer meet voortdurend de belastingsstroom en kan de uitgangsspanning dus afstemmen op de belasting. De motorspanning wordt op deze wijze aangepast aan het motortype en volgt iedere verandering in belasting.

Het Danfoss VVC^{plus}-besturingssysteem

Het Danfoss VVC^{plus}-besturingssysteem berust op vectormodulatie voor constante-spanningsgestuurde PWM-omvormers.

Het schakelpatroon voor de omvormer wordt berekend met behulp van de SFAVM- of 60°AVM-methode zodat – vergeleken met frequentie-omvormers gebaseerd op synchrone PWM – het pulserende koppel in de luchtspleet zeer klein gehouden wordt. De gebruiker kan òf zelf kiezen welke van deze twee methoden hij wenst toe te passen òf de keus overlaten aan de besturing (AUTO), die dat doet op basis van de temperatuur van het koellichaam. Bij een temperatuur lager dan 75°C wordt geregeld volgens het SFAVM-principe en boven 75°C volgens het 60°AVM-principe.

Tabel 2.01 geeft een kort overzicht van beide principes.

Keus	Max. schakelfrequentie van de omvormer	Eigenschappen
SFAVM	Max. 8 kHz	<ol style="list-style-type: none">1. Geringere koppelpulsatie dan bij synchrone 60° PWM (VVC)2. Geen 'gangwisselschakeling'3. Grote schakelverliezen in de omvormer
60°-AVM	Max. 14 kHz	<ol style="list-style-type: none">1. Kleinere schakelverliezen in de omvormer (ongeveer 1/3 van SFAVM)2. Geringere koppelpulsatie dan bij synchrone 60° PWM (VVC)3. Relatief grotere koppelpulsatie dan bij SFAVM

Table 2.01 Tabel 2.01 SFAVM vergeleken met 60° AVM

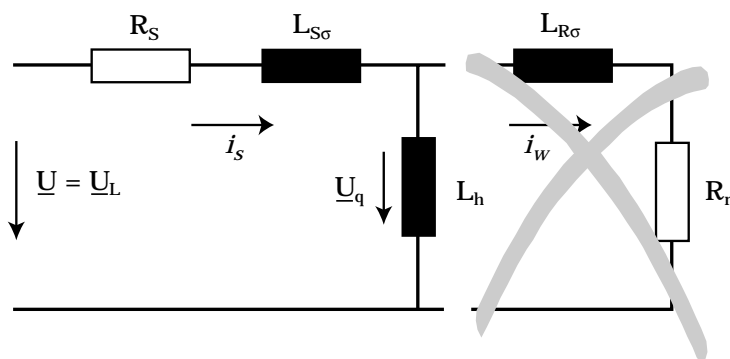
Het besturingsprincipe is schematisch weergegeven in een vereenvoudigd schakeldiagram (afb.2.33) en in een basisdiagram (afb.2.34).

Onderscheid kan worden gemaakt tussen twee bedrijfstoestan- den:

- Onbelast

Bij nullast stroomt er geen stroom door de rotor ($i_o = 0$) en de nullastspanning is dus:

$$\underline{U} = \underline{U}_L = (R_S + j\omega_S L_S) \times i_s$$



Afb. 2.33a Vereenvoudigd schakeldiagram van een draaistroommotor (onbelast)

waarin:

R_S = de statorweerstand

i_s = de magnetiseringsstroom van de motor

$L_{S\sigma}$ = de statorlekinductiviteit

L_h = de hoofdinductiviteit

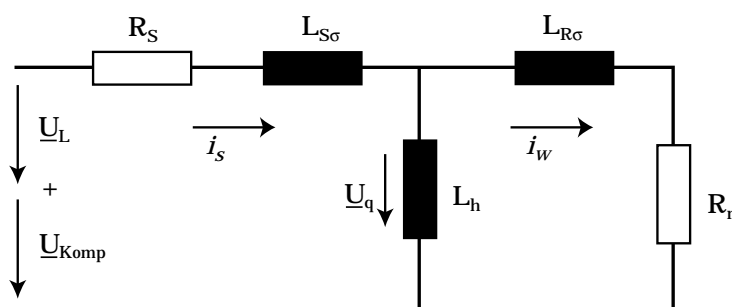
$L_S (=L_{S\sigma} + L_h)$ = de statorinductiviteit, en

$\omega_s (=2\pi f_s)$ = de hoeksnelheid van het draaiveld in de luchtspleet.

De nullastspanning (\underline{U}_L) wordt bepaald aan de hand van de motorgegevens (nominale spanning, -stroom, -frequentie, -toerental).

- *Belast*

Bij belasting verplaatst de werkstroom (i_w) zich naar de rotor. Om deze stroom mogelijk te maken wordt een extra spanning (\underline{U}_{komp}) aan de motor ter beschikking gesteld:

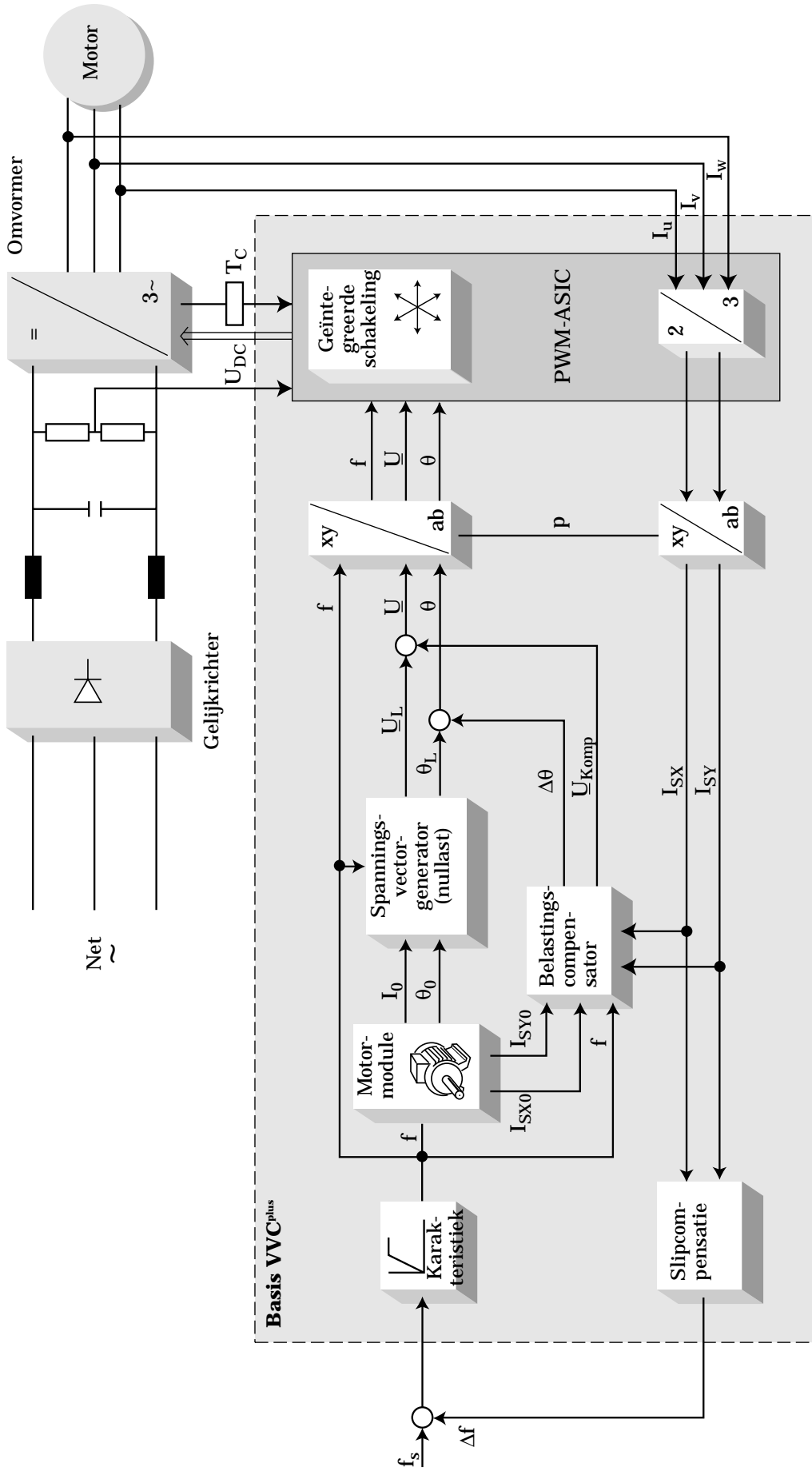


Afb. 2.33b Vereenvoudigd schakeldiagram van een draaistroommotor (belast)

De grootte van de extra spanning \underline{U}_{komp} wordt bepaald aan de hand van de nullast- en belastingsstroom en het toerentalbereik (laag resp. hoog toerental). De grootte van de spanning en het toerentalbereik worden door de motorgegevens bepaald.

f	frequentie (intern)	U_{DC}	spanning van de gelijkstroomtussenkring
f_s	ingestelde frequentie	\underline{U}_L	nullastspanningsvector
Δf	berekende slipfrequentie	\underline{U}_S	statorspanningsvector
I_{SX}	blindstroomcomponent (berekend)	\underline{U}_{komp}	belastingafhankelijke spanningscompensatie
I_{SY}	werkstroomcomponent (berekend)	U	voedingsspanning van de motor
I_{SX0}, I_{SY0}	nullaststroom van de x-, resp. y-as (berekend)	X_h	reactantie
I_u, I_v, I_w	stroom, resp. van fase U, V en W (gemeten)	X_1	statorlekreactantie
R_s	statorweerstand	X_2	rotorlekreactantie
R_r	rotorweerstand	ω_s	statorfrequentie
θ	hoek van de spanningsvectoren	L_S	statorinductiviteit
θ_0	nullastwaarde van theta	L_{Ss}	statorlekinductiviteit
$\Delta\theta$	belastingafhankelijke deel van theta (compensatie)	L_{Rs}	rotorlekinductiviteit
T_C	temperatuur warmteafvoersysteem/koellichaam	i_s	motorfasenstroom (schijnstroom)
		i_w	werkstroom (rotor)

Toelichting op afb.2.33 (blz.) en afb.2.34 (blz.)



Afb. 2.34 Het principe van VVC^{plus}-besturing

Zoals uit afb.2.34 blijkt berekent de motormodule de voor de belastingscompensator (I_{SX0} , I_{SY0}) en de spanningsvectorgenerator (I_0 , θ_0) in te stellen nullastwaarden (stromen en hoek).

Uitgaande van de nullaststroom en de statorweerstand en – inductiviteit berekent de spanningsvectorgenerator de nullastspanning (\underline{U}_L) en hoek (θ_L) van de spanningsvector (zie afb.2.33a).

De blindstroom- (I_{SX}) en werkstroomcomponent (I_{SY}) worden berekend aan de hand van de gemeten motorstromen (I_u , I_v en I_w).

Uitgaande van de berekende stromen (I_{SX0} , I_{SY0} , I_{SX} , I_{SY}) en de werkelijke waarden van de spanningsvector schat de belastingscompensator het luchtspleetkoppel en berekent hoeveel extra spanning (\underline{U}_{komp}) nodig is om de magnetische veldsterkte op de ingestelde waarde te houden. Hij corrigeert de door het belasten van de motoras te verwachten hoekafwijking (θ_0). De uitgangsspanningsvector wordt in vectorvorm (p) beschreven. Dit maakt rechtstreekse overmodulatie mogelijk en vereenvoudigt de koppeling aan de PWM-ASIC.

De doeltreffendheid van spanningsvectorbesturing wordt met name bij lage toerentallen bewezen, waarbij – in tegenstelling tot U/f-besturing – het dynamisch vermogen van de aandrijving door een goede bewaking van de spanningsvectorhoek merkbaar beter is. Bovendien is het stationair gedrag beter, omdat het besturingssysteem via de vectorwaarden voor spanning en stroom meer greep heeft op het koppel bij belasting dan mogelijk is op basis van scalaire signalen (amplitudewaarden).

Beveiligingsfuncties

VVC^{plus}-besturing wordt gekenmerkt door een beveiligingsfunctie dat er op gericht is een krachtige, intelligente vermogenskring op te bouwen en tegelijkertijd de kosten van de beveiliging van frequentie-omvormer en motor zo laag mogelijk te houden. Dit doel wordt bereikt dankzij een digitale beveiligingsstrategie die stoelt op een hergebruik van de voor het besturingssysteem benodigde signalen en snelle digitale signaalverwerking (ASIC) in plaats van passieve vermogenscomponenten (bijv. wisselstroomspoelen) toe te passen.

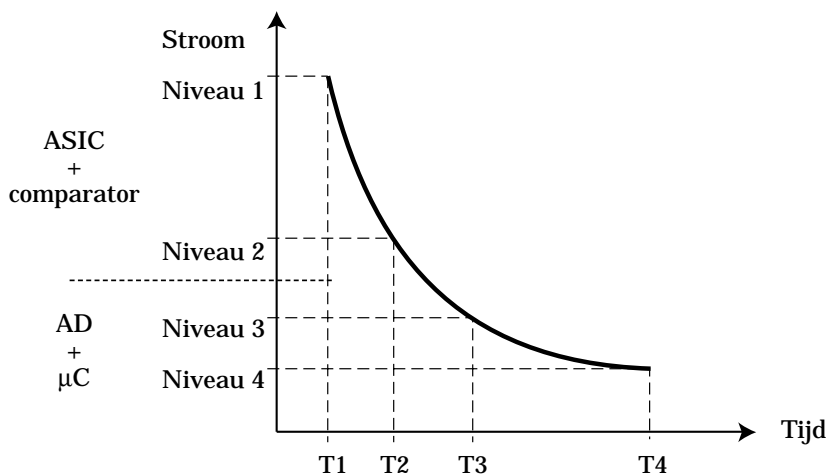
De omvormer is beveiligd tegen alle mogelijke storingen met uitzondering van doorslag. Doet zich dit voor dan kan men terugvallen op een passende vertragingstijdbesturing en een correct aangelegde poort-aansturing. Iedere IGBT is via gate-drive trafo's galvanisch gescheiden van zowel de voedingsspanning als het stuursignaal.

Geconstateerde storingen worden verwerkt door een foutbewakingssysteem. Wat er gebeurt bij stroomoverbelasting en te hoge temperaturen wordt hierna beschreven.

Stroom en temperatuur worden òf door een analoog-digitaal omvormer òf een comparator naar de ASIC overgeseind. De foutbewaking van de ASIC verwerkt de signalen en stelt de gewenste beveiliging in werking [stroomniveau 1 en 2 (afb.2.35)]. Ter begrenzing van de ASIC zorgt de microprocessor voor de bewaking van een tweede trap [stroomniveau 3 en 4 (afb.2.35)].

Stroomoverbelasting:

Afb.2.35 laat zien hoe bij verschillende stromen verschillende 'filtertijden' (tijd voor het uitschakelen van de frequentie-omvormer) tot stand komen. Het trigger-niveau en de 'filtertijd' kunnen zo ingesteld worden dat de betreffende omvormerschakelaar (IGBT) gegarandeerd maximaal storingongevoelig (ongevoelig voor stroomoverbelasting) is. 'Ruis' hier in de letterlijke betekenis van 'storing' (onderdrukking) maar ook als korte overbelasting, bijv. wanneer de omvormer is aangesloten op een lange motorkabel.



Afb. 2.35 Stroomoverbelastingsniveaus

Om de omvormer nog ongevoeliger te maken is een tweede ‘filtertijd’ toegevoegd. Deze ‘filtertijd’ bepaalt met welke frequentie en hoe vaak achter elkaar de omvormer kan inschakelen voordat hij uiteindelijk geblokkeerd wordt (stroomniveau 1). De filtertijd T_4 en het stroomniveau 4 worden door de gebruiker bepaald.

Voorbeeld:

Een 4-polige motor van 1,5 kW mag om technische, door de installatie gedicteerde redenen hoogstens 4 A trekken gedurende 5 sec. T_4 is dus 5 sec. en stroomniveau 4 is 4 A.

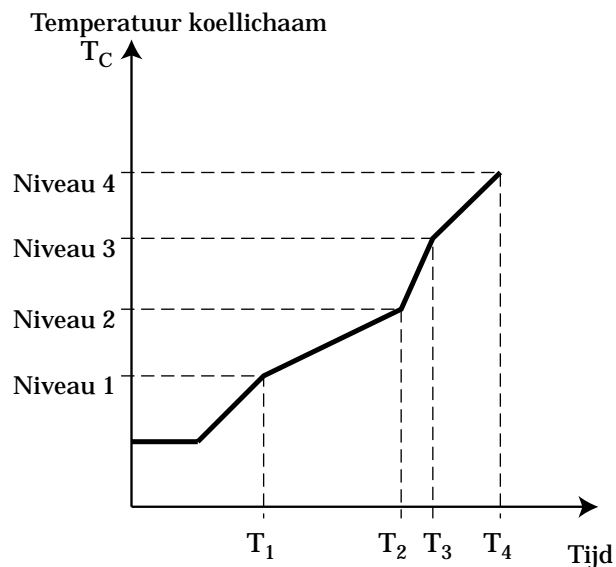
De rest wordt bepaald door de besturing en de hardware-stroomgrens van de frequentie-omvormer.

Het resultaat van deze beveiliging tegen stroomoverbelasting – waarin ook de betrouwbaarheid van de jongste generatie IGBT’s een rol speelt – is een zeer krachtige omvormer waaraan geen bijkomende passieve componenten zoals motorspoelen te pas komen.

Beveiliging tegen hoge temperaturen:

Met behulp van de rechtstreeks gemeten temperatuur van het koellichaam T_C (zie afb.2.34) worden de omvormerverliezen $P_{\text{ver.,WR}}$ berekend. Er wordt van uitgegaan dat de temperatuur van het koellichaam bepaald wordt door de koelingsvoorwaarden en de omvormerverliezen en dat de schakelaars (IGBT’s) van de omvormer de begrenzendende component vormen.

Door de meetwaarden van T_C en $P_{\text{ver.,WR}}$ te combineren kan de aandrijving optimaal op de werkelijke bedrijfsvoorwaarden worden afgestemd. In de regel gaat het daarbij om een verandering van de schakelfrequentie en uitgangsstroom, afhankelijk van de koelingsvoorwaarden, de netspanning en de omgevings-temperatuur.



Afb. 2.36 Oververhittingsniveaus

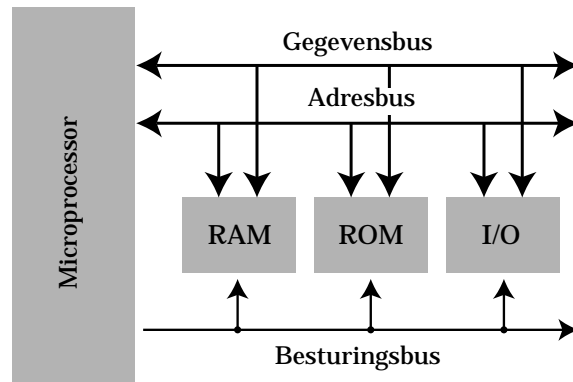
In het in afb.2.36 getoonde voorbeeld biedt het temperatuursignaal de gebruiker de gelegenheid en tijd om op de storing te reageren. Hij kan bijv. een abusievelijk niet aangesloten ventilator van de frequentie-omvormer alsnog aansluiten en inschakelen.

Tot het tijdstip T_1 wordt de modulatiefrequentie voor de omvormer verlaagd; het ruisniveau (onderdrukking) neemt toe en er wordt een waarschuwingssignaal afgegeven. Bij T_2 wordt de uitgangsspanning verlaagd, het maximale koppel begrensd en wederom een signaal afgegeven. Bij T_3 wordt een vooraf gedefinieerde minimumspanning bereikt en een derde waarschuwing gegeven. De gebruiker heeft nu de keus de motor gecontroleerd te stoppen of door te laten draaien met het risico dat de omvormer bij T_4 definitief uitgeschakeld wordt.

Het hierboven beschreven ‘intelligente beveiligingsfuncties’ (foutbewaking) maakt een efficiënt gebruik van de omvormerchip mogelijk. Dit garandeert een krachtige aandrijving die erg ‘tolerant’ is wat storingen betreft. Door voorprogrammering van de frequentie-omvormer kan de gebruiker de regelaar bovendien ‘leren’ hoe hij op een bepaalde storing dient te reageren.

De computer in het algemeen

Een computer bestaat uit drie basiscomponenten. Elk daarvan heeft een speciale taak.



Afb. 2.37 Het basisprincipe van de computer

Het hart van de computer is de microprocessor. Als de processor een reeks instructies in de juiste volgorde (programma) ontvangt kan hij een serie opdrachten in het geheugen van de computer uitvoeren. De microprocessor stuurt volgens dit programma tevens andere eenheden aan.

Het programma en de gegevens worden vastgelegd in het geheugen van de computer. Zo'n programma wordt dikwijls in een EPROM ('**E**rasable **P**rogrammable **R**ead **O**nly **M**emory') of in een PROM opgeslagen. EPROM's bewaren hun inhoud ook als de spanning naar de kring onderbroken wordt. De in een EPROM opgeslagen informatie kan alleen met ultraviolet licht gewist worden, waarna de EPROM opnieuw geprogrammeerd kan worden. In tegenstelling tot EPROM's zijn PROM's slechts éénmaal programmeerbaar. De microprocessor krijgt zijn informatie van de EPROM of PROM.

RAM is het geheugen waaruit de microprocessor gegevens haalt en na voltooide verwerking weer in opslaat. RAM ('**R**andom **A**ccess **M**emory') verliest zijn inhoud als de spanning onderbroken wordt. Als er opnieuw spanning aanligt is de inhoud ongedefinieerd.

De derde eenheid wordt met I/O aangeduid en bestaat uit de in- en uitgangen die de computer voor zijn gegevenscommunicatie nodig heeft. Dat kunnen bijv. verbindingen zijn met regelpanelen, printers of andere elektronische apparatuur.

Een 'bus' is een parallelgeleider die de eenheden met de computer verbindt. De gegevensbus brengt gegevens over van de ene eenheid naar de andere. De adresbus geeft aan waar de gegevens te vinden zijn en waar ze naar toe moeten. De besturingsbus controleert dat de overdracht in de juiste volgorde plaatsvindt.

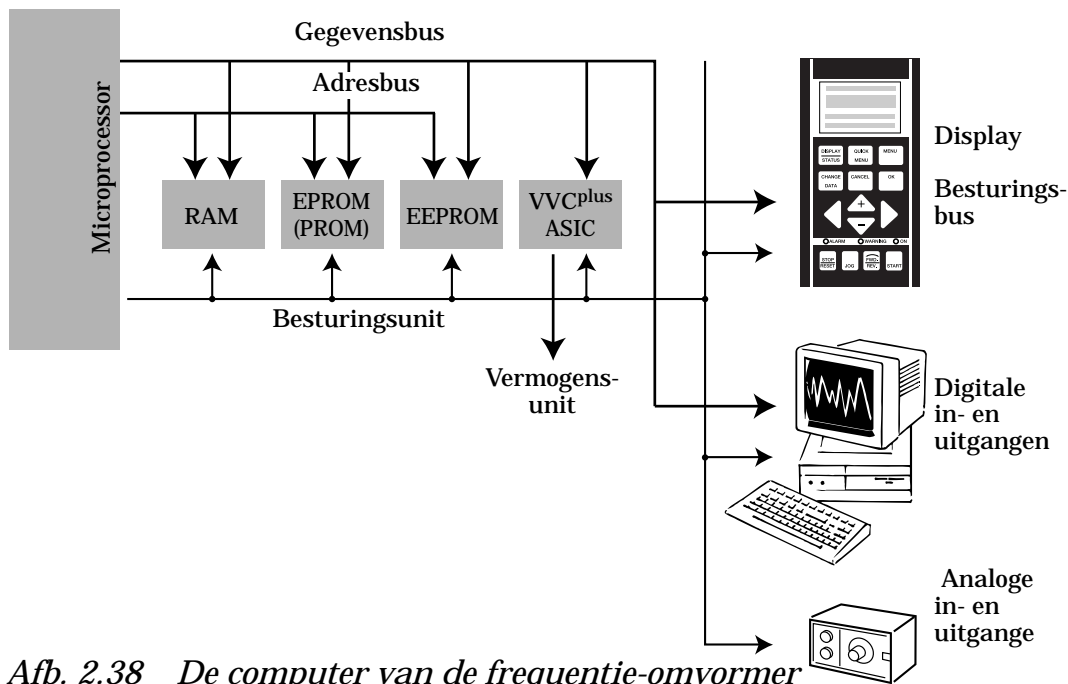
De computer van de frequentie-omvormer

Behalve de bovengenoemde drie units beschikt de computer van de frequentie-omvormer over nog enkele eenheden. Eén daarvan is een EEPROM ('Electrically Erasable' PROM): een geheugen dat de gebruiker in staat stelt met behulp van elektrische signalen de computer te programmeren of een bestaand programma te wijzigen. Dit is nodig voor het programmeren van de frequentie-omvormer (installatiegegevens) en voor het opslaan van bijzondere opdrachten.

De computer van de frequentie-omvormer kan bovendien van een ASIC voorzien worden. Een ASIC is een geïntegreerde schakeling waarin een deel van de functies is geprogrammeerd door de fabrikant van de halfgeleiders. De resterende functies kunnen overeenkomstig de speciale wensen van de fabrikant van de frequentie-omvormer geprogrammeerd worden. Zo is bijv. het Danfoss VVC^{plus}-besturingsprogramma ontstaan.

In- en uitgangen van de aansturing

De behoefte aan in- en uitgangen hangt af van de installatie waarvoor de frequentie-omvormer bestemd is. Een frequentie-omvormer in een volautomatisch werkende installatie moet zowel analoge als digitale stuursignalen kunnen verwerken. Aan analoge signalen kan iedere waarde van een bepaald bereik worden toegekend. Digitale signalen werken met slechts twee waarden (0 of 1).



Afb. 2.38 De computer van de frequentie-omvormer



Afb. 2.39 Een analoog signaal (a) en een digitaal signaal (b)

Er bestaat geen vaste norm voor stuursignalen. Enkele signalen worden tegenwoordig als standaard beschouwd, voor analoge signalen bijv. 0-10 V en 0 resp. 4-20 mA. Omdat in de digitale signaaluitgangen halfgeleiders worden gebruikt, moeten deze uitgangen worden belast met een minimumstroom om zeker te kunnen zijn van het signaal. Typische signaalbereiken zijn 20-30 V en 10-500 mA.

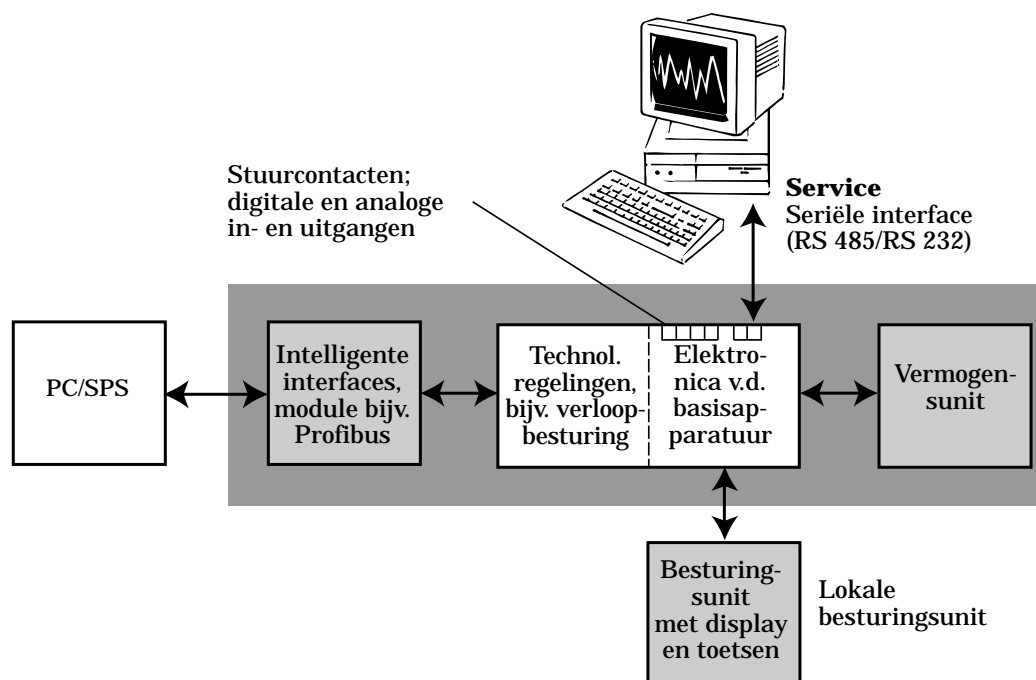
De digitale uitgangen van een PLC zijn afgestemd op de digitale ingangen van de frequentie-omvormer. Deze accepteren als minimum bijv. spanningen tussen 10 en 30 V en nemen bij 20 V een stroom op van min. 10 mA. De impedantie van de signaalingang mag dus niet meer dan 2 kOhm zijn.

Gegevenscommunicatie

In principe kunnen digitale frequentie-omvormers via drie interfaces gegevens uitwisselen met randapparatuur (zie afb.2.40). Die interfaces zijn:

- het conventionele aansluitblok voor digitale en analoge in- en uitgangen,
- de besturingsunit met display en toetsen,
- een seriële interface voor service-, diagnose- en besturingsoordrachten.

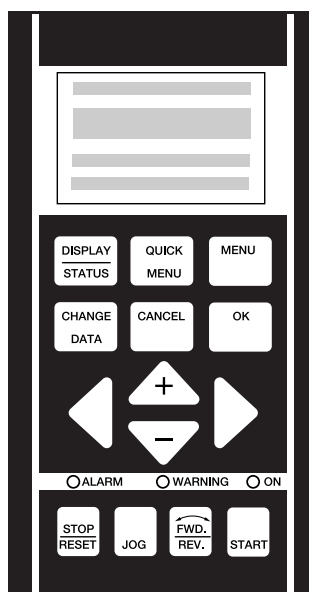
Afhankelijk van de toepassing kan de gegevenscommunicatie geoptimaliseerd worden met een intelligente seriële interface voor een efficiënte automatiseringsbus (bijv. PROFIBUS). Deze kan bestaan uit een aparte module die, om de elektronica van de basisapparatuur te ontlasten, over een eigen microprocessor en randapparatuur (bijv. Dual Port Ram) beschikt.



Afb. 2.40 Basisconcept – gegevenscommunicatie (frequentie-omvormer)

Wat het aansluitblok betreft zijn voor n verbindingen minstens $(n + 1)$ gegevensaansluitingen nodig, waarvan het aantal afhangt van de opdrachten en het aantal klemmen. Iedere klem kan voor verschillende functies geprogrammeerd worden. Op vrijwel elke frequentie-omvormer kan een besturingsunit met display en toetsen aangesloten worden. Met behulp van het dis-

play kunnen de functies van de stuurklemmen uitgeschakeld worden. Dit kan bij bepaalde storingen (kabelbreuk, ontbrekend stuursignaal) helpen om tot een diagnose te komen.



Afb. 2.41 Lokale besturingsunit van een frequentie-omvormer

In een proces wordt de frequentie-omvormer beschouwd als actief onderdeel van de installatie. De regelaar vormt een onderdeel of van een systeem zonder terugkoppeling (besturing) of van een systeem met terugkoppeling (regeling) van het proces.

Een systeem zonder terugkoppeling kan met een eenvoudige potmeter bediend worden. Een systeem met terugkoppeling is duurder en bevat meestal een programmeerbaar besturings- en regelsysteem (bijv. PLC/DDC).

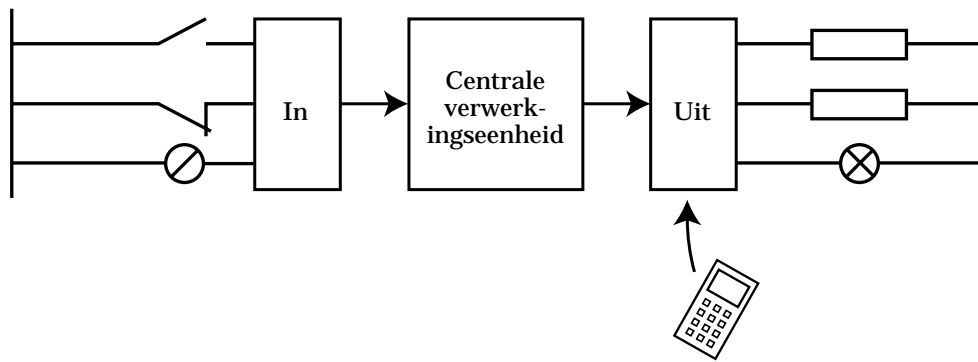
De PLC in het algemeen

De PLC kan zowel stuursignalen (snelheid) als opdrachten (start, stop, omkeren) geven.

De uitgangssignalen van de frequentie-omvormer – zoals bijv. motorstroom of -frequentie) worden dikwijls afgelezen op meet-instrumenten e.d. Een PLC kan echter ook uitgangssignalen lezen. Hierdoor heeft de gebruiker voortdurend greep op deze gegevens.

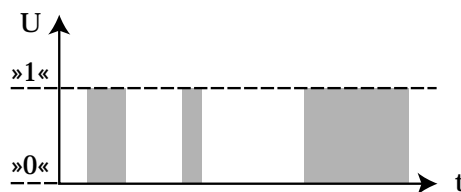
Een PLC-systeem bestaat uit drie basiscomponenten:

- een centrale verwerkingseenheid,
- een ingangs- en een uitgangsmodule,
- een programmeerunit.



Afb. 2.42 Het constructieprincipe van de PLC

Met behulp van de programmeerunit wordt de centrale verwerkingseenheid met een besturingsprogramma belast. De centrale verwerkingseenheid rangschikt de ingangssignalen en activeert de uitgangssignalen overeenkomstig de instructies van het programma. De centrale eenheid werkt uitsluitend met digitale signalen. Deze signalen wisselen tussen twee waarden, bijv. 24 V en 0 V. De hogere spanning wordt met '1' = 'ON' aangegeven en de lagere spanning met '0' = 'OFF'.



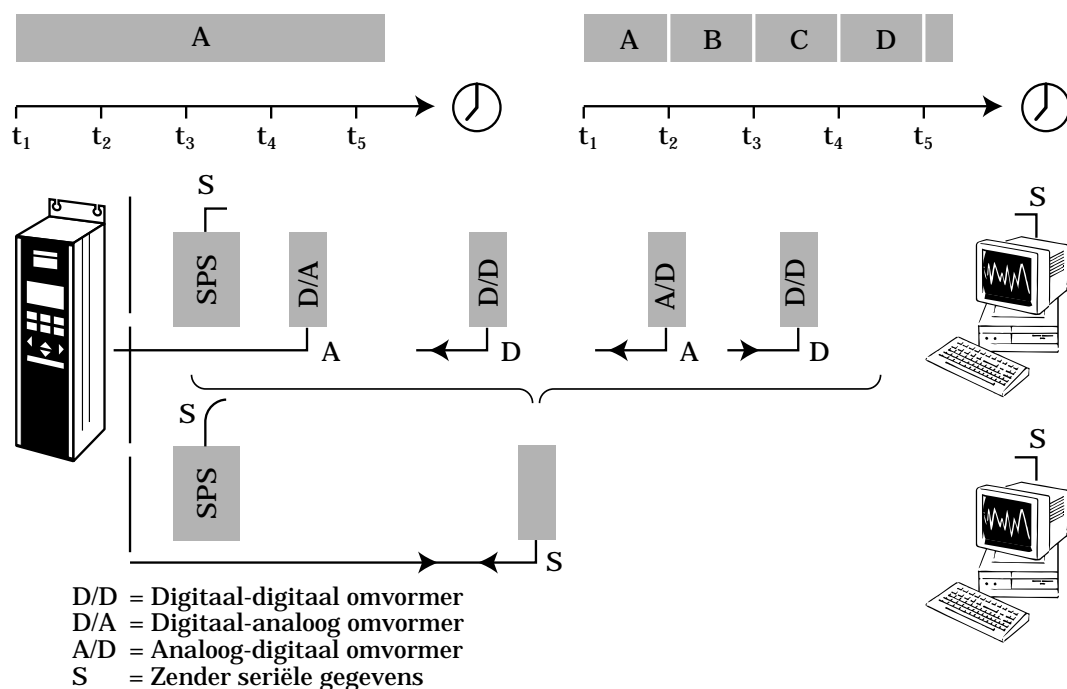
Afb. 2.43 Het digitale signaal kan gedurende kortere of langere tijd 'ON' of 'OFF' zijn

Een frequentie-omvormer en een PLC kunnen in principe op twee manieren op elkaar worden aangesloten.

De eerste manier is dat de afzonderlijke in- en uitgangen van de PLC met aparte kabels op de in- en uitgangen van de frequentie-omvormer worden aangesloten. De in- en uitgangen van de PLC maken daarmee losse componenten zoals potmeters, stuurcontacten en meters overbodig.

Seriële communicatie

Bij de tweede mogelijkheid worden in tijd verschoven signalen verzonden via dubbele leidingen. In de periode $t_1 - t_2$ wordt informatie A, in de periode $t_2 - t_3$ informatie B (enz.) overgebracht. Deze vorm van gegevensoverdracht wordt seriële communicatie genoemd (zie afb.2.44).



Afb. 2.44 Seriële communicatie betekent snellere signaaloverdracht en een eenvoudiger installatie

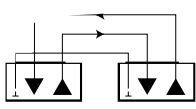
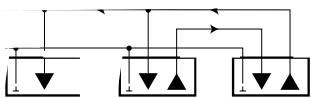
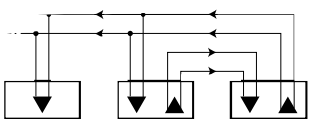
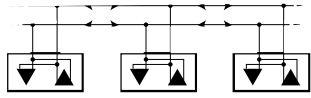
Er bestaan diverse systemen voor seriële communicatie. Door-slaggevend is daarbij hoeveel apparaten met elkaar moeten kunnen communiceren.

Bij één van die systemen zijn er meer kabels nodig als ieder apparaat zowel gegevens moet kunnen verzenden als ontvangen. Bij een ander systeem is communicatie met meerdere apparaten mogelijk met slechts twee kabels. Er kunnen meerdere ontvangers op slechts één zender (S) aangesloten worden. Bij een derde systeem kunnen alle daarop aangesloten apparaten met slechts twee kabels zenden en ontvangen. Een dergelijke communicatieverbinding wordt 'bus' genoemd.

De apparaten dienen een gemeenschappelijk signaalniveau te hebben, want de ontvanger moet de informatie van het signaal kunnen begrijpen. Op de aard en samenstelling van de signalen zijn een reeks normen van toepassing. Het aantal daarvan neemt toe, omdat de systemen steeds ingewikkelder worden.

Voor het gemeenschappelijke signaalniveau geldt geen bepaalde waarde. Derhalve dient de software van de apparatuur in de regel zodanig op elkaar afgestemd te worden dat een gemeenschappelijk signaalniveau bereikt wordt.

RS 232 is de bekendste norm. Signalen kunnen slechts over korte afstand en met geringe snelheid overgedragen worden. RS 232 wordt om die reden daar toegepast waar slechts zo nu en dan signalen verstuurd worden, bijv. naar terminals en printers.

Principe	Standaard toepassing	Aantal apparaten per kabelset	Max. afstand m	Aantal kabels	Signaalniveau
	RS 232 (punt-tot-punt)	1 zender; 1 ontvanger	15	duplex: min. 3 + div. statussignalen	±5 V min. ±15 V max.
	RS 423 (punt-tot-punt)	1 zender; 10 ontvangers	1200	duplex: min. 3 + div. statussignalen	±3,6 V min. ±6 V max.
	RS 422 (punt-tot-punt)	1 zender; 10 ontvangers	1200	duplex: 4	±2 V min.
	RS 485 (Bus)	32 zender; 32 ontvangers	1200	Semi duplex: 2	±1,5 V min.

▲ : zender
▼ : ontvanger

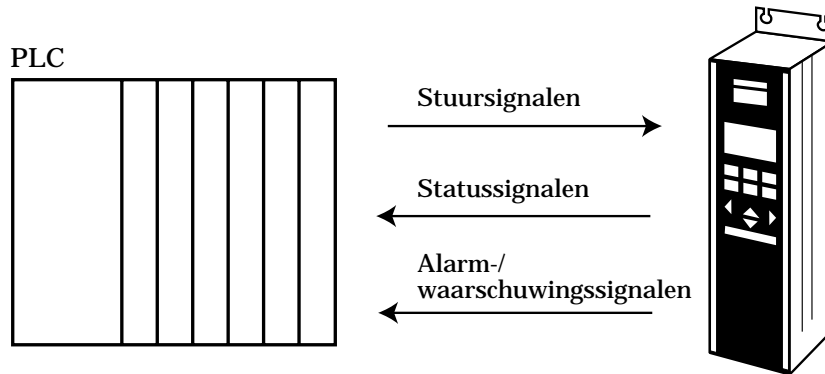
Afb. 2.45 Normen voor seriële verbindingen

Het probleem van de afstand en de snelheid van overdracht is bij RS 422 en 423 opgelost. Ze worden daarom vaak toegepast in automatische processen, bijv. samen met een PLC, waarin sprake is van voortdurende signaaloverdracht.

RS 485 is de enige norm waaronder een groot aantal apparaten onderling verbonden en bediend kunnen worden en communicatie tussen meerdere apparaten via een gemeenschappelijke dubbele kabel mogelijk is. De installatie heeft slechts twee kabels nodig, omdat de apparaten om de beurt via de gemeenschappelijke kabelverbinding (bus) zenden. Een bekend bussysteem is bijv. PROFIBUS.

Voor de communicatie tussen een PLC/PC en een frequentie-omvormer worden drie soorten signalen gebruikt:

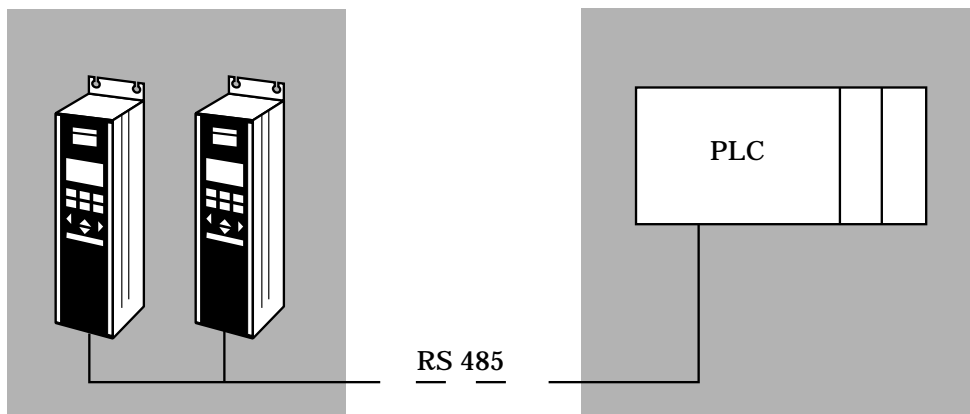
- stuursignalen (snelheid, start/stop/omkeren);
- statussignalen (motorstroom, motorfrequentie, frequentie bereikt);
- alarmsignalen (motorstop, oververhitting).



Afb. 2.46 De drie soorten signalen tussen een PLC en een frequentie-omvormer

De frequentie-omvormer ontvangt stuursignalen van de PLC en stuurt de motor dienovereenkomstig aan. De frequentie-omvormer stuurt statussignalen naar de PLC en rapporteert het effect dat de stuursignalen op de motor of het proces hebben. Wordt de frequentie-omvormer door bijzondere bedrijfsomstandigheden uitgeschakeld dan worden alarmsignalen naar de PLC gezonden.

RS 485 maakt het mogelijk uiteenlopende processystemen te ontwikkelen. De PLC kan bijv. in een schakelkast worden ingebouwd en van daaruit een aantal frequentie-omvormers in een andere schakelkast aansturen.



Afb. 2.47 De bus maakt tal van installatiesystemen mogelijk

Dankzij de overgang van analoge naar digitale technieken kunnen steeds meer seriële interfaces in frequentie-omvormers worden ingevoerd voor:

- het beproeven van apparatuur;
- de ingebruikneming;
- serviceverrichtingen;
- automatische bedrijfsvoering, en
- visualisering.

Voor de gegevensuitwisseling tussen de frequentie-omvormers en voor de besturing (PLC/PC) via de seriële interface is een protocol nodig. Het protocol legt vast hoe lang de informatie (het telegram) mag duren en welke informatie op welke plaats in de gegevensreeks te vinden is.

Bovendien biedt het protocol in het algemeen bovendien de volgende functies:

- oproepen (adresseren) van de betrokken apparaten;
- opvragen van gegevens bij de apparaten (bijv. de werkelijke stroom- en spanningswaarden);
- overdragen van gegevens aan bepaalde apparaten via hun adres (bijv. in te stellen waarden en grenswaarden van stromen en frequenties);
- overdragen van gegevens aan alle apparaten (BROADCAST), bijv. om een gelijktijdig stoppen of starten mogelijk te maken. Dit behoeft door de apparaten niet bevestigd te worden.

Iedere fabrikant heeft zijn eigen protocol. Dit betekent dat een gebruiker die met apparatuur van verschillend fabrikaat werkt steeds opnieuw met het probleem van de programmering geconfronteerd wordt. Tal van fabrikanten bieden software aan voor het met een PC invoeren van parameters, foutdiagnose of eenvoudige besturingsopdrachten. De communicatiesnelheid die daarbij het meest voorkomt is 9600 bit/sec. Gaat het om een gecompliceerd systeem of een toepassing waarvoor deze snelheid niet toereikend is dan is een intelligente en doeltreffender interfacemodule zoals PROFIBUS aan te bevelen (zie afb.2.40).

Fabrikantonafhankelijke communicatie

Bussystemen maken het mogelijk een technisch proces met behulp van apparatuur zoals PLC, PC, frequentie-omvormers, sensoren en donors te automatiseren. Voor de gegevensuitwisseling tussen deze veldapparatuur en centrale systemen, en tussen de apparaten onderling, worden bitseriële veldbussen als communicatiemedium gebruikt. Een door een fabrikant opgesteld protocol biedt niet meer dan een oplossing voor een plaatselijk probleem. Wat de gebruiker nodig heeft is een protocol dat niet van een fabrikant afhankelijk is. Het open en beproefde PROFIBUS-protocol is zo'n protocol.

PROFIBUS maakt gegevensuitwisseling mogelijk tussen apparaten van verschillend fabrikaat zonder speciale aanpassing van de interfaces. PROFIBUS heeft zijn waarde bewezen in tal van toepassingen in de automatisering van gebouwen en productieprocessen, in aandrijf- en chemische procestechnieken.

Samenhangend met de mogelijke toepassingsgebieden zijn er drie protocolvarianten:

Het FMS ('Field Bus Message Service') protocol

Dit is de universele oplossing voor communicatieproblemen. Het FMS-protocol is dermate flexibel dat het omvangrijke communicatie-opdrachten met gemiddelde gegevenssnelheid kan uitvoeren. Het wordt o.a. toegepast in de textielindustrie, de exploitatie van gebouwen en aandrijftechnieken, donortechnieken en sensoranalyse, alsmede voor laagspanningsschakelapparatuur.

Het DP ('Decentralized Peripheral') protocol

Deze op snelheid ingestelde variant is met name toegesneden op de communicatie tussen automatiseringssystemen en gedecentraliseerde randapparatuur. Dit protocol kan als vervanging dienen voor de prijzige parallelsigitaaloverdracht met 24 V en de overdracht van meetwaarden met 20 mA.

Het DP-protocol wordt het meest gebruikt voor het automatiseren van productieprocessen.

Het PA ('Process Automation') protocol

PROFIBUS-PA is een PROFIBUS-variant voor toepassing in procesautomatisering. PROFIBUS-PA is gebaseerd op de in IEC 1158-2 vastgelegde, intrinsiek veilige overbrengtechniek en maakt het mogelijk de deelnemers via de bus op afstand te voeden.

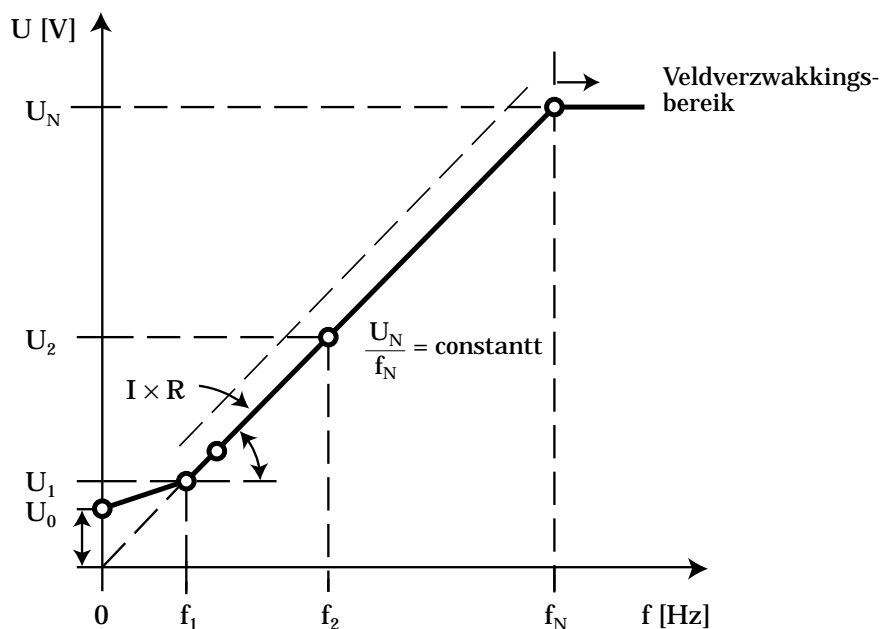
Behalve PROFIBUS zijn er op de markt ook nog andere communicatiesystemen voor frequentie-omvormers te vinden, zoals bijv.:

- Modbus +
- Interbus-S
- Device Net
- Lonworks

3. Frequentie-omvormers en draaistroommotoren

Voor het door een asynchroommotor ontwikkelde koppel (M) geldt in het algemeen $T \sim \Phi \times I_R$, waarin I_R de rotorstroom en Φ de nuttige flux van de motor is.

Wil men een optimaal koppel uit de motor halen dan moet de nuttige flux ($\Phi \sim U/f$) constant gehouden te worden. Dit betekent dat als de voedingsfrequentie (f) verandert de voedingsspanning (U) verhoudingsgewijs daaraan moet worden aangepast (zie afb.3.01).



Afb. 3.01 U/f -karakteristiekbesturing

Aanlopen met zware belasting (wormaandrijvingen), resp. met een optimaal aanloopkoppel, vraagt een extra (start)spanning (U_0). Bij lage toerentallen ($f < 10$ Hz) en belasting is er een duidelijk merkbaar spanningsverlies aan de effectieve weerstand van de statorwikkeling (in het bijzonder bij kleinere motoren), hetgeen in een rechtstreekse verzwakking van de luchtspleetflux (Φ) resulteert.

Voorbeeld:

Een 1,1 kW, 3×400 V/50 Hz motor met een statorweerstand (een fase) van ca. 8Ω neemt bij nominale belasting 3 A op. De spanningsverlaging aan de statorweerstand bedraagt in dit geval $8 \Omega \times 3 \text{ A} = 24 \text{ V}$. De motorfabrikant zorgt ervoor dat dit verlies bij nominale belasting gecompenseerd wordt.

Met U/f-karakteristiekbesturing kan de motor in ideale omstandigheden over 40 V bij 5 Hz beschikken. Bij nominale belasting neemt de motor de 3 A op, waardoor het spanningsverlies op 24 V komt. Er blijft dan nog slechts 16 V over voor de magnetisering. Met deze spanning is de motor ondergemagnetiseerd en produceert derhalve een kleiner koppel.

Dit spanningsverlies moet gecompenseerd worden om de motorflux in stand te houden.

De eenvoudigste compensatiemethode is: door verhoging van de uitgangsspanning het onderste bereik hetzij gestuurd aan te passen, of via de werkstroomcomponent van de uitgangsstroom van de frequentie-omvormer te regelen.

Deze compensatie wordt meestal $I \times R$ -compensatie, boost, ophalen van het koppel, en – bij Danfoss – startcompensatie genoemd.

Deze wijze van sturen is beperkt daar de verstoringen door sterk wisselende belasting slecht onder controle te houden zijn (een voorbeeld hiervan zijn aandrijvingen met tussen de warme en de koude toestand bedrijfsmatige schommelingen in de wikkelingsweerstand tot 25%). Het verhogen van de spanning kan verschillende consequenties hebben. Bij nullast kan de motorflux verzadigd raken en bij belasting de nuttige flux te zwak zijn. Bij verzadiging ontstaat een hoge blindstroom die tot verwarming van de motor leidt. Als de nuttige flux te zwak is ontwikkelt de motor bij belasting weinig koppel en kan tot stilstand komen.

Bedrijfsvoorwaarden voor de motor

Compensaties

Het aanpassen van een frequentie-omvormer aan een motor was vroeger verre van eenvoudig. De reden daarvoor was dat de betekenis van een aantal compensatiefactoren zoals 'startspanning' en 'start- en slipcompensatie' moeilijk in te schatten was.

Frequentie-omvormers compenseren de frequentie, spanning en stroom van de motor automatisch via parameters. In de regel kunnen deze compensatiefactoren ook handmatig ingesteld worden.

Belastingafhankelijke en belastingonafhankelijke compensatieparameters

Deze compensatieparameters garanderen een optimale magnetisering en dus een maximaal startkoppel zowel bij lage toerentallen als binnen het bereik tot aan het nominale toerental van de motor. Aan de uitgangsspanning wordt de spanning verhoogd om de invloed van de ohmse weerstand van de motorwikkelingen bij lage frequenties teniet te doen. De grootte van de toe te voegen, van de belasting afhankelijke spanning (start- en slipcompensatie) wordt bepaald door de (werk)stroom te meten. De toegevoegde, belastingonafhankelijke spanning (startspanning) garandeert een optimaal aanloopkoppel binnen het lagere toerentalbereik.

Een motor die aanzienlijk kleiner is dan wat hij zou moeten zijn kan extra, handmatig instelbare spanning vragen om aan te lopen of optimale magnetisering in het lagere toerentalbereik te kunnen garanderen.

Wordt één frequentie-omvormer voor meerdere motoren tegelijk gebruikt (parallelbedrijf) dan mag geen belastingafhankelijke compensatie worden toegepast.

Door de jongste generatie frequentie-omvormers wordt deze compensatie (voor standaardtoepassingen) automatisch ingesteld.

Slipcompensatie

De slip van een asynchroonmotor hangt af van de belasting en bedraagt ca. 5% van het nominale toerental. De slip van een tweepolige motor kan tot 150 omw/min oplopen.

De slip bedraagt echter ca. 50% van het gewenste toerental als een frequentie-omvormer een motor met bijv. 300 omw/min (10% van het nominale toerental) moet sturen.

Moet de frequentie-omvormer de motor met 5% van het nominale toerental sturen dan blijft de motor daardoor bij belasting stil staan. Deze afhankelijkheid van de belasting is ongewenst en door de werkstroom in de uitgangsfasen van de frequentie-omvormer te meten kan deze de slip volledig compenseren.

Frequentie-omvormers compenseren de slip door de frequentie zodanig te verhogen dat hij de gemeten werkstroom volgt. Deze vorm van compensatie wordt actieve slipcompensatie genoemd.

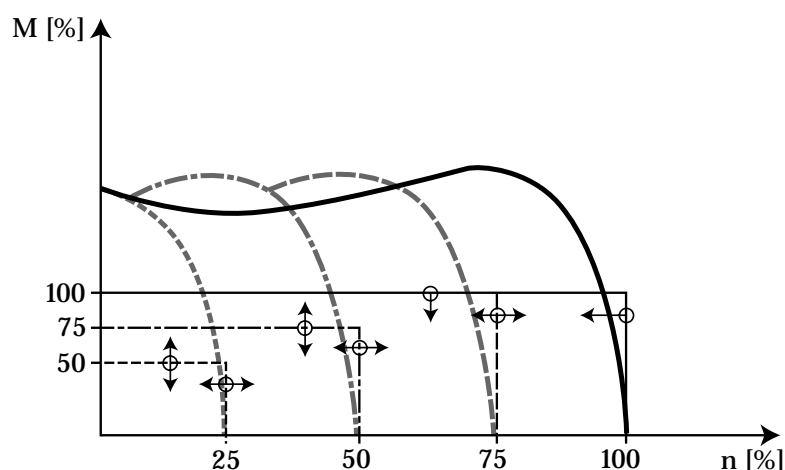
Koppelkarakteristieken van de motor

Stroomgrenzen

Een frequentie-omvormer die een stroom afgeeft die vele malen groter is dan de nominale motorstroom kan een koppelkarakteristiek produceren als in afb.1.22 (blz. 33) afgebeeld.

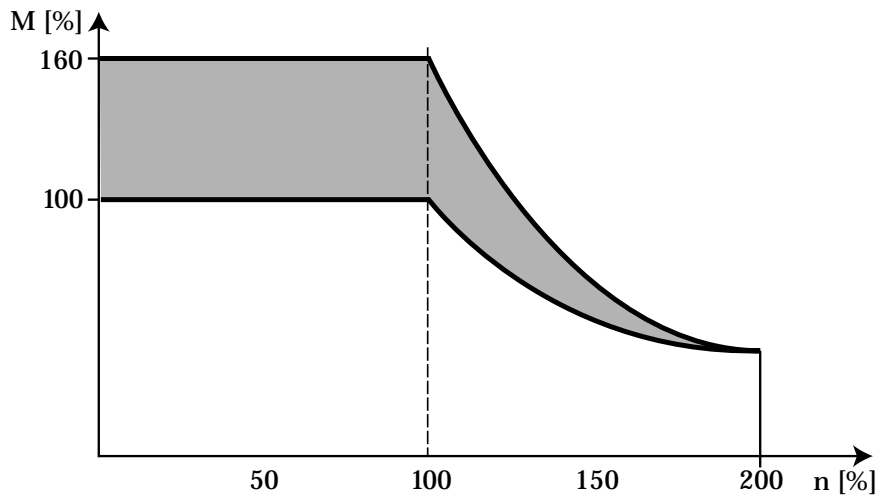
Dergelijke hoge stromen kunnen schade toebrengen aan motor en frequentie-omvormer (vermogenselektronische componenten) en zijn bij normaal gebruik van de motor overbodig. De motorstroom wordt indirect door de frequentie-omvormer begrensd doordat deze de uitgangsspanning en dus tevens de frequentie verlaagt. De stroomgrens is variabel en garandeert dat de motorstroom niet voortdurend zijn ingestelde waarde overschrijdt. Omdat de frequentie-omvormer de motor onafhankelijk van de belasting stuurt, kunnen binnen het nominale werkbereik van de motor verschillende grenswaarden ingesteld worden.

De koppelkarakteristiek van de motor ligt bij sommige frequentie-omvormers binnen de nominale waarden. Het is echter een voordeel als de frequentie-omvormer gedurende korte of langere tijd een koppel van bijv. 160% van het nominale koppel toestaat. Het is trouwens gebruikelijk dat een met een frequentie-omvormer geregelde motor in het oversynchrone bereik tot bijv. 200% van het nominale toerental gebruikt kan worden.



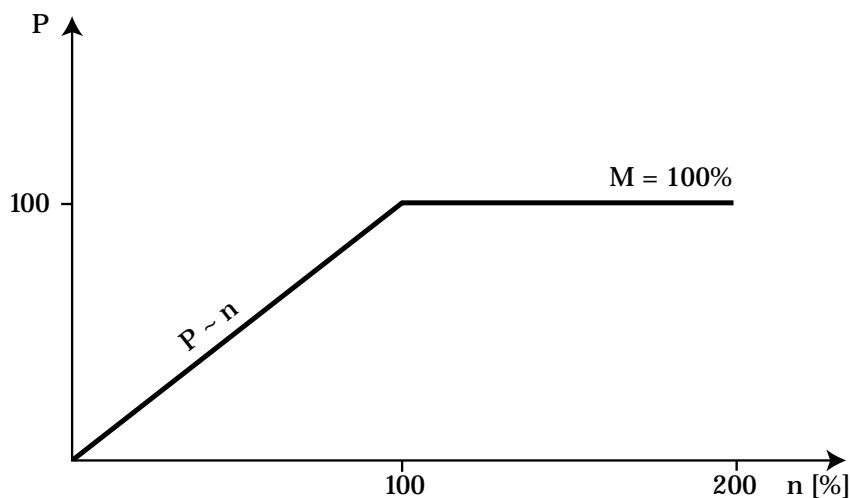
Afb. 3.02 De koppelkarakteristiek van een met een frequentie-omvormer geregelde motor kan binnen 'rechthoeken' ingesteld worden

Frequentie-omvormers kunnen geen hogere spanning dan die van het voedingsnet afgeven. De consequentie daarvan is dat de verhouding tussen spanning en frequentie kleiner wordt als het toerental tot boven het nominale toerental stijgt. Daardoor verzwakt het magneetveld en daalt het door de motor afgegeven koppel met $1/n$.



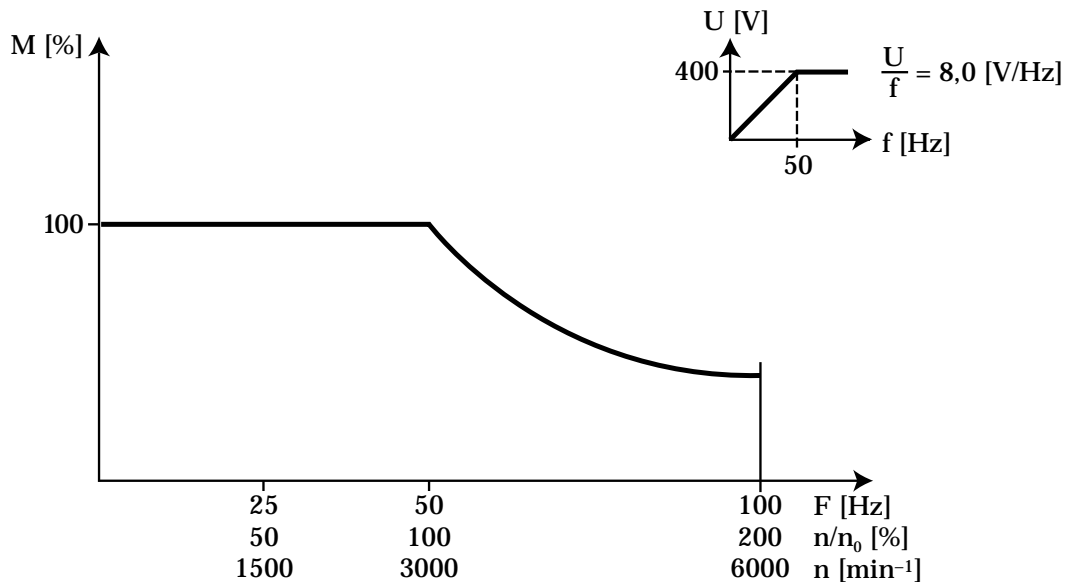
Afb. 3.03 Koppel en extra koppel van de motor

De maximale uitgangsstroom van de frequentie-omvormer blijft hetzelfde en geeft tot aan 200% van het nominale toerental een constant vermogen af.



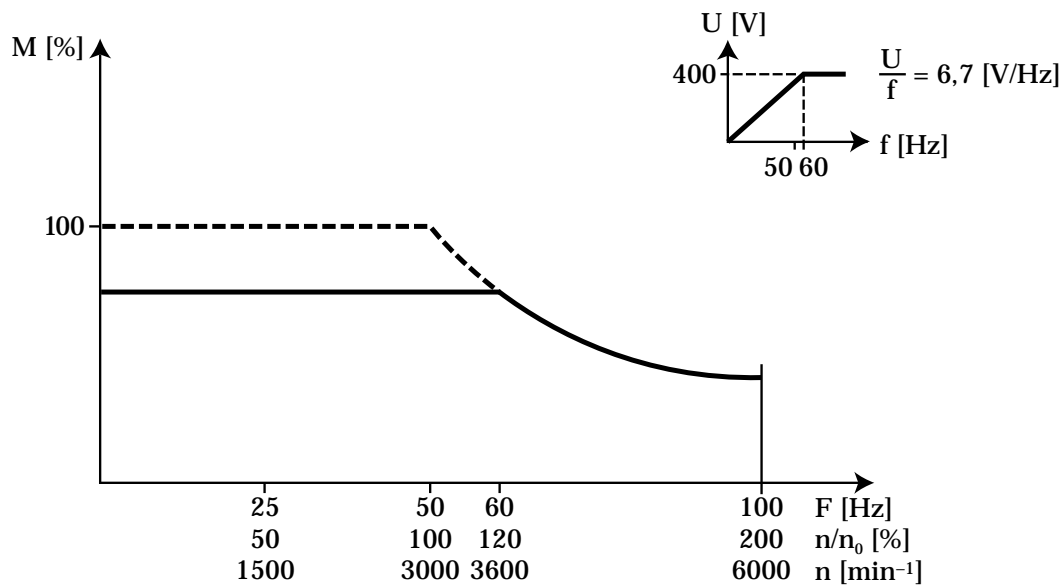
Afb. 3.04 Motorvermogen

Het toerental van een motor kan op verschillende manieren aangegeven worden. In omwentelingen per minuut [omw/min], in Hertz [Hz] of in een percentage van het nominale toerental van de motor [%]. Het uitgangspunt is steeds het toerental van de motor bij de nominale frequentie.



Afb. 3.05 Indicatie van het toerental (hier voor een tweepolige motor)

Een verandering in de verhouding tussen spanning en frequentie heeft invloed op de koppelkarakteristiek. Onderstaande afbeelding toont de koppelkarakteristiek bij verlaging van de spanning/frequentieverhouding tot 6,7 [V/Hz].



Afb. 3.06 Koppelkarakteristiek voor een gewijzigde U/f -verhouding

Eisen waaraan moderne digitale frequentie-omvormers moeten voldoen

De positieve ontwikkelingen in de vermogenselektronica, de microprocessortechniek en op het gebied van geïntegreerde schakelingen hebben de laatste jaren een zeer grote invloed gehad op elektrische aandrijftechnieken.

Door deze ontwikkelingen worden steeds hogere eisen gesteld aan de bewerkingssnelheid en -nauwkeurigheid van nieuwe systeemcomponenten waarmee aandrijvingen digitaal gestuurd kunnen worden.

Voordelen van een digitaal regelsysteem voor aandrijvingen zijn o.a.:

- reproduceerbaarheid en constantheid van de regelparameters
- eenvoudig te realiseren besturingsingrepen
- flexibiliteit voor specifieke toepassingen
- grotere regelnauwkeurigheid en -bereik.

In de analoge techniek was afstelling mogelijk via potentiometers of passieve componenten. Hierbij kunnen zich correctie- en temperatuurdrijfproblemen voordoen. Bij digitale regelsystemen kunnen de berekende regelparameters opgeslagen worden in een geheugenmodule (bijv. EEPROM).

Met een microprocessor zijn handelingen zoals regelblokkering en het omschakelen van gegevensverzamelingen op eenvoudige wijze te realiseren. In een frequentie-omvormer kunnen tevens complete verloopprogramma's (sequentiële besturing) en op specifieke aandrijvingen afgestemde intelligentie opgeslagen worden.

Tot voor enige jaren werd voor aandrijvingen met regelbaar toerental en een groot instelbereik, mede ten behoeve van een goed besturings- en belastingsgedrag, gebruik gemaakt van gelijkstroommotoren.

De reeds genoemde ontwikkelingen op elektronisch gebied hebben er toe geleid dat ook aan frequentie-omvormers en asynchrone motoren strengere dynamische eisen gesteld worden. Om aan die eisen te voldoen moet digitaal een gedrag gerealiseerd worden dat vergelijkbaar is met dat van de gelijkstroommotor.

De U/f-karakteristiekbesturing van de frequentie-omvormer is niet langer toereikend om aan die dynamische eisen te voldoen.

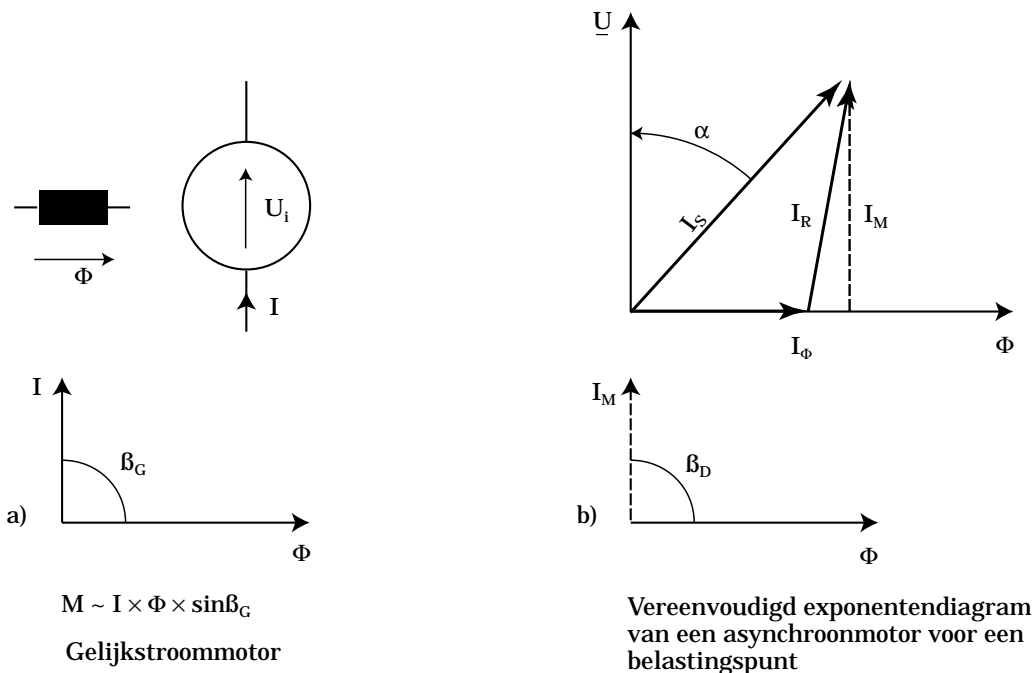
In plaats daarvan wordt gebruik gemaakt van een veldgericht besturingssysteem, dikwijls ook 'vectorregeling' genoemd.

Veldgerichte (vector)regelsystemen

Vectorregeling kan op tal van manieren plaatsvinden. Het voor- naamste verschil zit hem in de criteria die gehanteerd worden om de werkstroom, de magnetiseringsstroom (flux) en het koppel te berekenen.

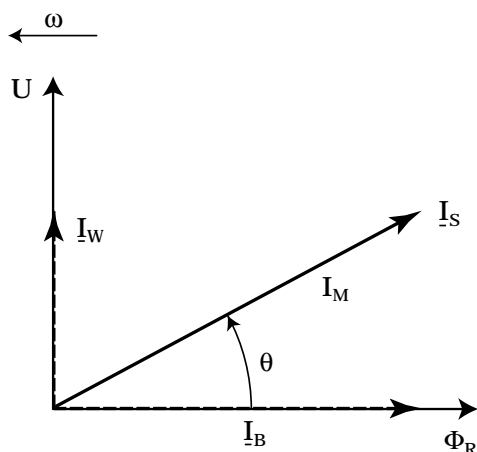
Vergelijken we de gelijkstroommotor met de asynchrone draai- stroommotor (zie afb. 3.07) dan wordt duidelijk welke proble- men we kunnen verwachten. Door de rangschikking van de veldwikkeling en de plaats van de borstels liggen de sterkte en de relatie tussen de fasen van de voor de opbouw van het koppel van belang zijnde elementen – de flux (Φ) en de ankerstroom – bij een gelijkstroommotor vast (afb. 3.07a).

De anker- en fluxgenererende stroom staan loodrecht op elkaar en beiden zijn gemakkelijk meetbaar. Bij asynchrone motoren zijn de flux Φ en rotorstroom I_R afhankelijk van de belasting. Bovendien zijn de fashoeken en stroomsterkte niet, zoals in de gelijkstroommotor, rechtstreeks via statorwaarden meet- baar.



Afb. 3.07 *Vergelijking gelijkstroommotoren met asynchrone draai- stroommotoren*

Met behulp van een wiskundig geconstrueerd motormodel kan het koppel echter toch berekend worden uit de relatie tussen de flux en de statorstroom. De gemeten statorstroom I_S wordt ontbonden in de component I_R , die samen met de flux Φ het koppel produceert, en de loodrecht daarop verlopende component I_B die de motorflux opwekt (afb.3.08).



- ω : hoeksnelheid
- I_S : statorstroom
- I_B : fluxgenererende stroom
- I_W : werkstroom/rotorstroom
- Φ_R : rotorflux

$$M \sim I_S \times \Phi_R \times \sin\theta$$

Afb. 3.08 Berekening van de stroomcomponenten voor een veldgericht regelsysteem

Met behulp van de beide stroomcomponenten kunnen het koppel en de flux onafhankelijk van elkaar beïnvloed worden. De op basis van dynamische motormodellen uit te voeren berekening vereist een ingewikkelde gegevensverwerking die eigenlijk alleen economisch verantwoord is voor digitale aandrijvingen. Door deze techniek van verdeling in twee regelkringen voor

- een belastingonafhankelijke bekrachtiging, en
- het koppel

is het mogelijk een asynchroonmotor dynamisch net zo te regelen als een gelijkstroommotor. Voor deze wijze van regelen is echter wel een terugkoppelsignaal (bijv. tachogenerator) nodig. De voordelen van deze methode van draaistroomregeling zijn:

- een goede reactie op veranderingen in belasting
- een nauwkeurige snelheidsregeling
- een maximaal koppel bij nullastsnelheid
- een aandrijfvermogen vergelijkbaar met dat van gelijkstroomaandrijvingen.

U/f -karakteristiek- en fluxvectorbesturing

Voor het verstellen van het toerental van draaistroommotoren worden sedert enkele jaren twee verschillende besturingsprincipes toegepast:

- normale U/f-besturing, en
- fluxvectorbesturing.

Afhankelijk van de concrete eisen die aan het aandrijfvermogen (dynamiek) en de nauwkeurigheid worden gesteld hebben beide methoden hun voor- en nadelen.

Het nadeel van U/f-karakteristiekbesturing is het begrensde regelbereik van het toerental. Dat ligt binnen het geregelde bereik bij ca. 1:20. Bij lage toerentallen is een alternatieve besturingsstrategie (compensatie) noodzakelijk.

De voordelen zijn:

- de betrekkelijk eenvoudige aanpassing van de frequentie-omvormer aan de motor
- de bestandheid tegen stootbelasting binnen het gehele toerentalbereik.

Bij fluxvectoraandrijvingen moet de frequentie-omvormer nauwkeurig aan de motor aangepast worden. Dit vereist een grondige kennis van de te sturen draaistroommotor. Voor het terugkoppelsignaal is een extra component nodig.

De voordelen zijn:

- de snelle reactie op toerentalregelingen plus een groot regelbereik
- een gunstiger dynamisch gedrag bij het veranderen van draairichting
- één besturingsstrategie voor het totale toerentalbereik.

De optimale oplossing voor de gebruiker is een toerentalbesturing die de beste eigenschappen van beide strategieën in zich verenigt. Eigenschappen zoals stabiliteit bij stapsgewijze verhoging en -verlaging van de belasting binnen het totale toerentalbereik – een typisch pluspunt van een 'U/f-gestuurde' draaistroommotor – en een snelle responsie op veranderingen in het ingestelde toerental (bij veldgerichte besturing) zijn eisen waaraan de motortoerentalbesturingen van de toekomst duidelijk zullen moeten voldoen. Een nieuwe besturingsstrategie die – door de kracht van de U/f-besturingen te combineren met de betere dynamische prestatie van veldgerichte besturingsprinci-

pes – nieuwe maatstaven aanlegt voor aandrijvingen met toerentalregeling, is de Danfoss VVC^{plus}-besturing.

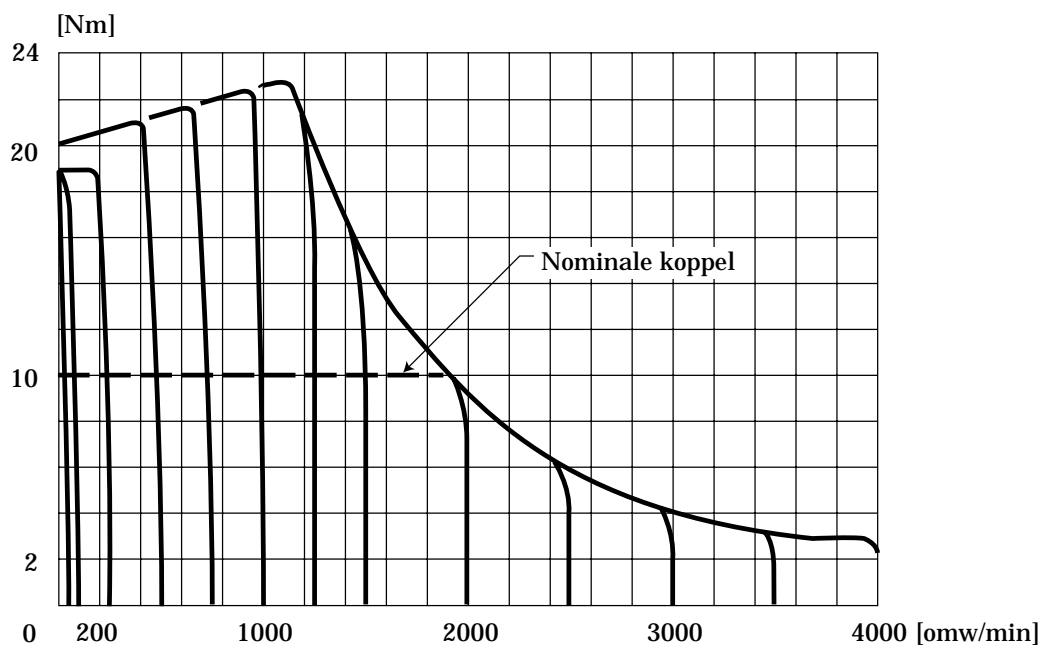
Verdere kenmerken van de VVC^{plus}-besturing worden hierna besproken.

Slipcompensatie

De magnetische veldsterkte van de motor en de basissnelheid worden onafhankelijk van het feitelijke belastingskoppel op hun ingestelde waarden gehouden. Dit geschiedt door twee compensatiecomponenten: slipcompensatie en de zogenaamde belastingscompensator (zie Danfoss VVC^{plus}-besturing hoofdst. 2 voor een beschrijving van de belastingscompensator).

De slipcompensatie zorgt dat de frequentie constant blijft door aan het ingestelde toerentalsignaal een berekende slipfrequentie Df toe te voegen (zie afb.2.32). De stijging van de statorfrequentie wordt begrensd door een door de gebruiker gedefinieerde (rechte) aanlooptijd. De slipwaarde wordt geschat op basis van de geschatte waarde van de koppelbelasting en de feitelijke magnetische veldsterkte, d.w.z. dat tevens rekening wordt gehouden met een veldverzwakking.

De grafiek in afb.3.09 toont het stationaire gedrag van het besturingssysteem samen met de koppel/toerentalkrommen.



Afb. 3.09 Koppel/toerentalkarakteristiek (nominale koppel 10 Nm)

Automatische motoraanpassing (AMA)

Voor industrieproducten wordt steeds vaker gebruik gemaakt van automatische instelfunctie. Doel is de installatie en eerste ingebruikneming minder ingewikkeld te maken. Hiertoe worden de statorweerstand en -inductiviteit gemeten. Een voordeel van dergelijke metingen vooraf is dat daardoor rekening gehouden kan worden met van de installatie afhankelijke afwijkingen van de elektrische parameters.

Gedurende de ingebruikneming dient gecontroleerd te worden dat de motor op de juiste wijze aangesloten is om er zeker van te zijn dat de gegevens kloppen.

In te stellen parameters

De parameters in het besturingssysteem zijn afgestemd op de motor in kwestie, d.w.z. op de daarmee corresponderende stroomkringparameters en de gegevens op het motorplaatje. De motorgegevens verkrijgt men door automatische aanpassing (AMA), handmatige invoering (standaardgegevens, -weerstand en -reactantie), of door gebruik te maken van standaardgegevens (nominale motorvermogen, -spanning, -frequentie, -toerental en -stroom). Vanuit dit uitgangspunt kan een besturingsalgoritme voor een breed vermogensspectrum (0,25 tot 500 kW) ontwikkeld worden.

De dimensionering van de motor wordt door de AMA van de VVC^{plus}-besturing in stilstand uitgevoerd. Voorkomen dient te worden dat de motor gedurende de meting door invloeden van buitenaf kan gaan draaien.

Automatische energie-optimalisering (AEO)

Omdat in de industrie steeds meer gebruik gemaakt wordt van elektrische aandrijvingen wordt tegenwoordig veel aandacht geschonken aan energiebesparing. In veel toepassingen waarbij de aandrijving meerdere belastingscycli doorloopt kan gedurende perioden met kleinere belasting energie bespaard worden door de magnetische veldsterkte te reduceren. In veel aandrijvingen wordt dat doel tot op zekere hoogte bereikt door voor belastingen die invloed op het koppel hebben U/f -eigenschappen in te bouwen, daarbij steunend op de reeds aanwezige kennis van het koppel/toerentalprofiel (ventilatoren, circulatiepompen).

Gebruik wordt gemaakt van een methode voor automatische online-optimalisering van het energieverbruik voor de feitelijke belasting op een bepaald koppel. Daarbij wordt de ingestelde waarde aangepast die de voor de feitelijke belasting benodigde magnetische veldsterkte levert. Als compromis tussen de maximaal bereikbare besparing en de reële toepassings-eisen voor wat het minimale koppel bij geblokkeerde rotor (kipkoppel) betreft wordt, teneinde de motor voldoende sterk te houden, een onderste grenswaarde vastgelegd.

De instellingen berusten uitsluitend op de in de besturing beschikbare gegevens zodat voor deze functie geen bijkomende instellingen of parameters nodig zijn. In tegenstelling tot normale toerentalbesturing met behulp van magnetische veldsterktedimensionering zorgt energie-optimalisering voor kleinere verliezen in de motor en bespaart daardoor energie. De besparing die in principe bij kleine tot middelgrote aandrijvingen bereikt kan worden bedraagt bij geringe belasting gemiddeld 3 tot 5% van het nominale vermogen. Een zeer belangrijk neveneffect is dat de motor bij geringe belasting vrijwel geruisloos loopt, zelfs bij lage tot gemiddelde schakelfrequenties.

Bedrijf binnen de stroomgrens

Spanningsgestuurde PWM-frequentie-omvormers, die op simpele U/f-karakteristiekbesturing berusten, werken over het algemeen in de buurt van de stroomgrens niet gelijkmatig. De spanning – en dus ook de frequentie – worden aanvankelijk verlaagd tot de ingestelde stroomgrens bereikt wordt. Zodra deze grens bereikt is probeert de frequentie-omvormer de ingestelde waarde opnieuw te bereiken (spanning en frequentie gaan weer omhoog). Dit leidt tot een verhoging resp. vermindering van het toerental, waardoor bijv. het mechanische deel van de installatie onnodig belast wordt en zelfs de kwaliteit van het product negatief beïnvloed kan worden.

Onder bepaalde omstandigheden kan zich een abrupte uitschakeling van de motor voordoen:

- als de spanning en frequentie via een interne karakteristiek verlaagd resp. tot aan het uitschakelpunt (omvormer overbelast) verhoogd worden, of
- de belasting gereduceerd wordt.

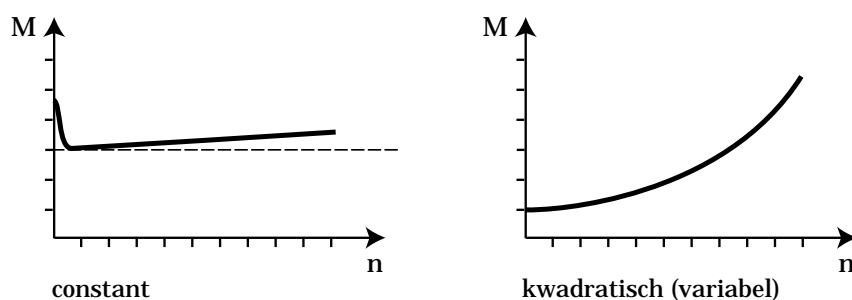
Moderne PWM-frequentie-omvormers zoeken (via een interne karakteristiek) een werkpunt waarop de ingestelde stroomgrens niet overschreden wordt en sturen de motor gelijkmatig tot aan dit werkpunt. De gebruiker wordt via een waarschuwingssignaal attent gemaakt op het feit dat de stroomgrens bereikt is. De frequentie-omvormer wordt pas uitgeschakeld als er geen geschikte frequentie te vinden is.

Welk vermogen moet de frequentie-omvormer hebben?

Bij het bepalen van het vermogen dat een frequentie-omvormer voor een bepaalde belasting dient te hebben moet eerst de belastingskarakteristiek vastgesteld te worden. Op basis daarvan kan berekend worden welke frequentie-omvormer past bij het vereiste afgegeven vermogen. Het vereiste afgegeven vermogen kan op vier verschillende manieren berekend worden. Welke van die manieren bruikbaar zijn hangt af van de motorgegevens die ter beschikking staan.

Belastingskarakteristieken

Voordat de grootte van de frequentie-omvormer bepaald kan worden dient eerst onderscheid gemaakt te worden tussen de beide meest voorkomende belastingskarakteristieken (zie afb.1.32 op blz. 44).



Afb. 3.10 Een constant en een kwadratisch belastingskoppel

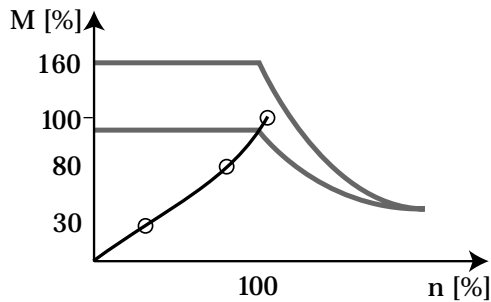
De reden voor dit onderscheid is:

- als bij pompen en ventilatoren het toerental stijgt gaat het energieverbruik met de 3de macht van het toerental omhoog ($P = n^3$), en
- het normale werkbereik van pompen en ventilatoren ligt tussen 50% en 90% van het maximale toerental. De belastingsgraad stijgt kwadratisch met het toerental, dus met 30% tot 80%.

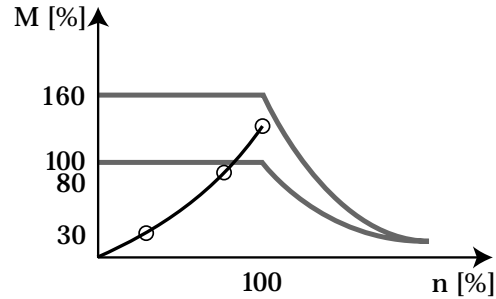
Deze beide verhoudingen worden weerspiegeld in de koppelkarakteristieken van een met een frequentie-omvormer geregelde motor.

Afb.3.11 en 3.12 tonen de koppelkarakteristieken van twee frequentie-omvormers van verschillende grootte, waarvan de

ene qua vermogen één maat kleiner is dan de andere. Beide koppelkarakteristieken zijn gebaseerd op dezelfde belastingskarakteristiek van een centrifugaalpomp. In afb.3.11 ligt het totale werkbereik van de pomp (0-100%) binnen de nominale waarden van de motor. Omdat het normale werkbereik van een pomp 30%-80% is kan in dit geval een frequentie-omvormer met een lager uitgangsvermogen gekozen worden.



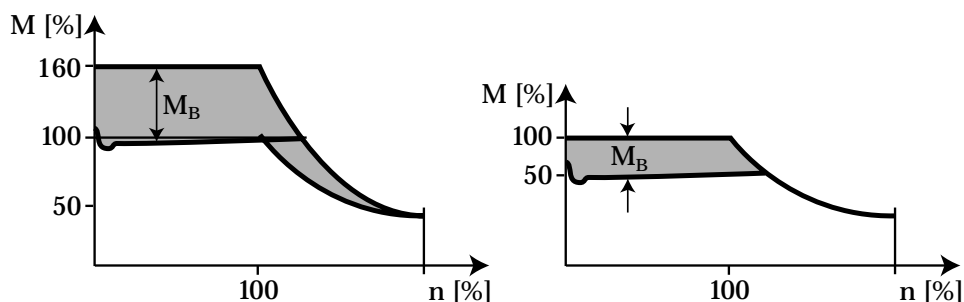
Afb. 3.11
'Grote' frequentie-omvormer



Afb. 3.12
'Kleine' frequentie-omvormer

Bij een constant belastingskoppel moet de motor een koppel kunnen afgeven dat groter is dan dat belastingskoppel. Het extra koppel wordt voor het versnellen gebruikt.

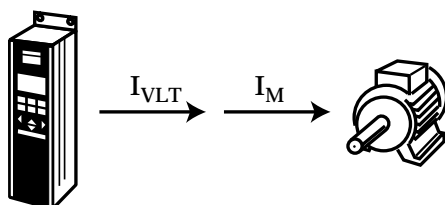
Voor het versnellen en voor grote startkoppels, zoals bijv. bij transportbanden, voldoet een door de frequentie-omvormer afgegeven kortstondig extra koppel van 60%. Het extra koppel maakt het de installatie tevens mogelijk schokkende belastingen te verwerken. Een frequentie-omvormer die geen extra koppel toestaat dient zo groot gekozen te worden dat het aanloopkoppel (M_B) binnen het nominale koppel ligt.



Afb. 3.13 *Het extra koppel wordt voor het versnellen gebruikt*

Nadat de belastingskarakteristiek is vastgelegd zijn er verschillende motorgegevens waarmee het vereiste vermogen van de frequentie-omvormer bepaald kan worden.

1. De frequentie-omvormer kan aan de hand van de door de motor opgenomen stroom I_M snel en accuraat gekozen worden. Bij een niet volbelaste motor kan de motorstroom bijv. aan een relevante, in bedrijf zijnde installatie gemeten worden.



Afb. 3.14 Keuze van een frequentie-omvormer gebaseerd op de nominale stroom

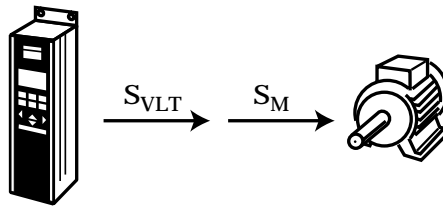
Voorbeeld: Een 7,5 kW, 3×400 V motor neemt 14,73 A op.

Op basis van de technische gegevens van de frequentie-omvormer kiezen we een regelaar waarvan de maximale continu-uitgangsstroom groter dan of gelijk aan 14,73 A is bij een constante of kwadratische koppelkarakteristiek.

N.B.

Wordt een frequentie-omvormer gekozen op basis van vermogen (methode 2-4) dan is het van belang de berekende vermogens en de onder de technische gegevens van de frequentie-omvormer aangegeven vermogens bij gelijke spanning te vergelijken. Dit is niet nodig wanneer een frequentie-omvormer op basis van een stroom wordt gekozen (methode 1), omdat alle overige gegevens dan bepaald worden door de uitgangsstroom van de frequentie-omvormer.

2. De keuze van de frequentie-omvormer kan ook worden bepaald aan de hand van het door de motor opgenomen schijnbaar vermogen S_M en het door de frequentie-omvormer afgegeven schijnbaar vermogen.



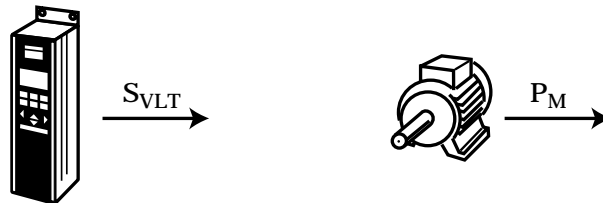
Afb. 3.15 Keuze van een frequentie-omvormer gebaseerd op het schijnbaar vermogen

Voorbeeld: Een 7,5 kW, 3 × 400 V motor neemt 14,73 A op.

$$S_M = \frac{U \times I \times \sqrt{3}}{1000} = \frac{400 \times 14,73 \times \sqrt{3}}{1000} = 10,2 \text{ kVA}$$

Aan de hand van de technische gegevens van de frequentie-omvormer kiezen we een regelaar waarvan het maximale continu-uitgangsvermogen groter dan of gelijk aan 10,2 kVA is bij een constante resp. kwadratische koppelkarakteristiek.

- De keus van een frequentie-omvormer kan voorts ook gebaseerd worden op het afgegeven vermogen P_M van de motor. Omdat met de belasting zowel $\cos \varphi$ als het rendement η verandert is dit geen nauwkeurige methode.



Afb. 3.16 Keuze van een frequentie-omvormer gebaseerd op het asvermogen

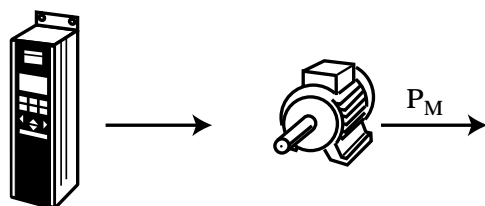
Voorbeeld: Een 3 kW motor met een rendement en $\cos \varphi$ van resp. 0,80 en 0,81 neemt op:

$$S_M = \frac{P_M}{\eta \times \cos \varphi} = \frac{3,0}{0,80 \times 0,81} = 4,6 \text{ kVA}$$

Aan de hand van de technische gegevens van de frequentie-omvormer kiezen we een regelaar waarvan het maximale continu-uitgangsvermogen groter dan of gelijk aan 4,6 kVA is bij een constante resp. kwadratische koppelkarakteristiek.

- De vermogensgrootten van frequentie-omvormers zijn om praktische redenen aangepast aan de standaardreeks asynchroonmotoren. De keus van een frequentie-omvormer wordt derhalve vaak op dit feit gebaseerd, maar zal, met name wan-

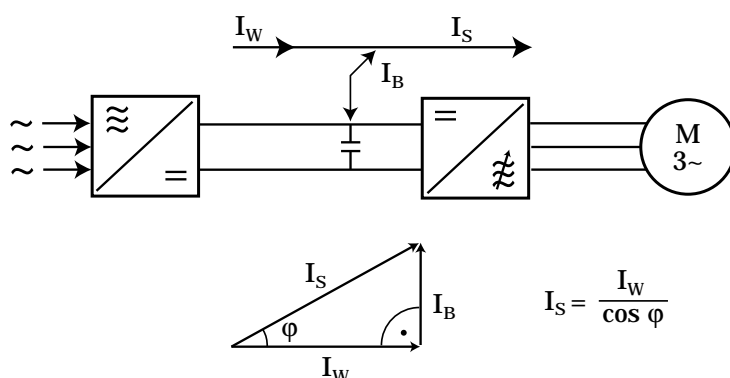
neer de motor niet vol belast wordt, niet altijd de juiste blijken te zijn.



Afb. 3.17 Keuze van een frequentie-omvormer gebaseerd op de standaardreeks motoren

Stroomverdeling in de frequentie-omvormer (cos φ van de motor)

De stroom voor het magnetiseren van de motor wordt ter beschikking gesteld door de condensator in de tussenkring van de frequentie-omvormer. De magnetiseringsstroom is een blindstroom die zich heen en weer tussen condensator en motor verplaatst (afb.3.18).



Afb. 3.18 Stromen in de frequentie-omvormer

Uit het net wordt slechts de werkstroom I_W opgenomen. De uitgangsstroom van de frequentie-omvormer is dus altijd groter dan de ingangsstroom. Behalve de werkstroom worden ook de verliezen I_{verl} uit het net opgenomen. Deze verhouding is zeer duidelijk merkbaar bij nullast.

Voorbeeld: De nullaststroom van een vierpolige 1,1 kW motor is 1,6 A. De uitgangsstroom van de daarop aangesloten frequentie-omvormer bedraagt ca. 1,6 A en de ingangsstroom bij nullast ligt in de buurt van nul.

Normaal gesproken geeft de motorfabrikant de $\cos \varphi$ van de motor bij nominale stroom aan. Bij een lage waarde van $\cos \varphi$ (bijv. in een reluctantiemotor) wordt de nominale motorstroom – bij een zelfde vermogen en netspanning – groter volgens de formule:

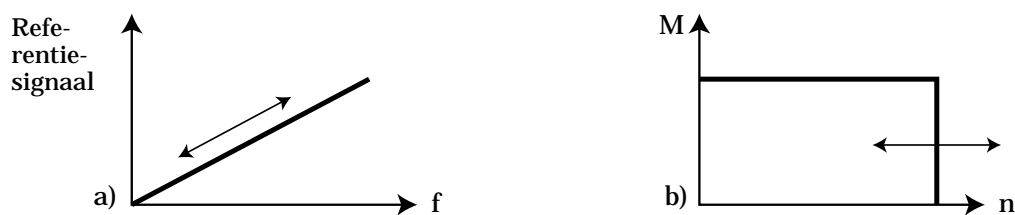
$$I_s = \frac{I_w}{\cos \varphi}$$

Een op basis van de nominale motorstroom berekende frequentie-omvormer (methode 1) maakt het nominaal motorkoppel niet kleiner.

Een ter compensatie van de blindstroom aan de motorklemmen aangebrachte condensator dient verwijderd te worden. Door de hoge schakelfrequentie van de frequentie-omvormer werkt de condensator als kortsluiting waardoor de motorstroom ongecontroleerd stijgt. Daar dit door de regelaar als aard- of kortsluiting ervaren wordt is uitschakeling het gevolg.

Regeling van het motortoerental

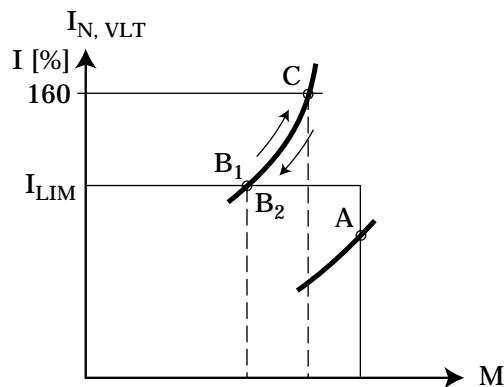
De uitgangsfrequentie van de frequentie-omvormer, en dus ook het toerental van de motor, wordt via één of meer signalen (0-10 V; 4-20 mA, of spanningsimpulsen) als toerentalreferentie gestuurd. Door de toerentalreferentie te verhogen stijgt het toerental van de motor. Het verticale deel van de koppelkarakteristiek van de motor verschuift naar rechts (afb.3.19b).



Afb. 3.19 Verband tussen het referentiesignaal en de koppelkarakteristiek van de motor

Wanneer het belastingskoppel kleiner is dan het motorkoppel bereikt het toerental zijn gewenste waarde. De koppelkarakteristiek van de belasting snijdt de koppelkarakteristiek van de motor op het verticale deel (punt A). Ligt het snijpunt op het horizontale deel (punt B) dan kan het toerental van de motor de daarbij behorende waarde niet continu overschrijden. De fre-

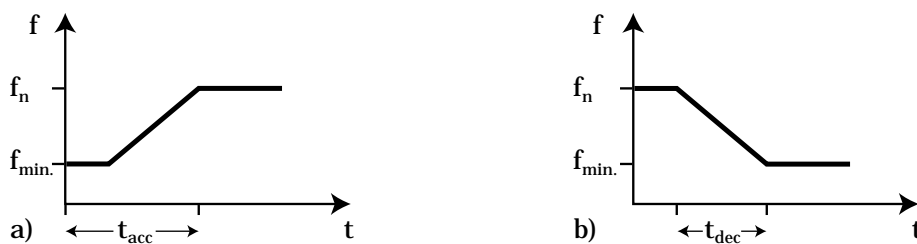
quentie-omvormer staat een kortstondige overschrijding van de stroomgrens toe zonder dat uitschakeling volgt (punt C). De duur van de overschrijding moet dus beperkt zijn.



Afb. 3.20 De motorstroom kan gedurende korte tijd de stroomgrens overschrijden.

Versnellings- en vertragingsskarakteristieken

De versnellingskarakteristiek toont de snelheid waarmee het toerental stijgt. Dit wordt uitgedrukt in de versnellingstijd t_{acc} , die aangeeft hoe snel de aandrijving het nieuwe toerental dient te bereiken. Deze karakteristieken zijn meestal gebaseerd op de nominale frequentie van de motor: een versnellingskarakteristiek van 5 sec. betekent dat de frequentie-omvormer 5 seconden nodig heeft om van 0 tot de nominale motorfrequentie ($f_n = 50$ Hz) te komen.



Afb. 3.21 Versnellings- en vertragingstijden

De vertragingsskarakteristiek toont de snelheid waarmee het toerental daalt. Dit wordt uitgedrukt in de vertragingstijd t_{dec} , die aangeeft hoe snel de aandrijving het nieuwe toerental dient te bereiken.

Er kan onmiddellijk van versnellen op vertragen overgeschakeld worden, omdat de motor voortdurend de uitgangsfrequentie van de omvormer volgt.

Als het traagheidsmoment van de motoras bekend is kunnen de kortste versnellings- en vertragingstijden berekend worden:

$$t_{\text{acc}} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(M_{\text{acc}} - M_{\text{reib}}) \times 9.55}$$

$$t_{\text{dec}} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(M_{\text{dec}} + M_{\text{reib}}) \times 9.55}$$

J is het traagheidsmoment van de motoras.

M_{reib} is het wrijvingskoppel van de installatie.

M_{acc} is het extra koppel dat voor het versnellen gebruikt wordt.

M_{dec} is het remkoppel dat ontstaat als de snelheidsreferentie verlaagd wordt.

n_1 en n_2 zijn de respectievelijke toerentallen bij de frequenties f_1 en f_2 .

Wanneer de frequentie-omvormer gedurende korte tijd een extra koppel toestaat worden de versnellings- en vertragingkoppel in de berekening met het nominale koppel M van de motor verhoogd. De versnellings- en vertragingstijden zijn in de praktijk meestal van gelijke grootte.

Voorbeeld:

$$t_{\text{acc}} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(M_{\text{acc}} - M_{\text{reib}}) \times 9.55} = 0.042 \times \frac{1000 - 500}{(27,0 - (0,05 \times 27,0)) \times 9.55} = 0.1 \text{ [s]}$$

Rembedrijf

Wordt de snelheidsreferentie verlaagd dan werkt de motor als generator en remt. De remvertraging hangt af van de grootte van het afgegeven motorvermogen.

Bij rechtstreeks op het voedingsnet aangesloten motoren wordt het remvermogen teruggeleverd aan het net.

Bij een door een frequentie-omvormer geregelde motor wordt het remvermogen opgeslagen in de tussenkring van de regelaar. Als het remvermogen groter is dan de vermogensverliezen stijgt de spanning in de tussenkring.

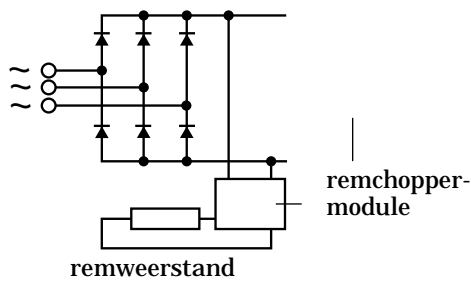
De tussenkringspanning kan oplopen tot het koppel waarop de frequentie-omvormer zichzelf als veiligheidsmaatregel uitschakelt. Het kan om die reden nodig zijn de tussenkring met een

remmodule en externe weerstand te belasten die het remvermogen opnemen.

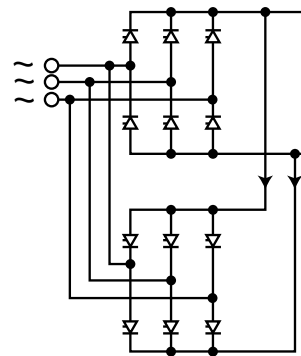
Zware belastingen kunnen met een remmodule en -weerstand snel afgeremd worden. Vanaf een bepaald vermogen veroorzaken de remmodule en -weerstand warmteproblemen. Dit wordt opgelost door gebruik te maken van een zogenaamde netterugvoedingsunit. Netterugvoedingsunits worden toegepast in ongeregelde gelijkrichters.

Bij frequentie-omvormers met geregelde gelijkrichter kan het remvermogen teruggeleid worden naar het net (zie afb.3.23).

Dit gebeurt bijv. via een omvormer die antiparallel aan de gelijkrichter geschakeld is.



Afb. 3.22
Remmodule en -weerstand



Afb. 3.23
Antiparallelgeschakelde omvormer

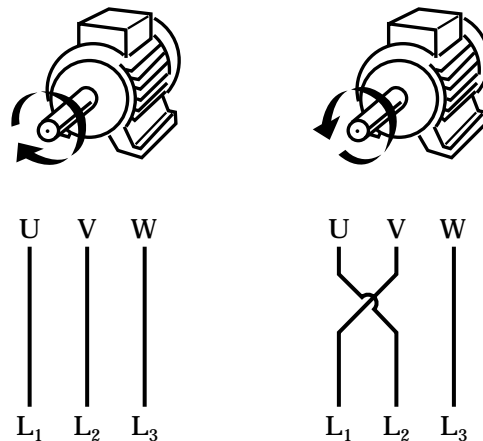
Een andere manier om de motor af te remmen is gelijkstroomremmen (DC-remmen). Middels een gelijkspanning over twee motorfasen wordt in de stator een stilstaand magneetveld opgewekt. Het remvermogen blijft in de motor, die daardoor oververhit kan raken. Er wordt daarom geadviseerd het gelijkstroomremmen binnen een laag toerentalbereik zo in te stellen dat de nominale motorstroom niet overschreden wordt. Over het algemeen is DC-remmen qua tijd begrensd.

Omkeren

De draairichting van asynchroonmotoren wordt door de fasevolgorde van de voedingsspanning bepaald.

Door verwisseling van 2 fasen vindt omkeren – omkering van de draairichting van de motor – plaats.

De meeste motoren zijn zo geconstrueerd dat de motoras, mits op de aangegeven wijze aangesloten, rechtsom draait.

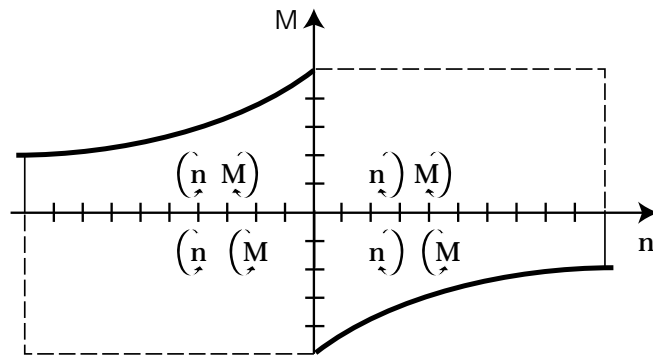


Afb. 3.24 De draairichting van de motor verandert door de fasevolgorde te veranderen

De fasevolgorde van de uitgangsklemmen van de meeste frequentie-omvormers is op hetzelfde principe gebaseerd.

Door de fasevolgorde elektronisch te veranderen kan de frequentie-omvormer de motor in omgekeerde richting laten draaien. Omkeren vindt plaats via een negatieve toerentalreferentie of een digitaal ingangssignaal. Als de motor bij de eerste ingebruikneming een bepaalde draairichting moet hebben is het van belang te weten hoe de frequentie-omvormer door de fabriek is afgesteld.

Aangezien een frequentie-omvormer de motorstroom tot zijn nominale waarde beperkt houdt kan de draairichting van een met een frequentie-omvormer geregelde motor vaker omgekeerd worden dan bij een rechtstreeks op het voedingsnet aangesloten motor het geval is.



Afb. 3.25 Het remkoppel van de frequentie-omvormer bij omkeren

Versnellings- en vertragingstijden

Ter wille van gelijkmatige bedrijfsvoorwaarden dienen alle frequentie-omvormers te beschikken over versnellings- en vertragingfuncties. De versnellings- en vertraging karakteristieken zijn instelbaar en zorgen ervoor dat de snelheid uitsluitend met de ingestelde waarde kan stijgen of dalen.



Afb. 3.26 Variabele versnellings- en vertragingstijden

De karakteristieken kunnen zo steil ingesteld worden dat het toerental van de motor ze onder bepaalde omstandigheden niet kan volgen.

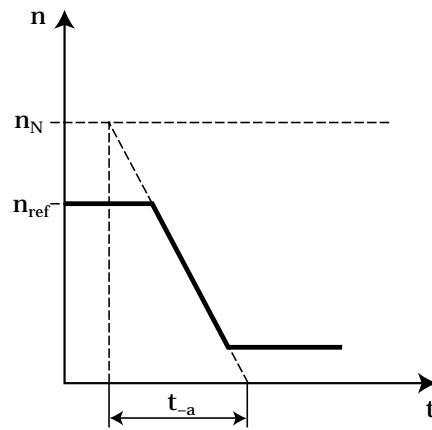
Hierbij stijgt de motorstroom tot hij de stroomgrens bereikt. Bij korte vertragingstijden (t_{-a}) kan de spanning in de tussenkring dermate stijgen dat de frequentie-omvormer door de beveiligingselektronica wordt uitgeschakeld.

De optimale versnellings- en vertragingstijden kunnen berekend worden aan de hand van de volgende formules:

$$t_a = J \times \frac{n}{(M_N - M_{\text{reib}}) \times 9.55}$$

$$t_{-a} = J \times \frac{n}{(M_N + M_{\text{reib}}) \times 9.55}$$

t_a : karakteristiek op
 t_{-a} : karakteristiek af
 n : toerental
 M_N : nominale motorkoppel
 M_{reib} : wrijvingskoppel



Afb. 3.27 Instelling van de versnellings- en vertragingstijd

De versnellings- en vertragingstijden zijn in de meeste gevallen gebaseerd op het nominale toerental van de motor.

Bewaking

Een frequentie-omvormer kan het stuurproces bewaken en bij storing ingrijpen.

De bewaking betreft drie onderdelen: de installatie, de motor en de frequentie-omvormer zelf.

De bewaking van de installatie geldt de uitgangsfrequentie, de uitgangsstroom en het motorkoppel. Voor deze grootheden kunnen een reeks grenswaarden ingesteld worden die ingrijpen in de besturing als ze overschreden worden. Er kan bijv. een grens gesteld worden aan het minimaal toelaatbare toerental (min. frequentie), aan de maximaal toelaatbare motorstroom (stroomgrens) of het maximaal toelaatbare motorkoppel (koppelgrens). Bij overschrijding van de vastgelegde grenzen kan de frequentie-omvormer ingrijpen. De regelaar kan bijv. zo geprogrammeerd worden dat hij een waarschuwingssignaal geeft, de motorsnelheid verlaagt of de motor zo snel mogelijk uitschakelt.

Voorbeeld:

In een installatie met een V-snaar als verbinding tussen de motor en de rest van de installatie kan de frequentie-omvormer geprogrammeerd worden om de V-snaar indirect te bewaken. Zou de V-snaar scheuren dan is te verwachten dat de uitgangsfrequentie sneller stijgt dan de 'ingestelde' karakteristiek aan geeft en de motorstroom onder een bepaalde minimumwaarde daalt. Als dat gebeurt kan de frequentie-omvormer de motor gericht stilzetten.

Motorbewaking door de frequentie-omvormer kan plaatsvinden op basis van een berekening van de thermische verhoudingen van de motor of met behulp van een daarop aangesloten PTC-weerstand. De frequentie-omvormer voorkomt overbelasting van de motor op dezelfde wijze als een thermische beveiliging dat doet. De uitgangsfrequentie vormt onderdeel van de berekening van de frequentie-omvormer. Dit garandeert dat de motor bij lage toerentallen niet overbelast raakt als de eigen koeling minder wordt. Moderne frequentie-omvormers kunnen ook motoren met koeling van buitenaf tegen een te hoge stroom beschermen.

De bewaking van apparatuur geschiedt van oudsher zodanig dat de frequentie-omvormer bij een te hoge stroom uitschakelt. Sommige frequentie-omvormers staan een korte overstroom toe. De microprocessor in de frequentie-omvormer kan de motorstroom en tijd totaliseren zodat de frequentie-omvormer optimaal benut kan worden zonder dat overbelasting optreedt.

Motorbelasting en -verhitting

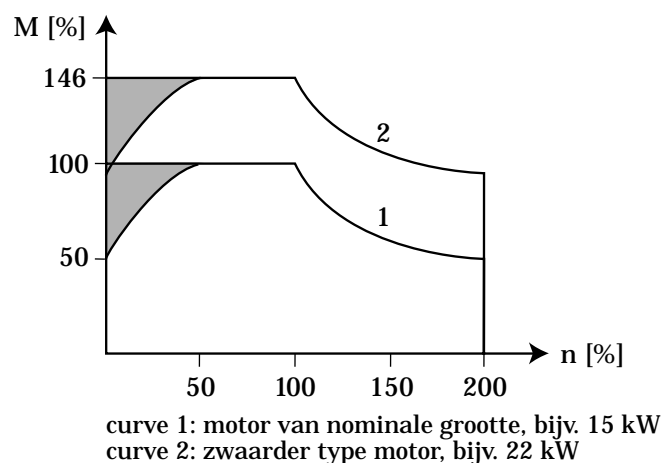
Bij aansluiting van een motor op een frequentie-omvormer dient voor voldoende koeling gezorgd te worden.

De temperatuur van een motor wordt door twee factoren beïnvloedt:

- als het toerental daalt wordt de hoeveelheid koellucht kleiner
- als de motorstroom niet sinusvormig is ontwikkelt zich warmte in de motor.

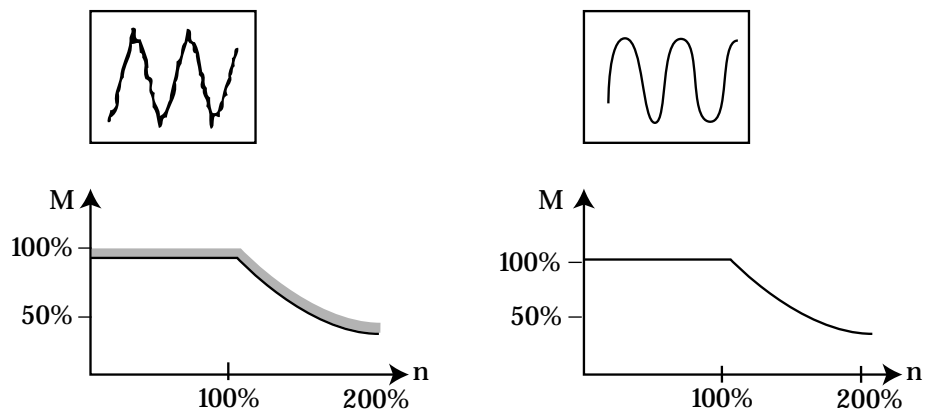
Bij een laag toerental is de ventilator van de motor niet in staat voldoende koellucht aan te voeren. Dit probleem ontstaat wanneer het belastingskoppel binnen het gehele regelbereik constant is. De grootte van het toelaatbare koppel bij continubelasting wordt in feite door dat geringere koelingsvermogen bepaald. Als de motor continu bij 100% nominale belasting loopt met een snelheid van minder dan de helft van het nominale toerental dient extra koellucht toegevoerd te worden (de grijze vlakken in afb.3.28).

In plaats van extra koeling kan ook de belasting van de motor gereduceerd worden door een zwaarder type motor te kiezen. De constructie van de frequentie-omvormer (voor een constant koppel) kent echter grenzen voor wat de grootte van de aan te sluiten motor betreft.



Afb. 3.28 De behoefte aan ventilatie van buitenaf bij een motor van nominale grootte en een zwaarder type motor

In een motor waarvan de motorstroom niet sinusvormig is ontstaan harmonische stromen die extra warmte veroorzaken. Hoeveel warmte vrijkomt hangt af van de grootte van deze harmonische stromen. Als de motorstroom niet sinusvormig is mag



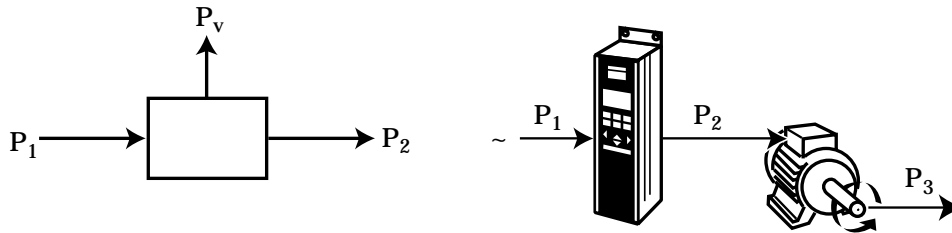
Afb. 3.29 Een stroom die niet sinusvormig is veroorzaakt extra warmte in de motor de motor niet continu 100% belast worden.

Rendementen

Het rendement η van een apparaat wordt bepaald door de verhouding tussen het afgegeven vermogen P_2 en het opgenomen vermogen P_1 .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Het verschil tussen P_1 en P_2 is het vermogensverlies P_V dat in de vorm van warmte in het apparaat vrijkomt.



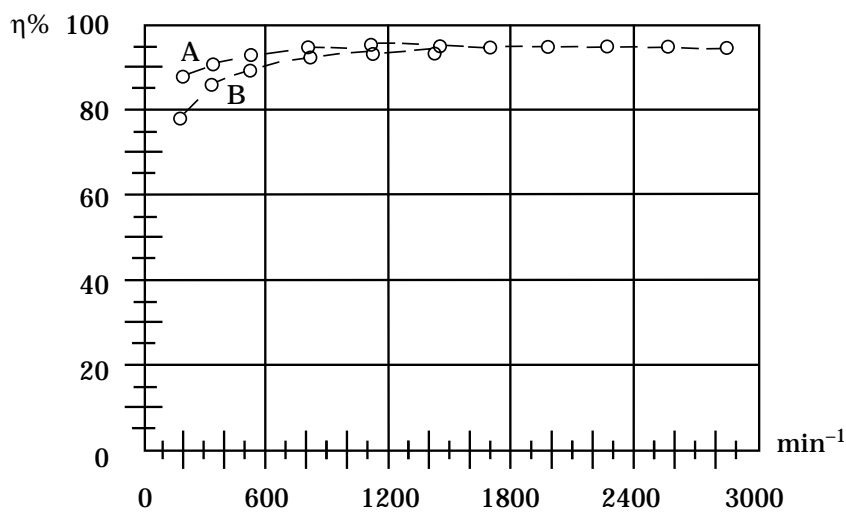
Afb. 3.30 Vermogen en rendement

Het rendement kan alleen voor de frequentie-omvormer, alleen voor de motor en voor de frequentie-omvormer plus motor (systeemrendement) berekend worden.

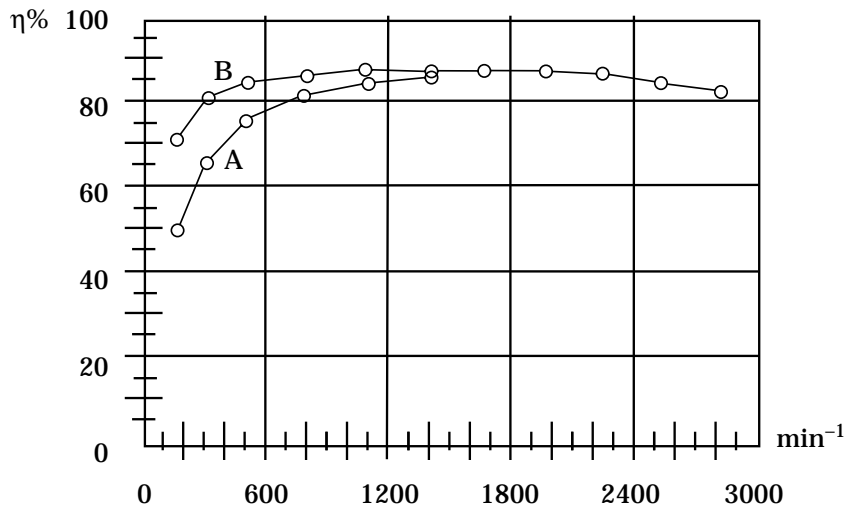
Rendement van de frequentie-omvormer $\frac{P_2}{P_1}$

Rendement van de motor $\frac{P_3}{P_2}$

Systeemrendement $\frac{P_3}{P_1}$



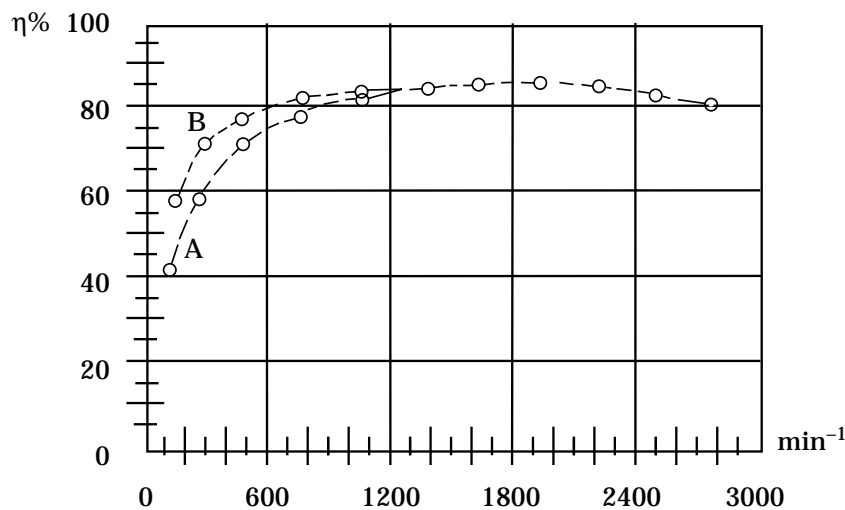
Afb. 3.31a Het rendement van een frequentie-omvormer bij 100% (A) en 25% (B) belasting



Afb. 3.31b Het rendement van een standaardmotor (2-polig) bij 100% (A) en 25% (B) belasting

De krommen tonen aan dat het rendement van de motor een grote invloed heeft op het systeemrendement. Frequentie-omvormers hebben in het gehele regelbereik een hoog rendement, zowel bij zware als geringe belasting.

Ook te zien is dat de rendementen het kleinst zijn bij lage toerentallen. Dit betekent echter niet dat de absolute verliezen bij lage toerentallen maximaal zijn.



Afb. 3.31c Het rendement van een frequentie-omvormer plus motor (2-polig) bij 100% (A) en 25% (B) belasting

Voorbeelden aan de hand van afb.3.31c:

1. $n = 800 \text{ min}^{-1}$

$$P_3 = 9628 \text{ W}$$

$$\eta = 77.3\%$$

$$P_1 = \frac{P_3}{\eta} = 12455.4 \text{ W}$$

$$P_T = P_1 - P_3 = 2827.4 \text{ W}$$

2. $n = 500 \text{ min}^{-1}$

$$P_3 = 1500 \text{ W}$$

$$\eta = 70\%$$

$$P_1 = \frac{P_3}{\eta} = 2143 \text{ W}$$

$$P_T = P_1 - P_3 = 643 \text{ W}$$

Het hoge rendement van de frequentie-omvormer biedt diverse voordelen:

- Des te hoger het rendement, des te minder warmte uit de installatie afgevoerd hoeft te worden. Dit speelt een belangrijke rol als de frequentie-omvormer in een regelpaneel wordt ingebouwd.
- Des te minder warmte zich in de halfgeleiders en spoelen van de frequentie-omvormer ontwikkelt, des te langer is hun levensduur.
- Geringer energieverbruik.

4. Bescherming en veiligheid

Op grond van de voor een specifieke installatie geldende voorschriften kan het noodzakelijk zijn in de buurt van de motor een noodschakelaar aan te brengen. Het is daarbij van belang dat deze schakelaar in de motorkabel kan worden aangebracht zonder schade aan de motor of frequentie-omvormer te veroorzaken – en dat bij voorkeur onafhankelijk van de schakelfrequentie.

Tussen het besturings- en het vermogensdeel van de frequentie-omvormer dient een galvanische scheiding te worden aangebracht. Gebeurt dat niet dan hebben de stuurstroomleidingen t.o.v. de aarde dezelfde spanning als het voedingsnet. Aanraking van de stuurstroomleidingen zou in dat geval levensgevaarlijk zijn en tevens de apparatuur kunnen beschadigen. Richtlijnen voor galvanische isolatie zijn te vinden in de Europese norm EN 50178. De frequentie-omvormer is beveiligd tegen de risico's van aanraking. Een betere beveiliging, zoals IP 21, voorkomt lichamelijke letsels door aanraking. Beveiliging tegen aanraking biedt ook het ongevalpreventievoorschrift VBG 4 dat in Duitsland voor elektrische apparaten geldt. Oververhitte frequentie-omvormers kunnen brand veroorzaken. Zij dienen om die reden voorzien te zijn van een ingebouwde warmtesensor die bij storingen in het koelsysteem de voedingsspanning onderbreekt.

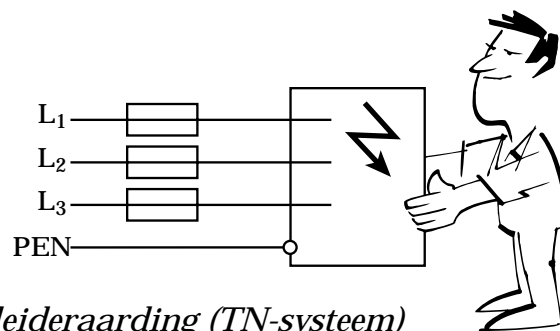
Een op een frequentie-omvormer aangesloten motor kan onder bepaalde omstandigheden zonder waarschuwing opnieuw starten. Dit kan bij voorbeeld gebeuren als de frequentie-omvormer tijdcomponenten activeert of temperatuurlimieten bewaakt.

Aanvullende beveiliging

Door aanvullende beveiliging worden gevaarlijke aanrakingspanningen aan de buitenkant van het huis vermeden. Frequentie-omvormers dienen altijd aanvullend beschermd te zijn. De wijze van beveiliging dient van geval tot geval beoordeeld te worden en hangt altijd af van de plaatselijke omstandigheden en voorschriften. Beveiliging kan geschieden door (nulleider) aarding of een beveiligingsrelais.

Nulleideraarding (TN-systeem)

Frequentie-omvormers kunnen extra beveiligd worden door in de voedingsleiding van de installatie tussen de aardklem en de nulleider een aardleiding aan te brengen. Deze vorm van extra beveiliging wordt dikwijls toegepast in industriële installaties en woonhuizen, die gebruik maken van een aardkabel. Als een installatie geen nulleideraarding heeft hangt het van de aansluitvoorwaarden van het apparaat af of deze op het betreffende net aangesloten mag worden. In sommige gevallen zal met de leverancier overleg moeten worden of dat mogelijk is.

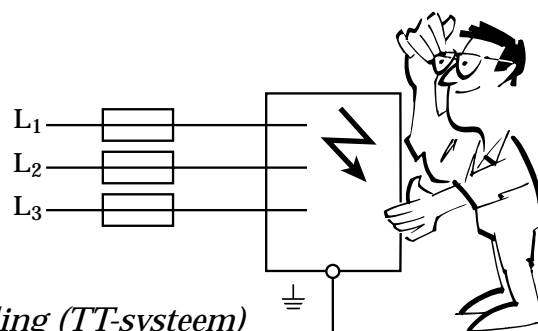


Afb. 4.01 Nulleideraarding (TN-systeem)

Aarding (TT-systeem)

Frequentie-omvormers kunnen extra beveiligd worden door een aardleiding aan te brengen tussen de aardklem en de equipotentiaalrail. Voorwaarde voor deze methode is een voldoende lage impedantie van het equipotentiaalpunt. Ontstoringsmaatregelen veroorzaken een lekstroom in frequentie-omvormers en de aardverbinding moet daarom zo laagohmig mogelijk zijn. EN 50178/5.3.2.1 stelt de volgende eisen:

Bij een lekstroom $> 3,5$ mA dient de doorsnede van de aardleiding minimaal 10 mm^2 te zijn dan wel het apparaat via twee gescheiden aardleidingen geaard te worden die aan de voorschriften van IEC 364-5-543 voldoen. Dit wordt vaak 'versterkte aarding' genoemd.



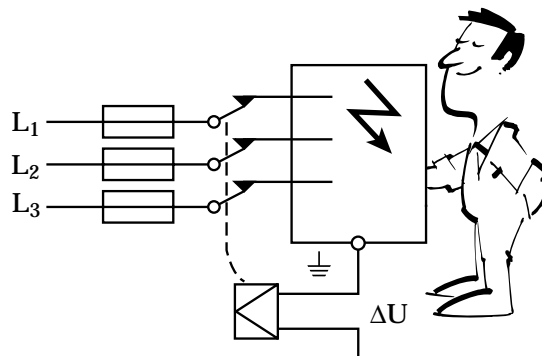
Afb. 4.02 Aarding (TT-systeem)

Beveiligingsrelais

Er zijn twee typen beveiligingsschakelaars die extra beveiliging kunnen bieden. Het ene type werkt met een foutspanningrelais, het andere met een aardlekschakelaar.

Extra beveiliging met een foutspanningrelais (FU-relais) is in de meeste installaties mogelijk. De beveiliging bestaat daaruit dat de spoel van het relais via een aardleiding tussen de aardklem van de frequentie-omvormer en de aardpotentiaal wordt geplaatst. Door een foutspanning wordt het relais geactiveerd en de frequentie-omvormer spanningsvrij gemaakt.

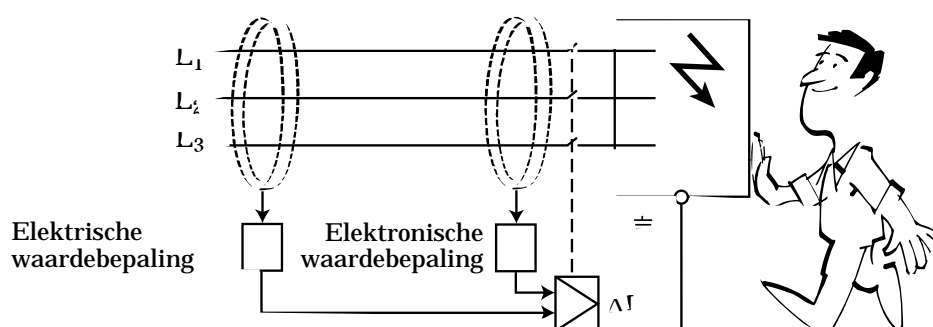
FU-relais zijn nuttig op plaatsen waar nulleideraarding niet toegestaan is of de ondergrond aarding onmogelijk maakt. Of deze methode al dan niet is toegestaan hangt van de voorschriften van de plaatselijke elektriciteitsmaatschappij af. In Duitsland wordt deze beveiligingsmethode tegenwoordig niet meer toegepast.



Afb. 4.03 Foutspanningrelais



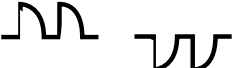

Beveiliging van frequentie-omvormers met een aardlekschakelaar (FI-schakelaar) is onder bepaalde voorwaarden toegestaan. Aardlekschakelaars werken met een totaalstroomtransformator waarop alle voedingsleidingen van de frequentie-omvormer zijn aangesloten. De transformator meet de som van de stromen die deze leidingen passeren. De som van de stromen is nul als in de installatie geen lekstroom voorkomt. Is er wel sprake van lekstroom dan is de stroomsom niet nul en wordt in de secundaire wikkeling van de transformator een stroom geïnduceerd. Deze stroom schakelt het relais uit en maakt de frequentie-omvormer spanningsvrij. Vroeger werkten aardlekschakelaars volgens een inductieprincipe dat uitsluitend op wisselspan-

ningswaarden gebaseerd was. Volgens EN 50178 kunnen frequentie-omvormers met B6-ingangsbruggelijkrichters ingeval van een storing vlakke gelijkstroom in de voedingskabel doen stromen. Aangeraden wordt om te controleren of aan de ingang van de frequentie-omvormer een gelijkstroom aangelegd kan worden. Voor een perfecte beveiliging is het in dit geval nodig een aardlekschakelaar te gebruiken die voor alle stroomsoorten gevoelig is. Deze kan via extra in te bouwen elektronica de foutstroom ook als gelijkstroom bewaken, omdat hij niet afhankelijk is van frequentie. De compatibiliteit met aardlekbeveiligingen wordt in EN 50178 besproken.



Afb. 4.04 Een voor iedere stroomsoort gevoelig aardlekschakelaar

Als een aardlekschakelaar wordt gebruikt die geen DC-aardlekstroom kan verwerken kan deze aardlekstroom worden geblokkeerd door vóór de frequentie-omvormer een scheidingstransformator in te bouwen.

	AC-aardlekstromen
	Pulserende aardlekstromen (halve positieve en negatieve golven) halve-golfstroom
	Afgesneden halve-golfstromen Afsnijhoek $\frac{90^\circ \text{ el.}}{135^\circ \text{ el.}}$
	Halve-golfstroom onderdrukt door een vlakke DC-aardlekstroom van 6 mA
	Vlakke DC-aardlekstroom

Afb. 4.05 Verloop en aanduiding van aardlekstromen

Lekstroom wordt tot op zekere hoogte veroorzaakt door ontstoringsfilters en andere ontstoringscomponenten. Gewoonlijk produceert elk afzonderlijk ontstoringsfilter een lekstroom van

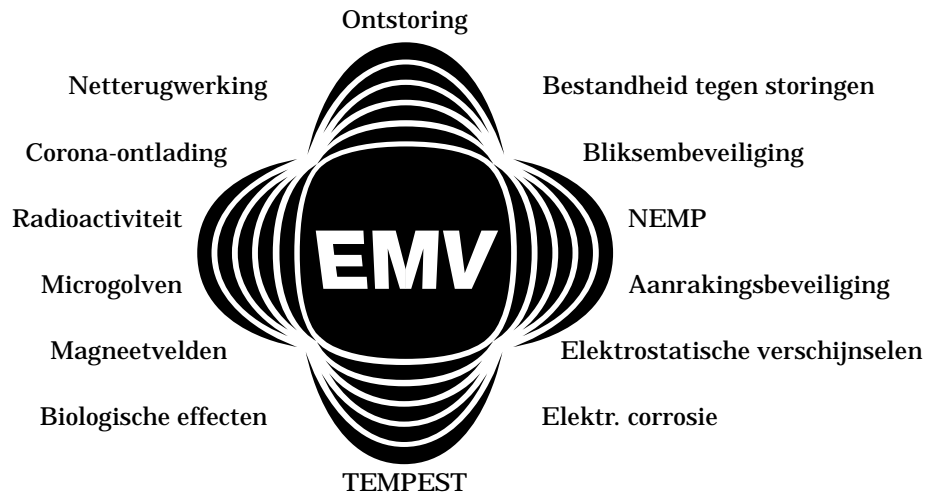
slechts enkele mA die dus verder geen consequenties heeft. Worden echter een aantal filters gecombineerd of zeer grote filters gebruikt dan kan de aardlekschakelgrens van een aardlekbeveiligingsschakelaar wel degelijk bereikt worden.

Elektromagnetische compatibiliteit

Elektromagnetische storingen zijn ongewenste elektrische verschijnselen die of door een apparaat worden voortgebracht of een negatieve invloed op een apparaat hebben.

Elektromagnetische verschijnselen komen in de natuur voor of ontstaan kunstmatig door toedoen van de mens.

Tot de in de natuur voorkomende elektromagnetische verschijnselen behoren bijv. de atmosferische storingen die tijdens een onweer ontstaan. Een tweede voorbeeld is het magneetveld dat de gehele aarde omgeeft en ons beschermt tegen energierijke stralingen uit het heelal. Atmosferische storingen zijn niet te voorkomen. De invloed ervan op elektrische apparatuur en installaties kan hoogstens beperkt worden door bepaalde voorzieningen te treffen.



Afb. 4.06 *Elektromagnetische verschijnselen*

Als kunstmatige elektromagnetische verschijnselen gelden alle door de mens veroorzaakte storingen. Deze ontstaan overal waar met elektrische energie gewerkt wordt. De storingen verplaatsen zich door de lucht of via elektrische leidingen. Storingen veroorzaakt door lichtsakelaars of ontstekingsappara-

tuur zijn op het televisiescherm te zien en op de radio te horen. Als de spanning even uitvalt blijft de klok stilstaan of werkt de computer niet perfect meer. Elektrostatische verschijnselen kunnen fouten in elektronische schakelingen en zelfs brand veroorzaken. Er is een hele reeks van wederzijdse beïnvloedingen, ook op biologische systemen zoals mensen, planten en dieren.

De internationale aanduiding voor storing is EMC, de Engelse afkorting van 'Electromagnetic Compatibility'. Dit duidt de mate aan waarin een apparaat elektrische storingen kan weerstaan en bovendien de omgeving niet belast door zelf storingen te veroorzaken. In het Duits wordt daarvoor de afkorting EMV ('Elektromagnetische Verträglichkeit') gebruikt.

Op 3 mei 1989 werd de EMC-richtlijn door de Raad van Europa van toepassing verklaard voor Europa. Deze Europese richtlijn moest in de nationale wetgevingen opgenomen worden. In Duitsland gebeurde dit in de vorm van de EMV-Wet die op 12.11.1992 van kracht werd. Gedurende de overgangperiode tot 1 januari 1996 kon een keus gemaakt worden tussen de reeds bestaande VDE-voorschriften en de nieuwe EN-normen. De nieuwe EMV-normen zijn verdeeld in drie groepen:

Basisnorm ('Basic Standard')

Deze normen gelden verschijnselen. Zij beschrijven de vereiste beproevingsmiddelen en meetmethoden.

Toepassingsnorm ('Generic Standard')

Deze normen betreffen de toepassingsomgeving. Er wordt verschil gemaakt tussen woningen, kantoren, (lichte) industrie en bijzondere toepassingsomgevingen.

Productnorm ('Product Standard')

Deze normen gaan in op de speciale eisen waaraan bepaalde productgroepen moeten voldoen voor wat betreft meetmethoden en evaluatie. De normen bevatten exacte beproevingsvoorschriften en grenswaarden. Productnormen gaan vóór toepassingsnormen.

Als een elektrisch of elektronisch apparaat aan de Europese normen voldoet dan dient dit m.i.v. een bepaalde datum officieel

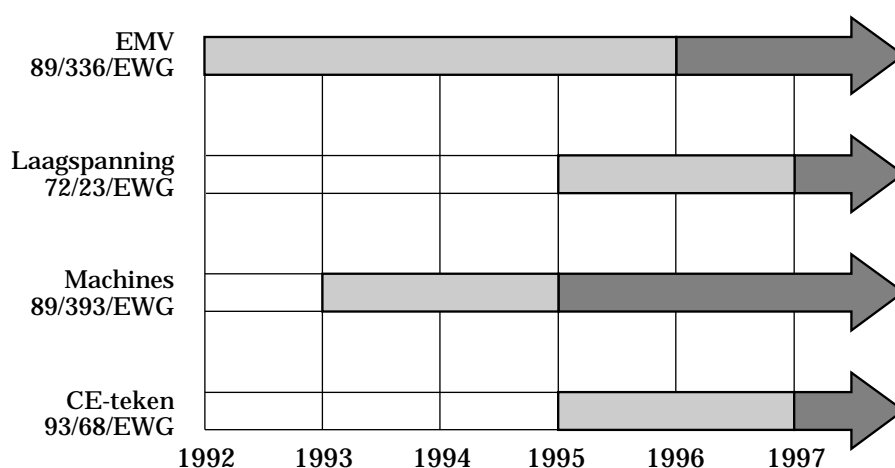
bewezen en zichtbaar gemaakt te worden. Dit gebeurt met behulp van een EG-conformiteitsverklaring en het CE-teken. De EG-conformiteitsverklaring dient als certificaat voor een apparatenserie en het CE-teken wordt niet alleen op het apparaat en de verpakking aangebracht, maar ook in de gebruiksaanwijzing opgenomen. De aanduiding CE geldt voor de betreffende Europese instanties als bewijs dat aan de wettelijke voorwaarden is voldaan.

Producten waarvoor door de EMC-richtlijn een CE-teken voorgeschreven is dienen sinds 1996 van die aanduiding voorzien te zijn.



Afb. 4.07 Het EG-conformiteitsteken

Voor elektrische apparaten die op een wisselspanning tussen 50 en 1000 V of gelijkspanning tussen 75 en 1500 V werken geldt bovendien de laagspanningsrichtlijn. Deze is gebaseerd op de reeds langer bestaande eerste verordening van de Wet op de Apparatuurbeveiliging. Deze sedert 1997 van kracht zijnde richtlijn heeft betrekking op de risico's die elektrische apparatuur inhouden voor de mens, dieren die de mens dienen en zaken.



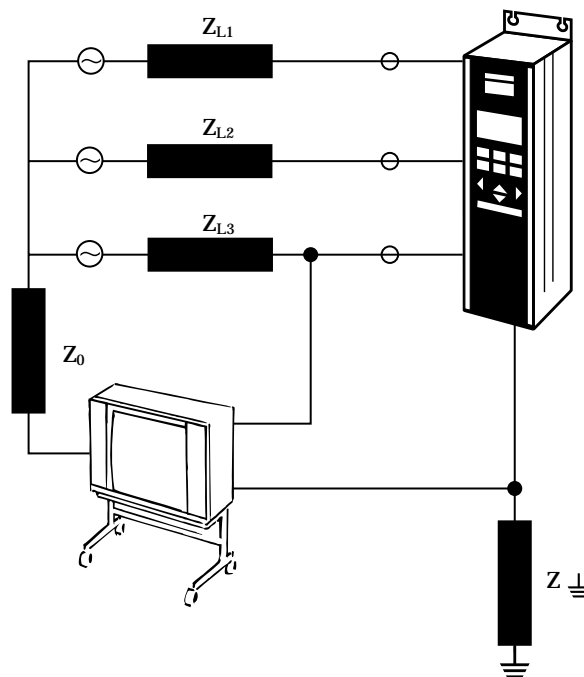
Afb. 4.08 Overgangstermijnen voor het CE-teken

Voortplanting van storingen

De door een apparaat (storingsbron) uitgezonden elektromagnetische energie (storing) wordt parasitaire emissie genoemd. De weerstand van een apparaat tegen elektromagnetische storingen heet storingsimmunitie (storingsvastheid). De parasitaire emissie van een frequentie-omvormer bestaat uit netterugwerking binnen het laagfrequentbereik. Deze storing verplaatst zich via de leidingen van het voedingsnet. Verder zijn er storingen zoals hoogfrequentstraling (10 kHz tot GHz) die zich door de lucht verplaatsen.

Koppelingen

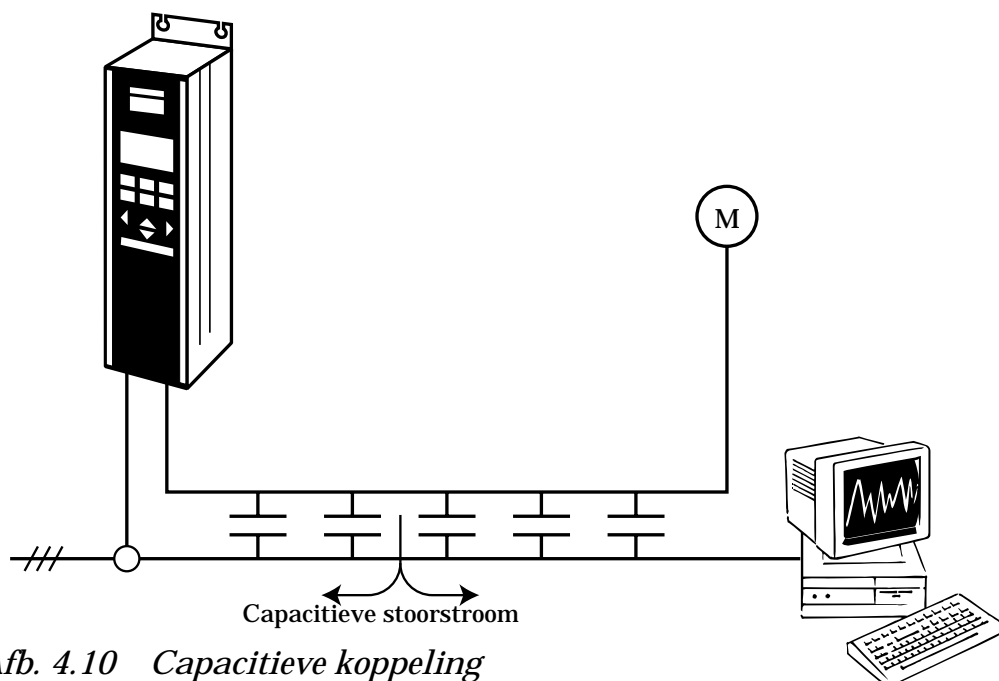
Elektrische kringen kunnen galvanisch, capacitief of inductief gekoppeld worden. In een galvanische koppeling hebben twee kringen een gemeenschappelijke, elektrisch geleidende verbinding.



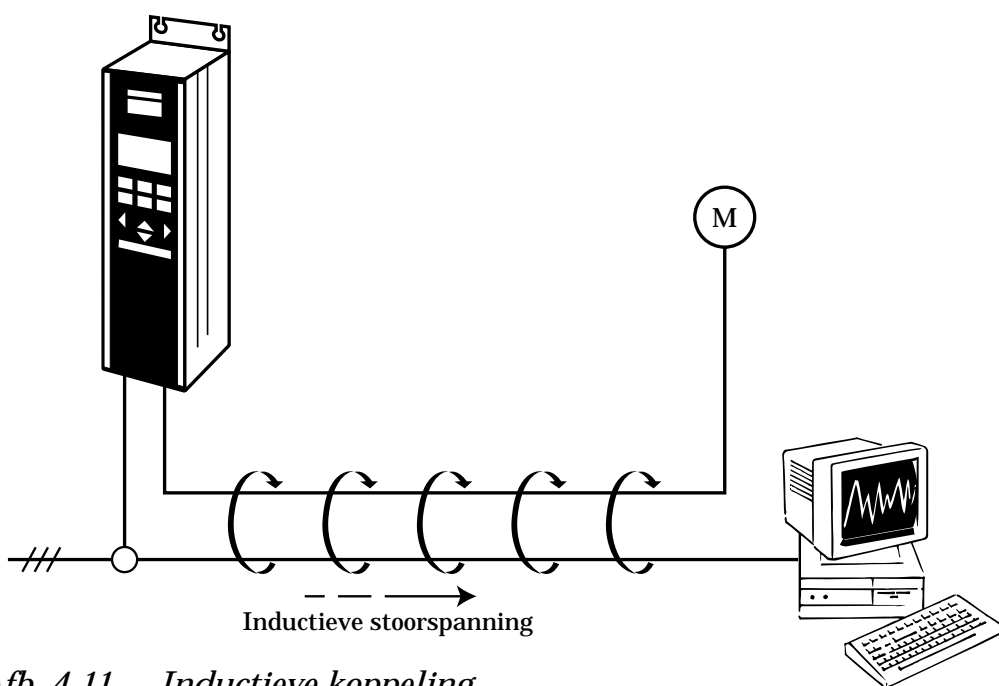
Afb. 4.09 Galvanische koppeling

Frequentie-omvormers en andere in een dergelijke koppeling opgenomen elektrische apparatuur zijn geleidend met elkaar verbonden en hebben hetzelfde aardingspunt. Afhankelijk van de impedantieverhoudingen kan deze koppeling via de beide gemeenschappelijke impedanties Z_{L3} en Z_0 een stoorspanning aan een apparaat veroorzaken.

Een capacatieve koppeling ontstaat als de aarding van twee kringen een gemeenschappelijk uitgangspunt heeft. Een typisch voorbeeld daarvan is een te dicht bij andere kabels gemonteerde motorkabel. De capacatieve stoorstroom die daarvoor ontstaat hangt af van de frequentie in de motorkabel, de daarbij behorende spanningshoogte en de afstand tot de andere kabels. De relatief hoge modulatiefrequentie van moderne frequentie-omvormers, waarmee de uitgangsspanning opgebouwd wordt, leidt tot een lage capacatieve weerstand in de motorkabel en veroorzaakt op die manier capacatieve stoorstromen.



Afb. 4.10 Capacatieve koppeling



Afb. 4.11 Inductieve koppeling

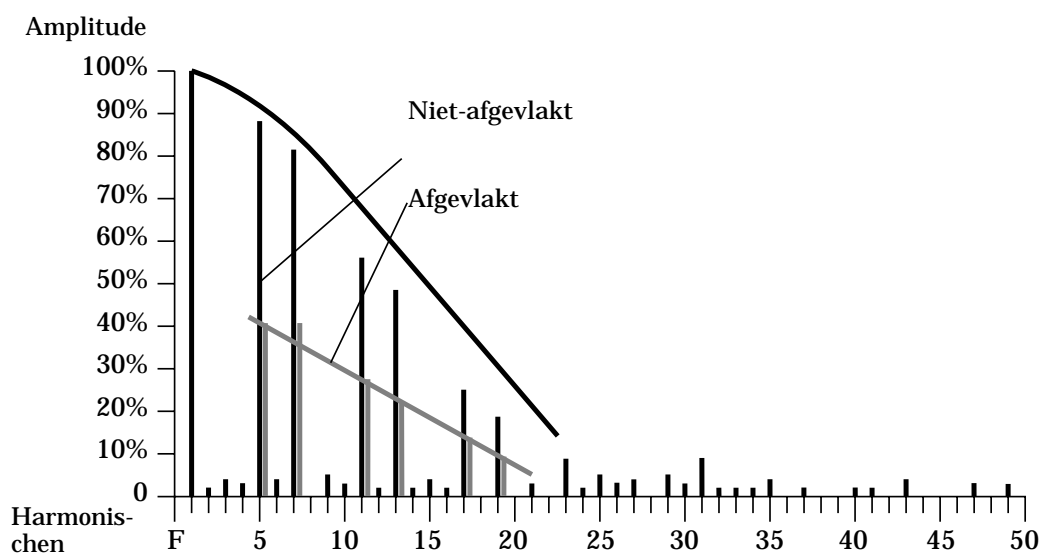
Een inductieve koppeling ontstaat als het magneetveld rond een stroomvoerende kabel een spanning induceert in een andere kabel. De op deze wijze geïnduceerde wisselspanning hangt af van de sterkte van het magneetveld en dus van de stroomsterkte in de motorkabel, de frequentie en de afstand tussen de kabels.

Voortplanting van storingen via leidingen

Parasitaire emissies kunnen zich via de leidingen van het voedingsnet verplaatsen. Daarbij wordt de 50 Hz sinuscurve van de voedingsspanning door hogere frequenties onderdrukt, hetgeen leidt tot een vervorming van die curve.

Netterugwerking van storingen

Storingen in het voedingsnet veroorzaakt door installaties die elektriciteit verbruiken leiden tot vervorming van de curve van de voedingsspanning. De vervorming is het gevolg van in de spanning aanwezige componenten die een hogere frequentie hebben. De bron van dergelijke storingen zijn ingangsschakelingen met gelijkrichters en halfgeleidermodulen die tegenwoordig in tal van apparaten – ook in frequentie-omvormers – toegepast worden. Netterugwerking van storingen veroorzaakt in andere, op hetzelfde voedingsnet aangesloten apparaten een bijkomende belasting in de vorm van een hogere stroomopname of akoestisch gebrom.



Afb. 4.12 Reductie van de netterugwerking van storingen in de VLT 5000

De gelijkrichter van een frequentie-omvormer produceert een pulserende gelijkspanning. De condensator van de daarachter geschakelde gelijkspanningstussenkring wordt bij elke spanningspiek opgeladen. Tijdens dit laadproces ontstaan aan de ingangszijde stromen met relatief hoge amplitudes. Deze impuls-, maar niet sinusvormige, belasting vervormt de sinuscurve van de voedingsspanning. De mate waarin dit gebeurt hangt af van de belastingsstroom en de impedantie van het net. Hoe groot de vervorming maximaal mag zijn is voor openbare laagspanningsnetten vastgelegd in EN 61000-2-2 en voor industriële installaties in EN 61000-2-4. Netstoring wordt veroorzaakt door het harmonisch residu: componenten die een hogere frequentie hebben dan de basisfrequentie van de voedingsspanning. Het totale percentage hogere harmonischen wordt ook wel THD ('Total Harmonic Distortion') genoemd.

$$\text{THD [\%]} = \frac{\sqrt{(U_3)^2 + (U_5)^2 + \dots + (U_N)^2}}{U_1}$$

Hoe groot de afzonderlijke hogere harmonischen in de netspanning maximaal mogen zijn is in EN 61000-2-2 tabel 1 vastgelegd. De terugkoppeling van storingen naar het net kan gereduceerd worden door de amplitudes van de impulsstroom te begrenzen. In de praktijk worden daartoe in de tussenkring of de ingang van de frequentie-omvormer smoorspoelen geplaatst. Frequentie-omvormers worden dikwijls zonder die smoorspoelen geleverd, die in dat geval apart besteld en ingebouwd kunnen worden. Welke voorbelastingen van de netspanning een frequentie-omvormer moet kunnen verwerken is vastgelegd in EN 60146-1-1 (algemene eisen voor statische halfgeleideromzetters).

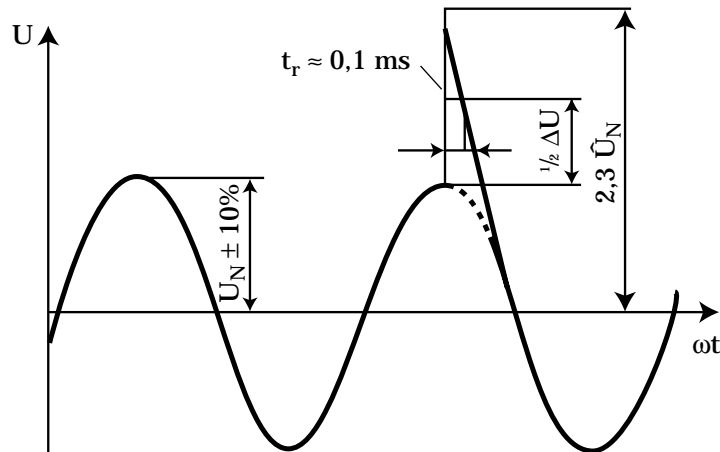
Transiënten/overspanning

In openbare zowel als industriële voedingsnetten kunnen zich transiënten voordoen. Dat zijn kortdurende overspanningspieken ter grootte van enkele duizenden volts.

Deze transiënten of overspanningspieken kunnen veroorzaakt worden door het in- en uitschakelen van grote belastingen in het voedingsnet of door het schakelen van installaties met blindstroomcompensatie. Blikseminslag in voedingskabels veroorzaakt een hoge overspanning die zelfs tot op 20 km afstand nog schade aan installaties kan toebrengen. In openluchtinstalla-

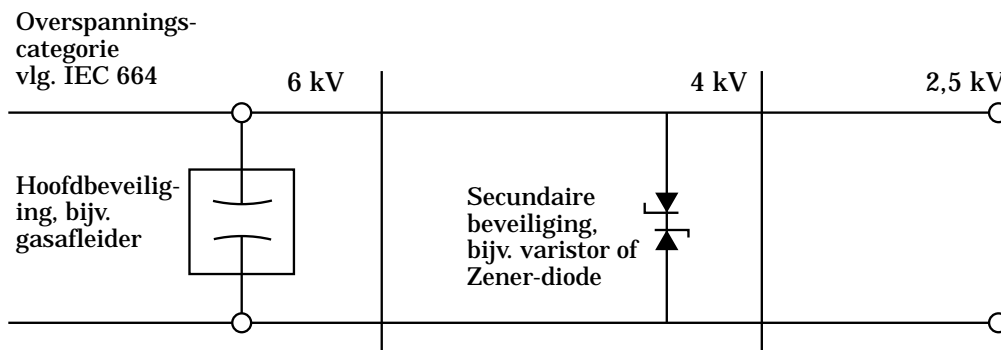
ties kan de spanning via de isolatoren zelfs andere kabels bereiken. Kortsluiting en de activering van beveiligingen in voedingsnetten veroorzaken eveneens transiënten. Door magnetisch inductieve koppeling kunnen ook in parallelkabels hoge spanningspieken ontstaan.

Welke vorm deze transiënten kunnen hebben en hoeveel energie ze bevatten wordt in VDE 0160 resp. EN 61000-4-1 beschreven.



Afb. 4.13 Nettransiënten vlg. EN 61000-4-1

De schadelijke invloed van transiënten en overspanningen kan op verschillende manieren begrensd worden. Voor energierijke transiënten en overspanningen kunnen gasafleiders of vonkbruggen gebruikt worden. In elektronische apparatuur worden vaak van de spanning afhankelijke weerstanden (varistors) toegepast om de overspanning af te zwakken. Met een Zener-diode is beveiliging via een signaal mogelijk.

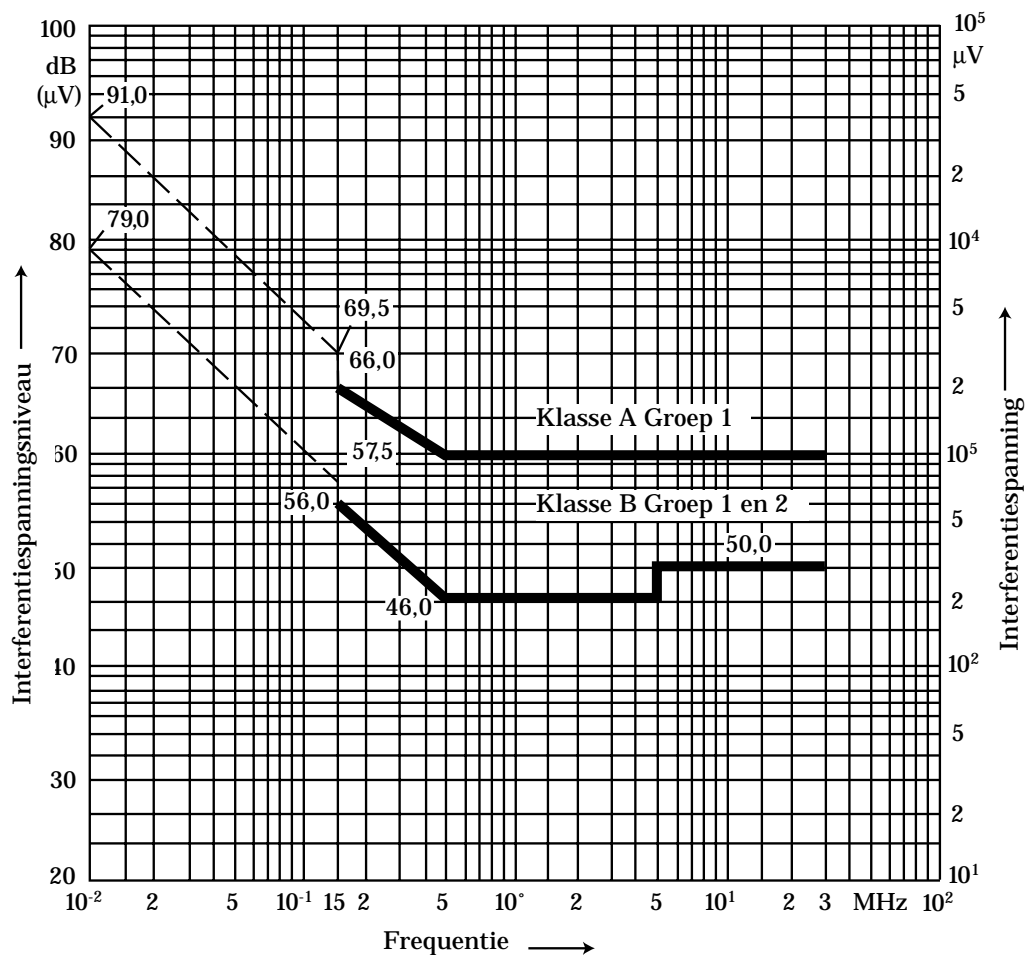


Afb. 4.14 Transientbeveiliging

Hoogfrequentstoringen

Iedere stroom en iedere spanning die geen zuivere sinusvorm heeft bevat componenten met hogere frequenties. De hoogte van die frequenties hangt af van het verloop van de karakteristiek.

Bij het sluiten of openen van een contact vindt een zeer snelle verandering in de stroom plaats. Het resultaat is een zeer steile stroomwijziging die zijn weerslag ook in de spanning heeft. In een radio is dit hoorbaar als klikstoring. Overigens wordt één enkele geruisimpuls gewoonlijk niet als storend ervaren. De als contacten fungerende halfgeleiders van frequentie-omvormers worden echter binnen het kHz-bereik met steile schakelflanken geschakeld waarbij permanent hoogfrequentstoringen ontstaan die uitgezonden worden.



Afb. 4.15 Interferentiegrenswaarden vlg. EN 55011

Hoogfrequentstoringen (RFI: 'Radio Frequency Interference') zijn elektrische harmonischen met frequenties tussen 10 kHz en

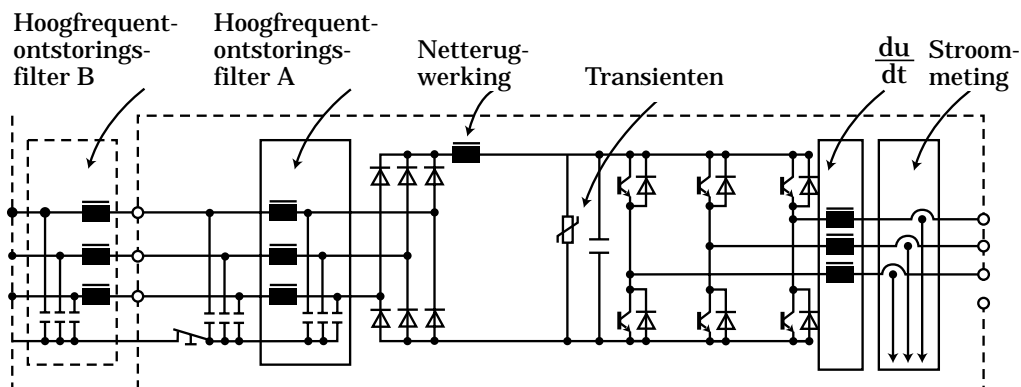
het GHz-bereik. De sterkte waarmee die storingen zich manifesteren hangt van verschillende factoren af:

- de impedantieverhoudingen in het voedingsnet
- de schakelfrequentie van de omvormer
- de mechanische constructie van de frequentie-omvormer
- de frequentie van de uitgangsspanning naar de motor
- de toegepaste ontstoringsinrichtingen.

Hoogfrequentstoringen verspreiden zich via leidingen of als straling. Overall in de wereld, en dus ook in Europa, zijn er wetten die bepalen hoeveel hoogfrequentstoring een apparaat mag veroorzaken. Voor Duitsland gold vroeger de Duitse VDE-norm. Tegenwoordig is in de EG de Europese EN-norm van toepassing. Wereldwijd geldt de IEC-norm.

De grenswaarden en methode van meten van hoogfrequentstoringen veroorzaakt door industriële, wetenschappelijke en medische radiofrequentapparatuur (ISM-apparaten) – waartoe ook de frequentie-omvormers behoren – zijn te vinden in EN 55011. De grenswaarden voor storingen veroorzaakt door elektrische huishoudelijke apparatuur zijn vastgelegd in EN 55014. Te zijner tijd zal op frequentie-omvormers norm EN 61800-3 van toepassing zijn.

De enige manier om zich via leidingen verplaatsende hoogfrequentstoringen effectief te bestrijden is met een filter. Deze hoogfrequent-ontstoringsfilters bestaan uit spoelen en condensatoren. Niet iedere frequentie-omvormer is bij aflevering reeds van een dergelijk filter voorzien. In dat geval dienen alsnog filters aangebracht te worden, die voor industrieel gebruik aan klasse A en voor huishoudelijk gebruik aan klasse B moeten voldoen.



Afb. 4.16 Frequentie-omvormers en hoogfrequent-ontstoring

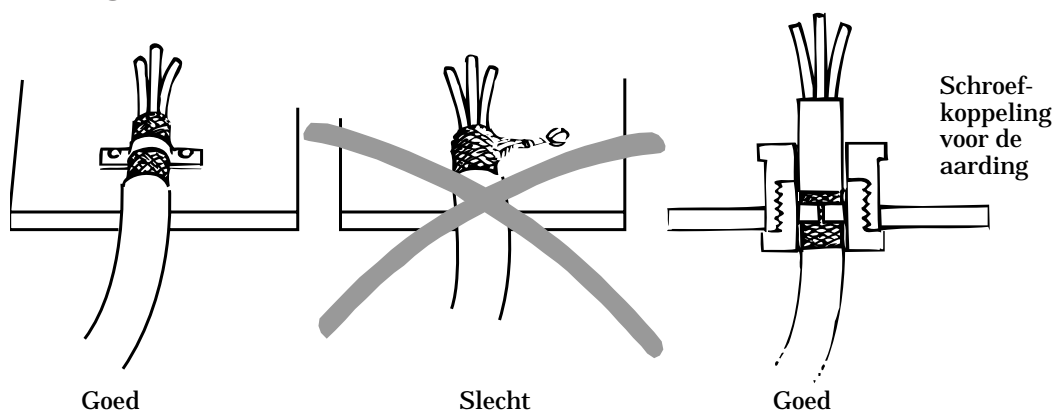
Hoogfrequentstoringen in de kabel van de frequentie-omvormer naar de aangesloten motor kunnen worden afgezwakt met filters of afgeschermdde kabels. Hoge schakelfrequenties van de omvormer betekenen dat:

- de condensatoren grote stromen moeten opnemen
- de spoelen van het filter groot gekozen moeten worden.

Afgeschermdde kabels

Om de verspreiding van hoogfrequentstoringen tegen te gaan wordt dikwijls gebruikt gemaakt van afgeschermdde kabels. De werking – afschermfactor – van zo'n kabel wordt uitgedrukt in decibels (dB). In plaats daarvan gebruikt men ook wel het begrip 'koppelingssimpedantie'. De afschermfactor (die gewoonlijk ca. 30 dB bedraagt) dient zo groot mogelijk te zijn, de koppelingssimpedantie daarentegen zo klein mogelijk. Een normale kabel kan niet als afscherming functioneren, omdat het oppervlak waarlangs de hoogfrequentstoorstraling moet afvloeien – bepaald door het skineffect – daarvoor te klein is.

Om de afscherming tegen hoogfrequentstoorstraling optimaal te doen functioneren dient deze waar mogelijk geaard te worden. In de praktijk gebeurt dat aan beide uiteinden van de kabel. Van belang daarbij is een goed contact tussen de afscherming en de aardpotentiala. Is deze verbinding slecht dan werkt de afscherming niet optimaal en wordt de stoorstraling minder sterk afgezwakt. Er dient rekening mee te worden gehouden dat meervoudige aarding een compensatiestroom via de aardpotentiala veroorzaakt. Signaalkabels dienen derhalve slechts aan één zijde geaard te worden. Omdat signaalkabels met zeer lage signaalwaarden werken zal een koppeling aan de afscherming storingen veroorzaken.



Afb. 4.17 De juiste EMC-aansluiting van de afscherming

Bij de aankoop en montage van een frequentie-omvormer dient men er op te letten hoe en in welke mate hoogfrequentstoorstraling begrensd moet worden. De technische documentatie dient te vermelden aan welke hoogfrequentontstoringsklasse de frequentie-omvormer voldoet. Het is niet altijd direct duidelijk of er filters zijn ingebouwd of dat ze apart gekocht en gemonteerd moeten worden.

Dikwijls zijn afgeschermdde motor- en besturingskabels nodig of aan te bevelen om een bepaalde mate van ontstoring te kunnen garanderen.

Blindstroomcompensatie

Blindstroomcompensatie wordt toegepast in een net als de faseverschuivingshoek tussen spanning en stroom ($\cos \varphi$) correctie behoeft. Dit is het geval als in een net veel inductieve verbruikers, zoals motoren of voorschakelapparatuur voor lampen, opgenomen zijn. Frequentie-omvormers veroorzaken geen faseverschuiving, omdat hun $\cos \varphi$ ongeveer 1 is. De condensatoren van een compensatiesysteem hebben bij hogere frequenties een lagere inwendige weerstand. Als de netspanning componenten met een hogere frequentie (hogere harmonischen) bevat stijgt de door het blindstroomcompensatiesysteem opgenomen stroom en worden de condensatoren warmer en zwaarder belast. Componenten in het net met een hogere frequentie kunnen vóór het compensatiesysteem geblokkeerd worden met smoorspoelen. Wij noemen dat afgevlakte compensatiesystemen. Deze maatregel voorkomt tevens dat tussen de inductiviteit van de verbruikers en de capaciteit van het compensatiesysteem een resonantie kan ontstaan. Er dient rekening mee gehouden te worden dat de hogere frequenties enigzins kunnen weglekken. Reden waarom voor het overbrengen van hoge schakel- en modulatiefrequenties sperfilters nodig zijn.

Of afgevlakte compensatiesystemen toegepast mogen worden hangt af van de voorschriften van het plaatselijke elektriciteitsbedrijf.

Het kiezen van een frequentie-omvormer voor aandrijvingen met regelbaar toerental

Het kiezen van een frequentie-omvormer voor aandrijvingen met regelbaar toerental vergt veel ervaring. Indien die ervaring ontbreekt is het aan te raden een vergelijkbare installatie (of toepassing) te bezoeken of de noodzakelijke gegevens door meten te verzamelen. Hieronder volgen enkele punten waar rekening mee gehouden dient te worden:

1. De motor

- Eisen die de installatie stelt
- Koppelerloop, aanloopkoppel, versnellingskoppel
- Toerentalregelbereik, koeling
- Vermogensopname van regelaar en motor
- Bedrijfskwadranten
- Slipcompensatie (dynamisch)
- Benodigde aanloop- resp. uitloopkarakteristieken
- Benodigde remtijden, duur van het remmen
- Rechtstreekse aandrijving, overbrengingen, omschakelcomponenten, massatraagheidskoppel
- Synchronisatie met andere aandrijvingen
- Bedrijfsduur, besturing
- Koppeling aan een computer, interfaces, visualisering
- Bouwvormen en beveiliging
- Mogelijkheid decentrale intelligentie in de frequentie-omvormer te integreren

2. De omgeving

- Opstellingshoogte; invloed van de omgevingstemperatuur
- Behoeftte aan koellucht, koelingsmogelijkheden
- Klimaateisen t.a.v. vocht, water, vervuiling, stof, gassen e.d.
- Bijzondere voorschriften zoals bijv. voor de mijnbouw, chemische industrie, scheepsbouw, levensmiddelenindustrie
- Lawaai

3. Het voedingsnet

- Netspanning, netspanningsvariaties
- Netcapaciteit
- Netfrequentievariaties
- Netterugwerking van storingen
- Kortsluit- en overspanningsbeveiliging
- Uitvallen van het net

4. Onderhoud, bediening en personeel

- Opleiding resp. scholing van het bedienend personeel
- Onderhoud
- Reserve-onderdelen en -apparatuur

5. Economische criteria

- Aanschaffingskosten (componenten)
- Benodigde ruimte, inbouw, constructie
- Installatiekosten
- Ingebruikneming van het systeem
- Opstellingskosten
- Bedrijfskosten
- Rendement van het systeem (frequentie-omvormer en motor)
- Behoeftte aan reactief vermogen; compensatie voor harmonische belastingen

6. Veiligheidsmaatregelen t.b.v. bedienend personeel/regelaar/motor

- Galvanische scheiding volgens PELV
- Fase-onderbreking
- Schakelen aan de uitgang van de regelaar
- Beveiliging tegen aard- en kortsluiting
- Motorspoelen ter beperking van de duur van spanningsstijgtijden
- Elektronische temperatuurbewaking en PTC-weerstand

7. Normen en voorschriften

- Duitsland: DIN, VDE; Europa: EN
- Internationaal: IEC, CE, enz.

Aan de hand van bovengenoemde punten dient zo mogelijk een frequentie-omvormer gekozen te worden die standaard aan het merendeel van de eisen voldoet. Zo dient o.a. nagegaan te worden:

- of de regelaar een net- of tussenkringsmoorspoel heeft waarmee terugkoppeling naar het net aanzienlijk gereduceerd wordt
- of een RFI-filter klasse A of B standaard ingebouwd is of apart moet worden aangeschaft
- of bij gebruik van een regelaar het vermogen van de motor verlaagd moet worden
- of de regelaar zelf beveiligd is tegen aard- en kortsluiting hoe de regelaar reageert in geval van storing

Bijlage I: Algemene mechanische theorie

Rechtlijnige beweging

Voor een rechtlijnige beweging geldt dat een lichaam in rust blijft of zijn rechtlijnige beweging voortzet tot op dat lichaam een kracht uitgeoefend wordt. De kracht F is gelijk aan het product van de massa van het lichaam en de verandering in snelheid ervan per tijdseenheid. De verandering in snelheid per tijdseenheid is tevens de versnelling a van het lichaam.

$$F = m \times a$$

Massa: »m« eenheid: [kg]

Versnelling: »a« eenheid: $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$ —

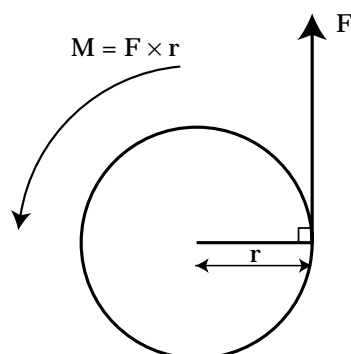
Kracht: »F« eenheid [N]

Om een lichaam zijn constante beweging te doen behouden dient voortdurend een kracht op dat lichaam uitgeoefend te worden, omdat het blootstaat aan krachten die in tegengestelde richting werken. Dat zijn bijv. wrijvingskrachten en de zwaartekracht.

Roterende beweging

Bij een roterende beweging geldt op vergelijkbare wijze dat een lichaam aan het draaien gebracht kan worden of dat de draaiingssnelheid ervan verandert door een rond het middelpunt van de massa werkend koppel.

Net als bij een kracht kan ook de werking van een koppel in een formule worden uitgedrukt. Het koppel is het product van het traagheidsmoment van het lichaam en de hoekversnelling α (= de verandering in snelheid van het lichaam per tijdseenheid).



Afb. AI.01

$$M = I \times \alpha$$

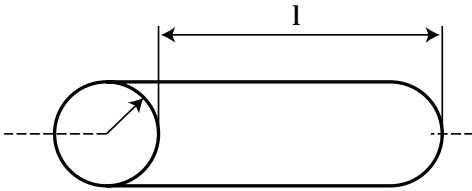
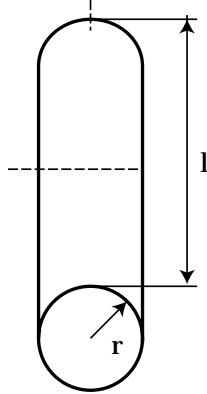
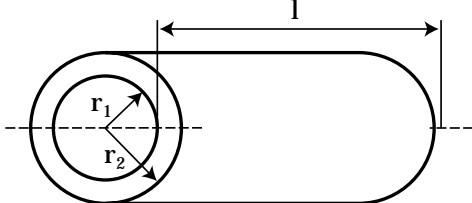
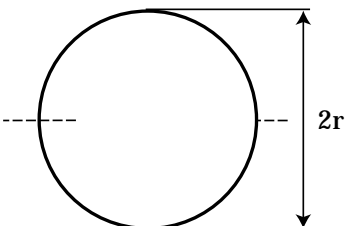
$$\omega = \frac{2 \pi n}{60}; n \text{ gemeten in } [\text{min}^{-1}]$$

Hoeksnelheid: ω – eenheid: $\left[\frac{\text{hoekverandering}}{\text{s}} \right]$

Hoekversnelling: $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$; – eenheid $\left[\frac{\text{hoekverandering}}{\text{s}^2} \right]$

Traagheidskoppel: I ; – eenheid: $[\text{kg m}^2]$

De versnelling wordt, net als door de massa, ook door het traagheidsmoment afgezwakt. De grootte van het traagheidsmoment wordt bepaald door de massa van het lichaam en de positie ervan ten opzichte van de draaiingsas.

$I = \frac{m \times r^2}{2}$	<p>Massieve cilinder</p> 
$I = \frac{m \times r^2}{4} + \frac{m \times l^2}{12}$	
$I = \frac{m}{2} \times (r_1^2 + r_2^2)$	<p>Holle cilinder</p> 
$I = \frac{2 \times m \times r^2}{5}$	<p>Massieve kogel</p> 

Afb. AI.02 De berekening van verschillende traagheidsmomenten

Als het koppel en de versnellingsverhoudingen van een installatie berekend moeten worden is het nuttig alle massa's en traagheden te verwerken tot één gezamenlijk traagheidskoppel op de motoras.

$$J = J_1 + J_2 \times \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + I_3 \times \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2 + \dots$$

J_1 : het eigen traagheidskoppel van de motor, enz.
 J_2, J_3 : de afzonderlijke traagheidsmomenten in het systeem
 ω_1 : de hoeksnelheid van de motor, enz.
 ω_2, ω_3 : de hoeksnelheid van de afzonderlijk roterende lichamen, enz.

Arbeid en vermogen

De arbeid die een motor bij een rechtlijnige beweging verricht is het product van de kracht F in de richting van de verplaatsing en de afstand s waarover het lichaam verplaatst wordt.

$$W = F \times s$$

Lengte van de verplaatsing: s – eenheid [m]
 Arbeid: W – eenheid [W \times s]

In roterende bewegingen is de arbeid het product van het koppel M en de hoekverdraaiing φ . Eén omwenteling = $2 \times \pi$ (rad.).

$$W = M \times \varphi$$

Hoekverdraaiing: φ – eenheid hoekverandering:
 1 omwenteling = $2 \times \pi$ [rad]

De arbeid die door een transportsysteem verricht wordt stijgt met de tijd. Deze arbeid heeft dus geen maximale waarde en kan niet in berekeningen gebruikt worden.

Het vermogen P is de arbeid per tijdseenheid en heeft wel een maximum.

Bij een rechtlijnige beweging is het vermogen het product van de kracht in de richting van de verplaatsing en de snelheid V (= de lengte van de verplaatsing per tijdseenheid).

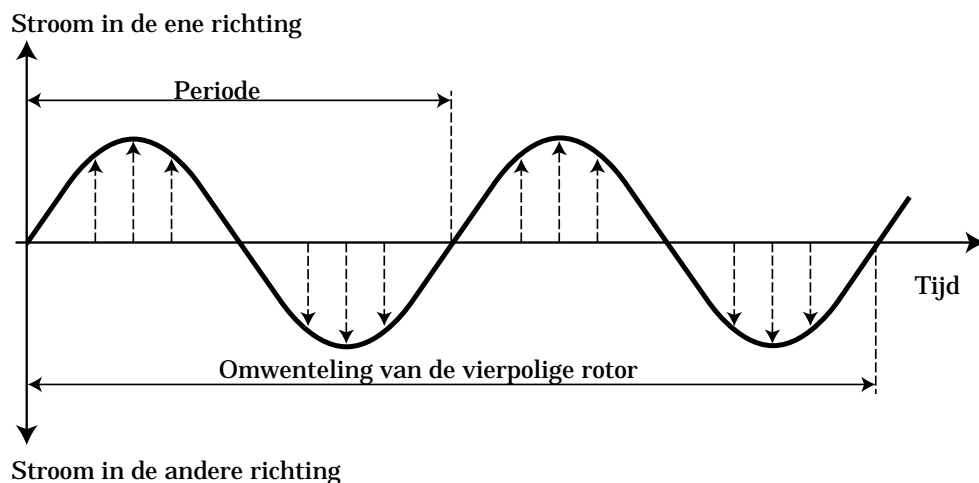
$$P = F \times V \quad \text{eenheid: [W]}$$

Op vergelijkbare wijze geldt voor roterende bewegingen dat het vermogen het product is van het koppel en de hoeksnelheid ω (= de lengte van de verplaatsing per tijdseenheid).

$$P = M \times \omega \quad \text{eenheid: [W]}$$

Bijlage II: Algemene wisselstroomtheorie

Wisselstroom wordt aangeduid met AC (Alternating Current) en ~ als symbool. Wisselstroom verandert voortdurend zowel van grootte (amplitude) als richting.

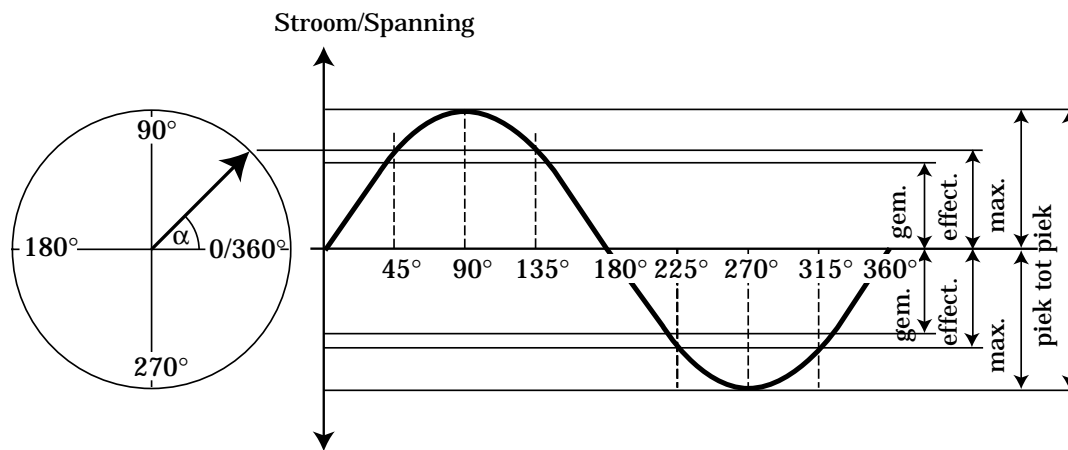


Afb. AII.01 De waarden van een wisselspanning veranderen voortdurend

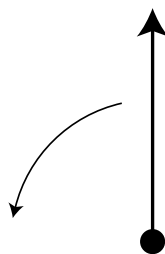
Het aantal perioden per seconde wordt de frequentie genoemd en in Hertz aangegeven: 1 Hz is één periode per seconde. De lengte van een periode – de trillingstijd – is $T = \frac{1}{f}$.

Bij een frequentie van 50 Hz is de trillingstijd 0,02 seconden.

In tegenstelling tot gelijkspanning en gelijkstroom – die door één enkele grootte worden bepaald – worden wisselspanning en wisselstroom door meerdere grootheden gedefinieerd.



Afb. AII.02 De verschillende waarden van een wisselspanning



Afb. AII.03 De vector draait linksom

In de regel wordt de effectieve waarde benut. Een wisselstroom van 1 A ontwikkelt in een weerstand dezelfde warmte als een gelijkstroom van 1 A.

Vectoren komen bij wisselstromen en -spanningen goed van pas. Zij laten het verband zien tussen stroom, spanning en tijd. Een vector wordt bepaald door zijn lengte en draairichting (linksom).

Draait een vector een hele slag rond zijn startpositie dan doorloopt de punt ervan een cirkel (360°).

De tijd die een omdraaiing in beslag neemt is gelijk aan de periode van de sinuscurve. De snelheid per seconde van de vector wordt hoeksnelheid genoemd en met de Griekse letter ω aangegeven: $\omega = 2 \times \pi \times f$.

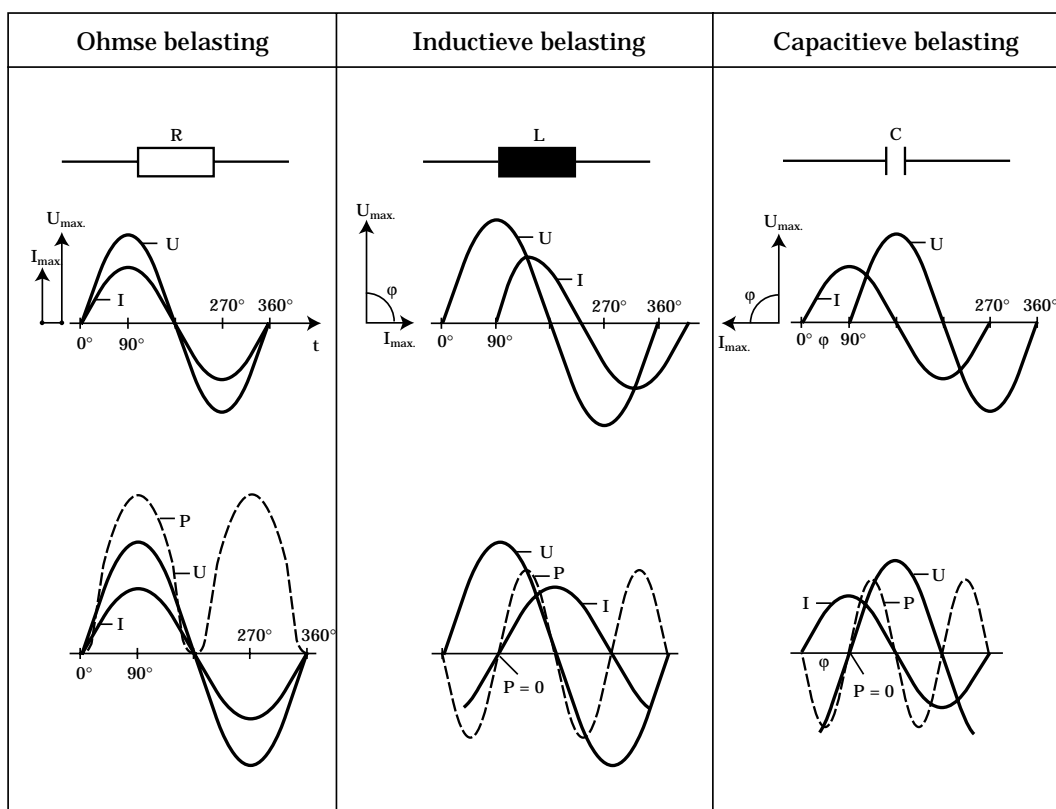
Er zijn drie soorten wisselstroombelastingen.

Als de belasting bestaat uit spoelen met een ijzerkern, zoals in motoren, dan is de belasting voornamelijk inductief. De stroom loopt in dat geval in achter op de spanning.

De belasting kan ook capacitief zijn en dan loopt de stroom voor op de spanning. Bij een zuivere ohmse belasting zijn stroom en spanning niet ten opzichte van elkaar verschoven.

De verschuiving tussen spanning en stroom wordt de faseverschuivingshoek genoemd en aangeduid met de Griekse letter φ .

Door vermenigvuldiging van de bij elkaar behorende waarden van stroom en spanning verkrijgt men de vermogenskarakteristieken van de drie soorten belasting.



Afb. AII.04 Stroom, spanning en vermogen bij belasting

In de beschrijving van wisselstroomkringen zijn 'zuivere' belastingen niet meer dan theoretische grootheden. Een belasting is òf niet-reactief/inductief òf niet-reactief/capacitief.

Vermogensfactor

De vermogensfactor λ geeft de verhouding aan tussen het werkzaam vermogen en het schijnbaar vermogen.

Hoewel de vermogensfactor ook dikwijls $\cos \varphi$ wordt genoemd heeft $\cos \varphi$ in feite uitsluitend betrekking op sinusvormige stromen en spanningen.

Bij niet-lineaire belastingen, zoals in frequentie-omvormers, is de belastingsstroom niet sinusvormig. Er dient daarom onderscheid gemaakt te worden tussen $\cos \varphi$ en de vermogensfactor.

$$\lambda = \frac{P}{I \times U} = \frac{I_W}{I}$$

P is het werkzaam vermogen, I_W de werkstroom, I en U effectieve waarden.

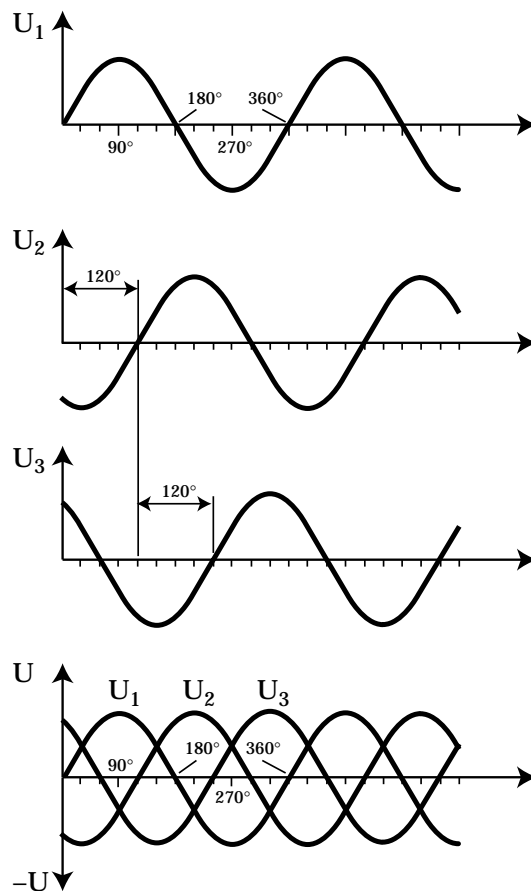
φ geeft het faseverschil tussen stroom en spanning aan. Bij een zuiver sinusvormige stroom en spanning vertegenwoordigt $\cos \varphi$ dus de verhouding tussen het werkzaam vermogen en het schijnbaar vermogen.

	Symbool	In het algemeen	Eenheid
Vermogen	P =	$U \times I \times \cos \varphi = S \cos \varphi$	W of kW
	Q =	$U \times I \times \sin \varphi = S \sin \varphi$	VAr of kVAr
	S =	$U \times I = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{Q}{\sin \varphi}$	VA of kVA
Spanning	U =	$\frac{P}{I \times \cos \varphi} = \frac{Q}{I \times \sin \varphi} = \frac{S}{I}$	V
Stroom	I_S =	$\frac{P}{U \times \cos \varphi} = \frac{Q}{U \times \sin \varphi} = \frac{S}{U}$	A
	I_W =	$\frac{P}{U} = \frac{S \times \cos \varphi}{U}$	A
	I_B =	$\frac{Q}{I} = \frac{S \times \sin \varphi}{I}$	A
Faseverschuiving	$\cos \varphi$ =	$\frac{P}{U \times I} = \frac{P}{S}$	geen eenh.
	$\sin \varphi$ =	$\frac{Q}{U \times I} = \frac{Q}{S}$	geen eenh.

Afb. AII.05

Driefasenwisselstroom

In een driefasenspanningsysteem zijn de spanningen in verhouding tot elkaar 120° verschoven. In de regel worden de drie fasen in één coördinatenstelsel afgebeeld.



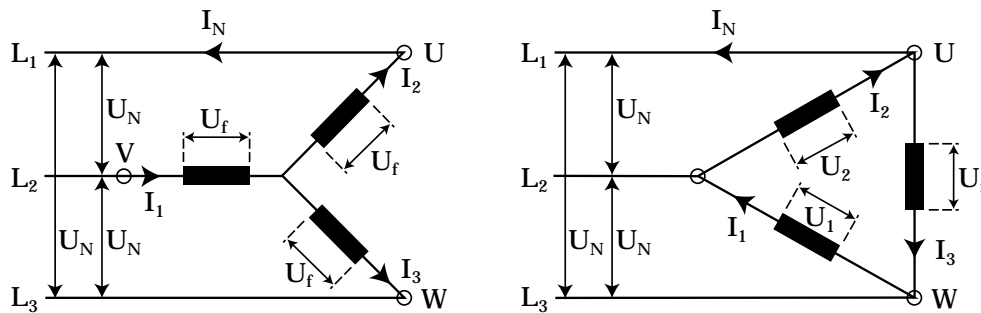
Afb.AII.06 Een driefasenwisselspanning bestaat uit drie afzonderlijke, in tijd ten opzichte van elkaar verschoven wisselspanningen

De spanning tussen een fasegeleider en de nulleider wordt de fasespanning (U_f) genoemd en de spanning tussen twee fasen de netspanning (U_N).

De verhouding tussen U_N en U_f is $\sqrt{3}$.

Ster- of driehoekschakeling

Als een driefasenvoedingsnet met een motor belast wordt zijn de motorwikkelingen in ster of driehoek geschakeld.



Afb. AII.07 Net- en fasenwaarden bij ster- en driehoekschakeling

In een sterschakeling wordt een fase aan het einde van de motorwikkelingen geschakeld en zijn de andere uiteinden kortgesloten (sterpunt). De spanning over de afzonderlijke wikkelingen is:

$$U_f = U_f = U_f = U_f = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

Voor de stromen geldt $I_1 = I_2 = I_3 = I_N$

In een driehoekschakeling zijn de motorwikkelingen in serie geschakeld en is elk verbindingspunt aan een fase aangesloten.

De spanning over de afzonderlijke wikkelingen is:

$$U_N = U_1 = U_2 = U_3$$

Voor de stromen geldt $I_1 = I_2 = I_3 = \frac{I_N}{\sqrt{3}}$

Bijlage III: Vaak gebruikte afkortingen

ASIC	IC voor specifieke toepassingen	P	Vermogen/effectief vermogen
CSI	Stroombron/zet- d afstand	P_1	Opgenomen (elektrische) vermogen
DDC	Directe computersturing	P_2	Afgegeven (mechanische) vermogen
f	Frequentie	P_V	Vermogensverlies
F	Kracht	pk	Paardenkracht
g	Versnelling ten gevolge van de zwaartekracht	r	Radius
GD2	Aandrijfkoppel	R_{FE}	Inverse weerstand
I_1	Statorstroom	s	Slip
I_B	Blindstroom/fluxgenererende werkstroom	S	Schijnbaar vermogen
I_R	Rotorstroom [i.p.v. IL!]	SFAVM	Stator fluxgerichte asynchrone vectormodulatie
I_M, I_S	Motorstroom (schijnstroom)	S_M	Schijnbaar vermogen (motor)
I_N	Nominale stroom	PLC	Programmeerbare sturing met geheugen
I_W	Koppelgenererende stroom/Werkstroom	t_{acc}	Versnellingstijd
I_j	Magnetiseringsstroom	t_{dec}	Vertragingstijd
IC	Geïntegreerde schakeling	t_{off}	Tijdtransistor inactief
J	Traagheidsmoment	t_{on}	Tijdtransistor actief
L	Inductiviteit	U	Spanning
M	Koppel	\underline{U}_q	Inductiespanning
M_a	Startkoppel	\underline{U}_S	Spanningsval (stator)
M_{acc}	Versnellingskoppel	VVC	Spanningsvectorregeling
M_{dec}	Remkoppel	W	Arbeid
M_k	Kipkoppel	X_h	Inverse reactantie
M_N	Nominaal koppel	X_R	Reactantie (rotor) [i.p.v. XL!]
n	Toerental	Φ	Hoofdflux, statorflux
n_n	Nominale toerental	Φ_R	Rotorflux [i.p.v. FL!]
n_o	Synchrone toerental	η	Motorrendement
n_s	Sliptoerental	ω	Hoeksnelheid
p	Aantal poolparen		

Literatuurverwijzingen

Aanvullende literatuur:

P. Thøgersen, M. Tønnes,
U. Jæger, S.E. Nielsen:
»New High Performance Vector
Controlled AC-Drive with
Automatic Energy Optimizer«
6th European Conference on
Power Electronics and Applica-
tions; Sept. 1995

S. Anderson og K. Jørgensen:
»Vekselstrømsmaskiner, -anlæg«
Polyteknisk forlag, 1985

P.F. Brosch:
»Frequenzumformer«,
Verlag moderne industrie, 1989

P.F. Brosch:
»Moderne Stromrichterantriebe«
Vogel Buchverlag 1992

ELFO:
»El-faglære«
Elinstallatørernes Lands-
forening, 1993

R. Fisher:
»Elektrische Maschinen«
Carl Hanser Verlag, 1986

W. Gilson:
»Drehzahlgeregelte Drehstrom-
antriebe«

VDE-Verlag, 1983
E.v. Holstein-Rathlou:
»Stærkstrømselktroteknik«
J. Jørgensen & Co. Bogtrykkeri,
1939

K. Jark og A.H. Axelsen:
»Elektroteknik«
H. Hagerup, 1966

Thomas Kibsgård:
»EL Ståbi«
Teknisk Forlag A/S, 1988

U. Krabbe:
»Strømrettere«
Danmarks Tekniske Højskole,
1982

W. Norbøll:
»Elektricitetslære«
P. Haase & Søns Forlag, 1952

Sprecher + Schuh AG:
»Schütz-Steuerungen«
Sprecher + Schuh AG, 1982

J. Nedtwig, M. Lutz:
»WEKA Praxis Handbuch«
Weka Fachverlag für technische
Führungskräfte, 1996

H.R. Schmeer:
»EMV 96«
VDE-Verlag, 1996

Trefwoordenregister

A

Aanloophbereik 21
Aanlooppkoppel 41, 45, 50, 106,
108, 122, 152
Aansturing 53, 60, 63, 64, 65,
66, 68, 71, 81, 84, 91, 95
Aarding 139, 140, 141, 147, 153
Aardlekschakelaar 141, 142
Adresbus 94, 95, 96
Afscherming 153
Analoge stuursignalen 95
Arbeid 21, 161
ASIC 74, 84, 90, 91, 95
Asynchroonmotoren 15, 25, 30,
35, 47, 49, 113, 114, 124, 130
AVM 75, 80, 86

B

Bediening 156
Belastingkarakteristieken 44,
51, 122, 126
Belastingskoppel 117, 134
Beschermingscode 37
Besturingsunit 97
Beveiliging (extra) 90, 91, 92,
133, 139, 140, 141, 142, 150,
155, 156
Beveiligingsrelais 139, 141
Blindstroom 34, 39, 58, 90, 107,
125, 126
Bouwvormen (motor) 40, 155
Bus 94, 100, 101, 104, 105

C

Capacitieve koppeling 146
Cascadeschakeling 29
Chopper 60, 61, 69, 81
Computer 74, 81, 94, 95, 143,
155
Cos φ , 39, 40, 42, 124, 126, 154,
165

D

Danfoss VVC-besturings-
systeem 84
Danfoss VVC^{plus}-besturings-
systeem 86
Digitale stuursignalen 95
Diode 54, 55, 56, 57
Draaiveld 17, 18, 19, 20, 22, 23,
27, 28, 32, 33, 47, 50, 51, 63,
74, 87
Driehoekschakeling 167
Driehoekspanning 65, 71, 72,
74

E

EEPROM 95, 113
EMC/EMV 143, 144
EPROM 94
Extra koppel 122, 128

F

Fasevolgorde 129
Frequentie-omvormer
(keuze van) 123
Frequentie-omvormer
(principediagram) 52
Frequentieverandering 32

G

Galvanische koppeling 146
Galvanische scheiding 139, 156
Gegevensbus 95
Geheugen 81, 82, 94, 95
Gelijkrichter 52, 53, 54, 55, 57,
59, 61, 69, 129, 149
Gelijkstroommotor 13, 113, 114,
115
Gelijkstroomremmen 129
Generator 13, 22, 128

H

Harmonischen 73, 74, 149, 151, 154
Hoeksnelheid 18, 79, 87, 161, 163

I

IGBT-transistor 62, 63, 66, 67, 68, 74, 84, 91, 92
IJzerverliezen 24
Impulsamplitudemodulatie (PAM) 64, 69
In- en uitgangen, 94, 95, 97, 99
Inductieve koppeling 146, 150
International Cooling 40
International Mounting 41
International Protection 37

K

Karakteristieken 44, 45, 127, 131
Kipkoppel 23, 32, 43, 51, 119
Koeling 133, 134, 155
Koelingssystemen 40
Koppel 10, 17, 20, 21, 22, 23, 25, 32, 34, 36, 41, 42, 43, 44, 45, 50, 51, 56, 62, 75, 86, 90, 93, 106, 107, 110, 111, 114, 115, 117, 118, 119, 122, 128, 132, 159, 161
Kortsluiting 18, 126, 150, 156, 157
Kortsluitrotor 18, 25

M

Magneetveld 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 24, 39, 47, 111, 129, 143, 148
Magnetisering 25, 32, 33, 34, 65, 83, 107, 108
Mechanische belasting 27
Microprocessor 52, 65, 74, 91, 94, 97, 113, 133
Motor (principe van de) 13
Motorencatalogus 35, 42

Motorgegevens 35, 41, 87, 118, 121, 123
Motorkabel 91, 139, 147, 148
Motorplaatje 23, 35, 41, 42, 118
Motorverhitting ?
Motorvermogensreeks 35

N

Netterugwerking 61, 146, 148, 156
Nominaal koppel 168
Noodschakelaar 139
Nulleideraarding 140, 141

O

Omkeren 98, 102, 130
Omvormer 52, 58, 59, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 69, 70, 71, 73, 75, 76, 80, 82, 86, 91, 92, 93, 127, 129, 153
Ondermagnetisering 25, 107
Ontstoring 154
Overmagnetisering 34

P

Paardenkracht 168
Poolparen 16, 18, 29, 30, 47, 51
Poort 56, 62, 66, 91
Pulsbreedtemodulatie (PWM) 65, 70, 71, 74, 74

R

RAM 94, 97
Reluctantiemotoren 49, 50, 51
Remmen 22, 129, 155
Rendement 23, 25, 42, 48, 124, 136, 137, 137, 156
Rotor 14, 15, 16, 18, 19, 20, 25, 27, 28, 30, 31, 32, 47, 49, 50, 51, 86, 87, 88, 119, 169
Rotorsturing 31
Rotorweerstand 27, 31, 88
RS 86, 87, 101, 102

S

Schakeldiagram (vereen-
voudigd) 86
Schakelfrequentie 62, 63, 65, 66,
68, 72, 75, 92, 126, 139, 152
Seriële communicatie 99, 100
SFAVM 75, 76, 78, 79, 80, 86
Sinusgestuurde PWM 65, 85
Sinusreferentie 73
Sleepingrotor 18, 29
Slip 20, 27, 29, 30, 31, 42, 109,
168
Slipregeling 30
Slipcompensatie 82, 108, 109,
117, 155
Snelheidsreferentie 128
Snelheidsverandering 30
Spanning/frequentie-
verhouding 112
Startcompensatie 107
Startkoppel 23, 108, 168
Startmagnetisering 33, 34
Startstroom 36
Statorspanning (wijzigen van)
30, 75
Statussignalen 102
Sterschakeling 167
Storingen (verplaatsing van)
58, 65, 91, 93, 98, 139, 143,
144, 146, 148, 149, 152, 153,
156
Stroomgrens 83, 92, 110, 119,
120, 127, 131, 132
Stuursignaal 56, 91, 98
Synchroon toerental 50
Synchroonmotoren 14, 47, 48,
49, 51

T

Thyristor 56, 57
Toerental 7, 8, 10, 11, 12, 13, 16,
20, 21, 22, 25, 28, 29, 30, 31,
32, 33, 40, 42, 44, 45, 47, 50,
51, 75, 83, 87, 108, 109, 110,
111, 116, 116, 119, 121, 126,
127, 131, 132, 134, 155, 168

Traagheidskoppel 43, 128, 159,
160, 168

Transformator 141

Transienten/overspanning 149

Transistoren 64, 65

Tussenkring 8, 9, 52, 53, 58, 59,
60, 61, 62, 64, 76, 82, 125,
128, 131, 149

U

Uitgangsspanning 55, 62, 66,
69, 71, 72, 73, 78, 79, 82, 85,
93, 107, 108, 110, 147, 152

V

Variabele gelijkstroom
tussenkring 59, 62

Varistor 150

VDE 144, 150, 152, 156

Ventilatie van buitenaf 134

Verliezen 23, 24, 25, 32, 57, 66,
73, 119, 125, 137

Vermogen 10, 21, 22, 23, 24, 25,
35, 36, 39, 40, 42, 44, 49, 51,
83, 90, 111, 119, 121, 122, 123,
124, 126, 129, 136, 156, 157,
161, 165, 168

Versnelling 43, 159, 160, 168

Versterkte aarding 140

Vertraging 56

Voedingsnet 22, 23, 25, 35, 39,
58, 59, 62, 73, 111, 128, 130,
139, 146, 148, 149, 152, 156

W

Warmtesensor 139

Warmteverlies 24, 27

Werkstroom 19, 26, 39, 40, 87,
88, 109, 114, 125, 165, 168

Wikkelingsverliezen 24

Wisselveld 16

Wrijvingsverliezen 25