

Handboek | VLT® frequentieomvormers

Wetenswaardigheden over frequentieomvormers



Voorwoord

In 1968 was Danfoss het eerste bedrijf ter wereld dat begon met het in serie produceren van frequentieomvormers voor toerenregeling van driefase-inductiemotoren. Tegenwoordig vormen frequentieomvormers een steeds belangrijker component voor optimalisatie van motorprestaties en het systeem waar de motor deel van uit maakt. Inmiddels worden frequentieomvormers gebruikt in een groeiend aantal toepassingen, waarbij de volgende doelstellingen vooropstaan:

- Optimalisatie van het energierendement: het omzetten van een vast toerental naar een variabel toerental in toepassingen met wisselende belasting is een belangrijke stap om energie te besparen. In feite vereist de moderne motortechnologie tegenwoordig altijd een geavanceerde regeling om optimaal te kunnen werken bij alle toerentallen.
- Fabrieksautomatisering: een voortdurend toenemende vraag naar kortere productietijden en de hogere automatiseringsgraad die hieruit voortvloeit, betekent ook een sterkere behoefte aan oplossingen op het gebied van toerenregeling.
- Procesregeling en -optimalisatie: een verbeterde procesregeling vereist vaak een toerenregeling van de motor en leidt tot een nauwkeuriger regeling, een hogere doorvoersnelheid of groter comfort, afhankelijk van de toepassing.

De basisprincipes van de FC-technologie blijven ongewijzigd, maar er zijn ook veel elementen die snel veranderen. In moderne producten is steeds vaker software geïntegreerd. Dit biedt nieuwe functies en stelt de FC in staat om een grotere rol binnen het systeem te vervullen. Er komen nieuwe motortypen op de markt, wat extra eisen aan de motorregeling stelt. Dit betekent op zijn beurt dat de FC in staat moet zijn om een grotere verscheidenheid aan motortypen te regelen, zonder de zaken ingewikkelder te maken voor de eindgebruiker. Daarnaast leidt nieuwe regelgeving ten aanzien van energierendement tot bredere toepassing van toerenregeling, waardoor op termijn alle motoren met toerenregeling zullen werken en door een FC worden geregeld.

Met deze nieuwste versie van "Wetenswaardigheden over frequentieomvormers" willen we hier bij Danfoss de traditie van eerdere versies van dit boek graag voortzetten. We zijn trots op wat we doen en zijn enthousiast over FC's. Met dit boek hopen we iets van dit enthousiasme op u over te dragen!

Voor meer informatie kunt u altijd contact opnemen met Danfoss.

Jakob Fredsted
Vice President, Research & Development
Danfoss Power Electronics A/S

Inhoud

	Pagina
0 Inleiding	7
0.1 Toerenregeling van elektromotoren	7
0.2 Het voordeel van toerenregeling	8
0.3 Hoe wordt het motortoerental aangepast?	8
0.4 Frequentieomvormers	9
1 Elektromotoren	10
1.1 Overzicht	10
1.2 Basisprincipes	11
1.2.1 Stator en rotor	11
1.2.2 Vermogen en koppel	12
1.2.3 Wisselstroom- en gelijkstroommotoren	13
1.2.4 Elektromagnetische inductie	13
1.2.5 Polen, synchroon toerental en asynchroon toerental	14
1.2.6 Rendement en verliezen	15
1.3 Asynchroonmotoren	17
1.3.1 Draaiveld	17
1.3.2 Kooiankermotor	19
1.3.3 Slip, koppel en toerental	21
1.3.4 Typische bedrijfscondities	23
1.3.5 Toerental wijzigen	24
1.3.6 Motortypeplaatje en ster- of driehoekconfiguratie	27
1.4 Synchroonmotoren	29
1.4.1 Permanentmagneetmotoren (PM-motoren)	29
1.4.1.1 Tegen-EMK	31
1.4.1.2 Koppel en toerentalbereik	32
1.4.2 Borstelloze DC-motoren (BLDC) of elektronischecommutatietmotoren (EC-motoren)	33
1.4.3 Netstart-PM-motor (LSPM-motor)	34
1.4.4 Reluctantiemotoren	35
1.4.5 Synchrone reluctantiemotor met kooianker	36
1.4.6 Synchrone reluctantiemotor (SynRM)	37
1.4.7 Geschakelde reluctantiemotor (SRM)	39
2 Frequentieomvormers	41
2.1 Directe omvormers	41
2.2 Omvormers met tussenkring	42
2.3 Gelijkrichter	44

	Pagina
2.3.1 Ongestuurde gelijkrichters	45
2.3.2 Halfgestuurde gelijkrichters	46
2.3.3 Volledig gestuurde gelijkrichters.....	47
2.3.4 Active Front End/Active Infeed.....	48
2.4 Tussenkring	48
2.4.1 Variabele tussenkring	49
2.4.2 Constante tussenkring	51
2.5 Omvormer	52
2.6 Modulatieprincipes	55
2.6.1 Pulsamplitudemodulatie (PAM)	55
2.6.2 Pulsbreedtemodulatie (PWM).....	56
2.6.3 Asynchrone PWM	59
2.6.3.1 SFAVM.....	59
2.6.3.2 60° AVM.....	62
2.7 Stuurcircuit en -methoden	63
2.7.1 Eenvoudige besturingsmethode.....	65
2.7.2 Scalaire sturing met compensatie.....	66
2.7.3 Ruimtevector met of zonder terugkoppeling.....	67
2.7.3.1 Ruimtevector (zonder terugkoppeling).....	67
2.7.3.2 Ruimtevector (met terugkoppeling).....	68
2.7.4 Flux-vectorregeling met of zonder terugkoppeling.....	69
2.7.4.1 Flux-vector (zonder terugkoppeling).....	69
2.7.4.2 Flux-vector (met terugkoppeling).....	70
2.7.5 Servo-omvormerregeling.....	71
2.7.6 Conclusies over regeling.....	71
2.8 Danfoss-besturingsprincipes.....	71
2.8.1 Danfoss VVCplus-besturingsprincipe.....	72
2.8.2 Danfoss flux-vectorbesturingsprincipe	76
2.9 Normen en wetgeving	77
3 Frequentieomvormers en motoren	78
3.1 Basisprincipes.....	78
3.1.1 U/f-bedrijf en veldverzwakking.....	78
3.1.2 87 Hz-kenmerken	80
3.1.3 Draaien binnen de stroombegrenzing	82
3.2 Compensaties.....	82
3.2.1 Belastingonafhankelijke startcompensaties.....	83
3.2.2 Belastingafhankelijke startcompensaties.....	83
3.2.3 Belastingcompensaties	84
3.2.4 Slipcompensaties	84

	Pagina
3.2.5 PM-motor- en SynRM-compensaties	85
3.3 Automatische aanpassing motorgegevens (AMA)	86
3.4 Werking	87
3.4.1 Regeling motortoerental	87
3.4.2 Omkeren	88
3.4.3 Vertraging- en versnellingsramps (aanloop en uitloop)	89
3.4.4 Motorkoppelregeling	91
3.4.5 Watchdog	92
3.5 Werking dynamische rem	93
3.5.1 Verlenging van de vertragingramp	94
3.5.2 Motor als remweerstand	94
3.5.3 Remchoppercircuit (remmodule) en weerstand	95
3.5.4 Gebruik van een regeneratieve remeenheid	95
3.6 Werking statische rem	96
3.6.1 Vrijlopen tot stilstand	97
3.6.2 DC-remmen	97
3.6.3 DC-houd	97
3.6.4 Elektromechanische rem	97
3.7 Motoropwarming en thermische bewaking	98
3.8 Functionele veiligheid	100
4 Energiebesparing met frequentieomvormers	104
4.1 Potentieel	104
4.2 Rendement motor + frequentieomvormer	105
4.3 Classificatie van energie-efficiënte componenten	106
4.4 Energie-efficiënte motorstart	109
4.5 Energie-efficiënte motorregeling	111
4.6 Belasting over tijd	113
4.6.1 Toepassingen met variabel koppel	113
4.6.2 Toepassingen met constant koppel	115
4.7 Levenscycluskosten	116
4.8 Systeembesparingen	117
4.9 Gebruik van geregenereerd vermogen	119
5 Elektromagnetische compatibiliteit	122
5.1 EMI en EMC	122
5.2 EMC en frequentieomvormers	123
5.3 Aarding en afscherming	125
5.4 Installaties met frequentieomvormers	130
5.5 Wetgeving en normen	131

	Pagina
6 Beveiliging tegen elektrische schokken en energiegevaaren	133
6.1 Algemeen	133
6.2 Netvoedingssystemen	134
6.3 Extra beveiliging.....	137
6.4 Zekeringen en circuitbreakers.....	139
7 Netstoringen	142
7.1 Wat zijn harmonischen?	142
7.1.1 Lineaire belastingen.....	142
7.1.2 Niet-lineaire belastingen	143
7.1.3 Het effect van harmonischen in een stroomverdeelsysteem.....	145
7.2 Normen en voorschriften voor het beperken van harmonischen	147
7.3 Methoden voor harmonischenreductie in frequentieomvormers	147
7.3.1 Passieve beperking van harmonischen.....	149
7.3.2 Actieve beperking van harmonischen.....	150
7.4 Tools voor analyse van harmonischen	152
7.4.1 VLT® Motion Control Tool MCT 31.....	153
7.4.2 Harmonic Calculation Software (HCS)	153
8 Interfaces	154
8.1 Mens-machine-interface (MMI)	154
8.2 Werkingsprincipes van seriële interfaces.....	156
8.3 Standaard seriële interfaces in frequentieomvormers.....	158
8.4 Veldbusinterfaces in frequentieomvormers	159
8.5 Standaardisatie van veldbussen.....	161
9 Dimensionering en selectie van frequentieomvormers	164
9.1 De juiste vermogensklasse van de omvormer	164
9.2 Classificatie van de frequentieomvormer op basis van de motorspecificaties	165
9.3 Overbelastingscapaciteit	166
9.3.1 Afwegingen ten aanzien van energierendement.....	168
9.4 Regelbereik	169
9.5 Reductie van het FC-vermogen.....	170
9.6 Regeneratieve energie.....	171
9.7 Motorkabels	172
9.8 Omgeving	173
9.9 Centrale versus decentrale installatie.....	175
9.10 Voorbeelden	177

0 Inleiding

De definitie van een frequentieomvormer (FC – frequency converter) (of frequentieomvormer) luidt: een elektronisch apparaat dat de frequentie van wisselstroom (AC) omzet naar een andere frequentie. Van oudsher waren deze apparaten elektromechanische machines (combinatie van motor en generator). Deze worden soms aangeduid als "dynamische" FC's. Met de komst van halfgeleiderlektronica werd het mogelijk om volledig elektronische FC's te bouwen, die vaak worden aangeduid als "statische" FC's (geen bewegende delen).

Hoewel het principe van het omzetten van een vaste netspanning en -frequentie naar variabele waarden praktisch ongewijzigd is gebleven, zijn er veel verbeteringen doorgevoerd sinds de eerste FC's, die gebruikmaakten van thyristoren en analoge technologie, tot aan de huidige microprocessorgestuurde, digitale apparaten.

Vanwege de voortdurend toenemende automatisering in de industrie is er een constante vraag naar meer geautomatiseerde regelingen en gestaag toenemende productiesnelheden, waardoor er voortdurend betere methoden voor verdere verbetering van het rendement van productie-installaties worden ontwikkeld.

Tegenwoordig vormt de door een FC geregelde driefasemotor een standaardelement in alle geautomatiseerde procesinstallaties, en in commerciële en openbare gebouwen. Hoogefficiënte inductiemotoren, maar met name motorontwerpen zoals permanentmagneetmotoren, EC-motoren en synchrone reluctantiemotoren, vereisen een regeling met FC's. Veel motoren kunnen niet eens werken wanneer ze rechtstreeks op een standaard 3-fasevoeding zijn aangesloten.

0.1 Toerenregeling van elektromotoren

Er worden verschillende termen gebruikt voor systemen die het toerental van elektromotoren kunnen regelen of wijzigen. De meest gangbare zijn:

- Frequentieomvormer (FC – frequency converter)
- Omvormer met variabel toerental (VSD – variable speed drive)
- Toerenregelaar (ASD – adjustable speed drive)
- Frequentieomvormer (AFD – adjustable frequency drive)
- Aandrijving met instelbare frequentie (VFD – variable frequency drive)

Terwijl de termen VSD en ASD verwijzen naar een toerenregeling in algemene zin, verwijzen AFD en VFD rechtstreeks naar het aanpassen van de voedingsfrequentie van een motor. In deze context wordt ook de afkorting "drive" gebruikt. In dit boek wordt de term frequentieomvormer (of FC) veel gebruikt. Deze term verwijst naar het vermogenslektronica-deel van de apparatuur en de ondersteunende componenten zoals stroomsensoren, I/O's en mens-machine-interface (MMI).

0.2 Het voordeel van toerenregeling

Er zijn talrijke redenen om het toerental van een toepassing aan te passen:

- Energie besparen en het rendement van systemen verbeteren
- Het toerental van de elektromotor aanpassen aan de procesvereisten
- Het koppel of vermogen van een elektromotor aanpassen aan de procesvereisten
- Het werkklimaat verbeteren
- De mechanische belasting van machines beperken
- Geluidsniveaus verlagen, bijvoorbeeld bij ventilatoren en pompen

Welk voordeel het meest bepalend is, hangt af van de toepassing. Het is echter bewezen dat een toerenregeling aanzienlijke voordelen biedt in zeer uiteenlopende toepassingen.

0.3 Hoe wordt het motortoerental aangepast?

Er zijn drie hoofdtechnologieën voor het realiseren van toerenregeling in de industrie. Elke technologie heeft unieke kenmerken:

Hydraulisch

- Hydrodynamisch type
- Statische typen

Deze genieten vaak de voorkeur in transportbandtoepassingen, met name voor grondverzet- en mijnuitrustingen. Dit komt voornamelijk vanwege de inherente "softstart"-mogelijkheid van de hydraulische eenheid.

Mechanisch

- Riem- en kettingaandrijvingen (met instelbare diameters).
- Frictieaandrijvingen (metaal)
- Variabele reductie

Voor bepaalde toepassingen geven sommige technici nog steeds de voorkeur aan mechanische oplossingen, vooral vanwege hun eenvoud en lage aanschafkosten.

Elektrisch

- FC met elektromotor
- Servosystemen (bijvoorbeeld servoversterker en servo-PM-motor)
- Gelijkstroommotor met besturingselektronica
- Sleepringmotor (slipregeling met een inductiemotor met gewikkelde rotor)

Van oudsher waren elektrische apparaten voor toerenregeling gecompliceerd en kostbaar. Ze werden met name gebruikt voor uitdagende taken waarvoor geen alternatieven beschikbaar waren.

Bovenstaande lijst met technische oplossingen voor toerenregeling van motoren is niet volledig en geeft vooral een indicatie van de technische mogelijkheden.

Dit boek richt zich met name op toerenregeling van elektromotoren met behulp van FC's.

0.4 Frequentieomvormers

Moderne frequentieomvormers kunnen worden toegepast om het toerental of koppel van een aangedreven machine aan te passen en te handhaven met een nauwkeurigheidsmarge van $\pm 0,5\%$. Dit is onafhankelijk van de belasting, in tegenstelling tot netbedrijf van een inductiemotor, waarbij het toerental maar liefst 3-5% (slip) kan variëren tussen nullastbedrijf en vollastbedrijf.

Motorfabrikanten passen verschillende concepten toe om een hoog energierendement te behalen in elektromotoren. Voor gebruikers kan het lastig zijn om het belangrijkste voordeel van elke technologie te zien, maar het zal duidelijk zijn dat energie-efficiënte motoren vragen om technisch geavanceerde regeling.

In principe kunnen bijna alle motoren werken met besturingsalgoritmes die speciaal zijn afgestemd op elk motortype. Sommige fabrikanten van FC's stemmen hun ontwerp af op een beperkte groep motortechnologieën, maar veel fabrikanten kiezen ervoor om de verschillende algoritmes in te bouwen en te laten selecteren tijdens de inbedrijfstelling. Voor de inbedrijfsteller is het belangrijk dat de FC eenvoudig in bedrijf te stellen is op basis van gegevens die standaard beschikbaar zijn voor het gebruikte motortype. Na de inbedrijfstelling moet de gebruiker erop kunnen vertrouwen dat het systeem echt zo eenvoudig is als verwacht; daarom zijn online metingen van het actuele energieverbruik en eenvoudige toegang tot belangrijke gegevens over de werking essentieel.

Om de selectie te vereenvoudigen en te voldoen aan de overheidsdoelstellingen voor verlaging van het energieverbruik, wordt er veel belang gehecht aan veelomvattende en eenduidige regelgeving.

Vergeet niet dat alle systeemcomponenten belangrijk zijn voor mogelijke energiebesparingen. Volgens de Duitse organisatie van elektrotechniek- en elektronicafabrikanten (ZVEI) kan ongeveer 10% van de besparingen worden gerealiseerd door toepassing van motoren met een hoger energierendement; 30% van de besparingen kan worden gerealiseerd via een variabel toerental, terwijl maar liefst 60% van de potentiële besparingen wordt gerealiseerd door het totale systeem te beoordelen en op basis hiervan te optimaliseren.

Houd dit in uw achterhoofd wanneer u alle hoofdstukken in dit boek doorleest en bedenk dat u een systeem niet kunt beoordelen door te kijken naar slechts één of enkele relevante componenten.

We wensen u een interessante leeservaring!

1 Elektromotoren

1.1 Overzicht

Een elektromotor is een elektromechanisch apparaat dat elektrische energie omzet in mechanische energie. Het omgekeerde proces – het produceren van elektrische energie uit mechanische energie – wordt uitgevoerd door een generator.

Er worden enorme eisen gesteld aan de werking van de elektromotor, met name in de industrie. Robuustheid, betrouwbaarheid, afmetingen, energierendement en prijs zijn slechts enkele van de criteria. De uiteenlopende behoeften hebben geleid tot de ontwikkeling van verschillende typen elektromotoren. Onderstaand schema geeft een algemeen overzicht van de meest gangbare elektromotortechnologieën.

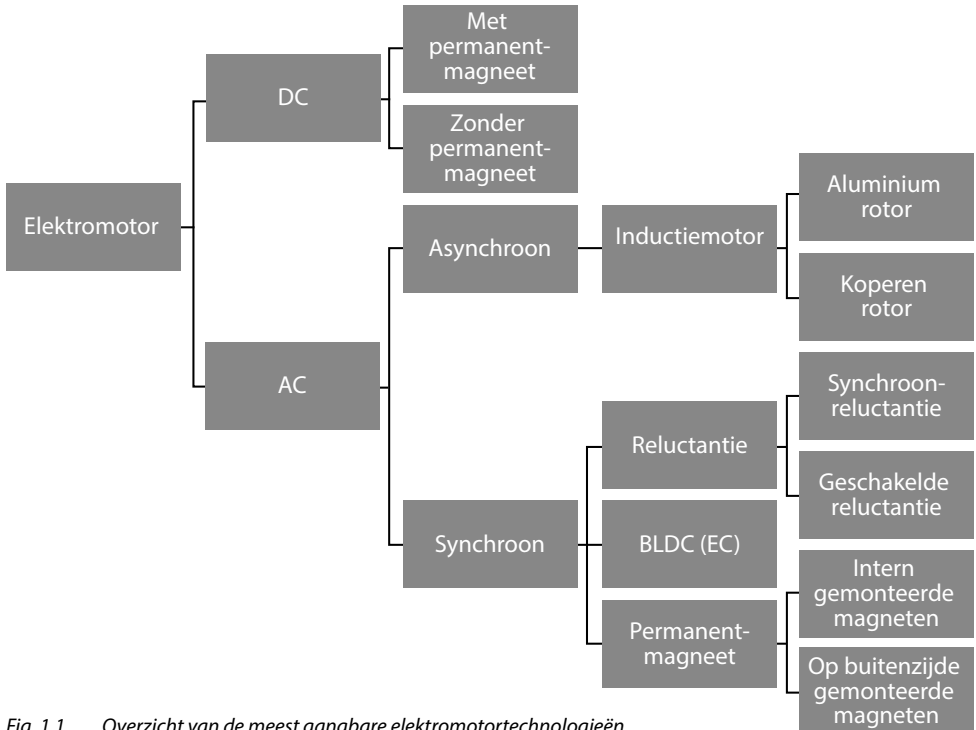


Fig. 1.1 Overzicht van de meest gangbare elektromotortechnologieën

1.2 Basisprincipes

1.2.1 Stator en rotor

De constructie van alle roterende elektromotoren bestaat in principe uit twee hoofdcomponenten.

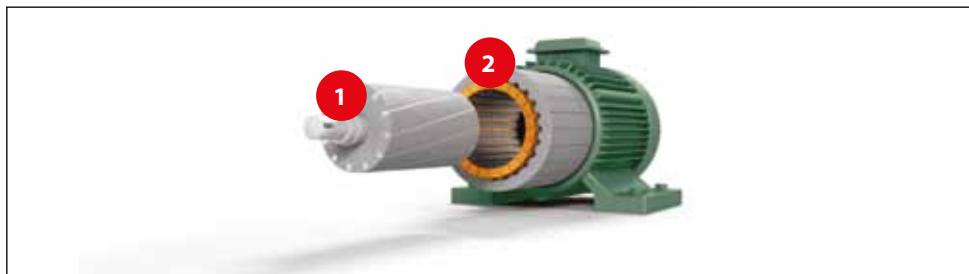


Fig. 1.2 Constructie van de asynchroonmotor

Rotor

De rotor (1) is het roterende deel van de motor dat op de motoras is gemonteerd. Net als de stator bestaat de rotor uit dunne ijzeren lamellen die de rotorwikkelingen bevatten.

Stator

De stator (2) is het stilstaande deel van de motor en bevat het blikpakket waarin de elektrische wikkelingen worden geplaatst.

Eén variant is de externe rotormotor. In tegenstelling tot het concept met een interne rotor, is de stator in het midden van de motor geplaatst en draait de rotor om de stator heen. Deze constructie wordt gebruikt in bepaalde ventilatortoepassingen waarbij de ventilatorbladen direct op de rotor zijn gemonteerd. Tenzij anders aangegeven, hebben alle verklaringen hieronder betrekking op een ontwerp met interne rotor.

De aansluitafmetingen van gangbare industriële motoren zijn vastgelegd in IEC-normen. Niet alle motoren voldoen echter aan deze vereisten. De afmetingen van motoren met een NEMA-frame wijken bijvoorbeeld af van de IEC-normen, vanwege de conversie van het metrische naar het imperiale stelsel.

1.2.2 Vermogen en koppel

Het nominale vermogen van elektromotoren is gedefinieerd binnen een standaardbereik. Deze standaardisatie stelt gebruikers in staat om voor specifieke toepassingen te kiezen tussen verschillende motorfabrikanten. Het "standaard" vermogensbereik en de incrementen verschillen van land tot land en van regio tot regio. We adviseren om uit te zoeken wat fabrikanten in hun catalogi definiëren als standaard. Over het algemeen kunnen motoren met een framegrootte tot 315 (ca. 200 kW) worden beschouwd als standaardmotoren met standaardafmetingen.

Paardenkracht [pk] is de imperiale eenheid die wordt gebruikt voor motorvermogen. Als deze eenheid in specificaties wordt gebruikt, kunt u deze als volgt converteren:
 1 pk = 0,736 kW of 1 kW = 1,341 pk.

Tabel 1.1 toont het typische nominale uitgangsvermogen in [kW] en [pk] op basis van de industriële standaard.

kW	0,18	0,25	0,37	0,55	0,75	1,10	1,50	2,20	3,00	4,00	5,50	7,50	11,0
pk					1,00		2,00	3,00		5,00	7,00	10,00	15,0
kW	15,0	18,5	22,0	30,0	37,0	45,0	55,0	75,0	90,0	110,0	132,0	160,0	200,0
pk	20,0		30,0	40,0	50,0	60,0	75,0	100					

Tabel 1.1 Nominiaal motorvermogen

Naast het vermogen is ook het koppel een belangrijk kenmerk van de motor. Het koppel geeft de rotatiekracht van de motoras aan. Het vermogen is direct gerelateerd aan het koppel en kan worden berekend wanneer koppel en toerental bekend zijn.

$$P = \frac{T \times n}{9,550}$$

P = Vermogen [kW]

T = Koppel [Nm]

n = Toerental [rpm]

De factor 9.550 die in de formule wordt gebruikt, komt voort uit de conversie van eenheden:

- Vermogen van de basiseenheid W (watt) naar de typeplaatje-eenheid kW (kilowatt)
- Toerental van de basiseenheid s⁻¹ (toeren per seconde) naar de typeplaatje-eenheid min⁻¹ (toeren per minuut)

1.2.3 Wisselstroom- en gelijkstroommotoren

De eerste elektromotor, een gelijkstroommotor, werd rond 1833 gebouwd. De toerenregeling voor dit type motor is eenvoudig en voldeed destijds aan de vereisten van zeer uiteenlopende typen toepassingen. De gelijkstroommotor wordt gestuurd door het leveren van een DC-spanning waarvan de hoogte het rotortoerental beïnvloedt. Spanning die op de stator- en rotorwikkelingen wordt geschakeld, wekt magneetvelden op die elkaar aantrekken of afstoten, waardoor de rotor beweegt. Energie die aan de rotor wordt geleverd, wordt via borstels (typisch koolborstels) overgedragen naar een commutator. De commutator zorgt ervoor dat de volgende rotorwikkeling wordt bekrachtigd om zo een doorlopende draaiing te realiseren. De borstels zijn onderhevig aan mechanische slijtage en moeten regelmatig worden onderhouden of vervangen. Het belang van gelijkstroommotoren is in de loop der tijd afgenomen en ze worden tegenwoordig zelden gebruikt in vermogensbereiken boven een paar honderd Watt.

In vergelijking met gelijkstroommotoren zijn draaistroommotoren aanzienlijk eenvoudiger en robuuster. Draaistroommotoren hebben echter meestal een vast toerental en een vaste koppelkarakteristiek. Daarom was het lange tijd onmogelijk om draaistroommotoren in veel diverse of speciale toepassingen te gebruiken. Desondanks worden ze in de meeste toepassingen gebruikt om elektrische energie om te zetten in mechanische energie.

Het werkingsprincipe van draaistroommotoren is gebaseerd op de effecten van een draaiend magnetisch veld. Het draaiend veld wordt opgewekt door hetzij een meerfasige AC-voeding (typisch driefasig) of een eenfasige voeding in combinatie met condensatoren of inductanties om de faseverschuiving te realiseren.

Dit boek richt zich op draaistroommotoren, met name op asynchroonmotoren, aangezien de vereisten voor bedrijf met FC's in toepassingen met toerenregeling voor diverse motortypen kunnen worden afgeleid uit deze motortechnologie. We gaan niet verder in op gelijkstroommotoren.

1.2.4 Elektromagnetische inductie

De meeste elektromotoren werken door de interactie van magnetische velden en stroomvoerende geleiders die kracht uitoefenen. Dit is het omgekeerde proces van het opwekken van elektrische energie uit mechanische energie door generatoren zoals een wisselstroomdynamo of een dynamo op een fiets.

a) Generatorprincipe, inductie door beweging

Wanneer een externe kracht (F) op een geleider werkt en deze door een magnetisch veld (B) beweegt, wordt een spanning opgewekt. Als de geleider deel uitmaakt van een gesloten circuit, loopt er een stroom (I); zie Fig. 1.3 "Principe van elektromagnetische inductie".

b) Motorprincipe

In motoren wordt het inductieprincipe in omgekeerde volgorde benut: een stroomvoerende geleider, die zich in een magnetisch veld bevindt, wordt beïnvloed door een kracht (F), wat resulteert in een beweging.

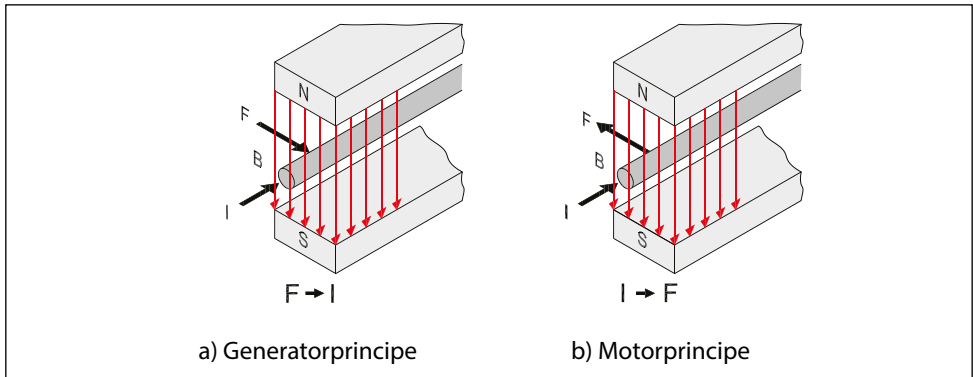


Fig. 1.3 Principe van elektromagnetische inductie

In beide gevallen is een magnetisch veld vereist. In Fig. 1.3 "Principe van elektromagnetische inductie" wordt het magnetische veld opgewekt door een permanentmagneet, terwijl het magnetische veld in een motor wordt opgewekt in de stator. Dit wordt gewoonlijk gerealiseerd door een spanning op de statorwikkelingen te schakelen. De geleiders die door de elektromagnetische kracht worden beïnvloed, bevinden zich in de rotor.

1.2.5 Polen, synchroon toerental en asynchroon toerental

Het synchrone toerental van een motor kan worden berekend wanneer de netfrequentie en het aantal poolparen bekend zijn.

$$n_0 = \frac{f \times 60}{p}$$

f = frequentie [Hz]

n_0 = synchroon toerental [min^{-1}]

p = aantal poolparen

Terwijl de frequentie wordt bepaald door het net of de FC, wordt het aantal polen bepaald door de manier waarop de statorspoelen zijn aangesloten.

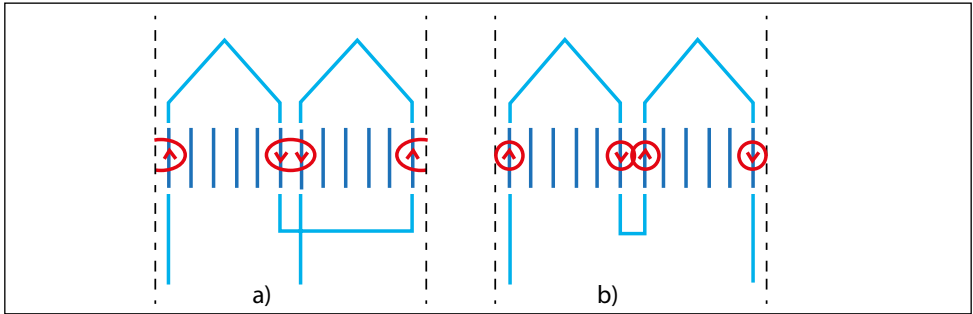


Fig. 1.4 Twee spoelen in één fase in serie aangesloten op a) twee polen b) vier polen

Tabel 1.2 Poolparen (p) of pooltal en synchronmotortoerental – geeft het aantal polen dat overeenkomt met het synchrone toerental (n_0) bij een voeding van 50 en 60 Hz. Hogere pooltallen zijn mogelijk maar worden tegenwoordig zelden toegepast.

Poolparen (p)	1	2	3	4	6
Pooltal (2 p)	2	4	6	8	12
n_0 [min ⁻¹] (50 Hz-voeding)	3000	1500	1000	750	500
n_0 [min ⁻¹] (60 Hz-voeding)	3600	1800	1200	900	600

Tabel 1.2 Poolparen (p) of pooltal en synchronmotortoerental

Synchroon betekent "gelijktijdig" of "gelijk". Dit houdt in dat bij synchroonmotoren het toerental van de rotor gelijk is aan het toerental van het draaiveld. Als het rotortoerental wordt beïnvloed door slip (zie ook sectie 1.3.3 Slip, koppel en toerental) en daardoor lager is dan het toerental van het draaiveld, wordt de motor geclassificeerd als asynchroon, dat wil zeggen "niet gelijktijdig" of "niet gelijk".

1.2.6 Rendement en verliezen

De motor neemt elektrisch vermogen op van het net. Bij een constante belasting is dit vermogen hoger dan het mechanische vermogen dat de motor kan overbrengen naar de as, vanwege diverse verliezen in de motor. De verhouding tussen uitgangsvermogen P_2 en ingangsvermogen P_1 is het motorrendement:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\text{uitgangsvermogen}}{\text{ingangsvermogen}}$$

Het rendement hangt af van het motorprincipe, de componenten (bijvoorbeeld de kwaliteit van het blikpakket), de hoeveelheid actief materiaal (bijvoorbeeld vanwege laminering van het blikpakket of het gebruik van magneten), het motorvermogen (nominaal vermogen) en het aantal polen.

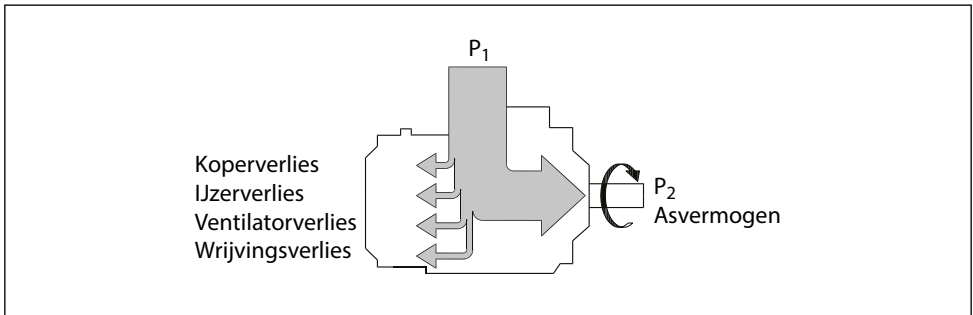


Fig. 1.5 Typische verliezen in de motor

De verliezen in de motor, zoals afgebeeld in Fig. 1.5 “Typische verliezen in de motor”, omvatten:

- koperverliezen als gevolg van de weerstand van de stator- en rotorwikkelingen;
- ijzerverliezen bestaande uit hystereseverliezen en wervelstroomverliezen. Hystereseverliezen treden op wanneer ijzer wordt gemagnetiseerd door een wisselstroom (AC).

Het ijzer wordt herhaaldelijk gemagnetiseerd en gedemagnetiseerd (namelijk 100 keer per seconde in geval van een 50 Hz-voeding). Magnetisering en demagnetisering vereisen beide energie. De motor levert vermogen ter compensatie van de hystereseverliezen, die toenemen met de frequentie en de sterkte van magnetische inductie.

Wervelstroomverliezen treden op doordat de magnetische velden elektrische spanningen opwekken in de ijzeren kern, net als in andere geleiders (zie Fig. 1.6 “Wervelstromen worden beperkt door de gelamineerde vorm van het blikpakket van de motorkern”). Deze spanningen produceren stromen die warmteverliezen veroorzaken. De stromen lopen in circuits die haaks staan op de magnetische velden.

De wervelstroomverliezen worden aanzienlijk beperkt door de ijzeren kern op te delen in dunne lamellen.

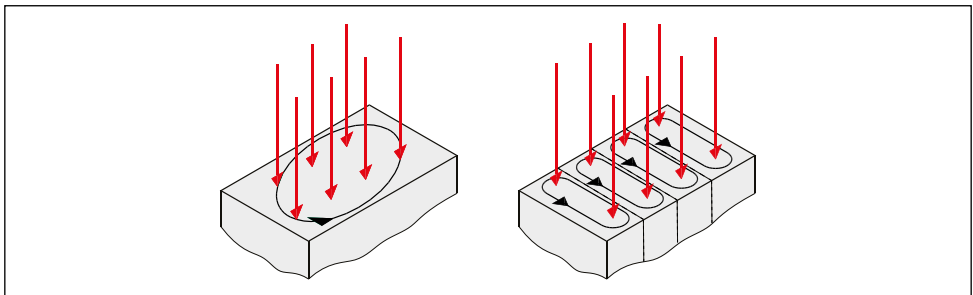


Fig. 1.6 Wervelstromen worden beperkt door de gelamineerde vorm van het blikpakket van de motorkern

- Ventilatorverliezen treden op als gevolg van de luchtweerstand van de motorventilator
- Wrijvingsverliezen treden op in de kogellagers die de rotor op zijn plaats houden

Bij het bepalen van het rendement en het uitgangsvermogen van de motor worden de verliezen in de motor gewoonlijk afgetrokken van het toegevoerde vermogen. Het toegevoerde vermogen wordt gemeten, terwijl de verliezen vaak worden berekend of proefondervindelijk worden bepaald.

1.3 Asynchroonmotoren

Om goed te begrijpen hoe een systeem met toerenregeling werkt, is inzicht nodig in de werkingsprincipes van dit type motor. Hoewel het basisonwerp de afgelopen decennia niet veel is gewijzigd, hebben moderne isolatiematerialen, computergebaseerde ontwerpmethoden evenals geautomatiseerde productiemethoden geleid tot lagere kosten per kilowatt vermogen en een hoger rendement voor de betreffende motorklassen.

De informatie in dit boek is voornamelijk van toepassing op de zogenaamde asynchrone draaistroommotor (of kooiankermotor), het type motor dat veel wordt gebruikt in combinatie met FC's.

1.3.1 Draaiveld

Wanneer een meerfasige AC-bron (typisch driefasig) op een geschikt wikkelingssysteem wordt toegepast, wordt een draaiend magnetisch veld opgewekt dat draait in de luchtspleet tussen de stator en de rotor. Als een van de fasewikkelingen wordt aangesloten op een voedingsfase, wordt een magnetisch veld opgewekt.

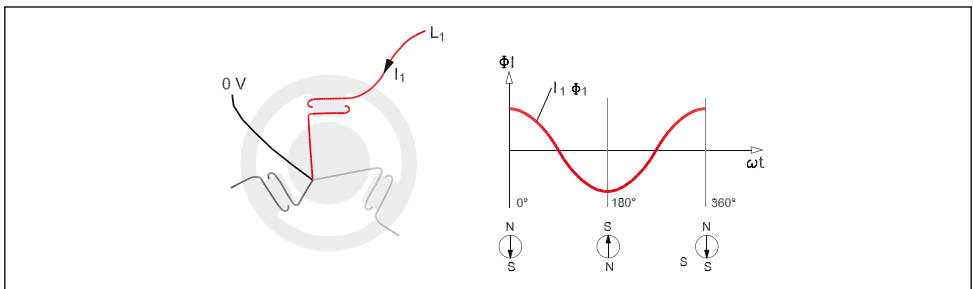


Fig. 1.7 Eén fase wekt een wisselend veld op (wisselveld)

Het magnetische veld in de statorkern heeft een vaste locatie, maar de richting varieert, zoals aangegeven in Fig. 1.7 "Eén fase wekt een wisselend veld op", aangeduid als "wisselveld". De draaisnelheid wordt bepaald door de netfrequentie. Bij een frequentie van 50 Hz wijzigt het veld 100 keer per seconde van richting.

Als er twee fasewikkelingen worden aangesloten op de relevante voedingsfasen, worden in de statorkern twee magnetische velden opgewekt. In een tweepolige motor zijn de velden 120 graden verschoven ten opzichte van elkaar. Ook de maximale veldwaarden zijn verschoven in tijd, zoals aangegeven in Fig. 1.8 "Twee fasen wekken een asymmetrisch draaiveld op".

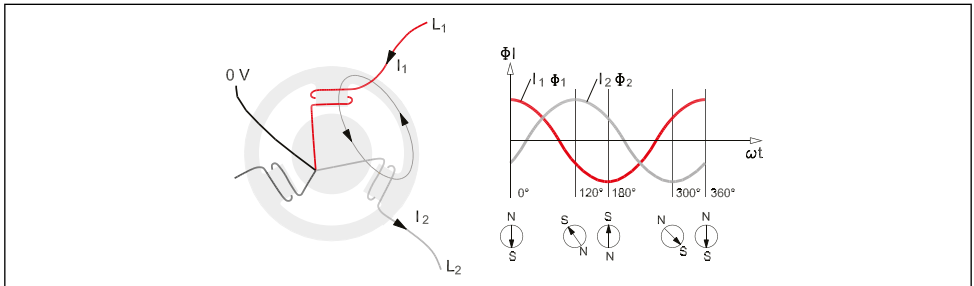


Fig. 1.8 Twee fasen wekken een asymmetrisch draaiveld op

Dit wekt in de stator een draaiend magnetisch veld op dat zeer asymmetrisch is totdat de derde fase wordt aangesloten. Wanneer de derde fase wordt aangesloten, zijn er drie magnetische velden in de statorkern. De drie fasen zijn 120° verschoven ten opzichte van elkaar, zoals aangegeven in Fig. 1.9 "Drie fasen wekken een symmetrisch draaiveld op".

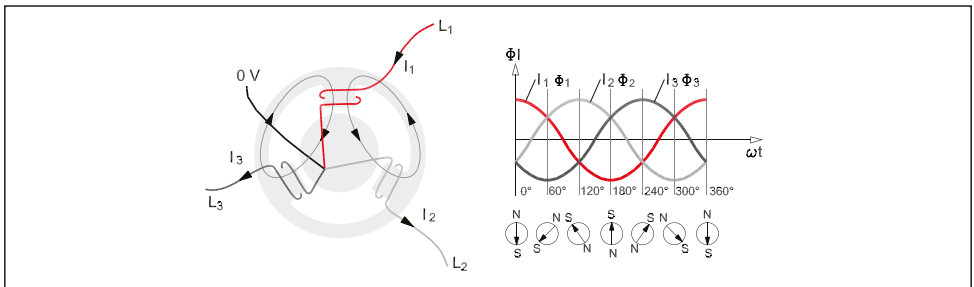


Fig. 1.9 Drie fasen wekken een symmetrisch draaiveld op

De stator is nu aangesloten op de driefasevoeding. De magnetische velden van de afzonderlijke fasewikkelingen vormen een symmetrisch draaiend magnetisch veld. Dit magnetische veld wordt het draaiveld van de motor genoemd.

De amplitude van het draaiveld (φ) is constant en bedraagt 1,5 maal de maximale waarde (φ_{\max}) van de wisselvelden. Het draaiveld draait met het synchrone toerental dat wordt bepaald door het aantal poolparen en de netfrequentie (zie ook sectie 1.3.3 Slip, koppel en toerental).

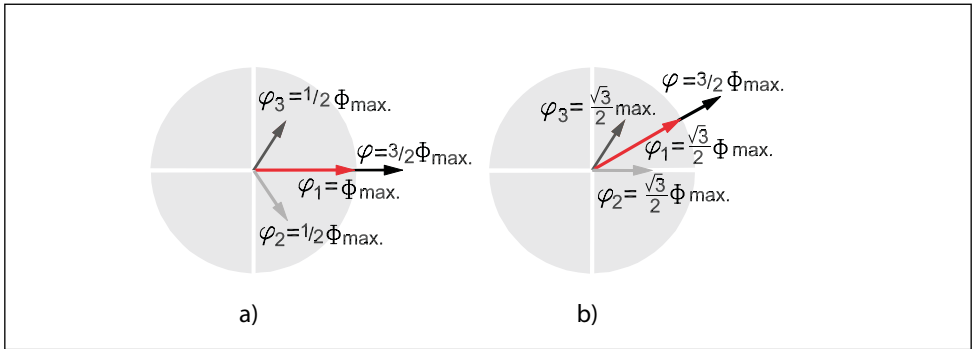


Fig. 1.10 Componenten van een magnetisch veld

De weergave van het draaiveld als een vector met een overeenkomstige hoeksnelheid beschrijft een cirkel, zoals aangegeven in Fig. 1.10 “Componenten van een magnetisch veld”. De grootte van het magnetische veld φ als resultaat van de componenten ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$) blijft constant op verschillende tijdstippen (a en b). Als functie van tijd in een coördinatenstelsel beschrijft het draaiveld van één enkele spoel een sinuslijn. Het gecombineerde draaiveld van de drie fasen in vectorweergave heeft een cirkelvorm. Het draaiveld wordt elliptisch als de amplitude tijdens een omwenteling verandert.

Bij eenfasemotoren wordt de faseverschuiving die de draairichting van de motor bepaalt, gecreëerd door een condensator of een inductantie, wat eveneens een elliptisch veld veroorzaakt.

1.3.2 Kooiankermotor

Het kooianker (ook wel kortsluitanker of kortsluitrotor genoemd) is het meestgebruikte rotortype en wordt toegepast in de kooiankermotor. In tegenstelling tot de stator, die wordt gekenmerkt door spoelen met veel wikkelingen, wordt in de kooiankermotor slechts één wikkeling in de sleuven van het rotorblikpakket geplaatst. Dit wordt gewoonlijk gedaan met behulp van aluminium of koperen staven. De staven worden aan beide uiteinden van de rotor kortgesloten met behulp van een ring die van hetzelfde materiaal is gemaakt. Koper heeft het voordeel dat het beter geleidt dan aluminium en daardoor lagere verliezen en een hoger rendement geeft. Nadelen ten opzichte van aluminium zijn hogere prijzen, lagere startkoppels en een hogere smelttemperatuur die het gieten bemoeilijkt en waardoor meer machinebewerking vereist is.

Een variant van de kortsluitrotor is de sleepringrotor, die gewikkelde rotorspoelen heeft. De spoelen zijn aangesloten op sleepringen. Borstels die over de sleepring slepen, maken het mogelijk om externe weerstanden aan te sluiten die het motorgedrag aanpassen (zie ook sectie 1.3.5 "Toerental wijzigen"). Als de sleepringen worden kortgesloten, werkt de rotor als een kooianker.

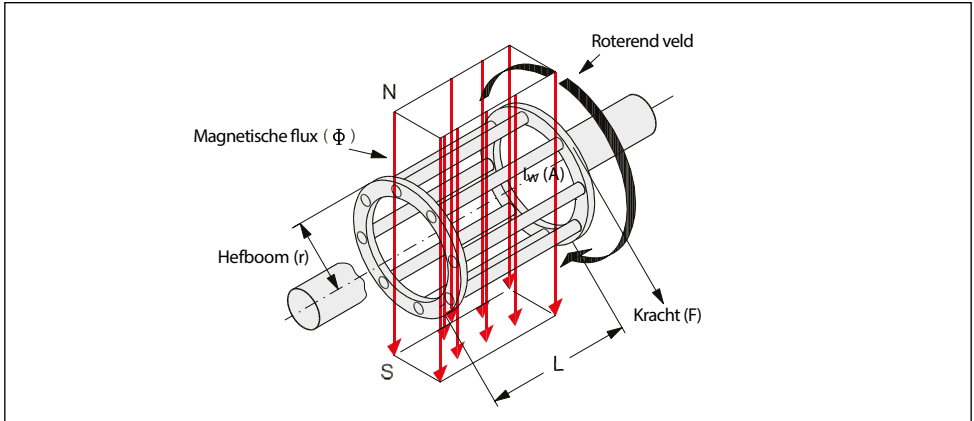


Fig. 1.11 Werkingsgebied en kooianker

De rotorbeweging van de kooiankermotor wordt als volgt gecreëerd: Een rotorstaaf die in het draaiveld is geplaatst, wordt gepasseerd door een reeks magnetische polen, zoals aangegeven in Fig. 1.11. Het magnetische veld van elke pool wekt in de rotorstaaf een stroom (I_w) op, die wordt beïnvloed door een kracht (F). Deze kracht wordt bepaald door de fluxdichtheid (B), de geïnduceerde stroom (I_w), de lengte (L) van de rotor in de stator en de hoek (θ) tussen de kracht en de fluxdichtheid. Stel dat $\theta = 90^\circ$, dan is de kracht:

$$F = B \times I_w \times L$$

De volgende pool die de staaf passeert, heeft een tegengestelde polariteit. Hierdoor wordt een stroom opgewekt in tegengestelde richting als de vorige stroom. Omdat de richting van het magnetische veld eveneens is veranderd, werkt de kracht in dezelfde richting als voorheen, zoals aangegeven in Fig. 1.12b "Inductie in de rotorstaven".

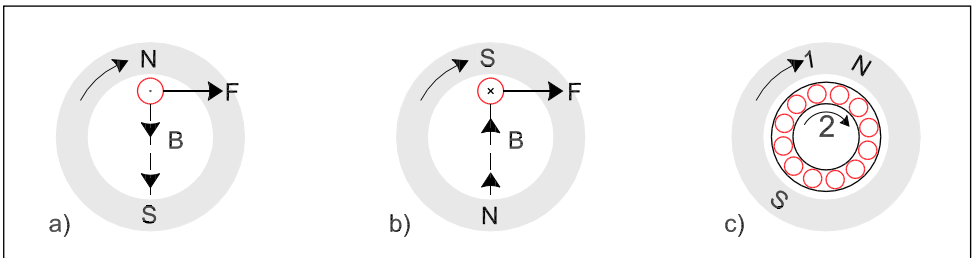


Fig. 1.12 Inductie in de rotorstaven

Wanneer de volledige rotor zich in het draaiveld bevindt (zie Fig. 1.12c “Inductie in de rotorstaven”), worden de rotorstaven beïnvloed door krachten die de rotor laten draaien. Het rotortoerental (2) bereikt niet het toerental van het draaiveld (1), aangezien er geen stromen in de kooistaven worden opgewekt wanneer deze met hetzelfde toerental als het veld draaien.

1.3.3 Slip, koppel en toerental

Zoals aangegeven in de secties 1.2.5 “Polen, synchroon toerental en asynchroon toerental” en 1.3.2 “Kooiankermotor”, is het rotortoerental (n_n) van asynchroonmotoren in normale omstandigheden iets lager dan het toerental (n_0) van het draaiveld. Het verschil tussen de toerentalen van het draaiveld en de rotor wordt slip (s) genoemd, waarbij:

$$s = n_0 - n_n$$

De slip wordt vaak uitgedrukt als een percentage van het synchrone toerental en ligt typisch tussen 1 en 10 procent.

$$s = \frac{(n_0 - n_n) \times 100}{n_0}$$

De krachten in de afzonderlijke rotorstaven vormen samen het koppel (T) op de motoras (zie sectie 1.3.2 “Kooiankermotor”). Bij een gegeven waarde van kracht (F) en straal (r), bedraagt het motorkoppel: $T = F \times r$.

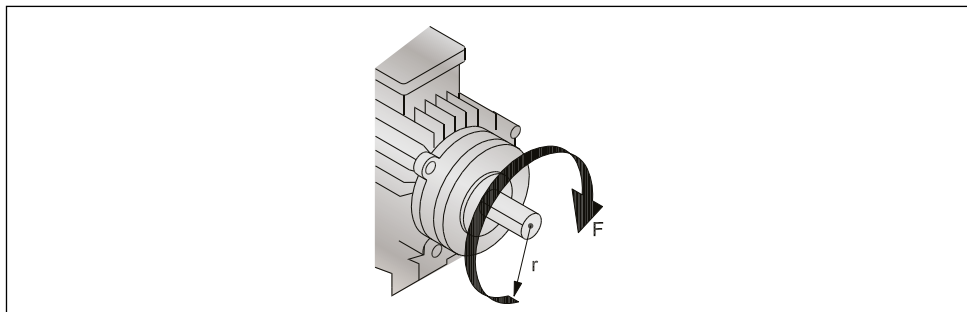


Fig. 1.13 Koppel op de motoras is kracht (F) x straal (r)

De relatie tussen motorkoppel, toerental en stroom van asynchroonmotoren heeft een karakteristieke curve, zoals te zien is in Fig. 1.14 “Belangrijkste motorstroom- en koppelkarakteristieken”. Deze curve hangt af van het ontwerp van de rotorsleuven en het materiaal van de staven.

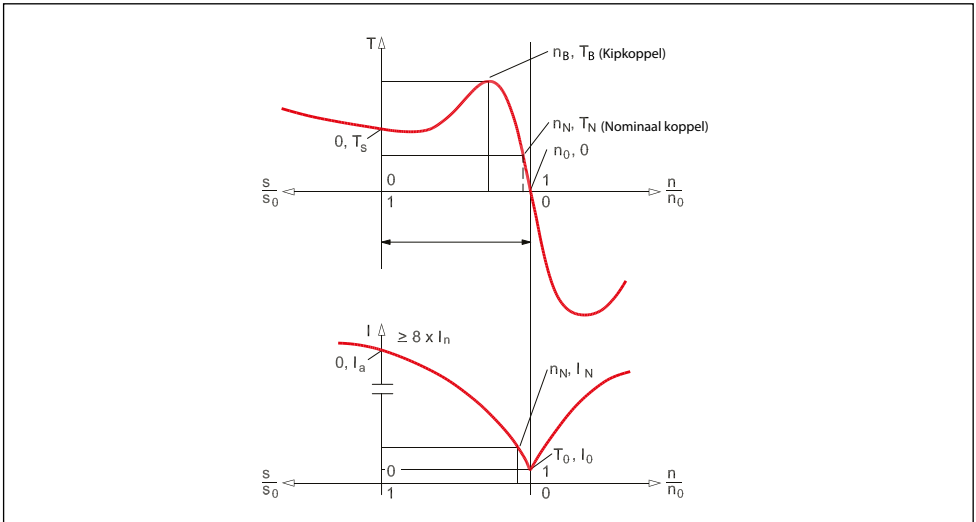


Fig. 1.14 Belangrijkste motorstroom- en koppelkarakteristieken

Het werkbereik van de motor ($0 < n/n_0 < 1$) is op te delen in twee bereiken:

- Startbereik ($0 < n/n_0 < n_B/n_0$)
- Werkbereik ($n_B/n_0 < n/n_0 < 1$)

Deze bereiken hebben de volgende kenmerken:

Startkoppel T_s . Dit is het koppel dat de motor produceert wanneer de nominale spanning en de nominale frequentie worden toegepast op een stilstaande motor.

Kipkoppel (max. koppel) T_B bij kiptoerental n_B . Dit is het hoogste koppel dat de motor kan produceren wanneer de nominale spanning en de nominale frequentie worden toegepast.

Nominaal motorkoppel T_N bij nominaal toerental n_N .

De nominale waarden van de motor zijn de mechanische en elektrische waarden waarvoor de motor is ontworpen overeenkomstig de norm IEC 60034. De nominale waarden, ook wel motorspecificaties genoemd, staan vermeld op het motortypeplaatje.

De nominale waarden geven het optimale werkpunt van de motor bij directe aansluiting op het net.

Naast het normale motorwerkbereik zijn er twee rembereiken.

- $n/n_0 > 1$: de motor wordt aangedreven door de belasting boven het synchrone toerental van de motor (n_0) en werkt als generator. In dit bereik produceert de motor een tegenkoppel en voert hij tegelijkertijd vermogen terug naar het voedingsnet.
- $n/n_0 < 0$: het remmen wordt aangeduid als regeneratief remmen of tegenstroomremmen.

Als twee fasen van een motor plotseling worden verwisseld, verandert het draaiveld van richting. Meteen hierna bedraagt de toerentalverhouding n/n_0 1. De motor, die tot op dat moment was belast met koppel T, remt nu met het remkoppel. Als de motor niet wordt uitgeschakeld bij $n = 0$, zal hij in de nieuwe looprichting van het magnetische veld blijven werken.

1.3.4 Typische bedrijfscondities

In principe hebben asynchroonmotoren zes spoelen: drie spoelen in de stator en drie spoelen in het kooianker (dat zich magnetisch gedraagt alsof het uit drie spoelen bestaat). Een subset van deze spoelen kan worden gebruikt als basis voor het creëren van een equivalent circuit waarmee het werkingsprincipe van de motor eenvoudiger te begrijpen is, met name wanneer de frequentie of de voedingsspanning verandert of varieert.

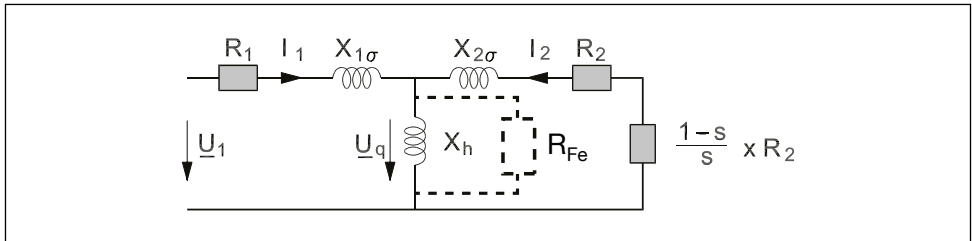


Fig. 1.15 Equivalentiedigram (eenfase) voor een motor die belast werkt

Het schakelen van een voedingsspanning (U_1) veroorzaakt een stroom in de stator (I_1) en de rotor (I_2) die wordt begrensd door de weerstand in de stator (R_1) en de rotor (R_2) en de reactantie in de stator ($X_1 \sigma$) en de rotor ($X_2 \sigma$). De weerstand is onafhankelijk van de voedingsfrequentie, maar de reactantie is wel van invloed.

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L$$

X_L = reactantie [Ω]

f = frequentie [Hz]

L = inductantie [H]

De spoelen beïnvloeden elkaar door middel van magnetische inductie. De rotorspoel wekt een stroom op in de statorspoel en omgekeerd. Dit wederzijdse effect betekent dat de twee elektrische circuits onderling kunnen worden verbonden via een gemeenschappelijk element dat bestaat uit R_{Fe} en X_{lv} , de zogenaamde dwarsweerstand en dwarsreactantie. De stroom die de motor opneemt voor magnetisering van de stator en de rotor, loopt via dit gemeenschappelijke element. De spanningsval over de "dwarskoppeling" is de inductiespanning (U_q). R_{Fe} is zeer klein en wordt buiten beschouwing gelaten in de volgende toelichting.

Standaard bedrijf

Wanneer de motor binnen het normale werkbereik werkt, is de rotorfrequentie, vanwege de slip, lager dan de frequentie van het draaiveld. In het equivalentiediagram wordt dit effect aangegeven met een wijziging van rotorweerstand R_2 met een factor $1/s$. R_2/s kan worden uitgedrukt als $R_2 + R_2 \times (1 - s)/s$ waarbij $R_2 \times (1 - s)/s$ de mechanische motorbelasting aanduidt.

Situatie zonder belasting

Bij nullastbedrijf (stationair draaien) is de slip s klein. Dit betekent dat $R_2 \times (1 - s)/s$ hoog is. Daardoor kan er bijna geen stroom door de rotor lopen. In het ideale geval is dit vergelijkbaar met het wegnemen van de weerstand die overeenkomt met de mechanische belasting van het equivalente circuit.

De opgewekte spanning (U_q) wordt vaak verward met de motorklemspanning. Dit komt door de vereenvoudiging van het equivalentiediagram die het eenvoudiger moet maken om de diverse motorcondities te begrijpen. De opgewekte spanning komt echter slechts bij benadering overeen met de klemspanning bij nullastbedrijf.

Situatie met geblokkeerde rotor

De slip neemt toe wanneer de motor belast werkt. Hierdoor zal $R_2 \times (1 - s)/s$ afnemen. Wanneer de rotor geblokkeerd is, is de slip 1; daarom zal de stroom, die met de belasting toeneemt, zijn maximum bereiken.

Het equivalentiediagram komt dus overeen met de condities die van toepassing zijn op de asynchroonmotor in de normale praktijk. Het kan in talrijke praktijkvoorbeelden worden gebruikt om de condities in de motor te beschrijven.

1.3.5 Toerental wijzigen

Het motortoerental n hangt af van de draaisnelheid van het magnetische veld en kan worden uitgedrukt als:

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

Het motortoerental kan daarom worden gewijzigd door wijziging van:

- het aantal poolparen p van de motor (bijvoorbeeld poolomschakelbare motoren);
- de motorslip s (bijvoorbeeld sleepingmotoren);
- de frequentie f van de motorvoedingsspanning (voor de motor).

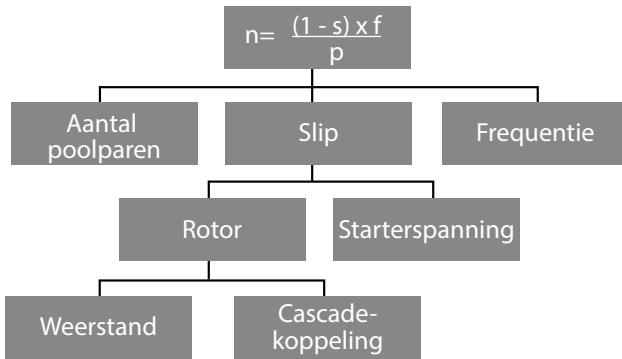


Fig. 1.16 Diverse opties voor het wijzigen van het motortoerental

Pooltalregeling

De draaisnelheid van het magnetische veld wordt bepaald door het aantal poolparen in de stator. Bij een tweepolige motor bedraagt de draaisnelheid van het magnetische veld 3000 tpm bij een motorvoedingsfrequentie van 50 Hz. Bij een vierpolige motor is de draaisnelheid 1500 tpm.

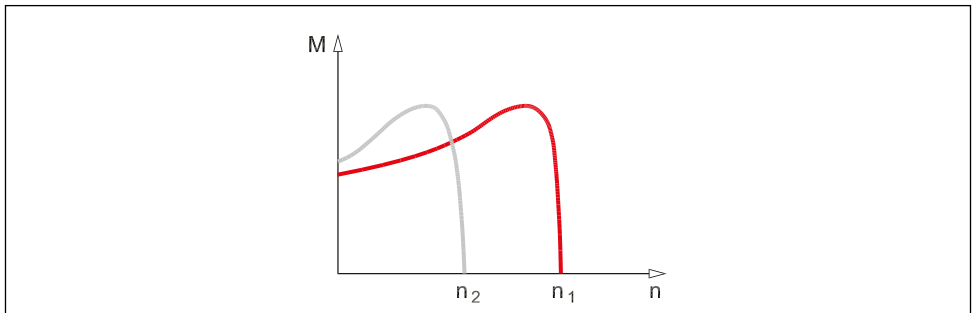


Fig. 1.17 Koppelkarakteristieken bij wijziging van het pooltal

Motoren kunnen worden ontworpen voor twee of meer verschillende pooltallen. Dit gebeurt door de statorwikkelingen op een speciale manier in de groeven te plaatsen (Dahlanderwikkeling) en/of meer afzonderlijke en geïsoleerde wikkelingen in de groef te plaatsen.

Het toerental wordt gewijzigd door de statorwikkelingen om te schakelen zodat het aantal poolparen in de stator wijzigt. Door van een klein aantal poolparen (hoog toerental) om te schakelen naar een groot aantal poolparen (laag toerental), kan het feitelijke motortoerental aanzienlijk worden verlaagd, bijvoorbeeld van 1500 naar 750 tpm. Bij snel omschakelen van een hoger naar een lager toerental, doorloopt de motor zijn regeneratieve bereik. Dit betekent een aanzienlijke belasting voor zowel de motor als het mechanisme van de aangedreven machine, wat kan leiden tot schade aan de motor en de machine.

Slipregeling

Het regelen van het motortoerental door middel van slip is mogelijk op twee manieren: door de voedingsspanning van de stator te wijzigen of door de rotor te modificeren. Hierbij moet worden opgemerkt dat beide methoden gepaard gaan met aanzienlijke thermische verliezen. Raadpleeg andere informatiebronnen als u hier meer informatie over nodig hebt.

Rotorregeling

Het regelen van het motortoerental met behulp van de rotor is mogelijk op twee manieren:

- Via weerstanden die in het rotorcircuit worden geplaatst. Deze typen motoren worden "sleepingmotoren" genoemd. Het nadeel van deze methode is het hogere vermogensverlies in het rotorcircuit.
- Via rotorcircuits die via cascadeschakelingen worden verbonden met andere elektrische machines of gelijkrichtercircuits. Het rotorcircuit wordt vervolgens via sleepingen verbonden met DC-machines of met gestuurde gelijkrichtercircuits in plaats van weerstanden. De DC-machine voorziet het rotorcircuit van extra, variabele spanning, waardoor het mogelijk wordt om het rotortoerental en de magnetisering te wijzigen.

Frequentieregeling

Met een voedingsspanning met variabele frequentie is het mogelijk om het motortoerental te regelen met minimale extra verliezen. De draaisnelheid van het magnetische veld, en daarmee het rotortoerental, verandert met de frequentie. Om het motorkoppel te handhaven, moet de motorspanning veranderen met de frequentie, zoals aangegeven in Fig. 1.18 "Koppelkarakteristieken met spanning-frequentieregeling".

Bij een constante verhouding tussen motorvoedingsspanning en frequentie is ook de magnetisering binnen het nominale werkbereik van de motor constant.

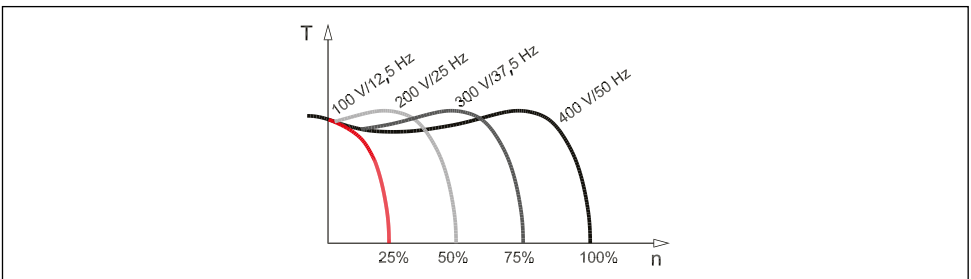


Fig. 1.18 Koppelkarakteristieken met spanning-frequentieregeling

Bij lage toerentallen moet de verhouding worden aangepast om de ohmse verliezen te compenseren. Binnen dit toerentalbereik kan aanvullende, geforceerde koeling noodzakelijk zijn.

1.3.6 Motortypeplaatje en ster- of driehoekconfiguratie

Gewoonlijk is de motor voorzien van een typeplaatje waarop alle essentiële motorgegevens staan vermeld. Aanvullende gegevens zijn beschikbaar in de motorcatalogus of op te vragen bij de fabrikant.

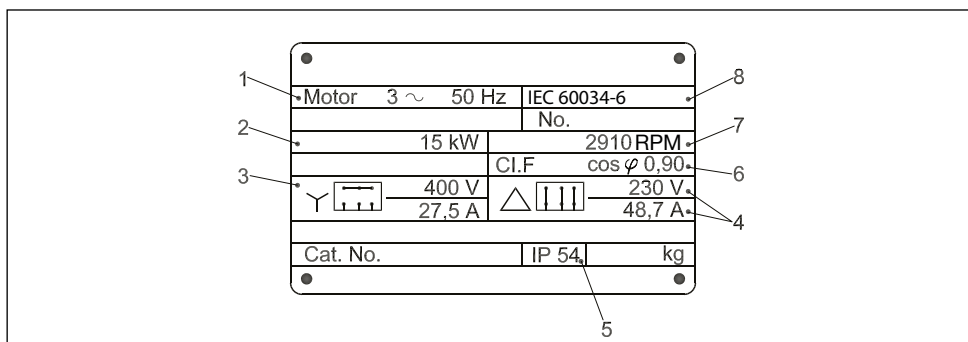


Fig. 1.19 Motortypeplaatje met essentiële gegevens

Het getoonde typeplaatje bevat de volgende informatie:

1. De motor is een draaistroommotor met een nominale frequentie van 50 Hz
2. Het nominale (as)vermogen is 15 kW
3. De statorwindingen kunnen in serie (ster) worden aangesloten met een nominale spanning van 400 V en een nominale (schijnbare) stroom van 27,5 A
4. In plaats daarvan kunnen de statorwindingen ook parallel (in driehoek) worden aangesloten met een nominale spanning van 230 V en een nominale (schijnbare) stroom van 48,7 A
5. De beschermingsklasse is IP 54
6. Isolatieklasse F (155 °C) en een arbeidsfactor (cos φ) van 0,90
7. Het nominale toerental 2910 tpm (een tweepolige motor) is het motortoerental bij nominale belasting, nominale frequentie en nominale belasting
8. Voldoet aan de normen van IEC 60034-6

Bepaalde motorgegevens (koppel, rendement enz.) kunnen worden berekend op basis van de gegevens van het typeplaatje. Zo kan de arbeidsfactor bijvoorbeeld worden gebruikt om de actieve en reactieve component van de motorstroom te berekenen.

Besteed speciale aandacht aan de nominale motorspanning bij aansluiting in ster of driehoek. Als de voedingsspanning hoger is dan de nominale spanning van de toegepaste configuratie, wordt de motor beschadigd. Vaak kan de aansluiting worden gewijzigd door de jumpers op de motorklemmen te verplaatsen.

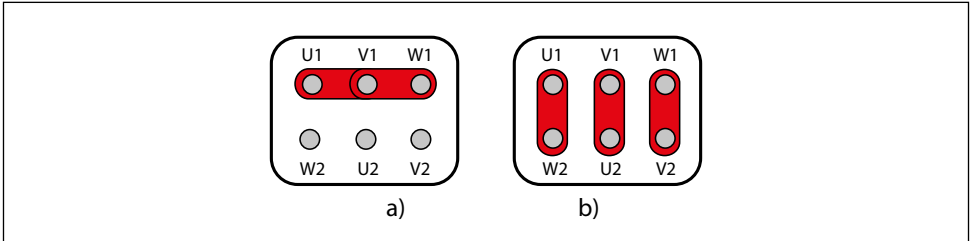


Fig. 1.20 Motoren aangesloten in ster (a) of driehoek (b) via jumpers op het klemmenblok

Bij een driehoekaansluiting wordt de volledige voedingsspanning geschakeld op elke motorfase, maar wordt de stroom verlaagd met factor $\sqrt{3}$. Bij een steraansluiting wordt de stroom gehandhaafd en wordt de spanning verlaagd. Daardoor is het vermogen gelijk ongeacht de aansluiting, doordat de toevoerspanningen verschillend zijn.

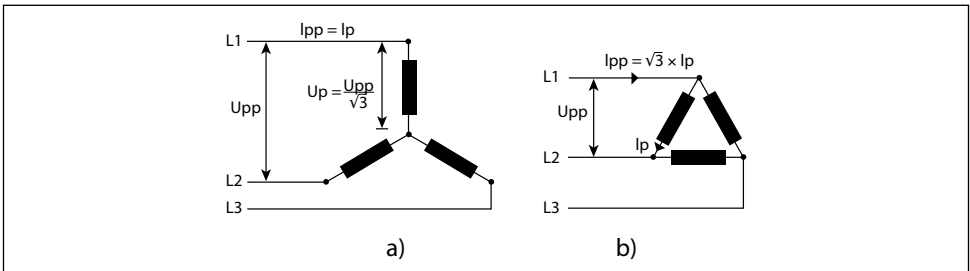


Fig. 1.21 Stroom- en spanningsverdeling bij aansluiting in ster (a) en driehoek (b)

Zogenaamde ster-driehoekstarters benutten dit gedrag om de startstroom van een motor te beperken. Dit is alleen mogelijk wanneer de motor in normaal bedrijf op het desbetreffende net in driehoek aangesloten zou worden. Voor een 400 V-net betekent dit dat de motor in steraansluiting een nominale waarde van 690 V moet hebben en in driehoekaansluiting een nominale waarde van 400 V. Bij het opstarten zal de motor echter tijdelijk in ster worden aangesloten, waardoor stroom, vermogen en koppel tot een derde worden verlaagd. Nadat de motor is aangelopen, wordt de aansluiting veranderd in driehoek.

Motorspanningen worden in catalogi vaak aangeduid door de ster- en driehoekspanningen samen te vermelden (voorbeeld: 400/230 V Y/ Δ of 690/400 V Y/ Δ). De lagere spanning verwijst altijd naar de driehoekaansluiting en de hogere spanning naar de steraansluiting.

De relatie van de stroom is net omgekeerd: de lagere stroom verwijst naar de sterconfiguratie en de hogere stroom verwijst naar de driehoekconfiguratie.

1.4 Synchronmotoren

De synchronomotor dankt zijn naam aan het feit dat de rotor met hetzelfde toerental draait als het magnetische veld dat door de statorwikkelingen wordt opgewekt. Het ontwerp van de stator is in veel gevallen vergelijkbaar met dat van asynchroommotoren, met gedistribueerde wikkelingen. Sommige fabrikanten gebruiken concentrische wikkelingen (in groeven), wat een compacter motorontwerp mogelijk maakt en minder koper vereist. De energiebesparing die het gebruik van minder koper oplevert, wordt echter vaak tenietgedaan door extra verliezen, wat leidt tot harmonischen in de luchtspleetflux als gevolg van de constructie.

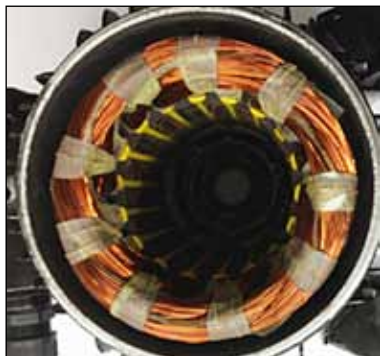


Fig. 1.22 Gedistribueerde wikkelingen

1.4.1 Permanentmagneetmotoren (PM-motoren)

De eenvoudigste manier om een permanentmagneetmotor (PM-motor) te bouwen, is om het kooianker van een asynchroommotor te vervangen door een rotor die is uitgerust met permanentmagneten. Wanneer een geschikte spanning op de stator wordt geschakeld, wordt er in de luchtspleet een draaiend magnetisch veld opgewekt. De rotor zal het veld met het synchrone toerental volgen, omdat de magneten worden aangetrokken door het draaiveld. Als het verschil tussen het rotortoerental en het toerental van het magnetische veld te groot is, loopt de motor niet meer synchroon en komt de motor tot stilstand. Daarom is een geschikte regelaar nodig die ervoor zorgt dat de toerentalwijzigingen worden uitgevoerd door traploze regeling van de voedingsfrequentie en niet door schakelen tussen verschillende toerentallen.

In het verleden werden PM-motoren vaak gebruikt in servotoepassingen met focus op snelle en nauwkeurige regeling. Deze servomotoren zijn meestal slank en lang van vorm, voor een lage massa traagheid in uiterst dynamische toepassingen. Om het hoge rendement van PM-motoren in andere toepassingen te benutten, is het principe doorgevoerd in motoren in IEC-frame groottes. Standaard frequentieomvormers kunnen in de meeste PM-motorsystemen werken als in het apparaat geschikte besturingsalgoritmes zijn geïmplementeerd.

Om de motor zo goed mogelijk te magnetiseren, moet de regelaar op elk willekeurig moment de rotorhoek kennen. In veel toepassingen zijn sensorloze strategieën voor het bepalen van de rotorhoek voldoende. Als de regelaar niet geschikt is voor een sensorloze regeling, of in uiterst dynamische servotoepassingen, worden externe positieterugkoppelingsapparaten gebruikt.

In het equivalentiediagram worden de magneten voorgesteld door een spanningsbron U_p , omdat door het draaien van de rotor een spanning wordt opgewekt in de stator. Deze spanning wordt tegen-EMK genoemd; zie sectie 1.4.1.1 Tegen-EMK. De afwezigheid van motorslip, rotorweerstand en inductantie wijst erop dat er in de rotor geen verliezen optreden, wat zorgt voor een zeer goed rendement.

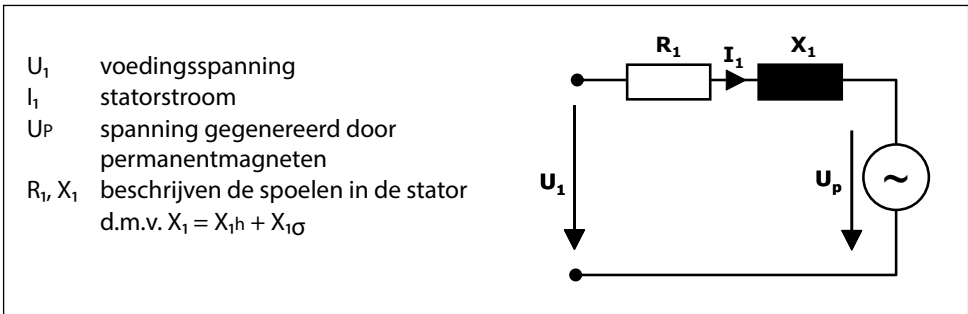


Fig. 1.23 Vereenvoudigd equivalentiediagram van een PM-motor

Over het algemeen kunnen PM-motoren worden onderverdeeld in motoren met rotors waarbij de magneten op de buitenzijde (SPM-motor) of intern (IPM-motor) zijn gemonteerd. De locatie van de magneet leidt tot verschillende vormen van het resulterende magnetische veld en wordt beschreven met behulp van de inductanties L_d en L_q .

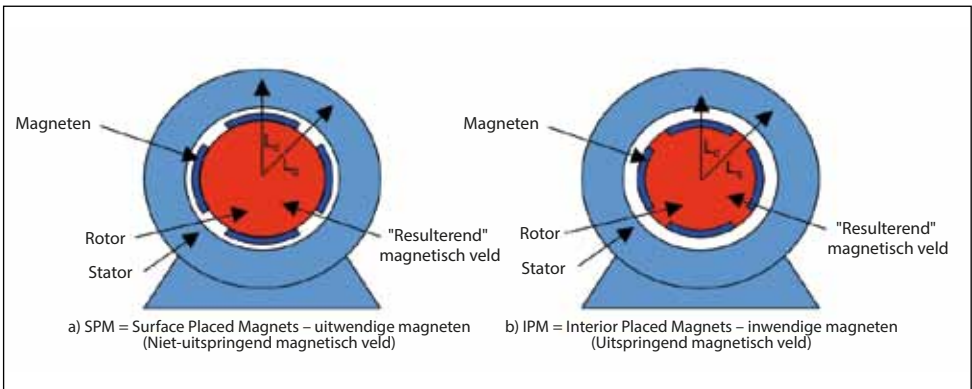


Fig. 1.24 Locatie magneet a) SPM en b) IPM

Omdat de magneten zich als lucht gedragen ten opzichte van het resulterende magnetische veld, worden uitspringende en niet-uitspringende velden gecreëerd. Bij SPM-motoren hebben L_d en L_q dezelfde waarde, wat resulteert in een niet-uitspringend veld, terwijl de verschillende L_d en L_q van een IPM-motor een uitspringend veld creëren dat extra koppel produceert bij veldverzwakking.

1.4.1.1 Tegen-EMK

Wanneer de as van een PM-motor wordt gedraaid, produceert de motor een spanning op de motorklemmen. Deze spanning wordt tegen-EMK (EMK = elektromotorische kracht) genoemd en beschrijft een belangrijk kenmerk van de motor. Hoe hoger de spanning, hoe beter het motorrendement. Afhankelijk van de aansluiting en plaatsing van de wikkelingen kan de tegen-EMK trapeziumvormig of sinusvormig zijn. Voor een trapeziumvormige spanning is zogenaamde blokcommutatie nodig, wat eenvoudig te realiseren is in de elektronica maar nadelen heeft zoals ruis en koppelrimpels. PM-motoren hebben meestal een sinusvormige tegen-EMK en worden aangestuurd door middel van sinusvormige commutatie.

Houd er rekening mee dat de motor actief een spanning produceert, niet alleen tijdens bedrijf maar ook wanneer de voedende FC is afgeschakeld van het net (stroomuitval, defect, uitgeschakeld), omdat de motor in principe in staat is voldoende energie te genereren om het apparaat in te schakelen wanneer de as draait (bijvoorbeeld bij vrijlopen). De spanning die nodig is om de FC in te schakelen, hangt af van de netspanning waarvoor de FC is ontworpen.

Voorbeeld: vereist toerental van een PM-motor met 200 V tegen-EMK om een FC voor een netspanning van 400 V in te schakelen (vereiste DC-tussenkringspanning ongeveer 320 V).

$$n_{\text{vermogen aan}} = \frac{U_{\text{DC aan}}}{\sqrt{2}} \times 1000 \text{ tpm} = \frac{320 \text{ V}}{200 \text{ V}} \times 1000 \text{ tpm} = 1134 \text{ tpm}$$

Als de door de motor opgewekte spanning te hoog is, kan de frequentieomvormer onherstelbaar worden beschadigd. In de praktijk kan dit gebeuren wanneer de aandrijvende FC wordt uitgeschakeld terwijl de motor op zeer hoge toeren draait. Tijdens bedrijf beperkt de FC de spanning die wordt teruggevoerd van de motor. Wanneer de besturing plotseling wordt uitgeschakeld, wordt de volledige tegen-EMK-spanning meteen zichtbaar op de klemmen. Dit kritieke toerental hangt af van de tegen-EMK van de motor en de spanning waarvoor de FC is ontworpen.

Voorbeeld: 400 V net, $U_{\text{tegen-EMK bij 1000 tpm}} = 100 \text{ V}$, $U_{\text{DC kritisch}} = 1000 \text{ V}$

$$n_{\text{kritiek}} = \frac{U_{\text{DC kritiek}}}{U_{\text{tegen-EMK bij 1000 tpm}} \sqrt{2}} \times 1000 \text{ tpm} = \frac{1000 \text{ V}}{100 \text{ V} \times \sqrt{2}} \times 1000 \text{ tpm} = 5656 \text{ tpm}$$

Een remweerstand kan worden gebruikt om dergelijke kritieke situaties het hoofd te bieden.

Helaas bestaat er geen standaard die door motorfabrikanten wordt gebruikt om informatie te geven over de tegen-EMK. Sommige fabrikanten vermelden de tegen-EMK bij 1000 tpm terwijl anderen het nominale toerental van de motor gebruiken. Soms wordt de waarde van factor ke gegeven in radialen en moet deze worden geconverteerd naar tpm.

$$U_{\text{EMF}} = ke \times \frac{1000}{60} \times 2\pi$$

Wanneer piekwaarden worden gegeven, moet de spanning worden gedeeld door de vierkantswortel van twee om de RMS-waarde te verkrijgen.

Ook geavanceerde motorgegevens zoals de motorweerstand en inductanties worden op verschillende manieren vermeld. Soms worden ze gegeven als fase-fasewaarden en soms als fase-sterwaarden.

$$U_{\text{RMS}} = \frac{U_{\text{Piek}}}{\sqrt{2}}$$

1.4.1.2 Koppel en toerentalbereik

Het koppel van een PM-motor is evenredig aan de motorstroom, terwijl het toerental evenredig is aan de voedingsfrequentie. Bij nominaal koppel en toerental is een bepaalde spanning nodig. Als de FC een hogere spanning kan leveren, kan het toerental verder worden verhoogd. Dit resulteert in een hoger vermogen bij een constant koppel. Wanneer de spanning een bovengrens heeft bereikt, komt de motor in het veldverzwakkinggebied. Werking in het veldverzwakkinggebied is alleen mogelijk met hiervoor geschikte frequentieomvormers. Motormechanica en -isolatie moeten het hogere toerental ondersteunen en bestand zijn tegen de hogere spanning.

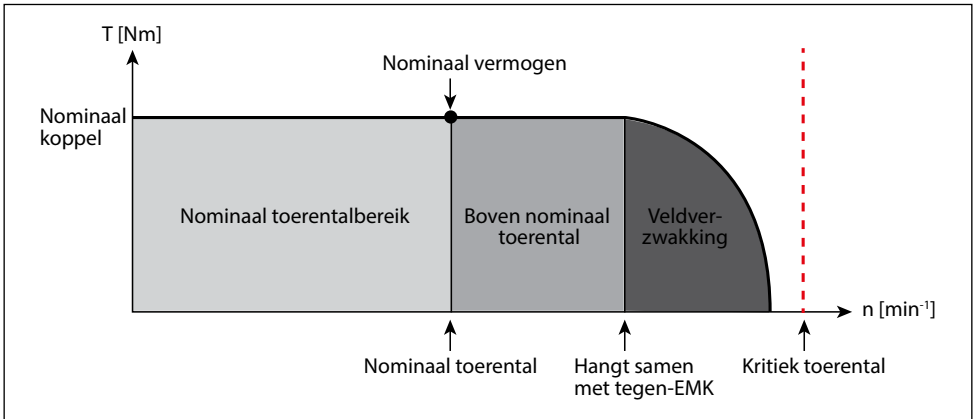


Fig. 1.25 Werking in veldverzwakkingsgebied

Het grootste risico van werking in veldverzwakkingsgebieden is uitschakeling van de motor bij een te hoog toerental, aangezien de hoge tegen-EMK de FC onherstelbaar kan beschadigen (zie sectie 1.4.1.1 Tegen-EMK).

Een andere mogelijkheid om het toerentalbereik te vergroten, is om de sterconfiguratie van een motor te wijzigen in een driehoekconfiguratie, als de motor deze optie biedt. Net als bij asynchroonmotoren resulteert een driehoekaansluiting in een hogere spanning op de wikkelingen, omdat de spanning niet wordt verlaagd met een factor 1,73 oftewel $\sqrt{3}$, zoals bij een sterconfiguratie.

1.4.2 Borstelloze DC-motoren (BLDC-motoren) of elektronischecommutatiemotoren (EC-motoren)

EC (elektronische commutatie) en BLDC (borstelloze DC) zijn in principe verschillende benamingen voor dezelfde technologie. In het oorspronkelijke BLDC-concept werden er slechts twee fasen bekrachtigd met een trapeziumvormige spanning. In vergelijking met een verdeling over drie fasen resulteert dit in een stroom die 1,22 maal zo hoog is. Voor het bepalen van de rotorpositie worden Hall-sensoren gebruikt. Nadelen van het concept zijn grotere koppelrimpels en ijzerverliezen.

In de praktijk zijn er veel verschillende typen EC-motoren, zoals kleine servomotoren van enkele watts, maar ook uitvoeringen voor gebouwautomatisering met een vermogen tot ongeveer 10 kW. In het algemeen staat BLDC/EC bekend om een bijzonder hoog rendement. Deze reputatie is met name terecht bij bijzonder kleine apparaten – het oorspronkelijke toepassingsgebied van deze motoren – waar de universeel- en spleetpoolmotoren (rendement circa 30%) duidelijk worden overtroffen. Boven enkele honderden watt is het rendement vergelijkbaar met dat van standaard PM-motoren.

Moderne EC/ECM-motoren maken gebruik van dezelfde besturingsprincipes als PM-motoren. Bij gebouwautomatisering worden EC-motoren vaak toegepast als naaf van EC-ventilatoren. Dit resulteert in een zeer compacte ventilatoreenheid met een bijzonder efficiënte motor. Helaas veroorzaakt de plaatsing van de motor in het midden van een centrifugaalventilator luchtwervelingen die het totale ventilatorrendement verlagen. Ten opzichte van een direct aangedreven ventilator kan het verschil bij hetzelfde motorrendement 3-6% bedragen.

1.4.3 Netstart-PM-motor (LSPM-motor)

Een netstart-PM-motor is een hybride van een kooiankermotor en een PM-motor waarbij de magneten intern in de rotor zijn geplaatst.



Fig. 1.26 De positie van magneten in de rotor beïnvloedt de motorkarakteristieken

Bij aansluiting op een driefasenet ontwikkelt de motor een koppel en versnelt hij zoals een standaard asynchroonmotor tot een bijna synchron toerental, mits het motorkoppel gedurende het versnellen groter is dan het belastingskoppel. Wanneer de rotor ongeveer het toerental van het draaiveld heeft bereikt, wordt een synchronisatiekoppel (reactiekoppel) geproduceerd vanwege de magnetische koppeling tussen het draaiende statorveld en de rotorpolen, waardoor de rotor synchron gaat draaien.

Na de synchronisatie blijft de motor op het synchrone toerental lopen. Omdat er geen verschil is tussen de toerentalen van het magnetische veld en de rotor, worden er in de kooi geen stromen opgewekt. Dit resulteert in een hoog rendement en een goede arbeidsfactor. Bij een wijziging van de belasting werkt de kooi nog steeds als demper. Dit is ook het geval als de motor wordt gestuurd door een FC, waarbij de extra demper het rendement met zo'n 5-10% kan verlagen.

Als de motor wordt belast met een koppel dat hoger is dan het synchrone kippkoppel, werkt hij niet langer synchron en werkt hij verder als een asynchroonmotor met een belastingafhankelijk toerental. Afhankelijk van het ontwerp is de motor meer of minder gevoelig voor onderspanningssituaties, die er eveneens voor kunnen zorgen dat de motor niet langer synchron loopt. Hernieuwde synchronisatie vindt automatisch plaats wanneer het belastingskoppel lager is dan het synchronisatiekoppel. De rotor zal echter stilvallen als de motor wordt belast met een koppel dat hoger is dan het inductiekippkoppel.

Een nadeel van het concept is de invloed van de magneten bij het starten van de motor. Tijdens het opstarten treden koppeloscillaties en koppelpeken op, in combinatie met ruis. Bovendien is het startkoppel lager in vergelijking met een asynchroonmotor, aangezien de magneten een negatieve koppelcomponent (1) creëren.

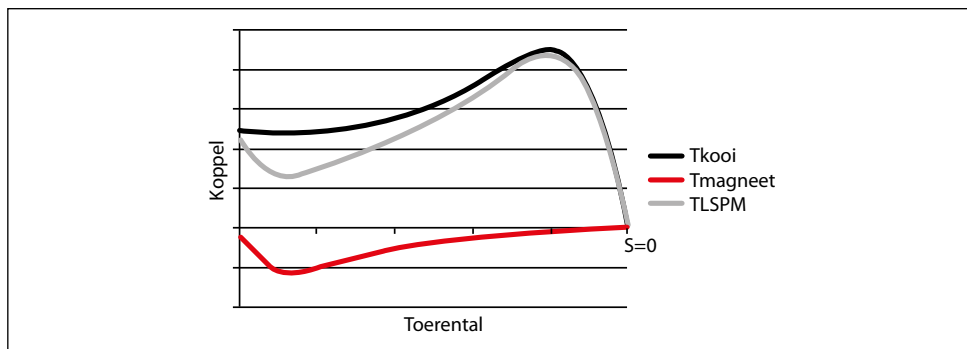


Fig. 1.27 Startkoppel van LSPM wordt verlaagd in vergelijking met een zuiver kooiankerkoppel

LSPM-motoren worden typisch gebruikt in ventilatoren en pompen, beschikbaar in het vermogensbereik tot zo'n 10 kW, maar kunnen ook worden gebruikt in toepassingen met een lage massastraagheid.

1.4.4 Reluctantiemotoren

Om motorbeweging te creëren, maken deze typen motoren gebruik van magnetische reluctantie, ook wel aangeduid als magnetische weerstand. Net als bij elektrische schakelingen volgt de magnetische flux het pad met de laagste weerstand. Net als bij asynchroonmotoren wordt het magnetische veld opgewekt door een geschikte spanning te schakelen op de statorwikkelingen. De rotor draait naar de positie met minimale magnetische reluctantie. Als de rotor nu uit deze positie wordt geforceerd, wordt er een koppel geproduceerd om de rotor terug te brengen naar de positie waar de reluctantie minimaal is. Het koppel dat door de magnetomotorische kracht wordt geproduceerd, hangt af van de relatie tussen de inductanties in de d-as en de q-as, die bekendstaat als de saliency ratio.

De saliency ratio wordt rechtstreeks bepaald door het ontwerp van het rotorblikpakket. Uitsnijdingen in het blikpakket worden gebruikt om de equivalente luchtspleet van de machine te vormen door regeling van de fluxpaden. Ze beïnvloeden ook hoe de inductanties van de d-as en de q-as variëren met de magnetiseringsstroom. Omdat deze uitsparingen de equivalente luchtspleet vergroten, is er een hogere magnetiseringsstroom nodig, wat leidt tot een slechtere $\cos \phi$. Zoals in Fig. 1.28 "Maximale arbeidsfactor t.o. saliency ratio" wordt getoond, hangt de maximale arbeidsfactor af van de L_d/L_q -verhouding. Hoe hoger de verhouding, hoe beter de $\cos \phi$. Moderne rotorontwerpen hebben een verhouding in het bereik van 4 tot 10.

(1) Bron – 2014 J Sorgdrage, A.J Grobler and R-J Wang, Design procedure of a line-start permanent magnet synchronous machine.

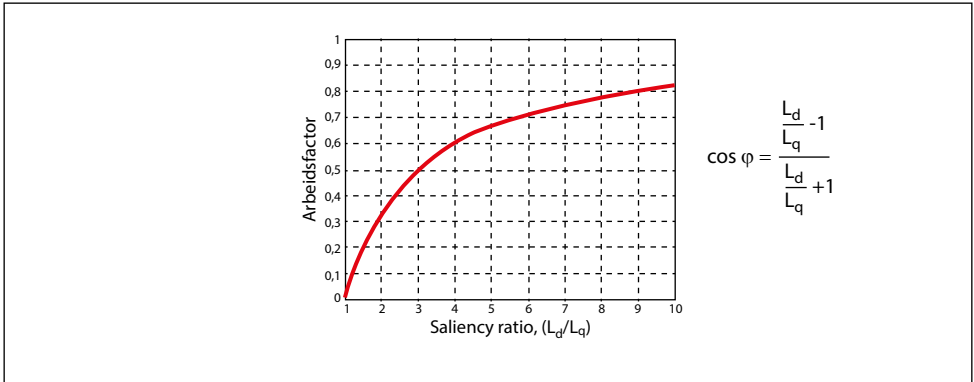


Fig. 1.28 Maximale arbeidsfactor t.o. saliency ratio

Hoewel bij reluctantiemotoren een hogere $\cos \varphi$ wenselijk is, is het energierendement redelijk hoog. Verliezen in de rotor ontstaan vooral door harmonischen in de luchtspleet tussen stator en rotor.

Het reluctantieprincipe werd voor het eerst toegepast rond 1840. In de loop der tijd hebben diverse optimalisaties geleid tot uiteenlopende motorprincipes en -ontwerpen. In de volgende paragrafen worden de drie meest gangbare typen reluctantiemotoren besproken.

1.4.5 Synchrone reluctantiemotor met kooianker

De stator van deze driefasereluctantiemotor is identiek aan die van een standaard kooiankermotor. Het rotorontwerp is aangepast door de wikkelingen te verwijderen en poolopeningen uit te snijden op de omtrek van de gelamelleerde rotorkern. De openingen worden weer opgevuld met aluminium en de spoelkoppen worden kortgesloten.

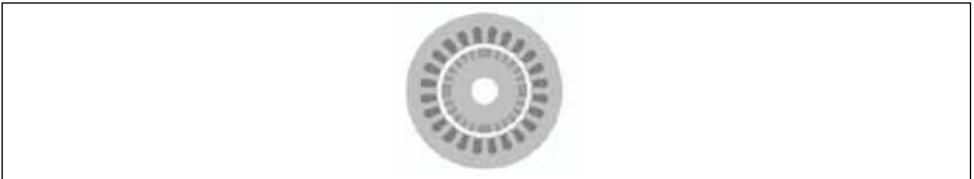


Fig. 1.29 Rotor met poolopeningen op de omtrek in de stator geplaatst

Net als bij een LSPM-motorontwerp (zie sectie 1.4.3 Netstart-PM-motor (LSPM-motor)) versnelt de motor bij aansluiting op een driefasenet tot nabij het synchrone toerental, mits het geproduceerde koppel voldoende is voor de belasting. Wanneer het synchrone toerental bijna is bereikt, wordt de rotor gesynchroniseerd en loopt de motor met het synchrone toerental, ondanks het ontbreken van rotorbekrachtiging.

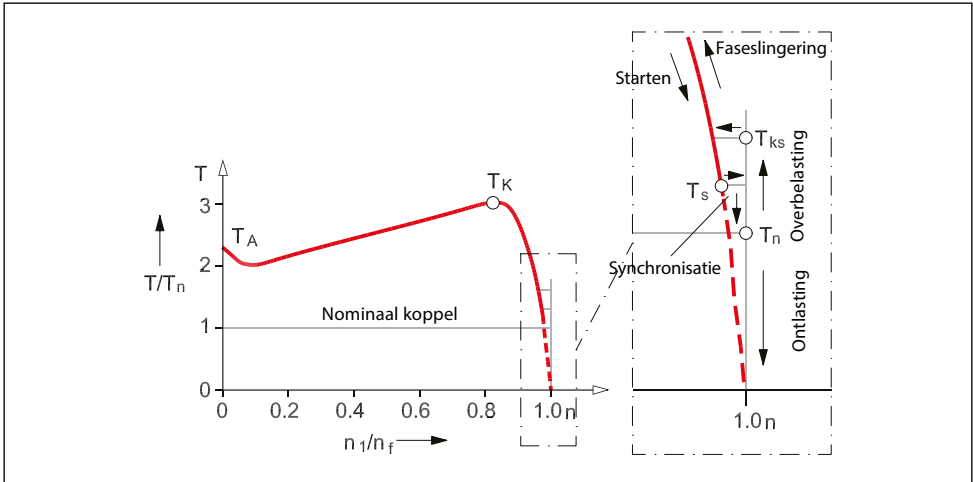


Fig. 1.30 Koppelkarakteristiek van een reluctantiemotor

Bij belasting loopt de rotor met uitspringende polen met de belastingshoek achter op het draaiveld van de stator. Ook nu is het gedrag vergelijkbaar met dat van LSPM wanneer het belastingskoppel te hoog wordt. De motor loopt niet meer synchroon, blijft werken als een asynchroommotor en wordt automatisch weer gesynchroniseerd wanneer het belastingskoppel lager wordt dan het synchronisatiekoppel.

Door de mogelijkheid om direct op lijn (DOL) te starten en met synchroon toerental te lopen is de motor interessant voor diverse toepassingen. Het vermogensbereik gaat vaak niet verder dan circa 10 kW. Het nadeel is een lager rendement, met name bij aandrijving door FC's, aangezien de rotorwikkelingen als extra demper werken.

1.4.6 Synchrone reluctantiemotor (SynRM)

Het ontwerp van een nieuwe generatie reluctantiemotoren is gericht op energierendement. Dit uiterst efficiënte motortype wordt vaak bedoeld wanneer men het heeft over synchrone reluctantiemotoren en moet niet worden verward met reluctantiemotoren die gericht zijn op een hoge koppeldichtheid of de mogelijkheid om op het net te starten. De efficiëntie is te danken aan het nieuwe rotorontwerp.



Fig. 1.31 Speciaal ontwerp rotorblikpakket leidt tot hoog rendement met lage koppelrimpels

De statorconstructie en de wikkelingen zijn vergelijkbaar met die van een asynchroonmotor. Door een geschikte spanning te schakelen op de gedistribueerde wikkelingen, wordt een harmonischenveld opgewekt dat lage harmonische verliezen veroorzaakt. Ook het ontwerp van de rotor is geoptimaliseerd om harmonische verliezen te beperken en om te werken met lage koppelrimpels.

Omdat de motor niet direct op het net kan starten, is het gebruik van een frequentieregelaar nodig om de motor te regelen. Om de uitsparingen in het rotorblikpakket te magnetiseren, is een hoger schijnbaar vermogen nodig dan voor een asynchroonmotor (zie sectie 1.4.4 Reluctantiemotoren). Als de omvormer en de condensatoren in de tussenkring correct gedimensioneerd zijn, zullen deze de extra schijnbare stroom leveren. In dat geval wordt het net niet belast met het hogere schijnbare vermogen en de lagere $\cos \varphi$.

Om de motor te kunnen aandrijven, moet de FC de rotorhoek kennen. Afhankelijk van de hoek zal de omvormer de verschillende wikkelingen bekrachtigen. Het bepalen van de rotorhoek wordt vaak sensorloos uitgevoerd zonder aanvullend apparaat. Om een energie-efficiënte regeling te realiseren, moet de omvormer tijdens bedrijf ook het gedrag van L_d en L_q regelen.

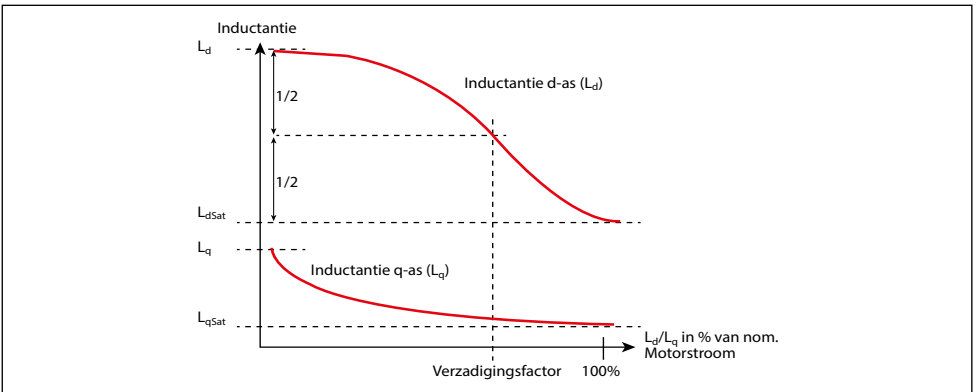


Fig. 1.32 Voorbeeld van relatie tussen L_d/L_q en I_d/I_q

De inductantiecomponenten van de SynRM-rotor veranderen afhankelijk van de belasting, vanwege verzadigingseffecten. Daarom zijn de afzonderlijke inductanties L_d en L_q afhankelijk van stroom I_d en I_q ($L_d(I_d, I_q)$ en $L_q(I_d, I_q)$). Als hiermee rekening wordt gehouden, is een uiterst energie-efficiënte werking van de motor mogelijk. Boven een bepaald vermogensbereik biedt de efficiëntie in deellast voordelen ten opzichte van andere concepten.

Decennia lang waren asynchroonmotoren de standaard, terwijl andere technologieën enkel in specifieke marktsegmenten werden gebruikt. De trend richting energie-efficiëntere motoren en de mogelijkheden die FC's bieden, hebben geleid tot innovatieve technologieën zoals de verbeterde SynRM. Meer verbeteringen en optimalisaties zijn in ontwikkeling.

1.4.7 Geschakelde reluctantiemotor (SRM)

De constructie van de stator lijkt veel op die van gelijkstroommotoren wegens het gebruik van concentrische wikkelingen. Dit kan leiden tot een compacte behuizing. Het ontwerp van het rotorblikpakket heeft een zeer duidelijke vorm met een lage massa-traagheid, waarbij het aantal polen eenvoudig kan worden geteld. Hoewel bij tweepolige motoren de rotorpolen zijn uitgelijnd met de statorpolen, wijkt de poolverhouding meestal af. Dit principe is ook toegepast bij andere motortypen maar is overduidelijk bij geschakelde reluctantiemotoren.

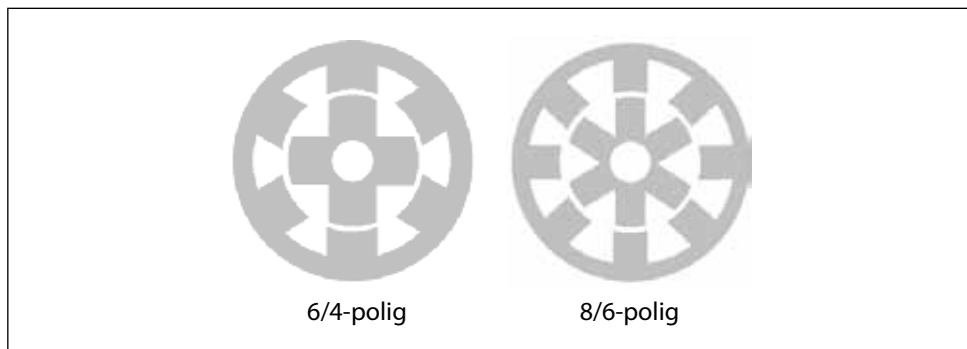


Fig. 1.33 Configuratievoorbeelden geschakelde reluctantiemotor

Om de motor te laten werken, is een geschikte regelaar nodig die de statorspoelen op geavanceerde wijze bekrachtigt. De fasen worden een voor een bekrachtigd. Wanneer de spoelen van een fase van spanning worden voorzien, ontstaat er een flux door de statorpolen en de rotor, waardoor de rotor in beweging komt. Nadat de rotor in beweging is gekomen, wordt de spanning op de volgende fase geschakeld, enzovoort.

Het is niet mogelijk om de motor direct op het net te starten. Het ontwerp staat een aanloopkoppel van 100% voor onbepaalde tijd toe en biedt zelfs bij deellastbedrijf een hoog rendement. De dubbel uitspringende constructie in rotor en stator is uiterst robuust maar leidt meestal tot hoge koppelrimpels en lage dynamiek met meer geluid.

2 Frequentieomvormers

Sinds eind jaren '60 is de FC in rap tempo ontwikkeld. Er is aanzienlijke voortgang geboekt dankzij ontwikkelingen op met name het gebied van microprocessor- en halfgeleider-technologie en de daarmee gepaard gaande prijsverlaging. De basisprincipes van de FC zijn echter ongewijzigd.

Zoals in de inleiding is aangegeven, is de belangrijkste functie van een FC het genereren van een variabele voeding (bijvoorbeeld 0 tot 400 V en 0 tot 50 Hz) op basis van een voeding met "vaste" parameters (bijvoorbeeld 400 V en 50 Hz). Er zijn twee benaderingswijzen om deze conversie uit te voeren, wat tot uiting komt in twee typen FC's: directe omvormers en omvormers met tussenkring.

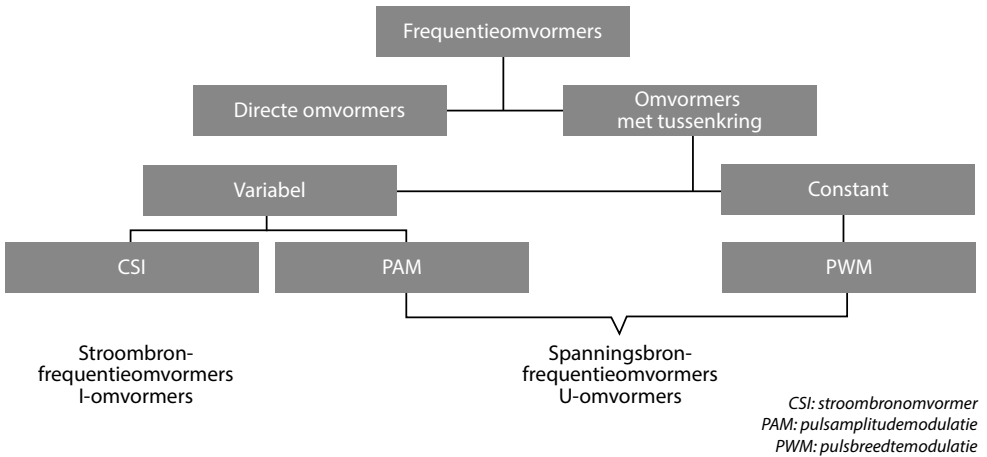


Fig. 2.1 Overzicht van frequentieomvormertypen

2.1 Directe omvormers

De directe omvormer voert de conversie uit zonder tussentijdse opslag.

Directe omvormers worden over het algemeen enkel gebruikt in hoogvermogen-toepassingen (Megawatt-bereik). Dit boek gaat niet uitgebreid in op dit type omvormer, maar er zijn wel diverse functies die het vermelden waard zijn.

Directe omvormers hebben de volgende kenmerken:

- Een beperkt frequentieregelbereik (ongeveer 25 tot 30 Hz) bij een netfrequentie van 50 Hz.
- Vaak gebruikt in combinatie met synchroonmotoren.
- Geschikt voor toepassingen met strikte eisen ten aanzien van dynamische prestaties.

2.2 Omvormers met tussenkring

In de meeste gevallen is de FC uitgerust met een tussenkring. Een andere term voor tussenkring is "DC-bus". Binnen de groep omvormers met tussenkring zijn er twee subtypen:

- constante tussenkring
- variabele tussenkring

FC's met een tussenkring kunnen worden opgesplitst in vier hoofdcomponenten, zoals aangegeven in Fig. 2.2 "Blok-schema van een frequentieomvormer met tussenkring".

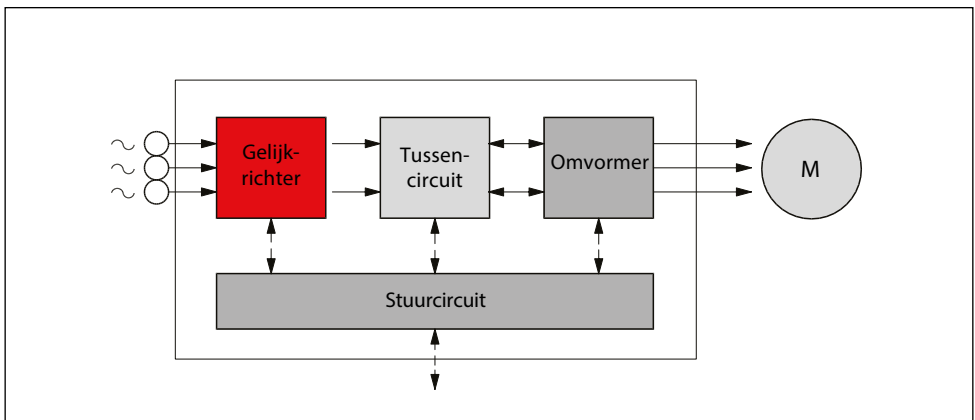


Fig. 2.2. Blokschema van een frequentieomvormer met tussenkring

Gelijkrichter

De gelijkrichter is aangesloten op een eenfase- of driefasenetvoeding en genereert een pulserende gelijkspanning. Er zijn vier basistypen gelijkrichters, zoals aangegeven in Fig. 2.3 "Topologie hoofdcomponenten":

- gestuurd
- halfgestuurd
- ongestuurd
- active front-end

Tussenkring

De tussenkring kan op verschillende manieren werken, zoals aangegeven in Fig. 2.3 "Topologieën hoofdcomponenten – tussenkring", en heeft meerdere functies:

- Omzetten van de spanning na de gelijkrichter in een gelijkspanning
- Stabilisatie of afvlakken van de pulserende gelijkspanning om deze beschikbaar te maken voor de omvormer

Omvormer

Omzetten van de constante gelijkspanning van de gelijkrichter in een variabele wisselspanning. De omvormer genereert de frequentie van de motorspanning. Bepaalde omvormers zijn daarnaast echter ook in staat om de constante DC-spanning om te zetten in een variabele AC-spanning. Zie Fig. 2.3 "Topologie hoofdcomponenten – omvormer".

Stuurcircuit

Het stuurcircuit zendt signalen naar – en ontvangt signalen van – de gelijkrichter, de tussenkring en de omvormer. Het ontwerp van de specifieke FC bepaalt welke onderdelen worden aangestuurd.

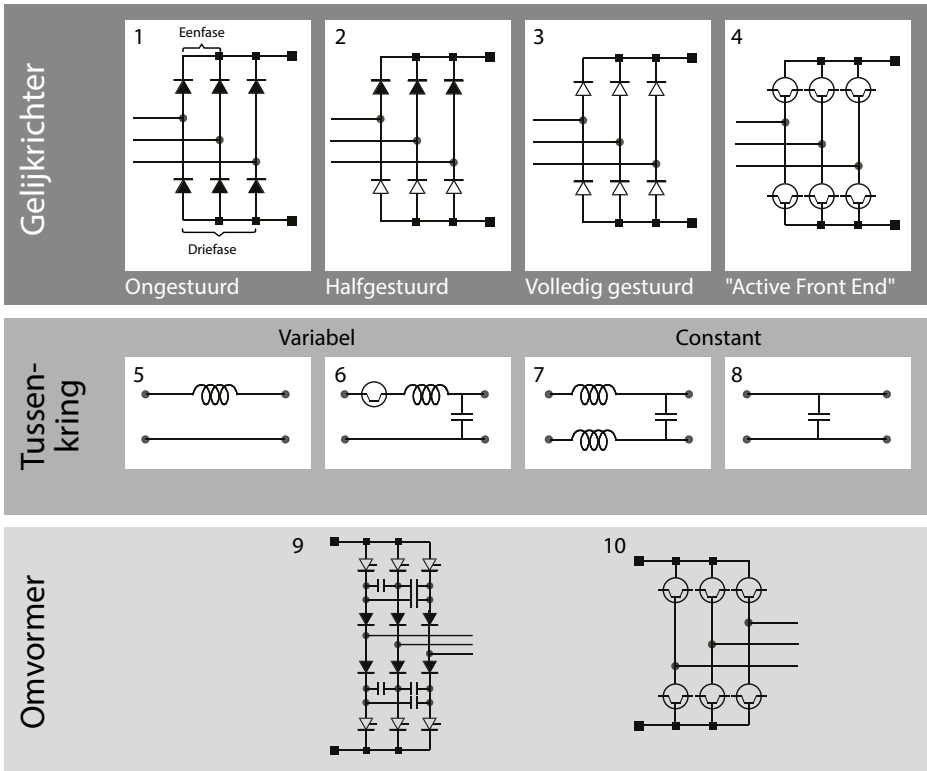


Fig. 2.3 Topologie hoofdcomponenten

Bij de configuratie van de FC moet een keuze worden gemaakt uit verschillende hoofdcomponenten. Zie tabel 2.1 "Configuratievoorbeelden frequentieomvormer".

Configuratievoorbeeld	Afkorting	Configuratie: Verwijzing naar componenten in Fig. 2.3
Pulsamplitudegemoduleerde omvormer	PAM	(1 of 2 of 3) en 6 en (9 of 10)
Pulsbreedtegemoduleerde omvormer	PWM	(1 of 2 of 3 of 4) en (7 of 8) en (9 of 10)
Stroombronvormer	CSI	3, 5 en 9

Tabel 2.1 Configuratievoorbeelden frequentieomvormer

Wat alle FC's gemeenschappelijk hebben, is dat het stuurcircuit signalen gebruikt om de halfgeleiders van de omvormer in en uit te schakelen. Het schakelpatroon is gebaseerd op diverse principes. FC's kunnen verder worden onderverdeeld in typen op basis van het schakelpatroon dat de voedingsspanning naar de motor regelt.

2.3 Gelijkrichter

Afhankelijk van het betreffende vermogen levert de voeding een driefasewisselspanning of een eenfasewisselspanning met een vaste frequentie.

Bijvoorbeeld:

Driefasewisselspanning: 3 x 400 V/50 Hz

Eenfasewisselspanning: 1 x 240 V/50 Hz

De gelijkrichter van een FC bestaat uit diodes of thyristoren, of een combinatie van beide, of bipolaire transistoren (IGBT's).

Fig. 2.3 "Topologie hoofdcomponenten" toont de vier verschillende gelijkrichtingsmethoden die tegenwoordig beschikbaar zijn. Bij laagvermogen toepassingen (tot 30 kW, afhankelijk van de fabrikant) worden meestal ongestuurde B6-bruggelijkrichters gebruikt. Halfgestuurde gelijkrichters worden gebruikt in het vermogensbereik vanaf 37 kW.

De gelijkrichtercircuits die hierboven zijn beschreven, laten de energie in slechts één richting door, namelijk van de voeding naar de tussenkring.

2.3.1 Ongestuurde gelijkrichters

Ongestuurde gelijkrichters bestaan uit diodes, zoals aangegeven in Fig. 2.4 “Werking van diodes”.

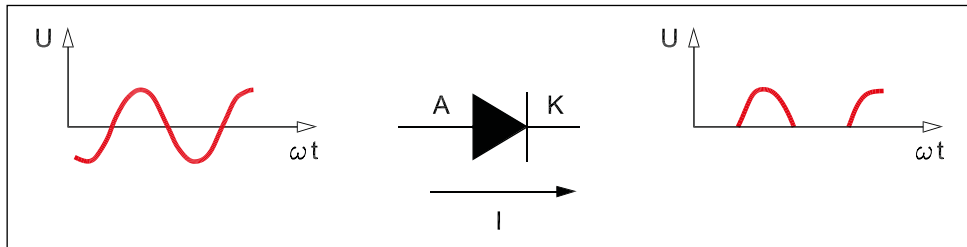


Fig. 2.4 Werking van diodes

Een diode laat de stroom in slechts één richting door: van de anode (A) naar de kathode (K). De stroom wordt geblokkeerd als deze van de kathode naar de anode wil gaan. Het is niet mogelijk om de stroomsterkte te regelen, zoals het geval is bij bepaalde andere halfgeleiders. Een wisselspanning over een diode wordt omgezet in een pulserende gelijkspanning. Als een driefasewisselspanning naar een ongestuurde driefasegelijkrichter wordt gevoerd, zal de gelijkspanning continu pulseren.

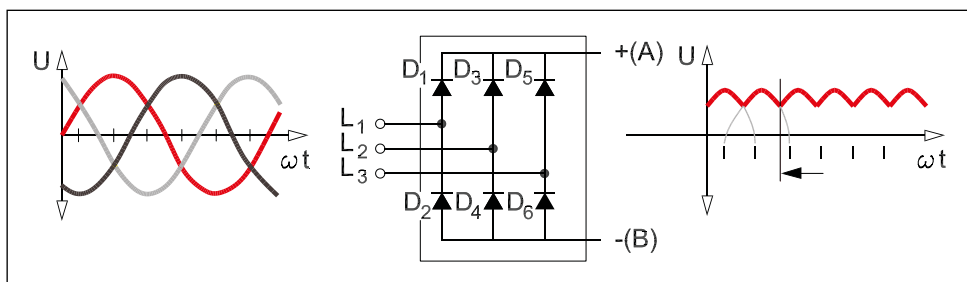


Fig. 2.5 Ongestuurde gelijkrichter (B6-diodebrug)

Fig. 2.5 “Ongestuurde gelijkrichter (B6-diodebrug)” toont een ongestuurde driefasegelijkrichter bestaande uit twee groepen diodes. De ene groep bestaat uit de diodes D_1 , D_3 en D_5 . De andere groep bestaat uit de diodes D_4 , D_6 en D_2 . Elke diode geleidt gedurende een derde van periode T (120°).

In beide groepen geleiden de diodes na elkaar. De perioden dat beide groepen geleiden, zijn ten opzichte van elkaar verschoven met een zesde van periode T (60°). Diodegroep $D_{1,3,5}$ geleidt de positieve spanning. Wanneer de spanning van fase L_1 de positieve piekwaarde bereikt, neemt klem (A) de waarde van fase L_1 aan. Over de andere twee diodes zijn sperspanningen met magnitude U_{L1-2} en U_{L1-3} aanwezig.

Hetzelfde principe geldt voor diodegroep $D_{4,6,2}$. Hier neemt klem (B) de negatieve fasespanning aan. Als L_3 op een gegeven moment de negatieve drempelwaarde bereikt, geleidt diode D_6 .

De andere twee diodes zijn onderhevig aan sperspanningen van magnitude U_{L3-1} en U_{L3-2} .

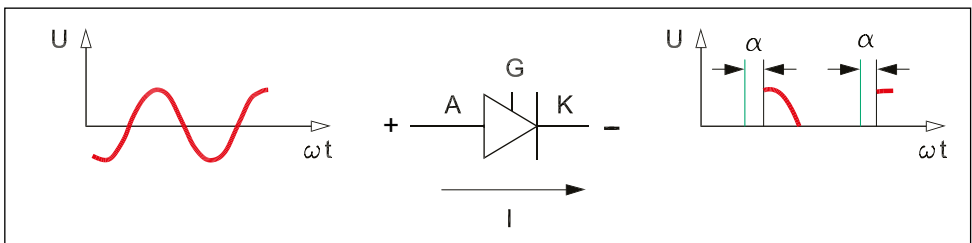
De DC-uitgangsspanning van de ongestuurde gelijkrichter is constant en is gelijk aan het verschil in spanning tussen de twee diodegroepen. De gemiddelde waarde van de pulserende gelijkspanning is ongeveer 1,31 tot 1,41 maal de netspanning met een driefasevoeding of ongeveer 0,9 tot 1,2 maal de gelijkspanning in geval van een eenfasevoeding.

De stroomopname van de diodes is niet-sinusvormig. Daarom veroorzaken ongestuurde gelijkrichters interferentie via het net. Om dit tegen te gaan, worden steeds vaker FC's met B12- en B18-gelijkrichters gebruikt. B12- en B18-gelijkrichters bevatten respectievelijk 12 en 18 diodes, ingedeeld in groepen van 6.

2.3.2 Halfgestuurde gelijkrichters

Bij halfgestuurde gelijkrichters neemt een thyristorgroep de plaats in van een van de diodegroepen (bijvoorbeeld $D_{4,6,2}$, zoals aangegeven in Fig. 2.5 "Ongestuurde gelijkrichter (B6-diodebrug)". De thyristoren worden ook wel siliciumthyristoren of gestuurde halfgeleidergelijkrichters (SCR – silicon controlled rectifiers) genoemd. SCR's zijn ook te vinden in veel elektronietoepassingen, met name voor vermogensregeling.

Door de ontstekingstijd van de thyristoren te sturen, is het mogelijk om de inschakelstroom van de eenheden te begrenzen en een soft-charge van de condensatoren in de tussenkring te realiseren. De uitgangsspanning van deze gelijkrichters is identiek aan de spanning die wordt geproduceerd door ongestuurde gelijkrichters. Halfgestuurde gelijkrichters zijn veelal te vinden in FC's met een vermogensklasse van 37 kW en hoger.



Afb. 2.6 Werking van thyristoren

In Fig. 2.6 “Werking van thyristoren” ziet u hoe het thyristorcircuit als gelijkrichter werkt wanneer α tussen 0° en 90° ligt. Wanneer α een waarde tussen 90° en 300° heeft, werkt het thyristorcircuit als omvormer.

2.3.3 Volledig gestuurde gelijkrichters

Volledig gestuurde gelijkrichters maken gebruik van thyristoren. Net als een diode staat een thyristor enkel een stroom vanaf de anode (A) naar de kathode (K) toe. Het verschil is echter dat de thyristor een derde klem heeft, die bekendstaat als de poort (G). Wanneer de poort door een signaal wordt geactiveerd, zal de thyristor geleiden. Als er eenmaal stroom door de thyristor gaat lopen, blijft de thyristor geleiden totdat de stroom terugvalt naar nul. De stroom kan niet worden onderbroken door een signaal naar de poort te zenden.

Thyristoren worden gebruikt in gelijkrichters. Het signaal dat naar de poort wordt verzonden, staat bekend als het α -stuursignaal van de thyristor. α is een vertraging die wordt uitgedrukt in graden. De graadwaarde geeft de vertraging aan tussen de nuldoorgang van de spanning en het moment waarop de thyristor wordt geactiveerd.

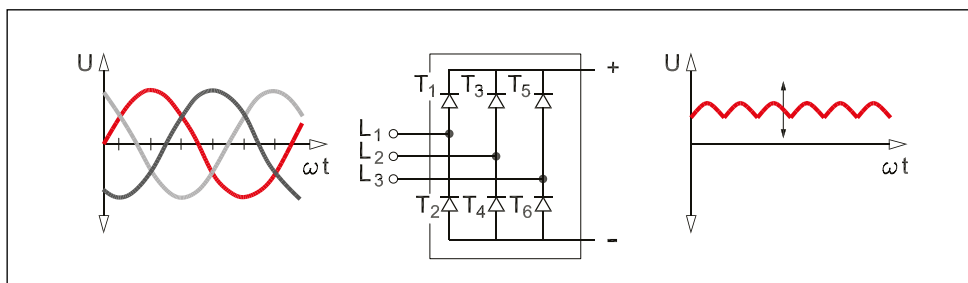


Fig. 2.7 Volledig gestuurde driefasegelijkrichter

Volledig gestuurde driefasegelijkrichters kunnen worden opgedeeld in twee groepen thyristoren: T1, T3 en T5 enerzijds en T4, T6 en T2 anderzijds. Bij volledig gestuurde gelijkrichters wordt α berekend vanaf het moment dat de overeenkomstige diode in een ongestuurde gelijkrichter normaal gesproken zou beginnen met geleiden, dat wil zeggen 30° nadat de spanning de nul is gepasseerd. In alle andere opzichten gedragen gestuurde gelijkrichters zich als ongestuurde gelijkrichters.

De amplitude van de gelijkgerichte spanning kan worden gevarieerd door α te regelen. Volledig gestuurde gelijkrichters leveren een gelijkspanning met een gemiddelde waarde U , waarbij

$$U = 1,35 \times \text{netspanning} \times \cos \alpha.$$

In vergelijking met ongestuurde gelijkrichters veroorzaken volledig gestuurde gelijkrichters aanzienlijke verliezen en verstoringen in het voedingsnet, omdat ze een hoge reactieve stroom opnemen wanneer de thyristoren gedurende korte tijd geleiden. Dit is een van de redenen waarom thyristoren voornamelijk worden gebruikt in het omvormerdeel van de FC. Volledig gestuurde gelijkrichters bieden echter het voordeel dat ze het mogelijk maken om regeneratief remvermogen in de tussenkring terug te voeren naar het voedingsnet.

2.3.4 Active Front End/Active Infeed

Bij bepaalde FC-toepassingen werkt de motor soms als generator. In dergelijke gevallen kan de energiebalans worden verbeterd door energie terug te voeren naar het voedingsnet.

Dergelijke FC's hebben een gestuurde (actieve) gelijkrichter nodig die energie terug laat stromen. Daarom worden deze apparaten Active Front End (AFE) of Active Infeed Converters (AIC) genoemd. Voorwaarde voor het terugvoeren van energie naar het voedingsnet is dat het spanningsniveau in de tussenkring hoger is dan de netspanning. Deze hogere spanning moet onder alle bedrijfscondities worden gehandhaafd. Er zijn diverse strategieën beschikbaar om de verliezen tijdens stand-by en motorwerking te beperken, maar geen van deze oplossingen kan deze verliezen volledig elimineren. In de generatormodus is aanvullende filtering nodig omdat de opgewekte spanning zonder filtering niet aansluit op de sinusgolfvorm van het voedingsnet.

2.4 Tussenkring

Afhankelijk van het ontwerp kan de tussenkring de volgende functies hebben:

- Werken als een energiebuffer zodat de motor energie kan opnemen van/energie kan terugvoeren naar het net via de omvormer en intermitterende belastingspieken kan opvangen.
- De gelijkrichter ontkoppelen van de omvormer.
- Netstoringen beperken.

De tussenkring is gebaseerd op een van vier verschillende basiscircuits die zijn aangegeven in Fig. 2.3 "Topologie hoofdcomponenten". Welk type tussenkring er wordt gebruikt, hangt af van het type gelijkrichter en omvormer waarmee de tussenkring moet worden gecombineerd.

De basisverschillen tussen de diverse typen tussencircuits worden besproken in de volgende secties.

2.4.1 Variabele tussenkring

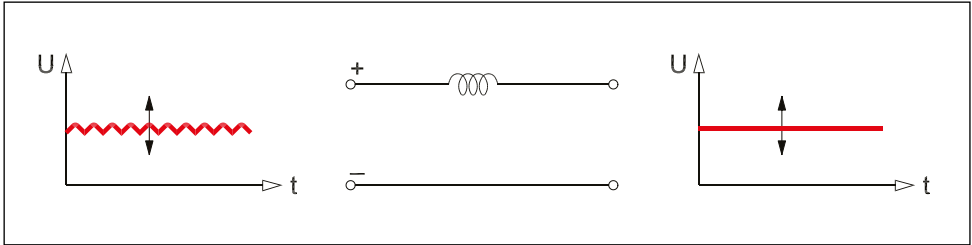


Fig. 2.8 Variabele DC-tussenkring

Dit type tussenkring bestaat uit een zeer grote inductiespoel, ook wel reactor genoemd, en wordt gecombineerd met een volledig gestuurde gelijkrichter zoals aangegeven in Fig. 2.3 “Topologie hoofdcomponenten” – deel 5 en Fig. 2.8 “Variabele DC-tussenkring”.

De inductiespoel zet de variabele spanning uit de volledig gestuurde gelijkrichter om in een variabele gelijkspanning. De belasting bepaalt de hoogte van de motorspanning. Het voordeel van dit type tussenkring is dat de remenergie van de motor kan worden teruggevoerd naar het voedingsnet zonder dat hiervoor extra componenten nodig zijn. De inductiespoel wordt gebruikt in stroomgestuurde FC's (I-omvormers).

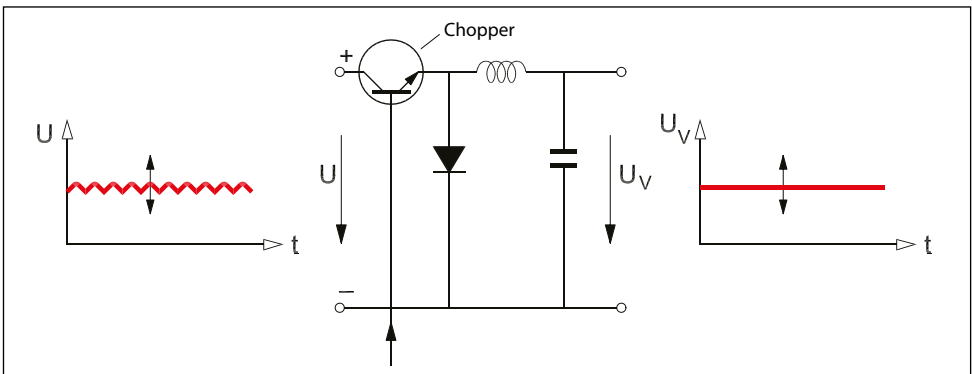


Fig. 2.9 Tussenkring met variabele gelijkspanning

Tot slot kan er vóór een filter een chopper worden geplaatst, zoals aangegeven in Fig. 2.9 “Tussenkring met variabele gelijkspanning”. De chopper bevat een transistor die werkt als een schakelaar voor het in- en uitschakelen van de gelijkgerichte spanning. Het stuurcircuit regelt de chopper door de variabele spanning na het filter (U_V) te vergelijken met het ingangssignaal.

Als er tussen de waarden een verschil bestaat, wordt de verhouding tussen tijd t_{aan} (wanneer de transistor geleidt) en tijd t_{uit} (wanneer de transistor spert) aangepast. Dit maakt het mogelijk om de effectieve waarde van de gelijkspanning te variëren op basis van de tijd dat de transistor geleidt. Deze waarde kan worden uitgedrukt als:

$$U_v = U \times \frac{t_{uit}}{t_{aan} + t_{uit}}$$

Wanneer de choppertransistor de stroom onderbreekt, probeert de filterspoel (of "reactor") een oneindig hoge spanning over de transistor te produceren. Om dit te voorkomen, is de chopper beveiligd met een vrijlooptiode, zoals aangegeven in Fig. 2.9 "Tussenkring met variabele gelijkspanning".

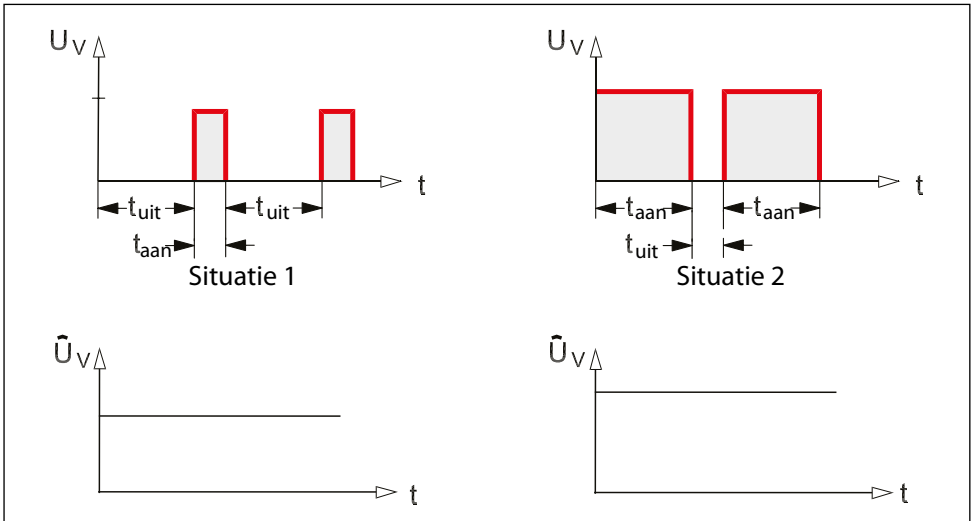


Fig. 2.10 Choppertransistor regelt de tussenkringspanning met de bijbehorende effectieve waarde

Het filter in de tussenkring vlakkt de blok golfstroom na de chopper af, terwijl de spanning bij een bepaalde frequentie constant wordt gehouden. De frequentie die bij de spanning hoort, wordt opgewekt in de omvormer.

2.4.2 Constante tussenkring

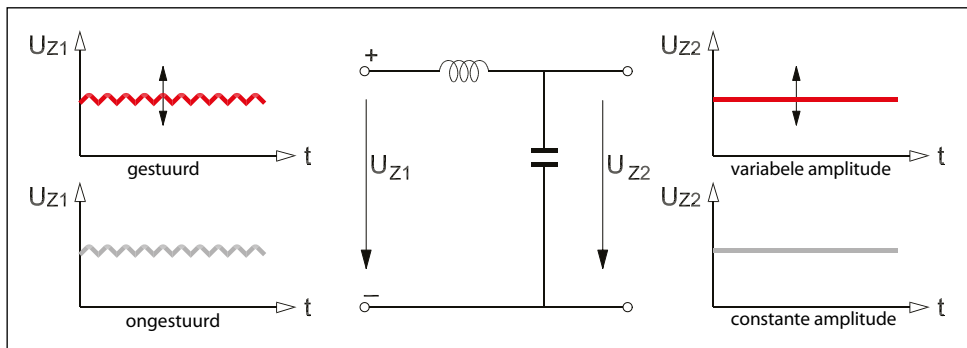


Fig. 2.11 Constante DC-tussenkring

De tussenkring kan bestaan uit een filter met een condensator en/of een inductiespoel (smoorspoel). Meestal worden er elektrolytische condensatoren gebruikt, vanwege hun hoge energiedichtheid. Hoewel condensatoren een beperkte levensduur hebben, bieden ze de volgende voordelen:

- Afvlakking van pulserende gelijkspanning (U_{Z1})
- Beschikbaarheid als energiereserve voor netspanningsdalingen
- Beschikbaarheid voor energieopslag voor belastingspieken en generatorwerking van de motor

DC-smoorspoelen bieden de volgende voordelen:

- De FC wordt beveiligd tegen nettransiënten
- Afvlakking van stroomrimpels, wat leidt tot een langere levensduur van de componenten van de tussenkring, met name de condensatoren
- Beperking van netstoringen en het mogelijke gebruik van kleinere dwarsdoorsneden van voedingsgeleiders. Deze functie kan ook worden geïmplementeerd met behulp van netsmoorspoelen stroomopwaarts van de FC.

Houd er bij het plannen van een installatie rekening mee dat de inductoren zwaar zijn en warm kunnen worden. Er kunnen hotspots ontstaan.

Dit type tussenkring is te combineren met diverse typen gelijkrichters. In geval van volledig gestuurde gelijkrichters wordt de spanning constant gehouden bij een bepaalde frequentie. Dit betekent dat de spanning die aan de omvormer wordt geleverd, een zuivere gelijkspanning (U_{Z2}) met een variabele amplitude is.

Bij halfgestuurde of ongestuurde gelijkrichters is de spanning op de omvormeringang een gelijkspanning met een constante amplitude (ongeveer $\sqrt{2}$ maal de netspanning). De verwachte spanning en frequentie worden beide geproduceerd in de omvormer.

De afgelopen jaren hebben fabrikanten tussenkringen zonder condensatoren en inductoren (smoorspoelen) ontwikkeld. Dit wordt in het algemeen aangeduid als een "condensatorloze" of "slanke" tussenkring. Het stuurcircuit regelt de gelijkrichting van de voedingsspanning zodanig dat lagere inschakelstromen mogelijk zijn en interferentie via het net kan worden beperkt tot waarden onder de 40% (vijfde harmonische). Dit levert de volgende kenmerken op:

- Lagere bouwkosten
- Geen laadcircuit vereist
- Compactere en lichtere constructie
- Gevoelig voor kortstondige spanningsdalingen in het netvoedingssysteem. (Dat wil zeggen dat de FC eerder wordt uitgeschakeld (trip) bij kortstondige spanningsdalingen, vanwege transiënten in het netvoedingssysteem).
- Interferentie naar het net in het hoge frequentiespectrum
- De toegenomen rimpel in de tussenkring verlaagt de uitgangsspanning met ongeveer 10% en resulteert in een hoger energieverbruik van de motor
- De herstarttijd voor normaal bedrijf kan langer zijn, vanwege drie processen die optreden:
 - Herinitialisatie van de FC
 - Magnetisering van de motor
 - Aanlopen tot de vereiste referentie voor de toepassing

2.5 Omvormer

De omvormer is de laatste van de hoofdelementen waaruit de FC bestaat. De omvormerprocessen vormen het laatste stadium als het gaat om het produceren van de uitgangsfrequentie en -spanning. Wanneer de motor direct op het net is aangesloten, zijn de ideale bedrijfscondities aanwezig op het nominale werkpunt.

De FC garandeert goede bedrijfscondities in het volledige toerentalbereik door de uitgangsspanning aan te passen aan de belastingscondities. Hierdoor is het mogelijk om de magnetisering van de motor op de optimale waarde te houden.

Vanuit de tussenkring krijgt de omvormer een van de volgende zaken:

- Variabele gelijkstroom
- Variabele DC-spanning
- Constante DC-spanning

In elk van deze gevallen moet de omvormer ervoor zorgen dat de voeding naar de motor een wisselspanning is. Met andere woorden, de frequentie van de motorspanning moet worden geproduceerd in de omvormer. De regelmethode van de omvormer is afhankelijk van het feit of de omvormer een variabele of een constante waarde ontvangt. In geval van een variabele stroom of spanning hoeft de omvormer enkel de bijbehorende frequentie te produceren. In geval van een constante spanning produceert de omvormer zowel de frequentie als de amplitude van de spanning.

Hoewel omvormers op verschillende manieren werken, is het basisontwerp altijd hetzelfde. De hoofdcomponenten zijn gestuurde halfgeleiders, die zijn ingedeeld in paren op drie aftakkingen, zoals aangegeven in Fig. 2.3 "Topologie hoofdcomponenten".

In plaats van thyristoren worden in het omvormerdeel van FC's steeds vaker transistoren toegepast. Daar zijn diverse goede redenen voor. Om te beginnen zijn transistoren nu beschikbaar voor hoge stromen, hoge spanningen en hoge schakelfrequenties. Bovendien worden transistoren, in tegenstelling tot thyristoren en diodes, niet beïnvloed door de nuldoorgang van de stroom. Transistoren kunnen op elk moment overgaan op geleiden of sperren door wijziging van de polariteit van de spanning die op de stuurklemmen wordt geschakeld. Door de vooruitgang die de afgelopen jaren is geboekt op het gebied van halfgeleiderstechnologie, is de schakelfrequentie van transistoren aanzienlijk verhoogd. De bovenste schakellimiet bedraagt nu enkele honderden kHz.

Hierdoor kan de door pulsmagnetisering in de motor veroorzaakte magnetische interferentie worden vermeden. Een ander voordeel van de hoge schakelfrequentie is dat deze een variabele modulatie van de uitgangsspanning van de FC mogelijk maakt. Dit betekent dat een sinusvormige motorstroom haalbaar is, zoals aangegeven in Fig. 2.12 "Effect van de schakelfrequentie op de motorstroom". Het stuurcircuit van de FC hoeft enkel de transistoren van de omvormer in en uit te schakelen volgens een geschikt patroon.

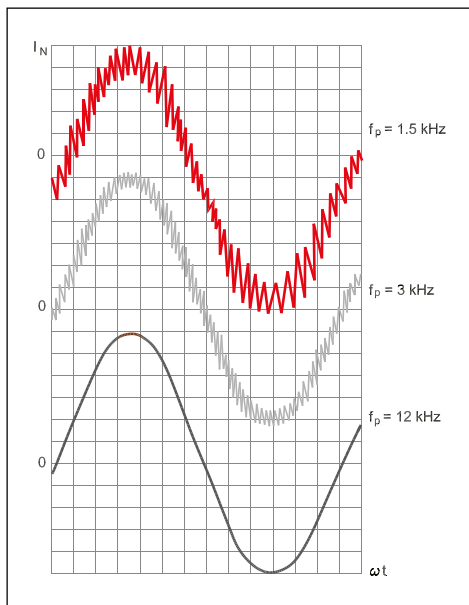





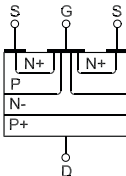
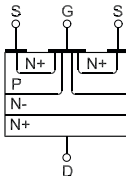
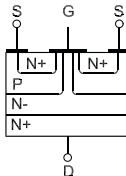
Fig. 2.12 Effect van de schakelfrequentie op de motorstroom

De keuze van de schakelfrequentie van de omvormer is een compromis tussen verliezen in de motor (sinusvorm van motorstroom) en verliezen in de omvormer. Als de schakelfrequentie toeneemt, nemen ook de verliezen in de omvormer toe, afhankelijk van het aantal halfgeleidercircuits.

Hoogfrequente transistoren zijn onder te verdelen in drie hoofdtypen:

- Bipolair (LTR)
- Unipolair (MOSFET)
- Bipolair met geïsoleerde poort (IGBT)

Tabel 2.2 Vergelijking van kenmerken vermogenstransistoren toont de belangrijkste verschillen tussen MOSFET-, IGBT- en LTR-transistoren.

Kenmerken	Halfgeleider		
	MOSFET	IGBT	LTR
Symbol			
Ontwerp			
Geleiding Elektrisch geleidingsvermogen Verliezen	Laag Hoog	Hoog Onbeduidend	Hoog Onbeduidend
Spercondities Hoge begrenzing	Laag	Hoog	Middel
Schakelcondities Inschakeltijd Uitschakeltijd Verliezen	Kort Kort Onbeduidend	Middel Middel Middel	Middel Laag Hoog
Stuurcondities Vermogen Driver	Middel Spanning	Middel Spanning	Hoog Stroom

Tabel 2.2 Vergelijking van kenmerken vermogenstransistoren

IGBT-transistoren zijn een goede keuze voor FC's wat betreft vermogensbereik, goede geleiding, hoge schakelfrequentie en eenvoudige regeling. Ze combineren de kenmerken van MOSFET-transistoren met de uitgangseigenschappen van bipolaire transistoren. De feitelijke schakelcomponenten en omvormerregeling worden gewoonlijk gecombineerd tot één module die een "intelligente vermogensmodule" (IPM – intelligent power module) wordt genoemd.

Een vrijloopdiode wordt parallel met elke transistor aangesloten, omdat hoge geïnduceerde spanningen kunnen optreden over de inductieve uitgangsbelasting. De diodes dwingen de motorstromen om in hun richting te blijven vloeien en beschermen de schakelcomponenten tegen opgelegde spanningen. Het blindvermogen dat de motor nodig heeft, wordt eveneens verwerkt door de vrijloopdiodes.

2.6 Modulatieprincipes

De halfgeleiders in de omvormer geleiden of sperren op basis van de signalen die door het stuurcircuit worden geproduceerd. De variabele spanningen en frequenties worden geproduceerd op basis van twee basisprincipes (modulatietypen):

- Pulsamplitudemodulatie (PAM)
- Pulsbreedtemodulatie (PWM)

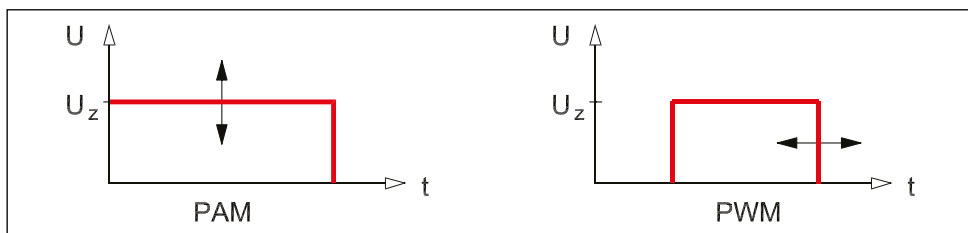


Fig. 2.13 Modulatie van amplitude en pulsbreedte

2.6.1 Pulsamplitudemodulatie (PAM)

PAM wordt gebruikt in FC's met een variabele tussenkringspanning of -stroom. In FC's met ongestuurde of halfgestuurde gelijkrichters wordt de amplitude van de uitgangsspanning gegenereerd door de chopper van de tussenkring, zoals aangegeven in Fig. 2.9 "Tussenkring met variabele gelijkspanning". In gevallen waarbij de gelijkrichter volledig gestuurd is, wordt de amplitude rechtstreeks gegenereerd. Dit betekent dat de uitgangsspanning voor de motor beschikbaar komt in de tussenkring.

De intervallen gedurende welke de afzonderlijke halfgeleiders aan of uit moeten zijn, worden opgeslagen in een patroon, en dit patroon wordt uitgelezen met een snelheid die afhankelijk is van de gewenste uitgangsfrequentie.

Dit schakelpatroon van de halfgeleiders wordt geregeld door de magnitude van de variabele spanning of stroom in de tussenkring. Bij gebruik van een spanninggestuurde oscillator volgt de frequentie altijd de amplitude van de spanning.

Het gebruik van PAM kan leiden tot minder motorruis en zeer geringe rendementsvoordelen in speciale toepassingen zoals snellopende motoren (10.000-100.000 tpm). Vaak weegt dit echter niet op tegen de nadelen, zoals hogere kosten voor de meer geavanceerde hardware en regelproblemen zoals hogere koppelrimpels bij lage toerentallen.

2.6.2 Pulsbreedtemodulatie (PWM)

PWM wordt gebruikt in FC's met een constante tussenkringspanning. Dit is de meest toegepaste en ontwikkelde methode. In vergelijking met PAM gelden er voor deze modulatiemethode lagere hardwarevereisten, zijn de regelprestaties bij lagere toerentallen beter, en kan er altijd een remweerstand worden gebruikt.

De motorspanning kan worden gevarieerd door de tussenkringspanning (DC) gedurende een bepaalde tijd op de motorwikkelingen te schakelen. De frequentie kan worden gevarieerd door de positieve en negatieve spanningspulsen voor de twee halve perioden te verschuiven langs de tijdsas.

Omdat de technologie de breedte van de spanningspulsen varieert, wordt hiervoor de benaming "pulsbreedtemodulatie" of PWM (pulse width modulation) gebruikt. Met behulp van conventionele PWM-technieken bepaalt het stuurcircuit de in- en uitschakeltijden van de halfgeleiders zodanig dat de motorspanning zo sinusvormig mogelijk wordt. Hierdoor kunnen de verliezen in de motorwikkelingen worden beperkt en wordt een soepele motorwerking verkregen, ook bij lage toerentallen.

De uitgangsfrequentie wordt gevarieerd door de motor gedurende bepaalde tijd op de halve tussenkringspanning aan te sluiten. De uitgangsspanning wordt gevarieerd door de spanningspulsen van de uitgangsklemmen van de FC op te delen in een reeks smallere afzonderlijke pulsen met pauzes ertussen. De puls-pauzeverhouding kan worden aangepast op basis van het vereiste spanningsniveau. Dit betekent dat de amplitude van de negatieve en positieve spanningspulsen altijd overeenkomt met de halve tussenkringspanning.

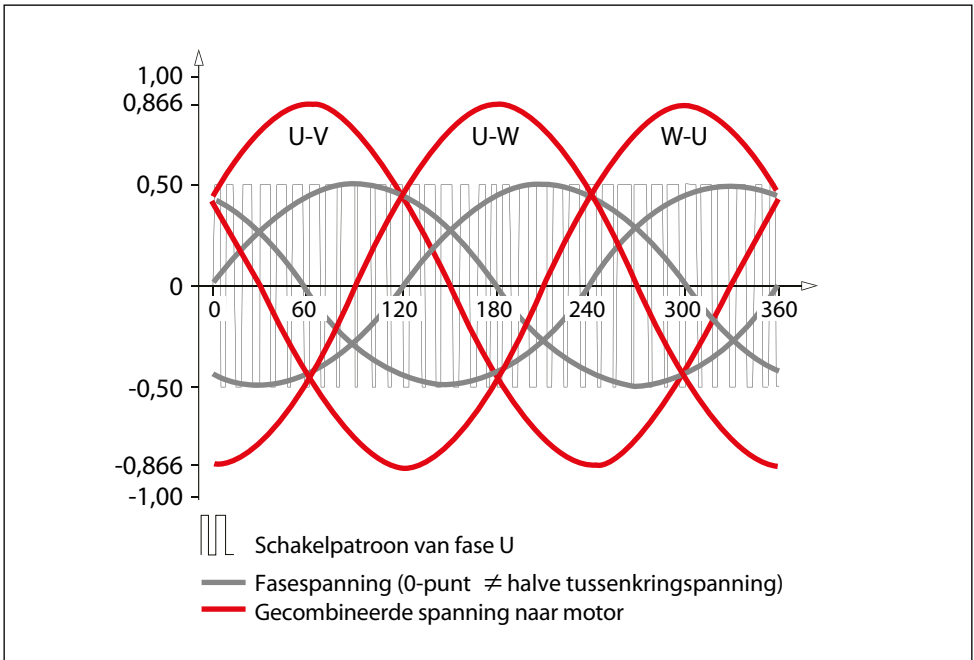


Fig. 2.14 PWM uitgangsspanning

Lage statorfrequenties leiden tot langere perioden. De periode kan zodanig worden verlengd dat het niet meer mogelijk is om de frequentie van de driehoekige signaalvorm te handhaven.

Hierdoor wordt de spanningsvrije periode te lang en gaat de motor onregelmatig lopen. Om dit te voorkomen, kan de frequentie van de driehoekige signaalvorm worden verdubbeld bij lage frequenties.

De lage schakelfrequentie leidt tot verhoging van de akoestische motorruis. Om de geproduceerde hoeveelheid ruis te beperken, kan de schakelfrequentie worden verhoogd. Dankzij de ontwikkelingen op het gebied van halfgeleider technologie is het nu mogelijk om een bijna sinusvormige uitgangsspanning te moduleren en een bijna sinusvormige stroom te genereren. Een PWM-FC die uitsluitend werkt met sinusvormige referentiemodulatie, kan tot 86,6% van de nominale spanning leveren (zie Fig. 2.14 "PWM uitgangsspanning").

De fasespanning op de uitgangsklemmen van de FC komt overeen met de halve tussenkringspanning gedeeld door $\sqrt{2}$, en is dus gelijk aan de halve spanning van het voedingsnet. De lijnspanning van de uitgangsklemmen komt overeen met $\sqrt{3}$ maal de fasespanning, oftewel 0,866 maal de spanning van het voedingsnet.

De uitgangsspanning van de FC kan niet gelijk zijn aan de motorspanning als een zuivere sinusvorm vereist is, aangezien de uitgangsspanning in dat geval zo'n 13% te laag zou zijn. De benodigde extra spanning kan echter worden verkregen door het aantal pulsen te verlagen op het moment dat de frequentie boven ongeveer 45 Hz komt. Het nadeel van deze methode is dat de spanning hierdoor stapsgewijs verandert en de motorstroom instabiel wordt. Als het aantal pulsen wordt verlaagd, neemt het aandeel van de harmonischen bij de FC-uitgang toe. Dit resulteert in grotere verliezen in de motor.

Een andere manier om het probleem aan te pakken, is om andere referentiespanningen te gebruiken in plaats van de drie sinusreferenties. Deze spanningen zouden elke golfvorm kunnen hebben, zoals trapeziumvormig of trapvormig.

Een referentiespanning die vaak wordt gebruikt, is er een die gebruikmaakt van de derde harmonische van de sinusreferentie. Door de amplitude van de sinusreferentie met 15,5% te vergroten en hier de derde harmonische aan toe te voegen, wordt voor de halfgeleiders van de omvormer een schakelpatroon gerealiseerd waarbij de uitgangsspanning van de FC toeneemt. Alle regelwaarden van de omvormer worden vanaf de stuurkaart verzonden, en de diverse referentiesignalen voor het bepalen van de schakeltijden worden opgeslagen in een tabel in het geheugen en vervolgens uitgelezen en verwerkt op basis van de referentiewaarde.

Er zijn andere manieren om de in- en uitschakeltijden van halfgeleiders te bepalen en te optimaliseren. De Danfoss VVC- en VVCplus-besturingsprincipes zijn gebaseerd op microprocessorberekeningen die de optimale schakeltijden voor de halfgeleiders van de omvormer bepalen.

De specificaties voor de rekensoftware voor de schakeltijden zijn fabrikantspecifiek en worden hier niet besproken.

Als er strengere eisen worden gesteld aan het instelbare toerentalbereik en soepele werking van de FC, dan moeten de PWM-schakeltijden worden bepaald door een extra digitale IC en kan niet worden volstaan met de microprocessor. Zo kan bijvoorbeeld een ASIC (Application Specific Integrated Circuit – toepassings specifieke geïntegreerde schakeling) de PWM-schakeltijden bepalen. In deze component is de beproefde kennis van de fabrikant geïmplementeerd. Ondertussen zijn de microprocessoren verantwoordelijk voor het uitvoeren van andere regeltaken.

2.6.3 Asynchrone PWM

Hieronder worden twee asynchrone PWM-methoden beschreven:

- SFAVM (Stator Flux Asynchrone Vectormodulatie)
- 60° AVM (Asynchrone Vectormodulatie)

Deze maken het mogelijk om de amplitude en hoek van de omvormerspanning stapsgewijs te wijzigen.

2.6.3.1 SFAVM

Stator Flux Asynchrone Vectormodulatie (SFAVM) is een ruimtevectormodulatiemethode die het mogelijk maakt om de omvormerspanning willekeurig, maar stapsgewijs, te wijzigen binnen de schakeltijd (oftewel asynchroon). Dit type modulatie is vooral bedoeld om de statorflux over het volledige spanningsbereik van de stator te handhaven, zonder koppelrimpels. Ten opzichte van de netvoeding zullen er bij een "standaard" PWM-voeding afwijkingen optreden in de statorfluxvectoramplitude en de fluxhoek. Deze afwijkingen zullen het draiveld (koppel) in de luchtspleet van de motor beïnvloeden en koppelrimpels veroorzaken. Het effect dat door de afwijking in amplitude wordt veroorzaakt, is te verwaarlozen en kan worden beperkt door de schakelfrequentie te verhogen. De afwijking in de hoek hangt af van de schakelreeks en kan leiden tot hogere koppelrimpels. Daarom moet de schakelreeks zodanig worden berekend dat de afwijking in de vectorhoek tot een minimum wordt beperkt.

Elke aftakking van een driefase-PWM-omvormer heeft twee schakelstanden, AAN en UIT, zoals aangegeven in Fig. 2.15 "Schakelstanden omvormer". De drie schakelaars voorzien in acht mogelijke schakelcombinaties, en daarmee in acht afzonderlijke spanningsvectoren op de uitgang van de omvormer of op de statorwikkeling van de aangesloten motor. Zoals hieronder te zien is, markeren deze vectoren (100, 110, 010, 011, 001, 101) de hoeken van een zeshoek, waarbij 000 en 111 nulvectoren zijn.

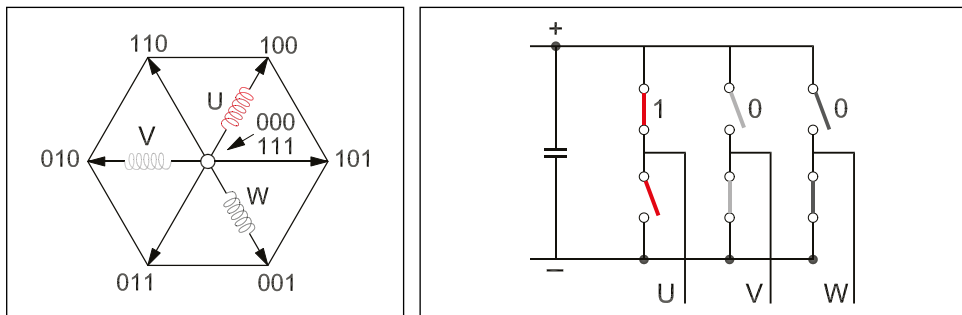


Fig. 2.15 Schakelstanden omvormer

Bij de schakelcombinaties 000 en 111 krijgen alle drie uitgangsklemmen van de omvormer dezelfde potentiaal. Dit is de positieve dan wel de negatieve potentiaal van de tussenkring, zoals aangegeven in Fig. 2.15 "Schakelstanden omvormer". Op de motor heeft dit hetzelfde effect als een kortsluiting op de klemmen; daarom wordt er op de motorwikkelingen een spanning van 0 V geschakeld.

Opwekken van de motorspanning

Bij stationair bedrijf moet de spanningsvector van de machine, U_{wt} , in een cirkelvormige baan worden geleid. De lengte van de spanningsvector is een maat voor de waarde van de motorspanning en het toerental van de spanningsvector komt overeen met de bedrijfsfrequentie op een specifiek moment. De motorspanning wordt opgewekt via korte pulsen op naastgelegen vectoren om een gemiddelde waarde te verkrijgen.

De Danfoss SFAVM-methode heeft onder meer de volgende kenmerken:

- De amplitude en hoek van de spanningsvector kunnen worden geregeld ten opzichte van de digitale referentie zonder dat er afwijkingen optreden.
- Het startpunt voor een schakelreeks is altijd 000 of 111. Hierdoor kan elke gegenereerde spanningsvector drie schakelstanden hebben.
- De spanningsvector wordt gemiddeld door middel van korte pulsen op aangrenzende vectoren en de nulvectoren 000 en 111.

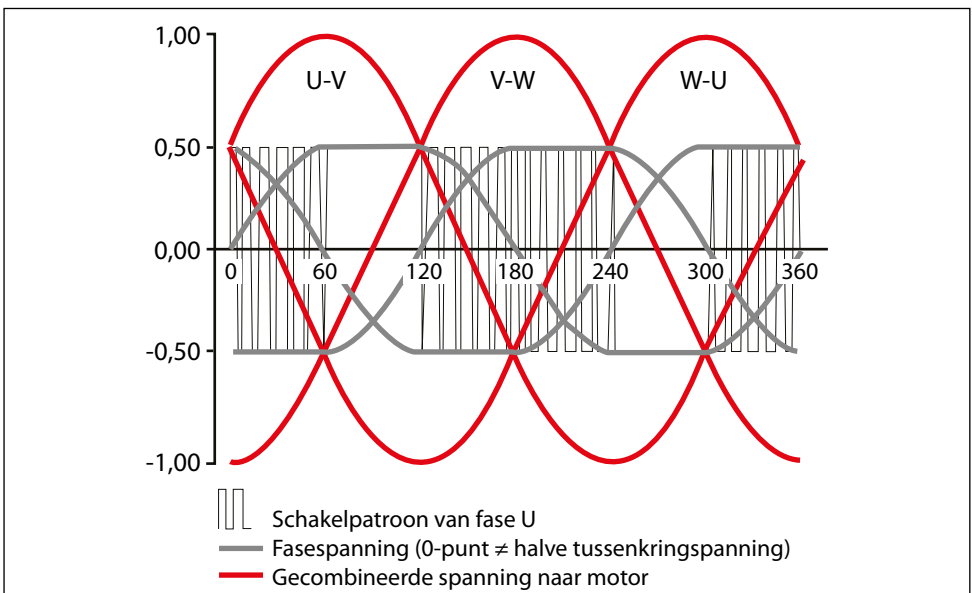


Fig. 2.16 Met het synchrone 60° PWM-principe wordt de volledige uitgangsspanning direct verkregen

SFAVM vormt een verbinding tussen het besturingssysteem en de vermogenskring van de omvormer. De modulatie loopt synchroon aan de stuurfrequentie van de regelaar en asynchroon aan de grondfrequentie van de motorspanning. Synchronisatie van besturing en modulatie vormt een voordeel voor hoogvermogenbesturing (zoals spanningsvector- of flux-vectorregeling), aangezien het besturingssysteem de spanning rechtstreeks en zonder beperkingen kan regelen. Amplitude, hoek en hoeksnelheid zijn regelbaar. Om de realtime rekentijd drastisch te verlagen, zijn de spanningswaarden voor verschillende hoeken in een tabel opgenomen. Fig. 2.17 "Uitgangsspanning (motor) – (fase-fase)" toont de motorspanning bij volle toeren.

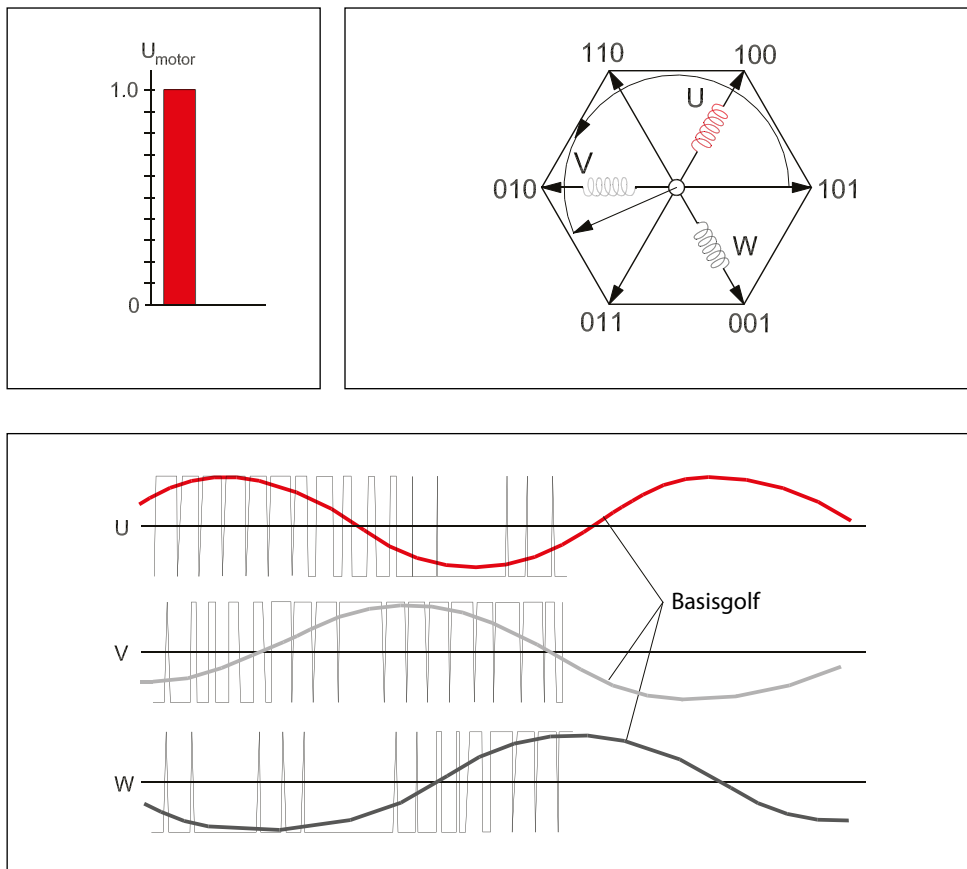


Fig. 2.17 *Uitgangsspanning (motor) – (fase-fase).*

2.6.3.2 60° AVM

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

- Binnen een bepaalde schakelperiode wordt slechts één nulvector (000 of 111) gebruikt.
- Als startpunt voor een schakelreeks wordt niet altijd een nulvector (000 of 111) gebruikt.
- Eén fase van de omvormer wordt gedurende 1/6 van de periode (60°) constant gehouden. De schakelstand (0 of 1) blijft gedurende dit interval ongewijzigd. In de andere twee fasen wordt er normaal geschakeld.

In Fig. 2.18 “Schakelreeks van de 60° AVM- en SFAVM-methode voor een aantal 60°-intervallen” en Fig. 2.19 “Schakelreeks van de 60° AVM- en SFAVM-methode voor meerdere perioden” wordt de schakelreeks van de 60° AVM-methode vergeleken met die van de SFAVM-methode – voor een kort interval (Fig. 2.18) en meerdere perioden (Fig. 2.19).

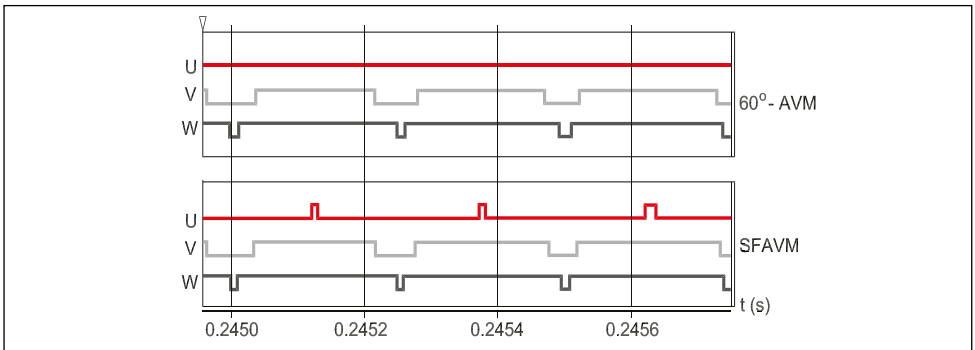


Fig. 2.18 Schakelreeks van de 60° AVM- en SFAVM-methode voor een aantal 60°-intervallen.

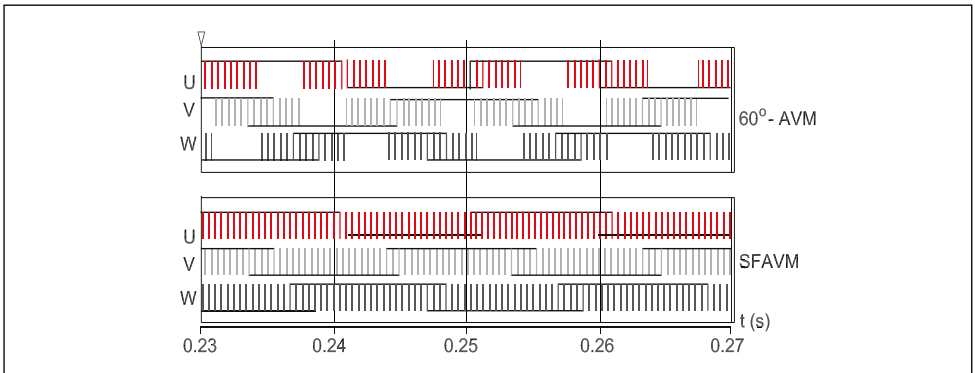


Fig. 2.19 Schakelreeks van de 60° AVM- en SFAVM-methode voor meerdere perioden

2.7 Stuurcircuit en methoden

Het stuurcircuit, of de stuurkaart, is de vierde hoofdcomponent van de FC. De drie hardwarecomponenten die tot nu toe zijn besproken (gelijkrichter, tussenkring en omvormer) zijn bijna altijd gebaseerd op dezelfde principes en componenten, ongeacht de fabrikant. In de meeste gevallen gaat het om standaardcomponenten die bijna altijd worden ingekocht bij dezelfde externe fabrikanten.

Dit geldt echter niet voor het ontwerp van het stuurcircuit. Dit is waar de fabrikant van de FC al zijn verworven kennis concentreert.

In principe heeft het stuurcircuit vier hoofdtaken:

- Het sturen van de halfgeleiders van de FC; de halfgeleiders bepalen de verwachte dynamische kenmerken of nauwkeurigheid
- Het uitwisselen van gegevens tussen de FC en randapparatuur (PLC's, encoders)
- Het meten, detecteren en weergeven van fouten, condities en waarschuwingen
- Het uitvoeren van beveiligingsfuncties voor de FC en de motor.

Op basis van microprocessortechnologie, met enkele of dubbele processoren, is het mogelijk om de snelheid van het stuurcircuit te verhogen met behulp van kant-en-klare pulspatronen die in het geheugen zijn opgeslagen. Dit betekent een aanzienlijke vermindering van het aantal benodigde berekeningen.

Bij dit type besturing is de processor in de FC geïntegreerd en altijd in staat om het optimale pulspatroon voor elke bedrijfsfase te bepalen. Er zijn diverse regelmethoden beschikbaar voor het bepalen van de dynamische kenmerken en responstijd in geval van een wijziging van referentie of koppel en de positioneringsnauwkeurigheid van de motoras.

In het algemeen kunnen de basisfuncties van een FC als volgt worden samengevat:

- Draaien en positioneren van de rotor
- Toerenregeling van de draaistroommotor, met of zonder terugkoppeling
- Koppelregeling van de draaistroommotor, met of zonder terugkoppeling
- Bewaking en signalering van bedrijfstoestanden

Bij het indelen (op basis van het type besturing) van de diverse spanningsbron-FC's die op de markt beschikbaar zijn, kunnen minstens zes verschillende typen worden onderscheiden:

- Eenvoudig (scalair) zonder compensatieregeling
- Scalair met compensatieregeling
- Ruimtevectorbesturing
- Fluxbesturing (veldgericht) zonder terugkoppeling
- Fluxbesturing (veldgericht) met terugkoppeling
- Servogestuurde systemen

Deze indeling wordt geïllustreerd in Fig. 2.20 “Besturingsklassen op basis van prestaties toerenregeling” en Fig. 2.21 “Besturingsklassen op basis van koppelprestaties”. Hier verwijst de responstijd naar de tijd die de FC nodig heeft om te berekenen hoe het signaal naar de uitgang moet worden gewijzigd wanneer het signaal op de ingang wijzigt. De motorkarakteristieken bepalen hoe lang het duurt om een respons op de motoras te registreren wanneer een ingangssignaal op de ingang van de FC wordt geschakeld.

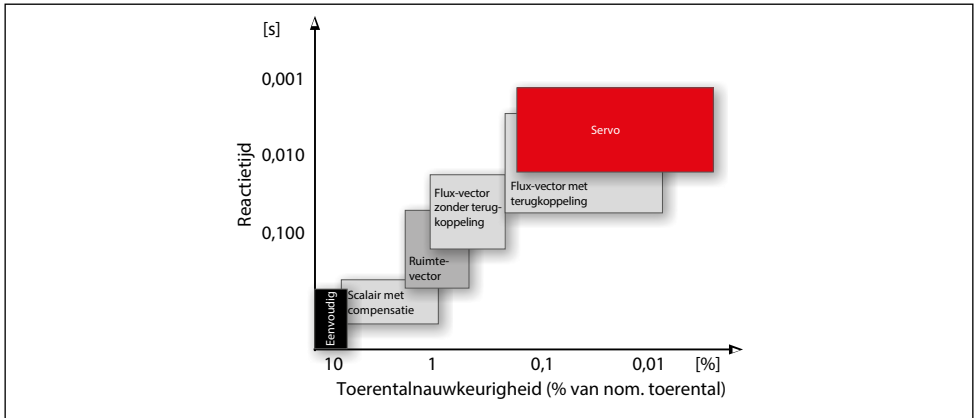


Fig. 2.20 Besturingsklassen op basis van prestaties toerenregeling

Het nominale motortoerental wordt gebruikt als de basis om de nauwkeurigheid van het toerental te bepalen. Het nominale motortoerental bedraagt 50 Hz in de meeste landen en 60 Hz in de VS. FC's kunnen worden ingedeeld op basis van de prijs-prestatieverhouding. Dat wil zeggen dat een FC die gebruikmaakt van een eenvoudige besturingsmethode voor het uitvoeren van zeer eenvoudige taken een beter financieel rendement oplevert dan een FC met een veldgeoriënteerde besturing.

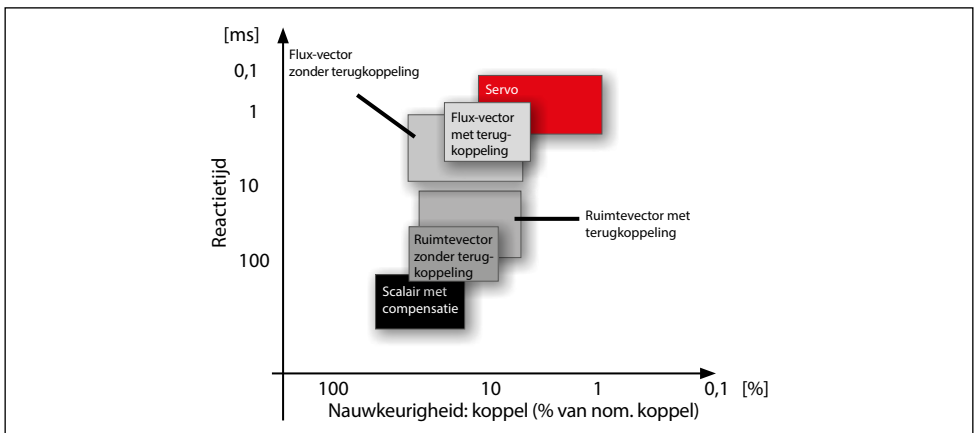


Fig. 2.21 Besturingsklassen op basis van koppelprestaties

De toerentalbereiken voor de diverse FC-typen zijn grofweg als volgt:

- Eenvoudig (scalair) zonder compensatie 1:15
- Scalair met compensatie 1:25
- Ruimtevector 1:100(0)
- Flux (veldgeoriënteerd) zonder terugkoppeling 1:1000
- Flux (veldgeoriënteerd) met terugkoppeling 1:10.000
- Servo 1:10.000

De koppelregelingsprestaties kunnen als volgt worden geclassificeerd:

- De reactietijd kan op dezelfde wijze worden gedefinieerd als voor toerenregeling
- De nauwkeurigheid wordt bepaald ten opzichte van het nominale koppel van de motor

Hierbij moet worden vermeld dat FC's die werken op basis van een eenvoudige besturingsmethode niet kunnen worden gebruikt voor een motorkoppelregeling met of zonder terugkoppeling.

2.7.1 Eenvoudige besturingsmethode

Dit type besturing wordt tegenwoordig zelden gebruikt. De besturing is in principe een vaste relatie tussen het gewenste motortoerental en een motorspanning. Het model kan in meer of mindere mate worden verfijnd, maar de belangrijkste nadelen zijn:

- instabiel motortoerental
- moeizame start van de motor
- geen motorbeveiliging

Het enige voordeel van een eenvoudige besturing zou de lage prijs kunnen zijn, maar aangezien de basiscomponenten voor motordetectie tamelijk goedkoop zijn, passen zeer weinig fabrikanten deze methode nog toe.

2.7.2 Scalair sturing met compensatie

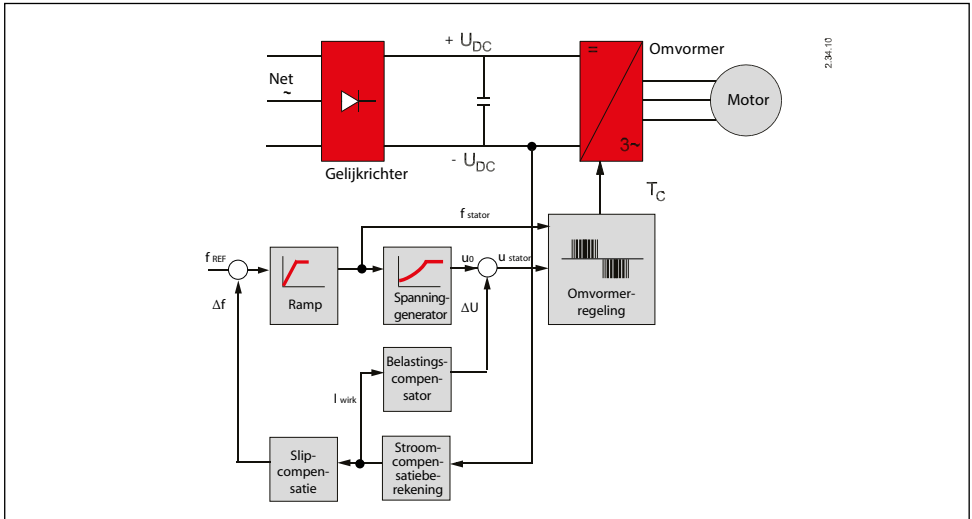


Fig. 2.22 Structuur scalair type frequentieomvormer met compensatie

Ten opzichte van een eenvoudige sturing voegt een FC met compensatie drie nieuwe besturingsfunctieblokken toe, zoals te zien is in Fig. 2.22 “Structuur scalair type frequentieomvormer met compensatie”.

De belastingscompensator gebruikt de stroommeting om de extra spanning (ΔU) te berekenen die nodig is om de belasting op de motoras te compenseren.

De stroom wordt meestal gemeten met behulp van een weerstand (shunt) in de tussenkring. Er wordt aangenomen dat het vermogen in de tussenkring gelijk is aan het vermogen dat door de motor wordt verbruikt. Als diverse actieve schakelposities worden gecombineerd, kunnen deze worden gebruikt om alle fasestroomgegevens te reconstrueren.

Basiskenmerken:

- Spanning/frequentie [U/f]-regeling met belastings- en slipcompensatie
- Regeling van spanningsamplitude en frequentie

Typisch asvermogen:

- Instelbaar toerentalbereik 1:25
- Nauwkeurigheid toerental $\pm 1\%$ van nominale frequentie
- Versnellingskoppel 40-90% van nominaal koppel
- Responstijd toerentalwijziging 200-500 ms
- Responstijd koppelregeling Niet beschikbaar

Typische kenmerken:

- Verbeterde stuurkenmerken ten opzichte van een eenvoudige scalaire sturing
- In staat om plotselinge veranderingen van de belasting op te vangen
- Geen extern terugkoppelingssignaal vereist
- Niet in staat om resonantieproblemen op te lossen
- Geen koppelregelingskenmerken
- Problemen bij het sturen van motoren met hoog vermogen
- Problemen bij veranderingen in de belasting in het lage toerentalbereik

2.7.3 Ruimtevector met of zonder terugkoppeling

De ruimtevectorbesturingsmethode is beschikbaar met of zonder externe terugkoppeling van het motortoerental. Aan de sturing wordt een functie toegevoegd (in de componenten die verantwoordelijk zijn voor magnetisering en een koppel producerende stroom) die een polaire transformatie van de motorstroom mogelijk maakt.

Behalve de spanning (U) en de frequentie (f) wordt ook de spanningshoek (θ) geregeld.

Basiskkenmerken:

- Spanningsvectorbesturing ten opzichte van karakteristieke waarden in stabiele toestand (statisch)

Typische kenmerken:

- Verbeterde dynamische prestaties ten opzichte van een scalaire sturing
- Zeer goed bestand tegen plotselinge wijzigingen in de belasting (ten opzichte van een scalaire sturing met compensatie)
- Werking op de stroomgrens
- Mogelijkheid voor actieve resonantiedemping
- Mogelijkheid voor koppelregeling met/zonder terugkoppeling
- Hoog start- en houdkoppel
- Problemen tijdens snel omkeren ten opzichte van flux-vector
- Geen "snelle" stroomregeling

2.7.3.1 Ruimtevector (zonder terugkoppeling)

Als de ruimtevector zonder externe terugkoppeling van het toerental werkt, worden het toerental en de positie door de besturingssoftware berekend op basis van gegevens over de motorstroom en motorfrequentie die worden gemeten (zie voorbeeld op pagina 74, Fig. 2.26 "Basisprincipes van Danfoss VVCplus-regeling").

Basiskenmerken:

- Spanningsvectorbesturing ten opzichte van karakteristieke waarden in stabiele toestand (statisch)

Typisch asvermogen:

- | | |
|--|-------------------------------------|
| • Instelbaar toerentalbereik | 1:100 |
| • Nauwkeurigheid toerental (stabiele toestand) | $\pm 0,5\%$ van nominale frequentie |
| • Versnellingskoppel | 80-130% van nominaal koppel |
| • Responstijd toerentalwijziging | 50-300 ms |
| • Responstijd koppelwijziging | 20-50 ms |

2.7.3.2 Ruimtevector (met terugkoppeling)

Voor de ruimtevectormethode met terugkoppeling is een encoder of ander apparaat vereist om het motortoerental of de motorpositie te detecteren. De besturingssoftware, de resolutie op de terugkoppelingsingang en de encoderresolutie bepalen de nauwkeurigheid van de motorregeling.

Typisch asvermogen:

- | | |
|--|--|
| • Instelbaar toerentalbereik | 1: 1000-10.000 |
| • Nauwkeurigheid toerental (stabiele toestand) | Afhankelijk van de resolutie van de gebruikte terugkoppelingscomponent |
| • Versnellingskoppel | 80-130% van nominaal koppel |
| • Responstijd toerentalwijziging | 50-300 ms |
| • Responstijd koppelwijziging | 20-50 ms |

2.7.4 Flux-vectorregeling met of zonder terugkoppeling

Een flux-vectorregeling wordt ook wel aangeduid als een veldgeoriënteerde regeling. De hierboven genoemde regelmethoden regelen de magnetische motorflux via de stator. Bij een veldgeoriënteerde regeling wordt de rotorflux rechtstreeks geregeld. Binnen deze context worden de volgende motorvariabelen geregeld:

- Toerental
- Koppel

Nadat de nominale gegevens van de motor zijn ingevoerd, kan een magnetisch fluxmodel worden gebruikt om de benodigde spanning en hoek te bepalen voor optimale motormagnetisering. De gemeten motorstroom wordt omgezet in een koppel genererende stroom en een magnetiseringsstroom. Een interne PID-regelaar is verantwoordelijk voor het regelen van het toerental, waarbij de terugkoppelingswaarde wordt geschat op basis van de gemeten motorstroom.

2.7.4.1 Flux-vector (zonder terugkoppeling)

Voor een fluxregeling is nauwkeurige informatie nodig over de conditie, temperatuur en rotorpositie van de motor. Het is een uitdaging om zonder terugkoppeling te werken terwijl de motorconditie wordt gesimuleerd. Het realiseren van optimale prestaties kan lastig zijn, met name bij lage motortoerentallen.

Typisch asvermogen:

- | | |
|--|--------------------------------|
| • Instelbaar toerentalbereik | 1:50 |
| • Nauwkeurigheid toerental (stabiele toestand) | ± 0,5% van nominale frequentie |
| • Versnellingskoppel | 100-150% van nominaal koppel |
| • Responstijd toerentalwijziging | 50-200 ms |
| • Responstijd koppelwijziging | 0,5-5 ms |

2.7.4.2 Flux-vector (met terugkoppeling)

Voor de flux-vectorbesturingsmethode met terugkoppeling is een encoder of vergelijkbare sensor nodig op de motoras. De besturingssoftware en de terugkoppelingsresolutie bepalen de nauwkeurigheid van de motorregeling.

De regeling wordt op exact dezelfde wijze uitgevoerd als bij methoden zonder terugkoppeling. In dit geval wordt het toerental echter niet geschat, maar berekend op basis van de encodersignalen. De flux-vectorregeling wordt geïllustreerd in Fig. 2.23 "Structuur flux-vectorregeling met terugkoppeling".

Typisch asvermogen:

- Instelbaar toerentalbereik 1:1000 tot 10.000
- Nauwkeurigheid toerental (stabele toestand) Afhankelijk van het gebruikte terugkoppelingssignaal (encoder)
- Versnellingskoppel 100-150% van nominaal koppel
- Responstijd toerenregeling 5,00-50 ms
- Responstijd koppelregeling 0,50-5 ms

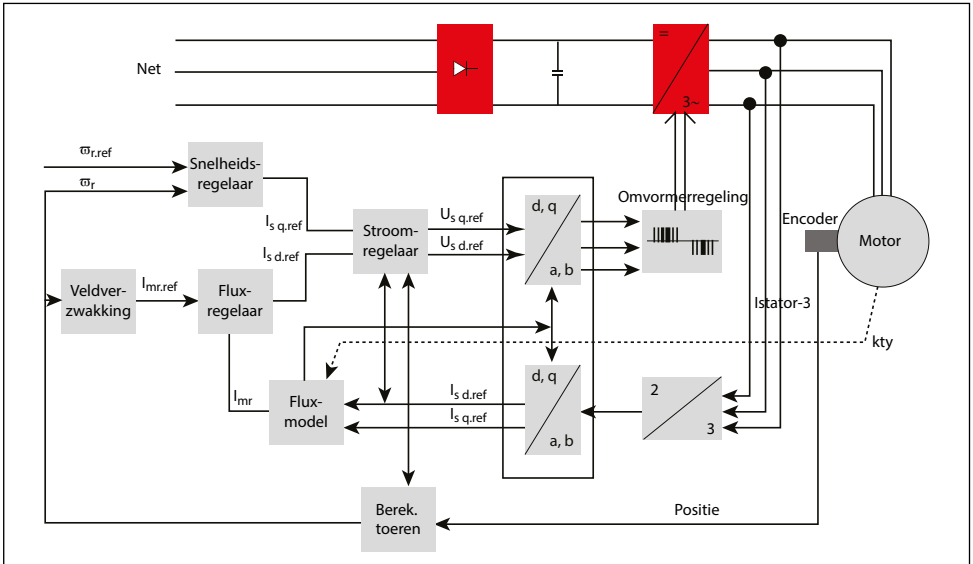


Fig. 2.23 Structuur flux-vectorregeling met terugkoppeling

2.7.5 Servo-omvormerregeling

De servo-omvormerregelingsmethode wordt hier niet uitgebreid besproken. Eén gangbare methode vertoont veel overeenkomsten met een fluxregeling met terugkoppeling, maar om een hoge dynamische respons te krijgen, kunnen de vermogenscomponenten en hardware worden opgewaardeerd tot twee, drie of zelfs vier maal de vermogenscomponenten in een FC om de beschikbaarheid van stroom en koppel te waarborgen.

2.7.6 Conclusies over regeling

Tot slot kunnen we stellen dat alle besturingsmethoden voornamelijk worden afgehandeld door de software. Hoe dynamischer de motorregeling moet zijn, hoe complexer het vereiste besturingsalgoritme.

Voor de inbedrijfstelling van een FC geldt een soortgelijk principe. Voor de inbedrijfstelling van een eenvoudige FC is niet veel programmering vereist. In de meeste gevallen hoeft u alleen de motorgegevens in te voeren. Voor toepassingen die een flux-vectorregeling vereisen of voor kritieke toepassingen zoals hijswerktuigen is bij de inbedrijfstelling een complexere programmering nodig.

Omdat de regeling vooral een kwestie van software is, hebben veel fabrikanten diverse besturingsmethoden in hun eenheden geïmplementeerd, zoals U/-, ruimtevector- of veldgeoriënteerde regeling. Om van de ene regelmethode over te schakelen op een andere, bijvoorbeeld van een ruimtevectorregeling naar een flux-vectormethode, zijn parameters nodig. Snelmenu's helpen de operator bij het instellen van de benodigde parameters voor elke besturingsmethode, om te kunnen voldoen aan de toepassingsvereisten.

2.8 Danfoss-besturingsprincipes

Een algemeen overzicht van de huidige standaard besturingsprincipes voor Danfoss frequentieomvormers is te zien in Fig. 2.24 "Basisprincipes van huidige standaard frequentieomvormers van Danfoss".

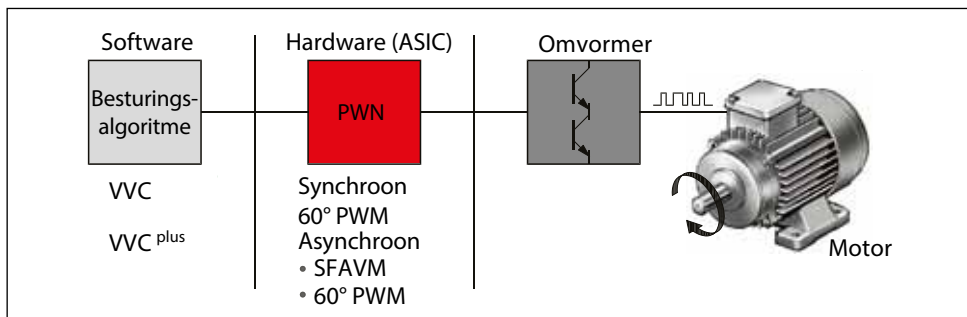


Fig. 2.24 Basisprincipes van huidige standaard frequentieomvormers van Danfoss

De PWM-schakelpatronen worden voor de omvormer berekend op basis van het geselecteerde besturingsalgoritme. Een U/f-regeling is geschikt voor alle toepassingen met

- speciale motoren (bijvoorbeeld schuifankermotoren);
- parallel aangesloten motoren.

Bij de hierboven genoemde toepassingen is geen compensatie van de motor vereist. Met het VVCplus-besturingsprincipe worden de amplitude en de hoek van de spanningsvector rechtstreeks bestuurd, net als de frequentie. De kern van deze methode wordt gevormd door een eenvoudig maar robuust motormodel. De betreffende besturingsmethode wordt Voltage Vector Control (VVC) genoemd.

Deze methode biedt onder meer de volgende kenmerken:

- Verbeterde dynamische eigenschappen in het lage toerentalbereik (0-10 Hz)
- Verbeterde motormagnetisering
- Bereik toerentalregeling: 1:100 met terugkoppeling
- Nauwkeurigheid toerental: $\pm 0,5\%$ van nominaal toerental zonder terugkoppeling
- Actieve resonantiedemping
- Koppelregeling
- Werking op de motorstroomgrens

2.8.1 Danfoss VVCplus-besturingsprincipe

Het VVCplus-besturingsprincipe van Danfoss gebruikt een vectormodulatiemethode voor PWM-omvormers met constante spanningsbron. Afhankelijk van de regelvereisten voor de toepassing kan het motorequivalentiediagram worden vereenvoudigd (d.w.z. dat de ijzer- koper- en luchtstromingsverliezen worden genegeerd) of in zijn volledige complexiteit worden gebruikt.

Voorbeeld:

Een eenvoudige ventilator- of pomptoepassing maakt gebruik van een vereenvoudigd motorschema. Een dynamische lifttoepassing waarvoor flux-vectorregeling nodig is, vereist echter een complex motorequivalentiediagram, waarbij in het besturingsalgoritme rekening wordt gehouden met alle verliezen.

Het schakelpatroon van de omvormer wordt berekend met behulp van het SFAVM-principe of het 60° AVM-principe, om koppelpulsaties in de lichtspleet zeer klein te houden. De gebruiker kan het gewenste werkingsprincipe selecteren of dit automatisch laten selecteren door de regeling, op basis van de temperatuur van het koellichaam. Bij een temperatuur onder 75 °C wordt voor de regeling het SFAVM-principe gebruikt. Bij temperaturen boven 75 °C wordt het 60° AVM-principe toegepast.

Het besturingsalgoritme houdt rekening met twee bedrijfscondities:

- Nullastbedrijf (stationaire toestand); zie Fig. 2.25a "Motorequivalentiediagram bij "nullast"". Bij nullastbedrijf is er geen belasting op de motoras. Bij transportbanden betekent nullastbedrijf letterlijk dat er geen producten worden getransporteerd. Er wordt simpelweg aangenomen dat de stroom die door de motor wordt opgenomen, enkel nodig is voor magnetisering en voor compensatie van verliezen. De actieve stroom wordt geacht bijna nul te zijn. De nullastspanning (U_L) wordt bepaald op basis van de motorgegevens (nominale spanning, stroom, frequentie, en nominaal toerental).

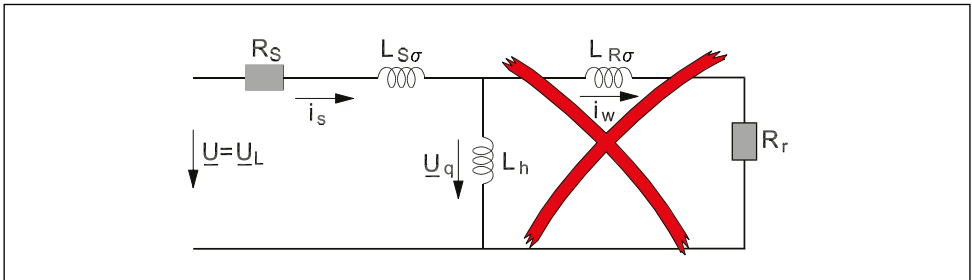


Fig. 2.25a Motorequivalentiediagram bij "nullast"

- Belast bedrijf
 De motoras wordt belast, wat impliceert dat er producten worden getransporteerd, zoals aangegeven in Fig. 2.25b "Motorequivalentiediagram bij "belasting"". De motor neemt meer stroom op wanneer hij wordt belast. Om het vereiste koppel te produceren, is de arbeidsstroom (I_w) nodig. Verliezen in de motor (met name in het lagere toerentalbereik) moeten worden gecompenseerd. Een belastingafhankelijke extra spanning (U_{Comp}) wordt beschikbaar gesteld aan de motor.

$$U = U_{LOAD} = U_L + U_{Comp}$$

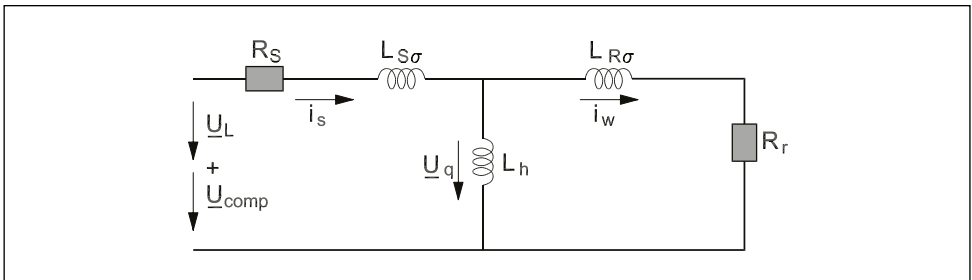


Fig. 2.25b Motorequivalentiediagram bij "belasting"

De extra spanning U_{Comp} wordt bepaald op basis van de stromen die bij de twee bovengenoemde condities (belast en onbelast) worden gemeten, en het toerentalbereik: laag of hoog toerental. De spanningswaarde en het toerental worden vervolgens bepaald op basis van de nominale motorgegevens.

Het besturingsprincipe wordt in het onderstaande blokschema geïllustreerd.

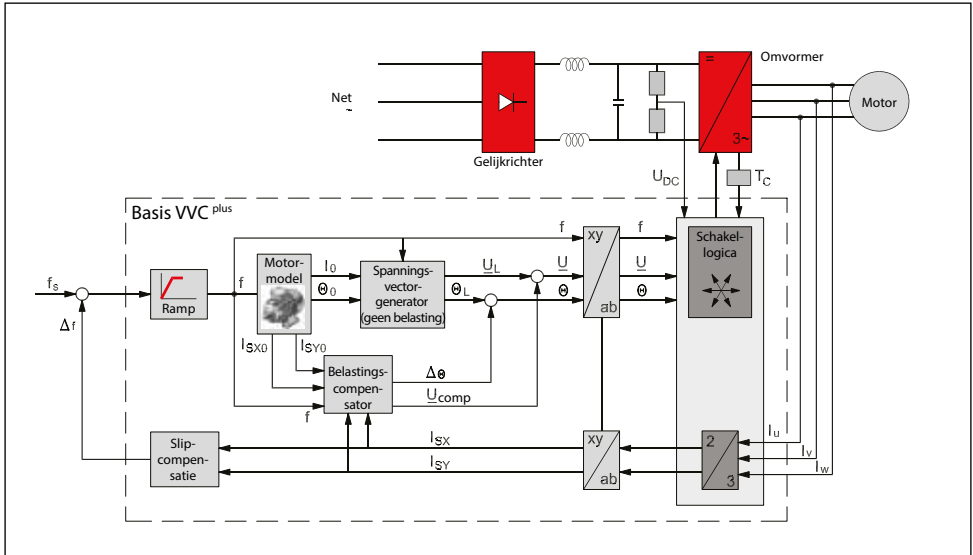


Fig. 2.26 Basisprincipes van Danfoss VVCplus-regeling

Zoals in Fig. 2.26 “Basisprincipes van Danfoss VVCplus-regeling” te zien is, berekent het motormodel de nullastreferenties (stromen en hoeken) voor de belastingscompensator (I_{SX} , I_{SY}) en de spanningsvectorgenerator (I_0 , θ_0).

De spanningsvectorgenerator berekent de nullastspanning (U_L) en de hoek (θ_L) van de spanningsvector op basis van de nullaststroom, statorweerstand en statorinductantie. De gemeten motorstromen (I_u , I_v en I_w) worden gebruikt om de blindstroom- (I_{SX}) en arbeidsstroomcomponent (I_{SY}) te berekenen.

Op basis van de berekende stromen (I_{SX0} , I_{SY0} , I_{SX} , I_{SY}) en de actuele spanningsvectorwaarden schat de belastingscompensator het luchtspleetkoppel en berekent hij hoeveel extra spanning (U_{Comp}) vereist is om de magnetische veldsterkte te handhaven op de referentiewaarde. Vervolgens corrigeert hij de hoekafwijking ($\Delta\theta$) die te verwachten is vanwege de belasting op de motoras. De uitgangsspanningsvector wordt weergegeven in polaire vorm (p). Dit maakt directe overmodulatie mogelijk en vereenvoudigt de aansluiting op de PWM ASIC.

Een spanningsvectorregeling is met name nuttig bij lage toerentallen, waarbij de dynamische prestaties van de frequentieomvormer aanzienlijk kunnen worden verbeterd (ten opzichte van een U/f-regeling) door middel van de juiste regeling van de spanningsvectorhoek. Bovendien wordt het gedrag in stabiele toestand verbeterd, aangezien het besturingssysteem op basis van de vectorwaarden voor zowel spanning als stroom een betere schatting van het belastingskoppel kan maken dan mogelijk is op basis van de scalaire signalen (amplitudewaarden).

f	Interne frequentie
f_s	Ingestelde referentiefrequentie
Δf	Berekende slipfrequentie
I_{SX}	Blindstroom (berekend)
I_{SY}	Arbeidsstroom (berekend)
I_{SX0}, I_{SY0}	Nullaststroom van x/y-as (berekend)
I_u, I_v, I_w	Gemeten fasestroom (U, V, W)
R_s	Statorweerstand
R_r	Rotorweerstand
θ	Hoek van de spanningsvectoren
θ_0	Thetawaarde bij "nullast"
$\Delta\theta$	Belastingafhankelijke hoekcompensatie
T_c	Temperatuur koellichaam (gemeten)
U_{DC}	Tussenkringspanning
U_L	Spanningsvector bij nullast
U_s	Spanningsvector stator
U_{Comp}	Belastingafhankelijke spanningscompensatie
U	Motorvoedingsspanning
X_h	Reactantie
X_1	Statorlekreactantie
X_2	Rotorlekreactantie
ω_s	Statorfrequentie
L_s	Statorinductantie
L_{Ss}	Statorlekreactantie
L_{Rs}	Ankerlekreactantie

Tabel 2.3 Verklaring van de gebruikte symbolen in:

Fig. 2.23 Structuur flux-vectorregeling met terugkoppeling

Fig. 2.24 Basisprincipes van huidige standaard frequentieomvormers van Danfoss

Fig. 2.25a Motorequivalentiediagram bij "nullast"

Fig. 2.25b Motorequivalentiediagram bij "belasting"

Fig. 2.26 Basisprincipes van Danfoss VVCplus-regeling

2.8.2 Danfoss flux-vectorbesturingsprincipe

Het principe van flux-vector berust op de aanname dat er een volledig equivalentiediagram beschikbaar is. Bij deze benaderingswijze worden alle relevante motorparameters meegenomen in de besturingsalgoritmes. Er moeten aanzienlijk meer motorgegevens worden gespecificeerd dan het geval is bij de elementaire VVCplus-regeling.

Met slechts één parameter kan tijdens de inbedrijfstelling het besturingsalgoritme van VVCplus-regeling worden overgeschakeld naar flux-vectorregeling. In dat geval moeten er meer gegevens in de frequentieomvormer worden ingevoerd voor een soepele werking van de motor. Niet alle parameters worden hier toegelicht. De parameters worden echter uitgebreid omschreven in de bedieningshandleidingen.

Een korte beschrijving van de besturingsstrategie is te zien in Fig. 2.27 "Basisprincipes van Danfoss flux-vectorregeling". In de frequentieomvormer is een fluxdatabase opgeslagen. De stromen die in alle 3 fasen worden gemeten, worden omgezet in polaire coördinaten (xy).

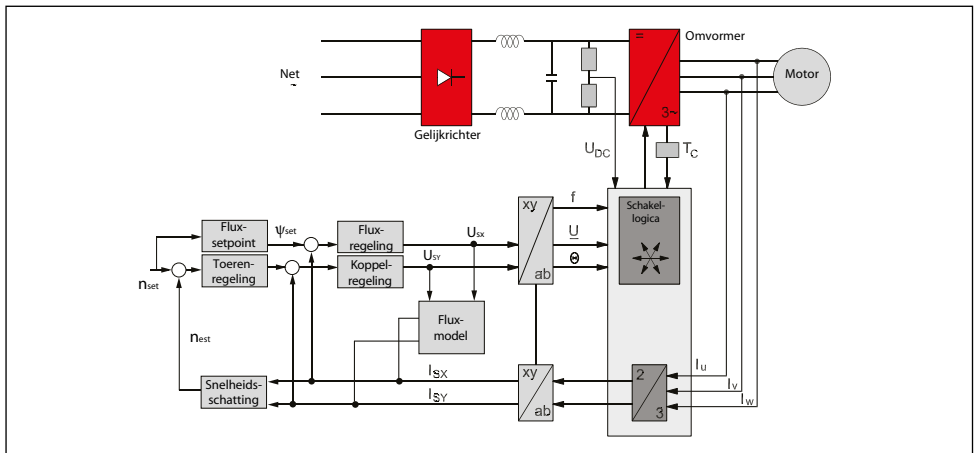


Fig. 2.27 Basisprincipes van Danfoss flux-vectorregeling

2.9 Normen en wetgeving

Net als voor alle andere producten zijn er wereldwijd wetten en technische normen beschikbaar om de veilige werking van FC's te waarborgen.

Wetten worden opgesteld door de wetgevingsinstanties van nationale of lokale overheden en kunnen daardoor van land tot land verschillen. Naleving is echter verplicht – het gaat om wetten. Het betreft politieke documenten die gewoonlijk geen specifieke technische details bevatten; deze details zijn te vinden in normen.

Normen worden opgesteld door experts van relevante normalisatie-instituten (zoals de International Electrotechnical Commission, IEC, of het Europees Comité voor Elektrotechnische normalisatie, CENELEC) en weerspiegelen de huidige stand van de techniek. Normen dienen om een gemeenschappelijk technisch fundament te leggen voor samenwerking tussen marktspelers. Gewoonlijk worden IEC-normen in de meeste landen geaccepteerd en worden lokale normen (EN, NEN, NEMA) geharmoniseerd om erop aan te sluiten.

Fabrikanten moeten naleving van de lokale regelgeving aantonen en documenteren door de normen na te volgen; als ze dit niet doen, mogen ze hun producten niet op de lokale markt verkopen. Op de producten zelf wordt de naleving aangeduid met symbolen.

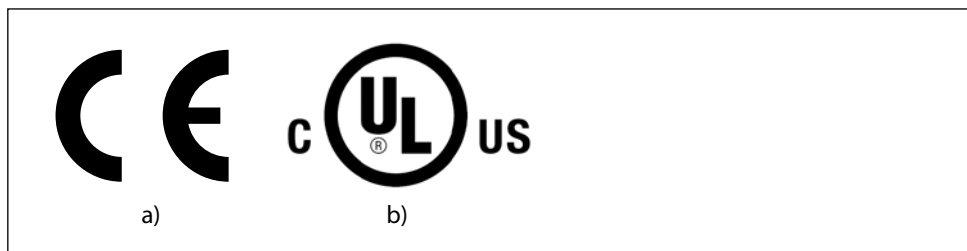


Fig. 2.28 CE-markering (a) en UL-listing (b)

Welke normen zijn toegepast en welke wettelijke overeenstemming wordt vermeld, wordt in Europa bijvoorbeeld vastgelegd in de Conformiteitsverklaring. Voor een beter begrip gaat dit boek in op diverse normen die op FC's betrekking hebben, en enkele relevante wettelijke maatregelen.

3 Frequentieomvormers en motoren

In de voorgaande hoofdstukken zijn de motor en de FC los van elkaar besproken. Dit hoofdstuk gaat in op de interactie tussen beide componenten.

3.1 Basisprincipes

3.1.1 U/f-bedrijf en veldverzwakking

De belangrijkste technische kenmerken van een motor zijn te vinden op het motortypeplaatje. De vermelde gegevens zijn bijzonder relevant voor de elektrisch installateur, omdat de waarden voor spanning, frequentie en vollaststroom worden vermeld. Belangrijke informatie over het mechanische ontwerp ontbreekt echter; deze is te vinden op het datablad of in de catalogus of kan worden opgevraagd bij de motorfabrikant. Deze informatie over het mechanische ontwerp omvat gegevens die betrekking hebben op het starten van de motor en intermitterend bedrijf, en bevat ook het beschikbare koppel op de motoras. Het askoppel is eenvoudig te berekenen met behulp van de gegevens van het typeplaatje.

Bij een gegeven belasting geldt de volgende uitdrukking:

$$T = \frac{P \times 9550}{n} = \frac{\eta \times \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \times 9550}{f \times 60/p \times (1-s)} = \frac{k \times V \times I}{f}$$

Dit resulteert in de principerelatie:

$$T \sim \frac{V}{f} \times I$$

De relatie wordt benut in spanninggestuurde FC's die een constante verhouding tussen de spanning (U) en de frequentie (f) handhaven. Deze constante verhouding (U/f) bepaalt de dichtheid van de magnetische flux (Φ) van de motor en wordt bepaald door de gegevens van het motortypeplaatje (bijvoorbeeld 400 V/50 Hz = 8 [V/Hz]). De constante fluxdichtheid zorgt voor een optimaal koppel van de motor. Idealiter betekent de verhouding 8 [V/Hz] dat elke wijziging van 1 Hz in de uitgangsfrequentie leidt tot een wijziging van 8 V in de uitgangsspanning. Deze regelmethode voor de uitgangswaarden van de FC wordt regeling van de U/f-karakteristiek genoemd.

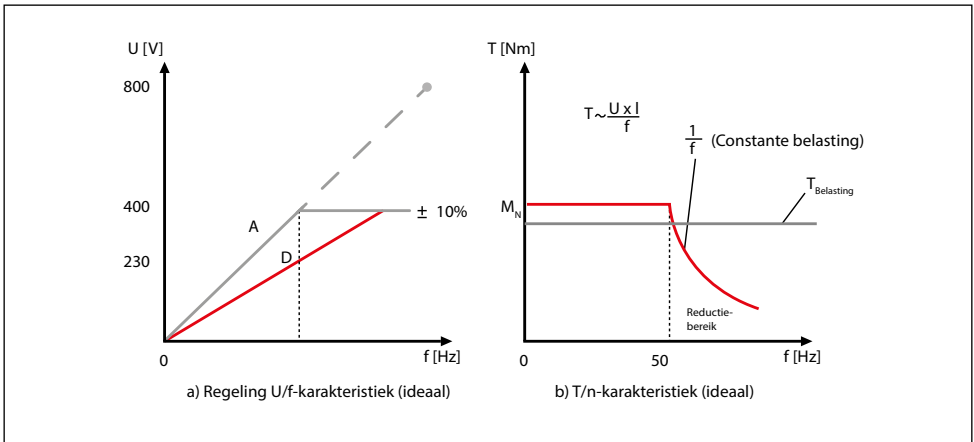


Fig. 3.1 Principe U/f-karakteristiek en koppel

De ideale curve van de U/f-karakteristiek voor een in ster aangesloten 50 Hz-motor is te zien in Fig. 3.1 “Principe U/f-karakteristiek en koppel” a) geschakelde motorspanning b) resulterend koppel. Tot 50 Hz levert de FC een constante U/f-verhouding aan de motor, wat het mogelijk maakt om de motor een constant koppel te laten leveren.

Om de motor bij 100 Hz te laten werken, moet de uitgangsspanning bij voorkeur worden verhoogd tot 800 V om een constante U/f-verhouding te handhaven (stippellijn in Fig. 3.1a “Principe U/f-karakteristiek en koppel”). Omdat deze hoge spanning kritiek is voor de motorisolatie, wordt deze strategie niet toegepast. Gewoonlijk begrenst de FC de uitgangsspanning op de waarde van de ingang (bijvoorbeeld 400V ± 10%).

Dit betekent dat de FC een constante U/f-verhouding slechts kan handhaven tot een bepaalde frequentie. Na deze frequentie kan de frequentie nog wel worden verhoogd, maar de spanning niet meer. Omdat dit de U/f-verhouding beïnvloedt, wordt de dichtheid van de magnetische flux lager. Daarom wordt dit toerentalbereik ook wel aangeduid als het veldverzwakkingsgebied (Fig. 3.1b “Principe U/f-karakteristiek en koppel”). Het zwakkere magnetisch veld leidt tot een lager maximaal motorkoppel. Wanneer het nominale koppel met 1/f wordt verlaagd, neemt het aanloopkoppel af met 1/f².

Houd er rekening mee dat de getoonde curves de ideale curves weergeven en enige compensatie vereisen, zoals te lezen is in de volgende secties.

3.1.2 87 Hz-kenmerken

Door FC's aangedreven asynchrone motoren worden meestal aangesloten op basis van de nominale spanning van het net. Dit betekent dat een 400 V/230 V-motor in ster wordt aangesloten als deze wordt gevoed door een 400 V-frequentieomvormer. Zoals in de vorige sectie is aangegeven, komt een 50 Hz-motor vanaf 50 Hz in het veldverzwakkingsgebied terecht wanneer de spanning niet verder kan worden verhoogd. Om het toerentalbereik uit te breiden, kan de motor in driehoek worden aangesloten.

Voorbeeld

Motor: 15 kW, 400 V/230 V Y/ Δ , 27,5 A/48,7 A, 50 Hz

Bij 50 Hz bedraagt het vermogen in zowel ster- als driehoekconfiguratie 15 kW vanwege de verschillende voedingsspanningen die leiden tot verschillende motorstromen.

$$P_Y (50 \text{ Hz}) = \sqrt{3} \times 400 \text{ V} \times 27,5 \text{ A} \times \cos \varphi \times \eta = 14,92 \text{ [kW]}$$

$$P_{\Delta} (50 \text{ Hz}) = \sqrt{3} \times 230 \text{ V} \times 48,70 \text{ A} \times \cos \varphi \times \eta = 15,19 \text{ [kW]}$$

In Fig. 3.2 "87 Hz-karakteristiek" is te zien hoe de motor bij een driehoekaansluiting tot 230 V loopt met een constante U/f-verhouding. Als de FC wordt gevoed via een 400 V-voeding, is het zelfs mogelijk de constante U/f-verhouding vast te houden tot 400 V, evenals de hoge stroom:

$$P_{\Delta} (87 \text{ Hz}) = \sqrt{3} \times 400 \text{ V} \times 48,70 \text{ A} \times \cos \varphi \times \eta = 26,42 \text{ [kW]}$$

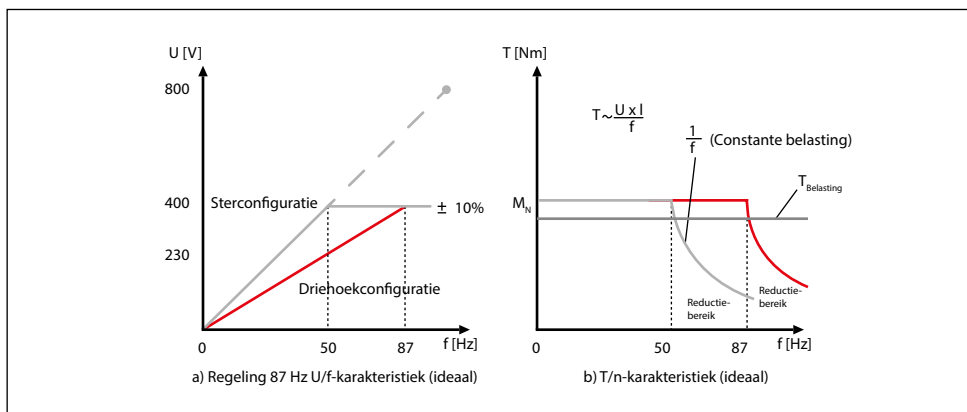


Fig. 3.2 87 Hz-karakteristiek

Dit betekent dat we de nominale fluxdichtheid (Φ) hebben tot 400 V, ook al is de motor aangesloten voor 230 V. Met deze hogere spanning kunnen we de maximale frequentie met nominale flux verhogen tot 87 Hz.

Om deze kennis toe te passen, moet aan de volgende voorwaarden zijn voldaan:

- De geselecteerde FC moet goed in staat zijn om de hogere driehoekstroom (48,70 A) te leveren.
- De motor moet zodanig zijn gewikkeld dat deze bestand is tegen de vereiste bedrijfsspanning (typisch hoger in sterconfiguratie) die door de FC wordt geleverd (d.w.z. met een 690 V-voedingsspanning en een 690 V-frequentieomvormer is deze toepassing alleen mogelijk met een motor die is gewikkeld voor 690 V/400 V Y/ Δ).
- Het koppel op de motoras blijft tot 50 Hz bij beide configuraties gelijk. Boven 50 Hz komt een in ster aangesloten motor in het veldverzwakingsgebied terecht. Bij een aansluiting in driehoek gebeurt dit pas bij ongeveer 90 Hz. Als de tolerantie van $\pm 10\%$ van de FC wordt toegepast, begint het veldverzwakingsgebied respectievelijk bij 55 Hz en 95 Hz. Het koppel neemt af omdat de motorspanning niet toeneemt.

Het gebruik van deze verhoogde motorcapaciteit biedt de volgende voordelen:

- Een bestaande FC kan worden gebruikt met een groter toerenregelingsbereik.
- Er kan een motor met een lager nominaal vermogen worden gebruikt. Een dergelijke motor kan een lager traagheidsmoment hebben waardoor een hogere dynamiek mogelijk is. Dit verbetert de dynamische kenmerken van het systeem.

Houd er rekening mee dat het gebruik van een 400 V/230 V Y/ Δ -motor met driehoek-aansluiting bij 400 V alleen mogelijk is op een FC vanwege de hogere voedingsfrequentie van 87 Hz. Bij directe aansluiting op een 400 V/50 Hz-net in driehoek-aansluiting wordt de motor onherstelbaar beschadigd!

3.1.3 Draaien binnen de stroombegrenzing

Zoals we hebben gezien, houdt de relatie tussen motoraskoppel en motorstroom in dat als de motorstroom kan worden geregeld, ook het koppel onder controle is. Als een toepassing tijdelijk het maximale koppel nodig heeft, is het essentieel dat de FC is ontworpen voor een continue bedrijfsstroom tot aan de stroomgrens en deze niet overschrijdt, en ook niet wordt uitgeschakeld (trip).

Er zijn verschillende strategieën om de FC te ontwerpen voor werking in stroombegrenzingssituaties. De meest gebruikte strategie is om het toerental te verlagen in toepassingen waarvan bekend is dat het werktuigkoppel dan ook zal dalen. Zoals we later echter zullen zien, kunnen er toepassingen zijn waarbij deze strategie niet kan worden toegepast en zelfs nog grotere problemen kan veroorzaken.

3.2 Compensaties

Het was vroeger lastig om een FC op een motor af te stemmen, omdat enkele van de compensatiefuncties, zoals "startspanning", "startcompensatie" en "slipcompensatie" in de praktijk moeilijk in te schatten zijn.

Deze compensaties zijn nodig omdat de motorkarakteristieken niet-lineair zijn. Zo vereist een asynchrone motor een grotere stroom bij lage toerentallen om zowel de magnetiseringsstroom als de koppel genererende stroom voor de motor te produceren. De ingebouwde compensatieparameters zorgen voor optimale magnetisering en daarmee het maximale koppel:

- tijdens het starten;
- bij lage toerentallen;
- in het bereik tot aan het nominale toerental van de motor.

In de jongste generatie FC's stelt het apparaat automatisch de benodigde compensatieparameters in nadat de nominale motorgegevens in de FC zijn geprogrammeerd. Deze gegevens omvatten spanning, frequentie, stroom en toerental. Dit geldt voor ongeveer 80% van standaardtoepassingen zoals transportbanden en centrifugaalpompen. Gewoonlijk kunnen deze compensatie-instellingen zo nodig ook handmatig worden gewijzigd voor een fijnafstelling van toepassingen zoals hijs- en heftoepassingen of verdringerpompen.

3.2.1 Belastingonafhankelijke startcompensaties

Verhoog zo nodig de uitgangsspanning in het lagere toerentalbereik door een extra spanning, vaak startspanning genoemd, handmatig in te stellen.

Voorbeeld

Een motor met een veel lager vermogen dan het aanbevolen motorvermogen bij een FC kan een extra, handmatig instelbare spanningsboost vereisen om statische wrijving te overwinnen of om te zorgen voor optimale magnetisering in het lage toerentalbereik. Als meerdere motoren door één FC worden bestuurd (parallelbedrijf), wordt aangeraden om de belastingonafhankelijke compensatie uit te schakelen.

Het belastingonafhankelijke supplement (de startspanning) zorgt voor een optimaal koppel tijdens de start.

3.2.2 Belastingafhankelijke startcompensaties

Het belastingafhankelijke spanningssupplement (de start- en slipcompensatie) wordt bepaald via de stroommeting (arbeidsstroom).

Deze compensatie wordt gewoonlijk aangeduid als $I \times R$ -compensatie, boost, koppelverhoging of – bij Danfoss – startcompensatie.

Dit type regeling is niet toereikend wanneer de verstoringen lastig te meten zijn en de belasting uiterst variabel is (bijvoorbeeld in motoren waarbij de wikkelingsweerstand tot 25% verandert tussen de warme en koude toestand).

De spanningstoename kan tot verschillende resultaten leiden. Bij nullastbedrijf kan het leiden tot verzadiging van de motorflux. In geval van verzadiging ontstaat er een hoge blindstroom die leidt tot opwarming van de motor. Als de motor belast werkt, zal hij vanwege de zwakke hoofdflux weinig koppel ontwikkelen en mogelijk stoppen met werken.

De werkelijke U/f- en T/n-karakteristieken zijn meestal zoals aangegeven in Fig. 3.3 "Werkelijke U/f- en T/n-karakteristiek".

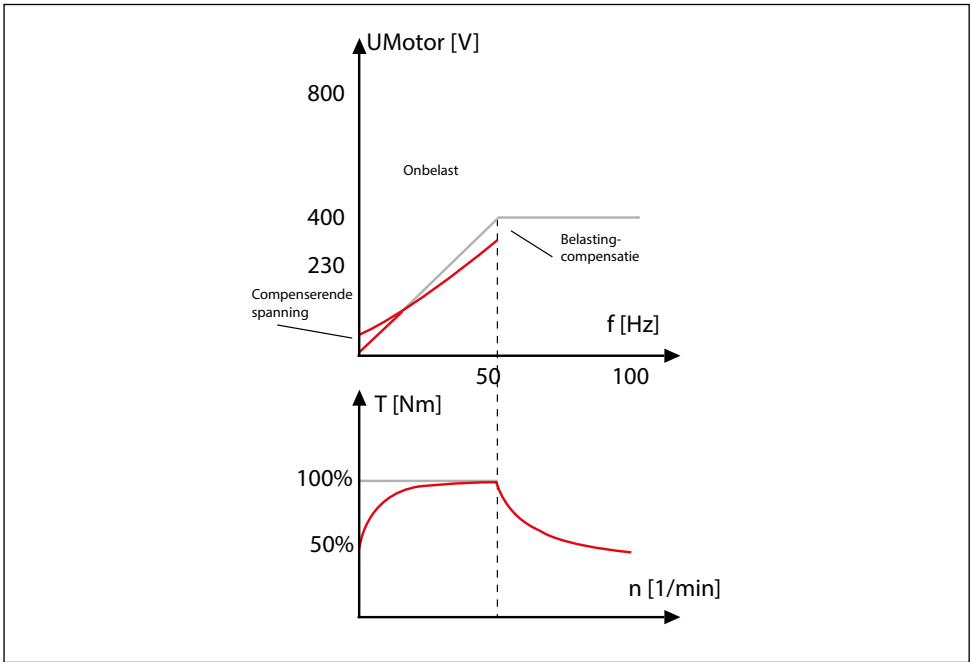


Fig. 3.3 Werkelijke U/f- en T/n-karakteristiek

In Fig. 3.3 is te zien hoe bij lage toerentallen extra spanning aan de motor wordt geleverd ten behoeve van compensatie.

3.2.3 Belastingcompensaties

De motorspanning wordt verhoogd bij hogere belasting, wat wordt bepaald op basis van de gemeten motorstroom.

De uitgangsspanning krijgt een spanningsboost die de invloed van de DC-weerstand van de motorwikkelingen effectief overwint bij lage frequenties en tijdens de start.

Een verhoging van de uitgangsspanning kan leiden tot overmagnetisering van de motor. Dit verhoogt de thermische belasting van de motor zodanig dat een verlaging van het koppel noodzakelijk is. De motorspanning wordt verlaagd bij nullastbedrijf.

3.2.4 Slipcompensatie

De slip van een asynchroonmotor is afhankelijk van de belasting en bedraagt doorgaans zo'n 5% van het nominale toerental. Het percentage is mede afhankelijk van het nominale vermogen van de motor. Voor een tweepolige motor betekent dit dat de slip ongeveer 150 tpm zal zijn.

De slip zal echter ongeveer 50% van het vereiste toerental bedragen als de FC de motor bestuurt bij 300 tpm (10% van het nominale synchrone toerental van 3000 tpm).

Als de FC de motor moet besturen bij 5% van het nominale toerental, zal de motor stilvallen als deze wordt belast. Deze afhankelijkheid van de belasting is ongewenst, en de FC kan deze slip volledig compenseren door de arbeidsstroom naar de motor effectief te meten. De FC compenseert in dat geval de slip door de frequentie te verhogen op basis van de feitelijk gemeten stroom. Dit wordt actieve slipcompensatie genoemd.

De FC berekent de slipfrequentie (f_{slip}) en de magnetiserings- of nullaststroom (I_{ϕ}) op basis van de motorgegevens. De slipfrequentie wordt lineair geschaald ten opzichte van de arbeidsstroom (verschil tussen nullaststroom en gemeten stroom).

Voorbeeld

Een vierpolige motor met een nominaal toerental van 1455 tpm heeft een slipfrequentie van 1,5 Hz en een magnetiseringsstroom van circa 12 A.

Bij een belastingsstroom van 27,5 A en 50 Hz levert de FC een frequentie van ongeveer 51,5 Hz. Bij een belastingsstroom tussen I_{ϕ} (12 A) en I_N (27,5 A) wordt de frequentie overeenkomstig teruggeregeld tot een waarde tussen nul en 1,5 Hz.

Zoals in dit voorbeeld te zien is, wordt de fabrieksinstelling van de slipcompensatie vaak zodanig geschaald dat de motor op het theoretische synchrone toerental loopt. In dit geval: $51,5 \text{ Hz} - 1,5 \text{ Hz} = 50 \text{ Hz}$.

3.2.5 PM-motor- en SynRM-compensaties

Voor permanentmagneetmotoren zijn de start- en slipcompensaties irrelevant, maar andere parameters juist essentieel.

Het magnetiseringsprofiel verschilt uiteraard van een asynchroonmotor, maar andere belangrijke gegevens en compensaties zijn:

- Nominaal motortoerental en nominale frequentie
- Tegen-EMK
- Max. toerental voordat tegen-EMK de FC beschadigt
- Veldverzwakking
- Dynamische gegevens die relevant zijn voor de besturing

Voor SynRM-motoren zijn andere parameters essentieel, zoals:

- Statorweerstand
- Inductanties d-as en q-as
- Verzadigingsinductanties
- Verzadigingspunt

3.3 Automatische aanpassing motorgegevens (AMA)

Motorgegevens op het motortypeplaatje of op het datablad van de motorfabrikant gelden voor een specifieke reeks motoren, of een specifiek ontwerp, maar deze waarden zijn zelden afgestemd op de individuele motor. Vanwege variaties in de productie van motoren en de installatie zijn deze motorgegevens niet altijd voldoende nauwkeurig om een optimale werking te garanderen.

Zoals hierboven is aangegeven, zijn er ook diverse compensaties die moeten worden ingesteld. Voor moderne FC's kan een nauwkeurige afstemming op de feitelijke motor en installatie een ingewikkelde en moeizame klus zijn.

Om de installatie en eerste inbedrijfstelling eenvoudiger te maken, zijn er steeds vaker automatische-configuratiefuncties beschikbaar, zoals de functie voor automatische motorgegevens aanpassing (AMA) van Danfoss. Deze functies meten bijvoorbeeld de statorweerstand en -inductantie. Er wordt tevens rekening gehouden met de invloed van de kabellengte tussen FC en motor.

De parameters die voor diverse typen motoren vereist zijn, verschillen in belangrijke details. Zo is de tegen-EMK-waarde essentieel voor PM-motoren, terwijl het verzadigingspunt belangrijk is voor SynRM-motoren. Daarom zijn verschillende typen AMA nodig. Houd er rekening mee dat niet alle FC's de AMA-functie ondersteunen voor alle motortypen.

In principe worden twee soorten motor-identificatie gebruikt:

Dynamisch

De functie laat de motor tot een bepaald toerental versnellen om de metingen uit te voeren. Gewoonlijk moet de motor zijn losgekoppeld van de belasting/machine voor een "identificatieronde".

Statisch

De motor wordt gemeten bij stilstand. Dit betekent dat de motoras niet hoeft te worden losgekoppeld van de machine. Het is echter belangrijk dat de motoras tijdens de meting niet gaat draaien door invloeden van buitenaf.

3.4 Werking

3.4.1 Regeling motortoerental

De uitgangsfrequentie van de FC, en daarmee het motortoerental, wordt geregeld door een of meer signalen (0-10 V; 4-20 mA of spanningspulsen) als toerentalreferentie. Als de toerentalreferentie toeneemt, neemt het motortoerental toe en verschuift het verticale deel van de motorkoppelkarakteristiek naar rechts (Fig. 3.4 "Relatie tussen referentiesignaal en motorkoppel").

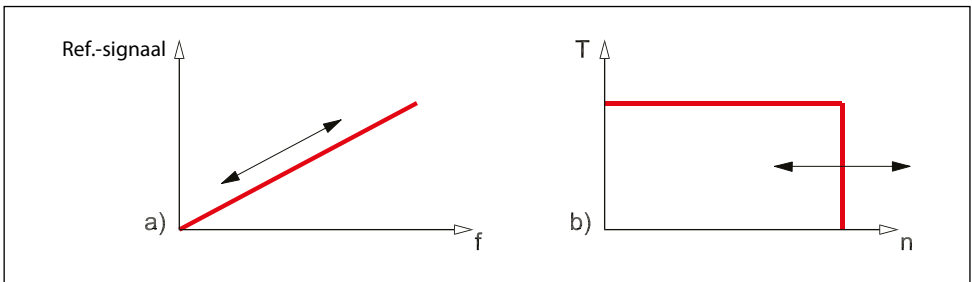


Fig. 3.4 Relatie tussen referentiesignaal en motorkoppel

Als het belastingskoppel lager is dan het motorkoppel, zal het toerental de vereiste waarde bereiken. Zoals te zien is in Fig. 3.5 "Relatie tussen stroomgrens en overstroomgrens", snijdt de belastingskoppelcurve de motorkoppelcurve in het verticale deel (bij punt A). Als het snijpunt zich in het horizontale deel bevindt (bij punt B), kan het motortoerental de bijbehorende waarde niet continu overschrijden. De FC staat kortstondige overschrijding van de stroomgrens toe zonder uit te schakelen (bij punt C), maar de duur van de overschrijding moet worden beperkt.

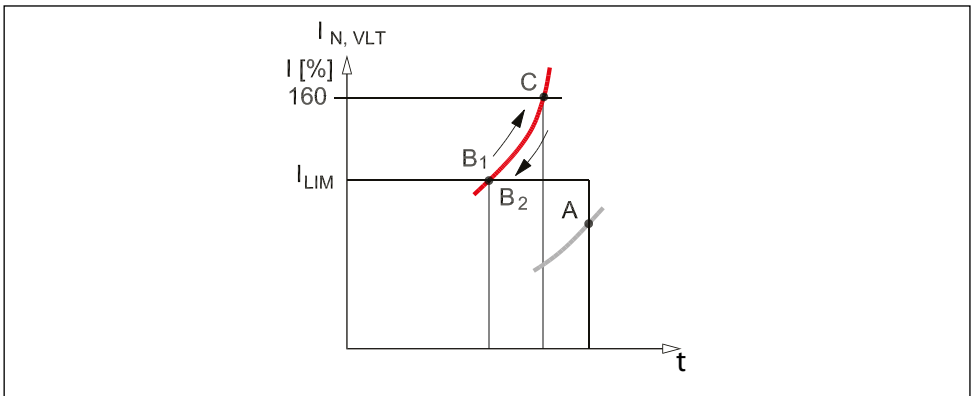


Fig. 3.5 Relatie tussen stroomgrens en overstroomgrens

3.4.2 Omkeren

De draairichting van asynchroonmotoren en veel synchroonmotoren wordt bepaald door de fasevolgorde van de voedende spanning. Als twee fasen worden verwisseld, verandert de draairichting van de motor (de motor draait achteruit).

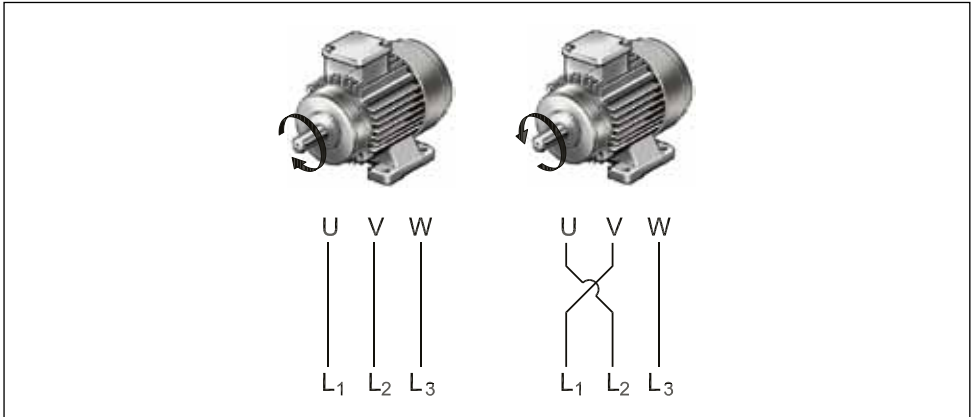


Fig. 3.6 De draairichting van de motor wordt omgekeerd wanneer de fasevolgorde wordt gewijzigd

Een FC kan de draairichting van de motor omkeren door de fasevolgorde te wijzigen. Omkeren wordt gedaan door middel van een negatieve toerentalreferentie of een digitaal ingangssignaal. Als de motor bij ingebruikname een specifieke draairichting moet hebben, is het belangrijk de standaard fabrieksinstellingen van de FC te kennen.

Aangezien een FC de motorstroom op de nominale waarde begrenst, kan een motor die door een FC wordt geregeld vaker worden omgekeerd dan een motor die direct op het net is aangesloten.

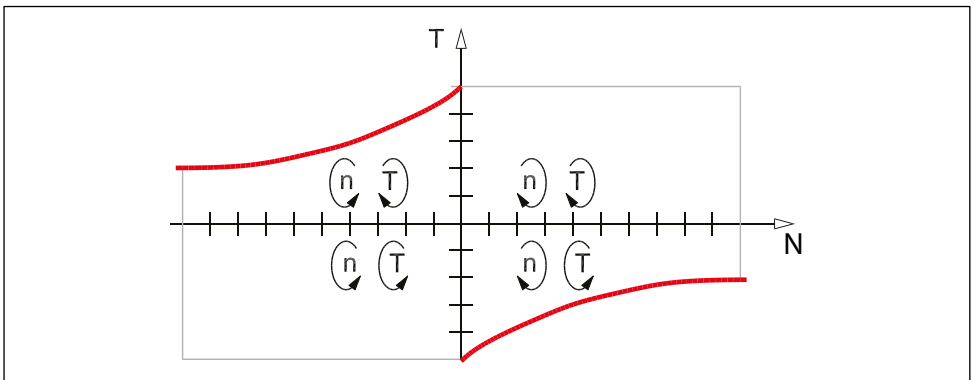


Fig. 3.7 Remkoppel van de frequentieomvormer tijdens omkeren

3.4.3 Vertragings- en versnellingsramps (aanloop en uitloop)

Voor veel toepassingen zijn er diverse redenen waarom het toerental niet te snel mag veranderen, maar in plaats daarvan langzaam of met soepele overgangen moet veranderen. Alle moderne FC's beschikken over rampfuncties om dit mogelijk te maken. Deze ramps zijn instelbaar en zorgen ervoor dat de toerentalreferentie alleen met een vooraf ingestelde snelheid kan worden verhoogd of verlaagd.

De versnellingsramp (aanloop) geeft aan hoe snel het toerental wordt verhoogd. Deze wordt uitgedrukt als een versnellingstijd t_{acc} en geeft aan hoe snel de motor het nieuwe toerental moet bereiken. Deze ramps zijn voornamelijk gebaseerd op de nominale motor-frequentie; een versnellingsramp van bijvoorbeeld 5 seconden betekent dat de FC er 5 seconden over doet om vanuit stilstand naar de nominale motorfrequentie ($f_n = 50$ Hz) te gaan.

Sommige fabrikanten bepalen het versnellen en vertragen echter ten opzichte van de waarden tussen de minimale en maximale frequentie.

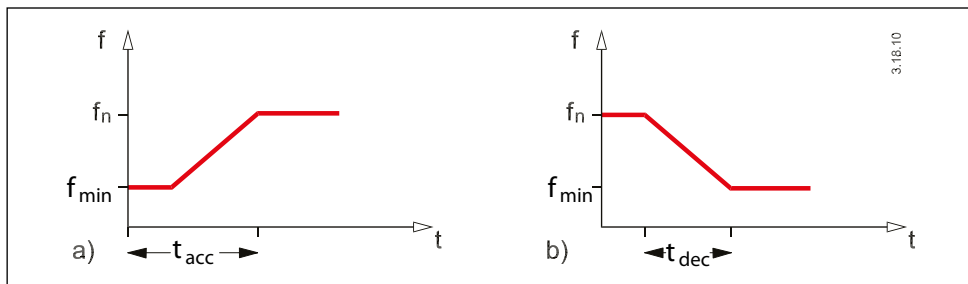


Fig. 3.8 Versnellings- en vertragingstijden

De vertragingramp (uitloop) geeft aan hoe snel het toerental wordt verlaagd. Deze wordt uitgedrukt als de vertragingstijd t_{dec} en geeft aan hoe snel de motor dit nieuwe, lagere toerental moet bereiken.

Het is mogelijk om direct van versnellen naar vertragen te gaan, aangezien de motor altijd de uitgangsfrequentie van de omvormer volgt.

Ramptijden kunnen op dusdanig lage waarden worden ingesteld dat de motor het vooraf ingestelde toerental in bepaalde gevallen niet kan volgen.

Dit leidt tot toename van de motorstroom totdat de stroomgrens wordt bereikt. In geval van korte uitlooptijden kan de spanning in de tussenkring zodanig hoog worden dat het veiligheidscircuit de FC stopzet.

Als het traagheidsmoment van de motoras en het hieraan gerelateerde massa-traagheidsmoment van de belasting bekend zijn, kunnen de optimale versnellings- en vertragingstijd worden berekend.

$$t_{\text{acc}} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(T_{\text{acc}} - T_{\text{fric}}) \times 9,55}$$

$$t_{\text{dec}} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(T_{\text{acc}} + T_{\text{fric}}) \times 9,55}$$

- J is het traagheidsmoment van de motoras en de belasting [kgm^2].
 T_{acc} is het overkoppel dat wordt gebruikt om te versnellen [Nm].
 T_{fric} is het wrijvingskoppel van het systeem [Nm].
 $t_{\text{acc/dec}}$ is de berekende versnellings- resp. vertragingstijd [s].
 n_1 en n_2 zijn de toerentallen bij de frequenties f_1 en f_2 [min^{-1}].

Als de FC een kortstondig overbelastingskoppel toestaat, worden het versnellings- en het vertragingkoppel ingesteld op het nominale motorkoppel T . In de praktijk is de versnellings- en de vertragingstijd vaak gelijk.

Voorbeeld

Een machine heeft de volgende specificaties:

- $J = 0,042 \text{ kgm}^2$
 $n_1 = 500 \text{ min}^{-1}$
 $n_2 = 1000 \text{ min}^{-1}$
 $T_{\text{fric}} = 0,05 \times T_N$
 $T_N = 27 \text{ Nm}$

De theoretische versnellingstijd kan als volgt worden berekend:

$$t_{\text{acc}} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(T_{\text{acc}} - T_{\text{fric}}) \times 9,55} = \frac{0,042 \times (1000 - 500)}{(27,0 - (0,05 \times 27,0)) \times 9,55}$$

De rampfuncties zorgen ervoor dat er geen abrupte toerentalwijzigingen optreden, op voorwaarde dat de FC is ingesteld op de berekende versnelling. Dit is essentieel in veel toepassingen, denk hierbij aan:

- zorgen dat flessen niet omvallen op flessentransportbanden;
- voorkomen van waterslag in pompsystemen;
- comfort bieden op roltrappen of in liften.

Meestal worden lineaire ramps gebruikt. Het is echter mogelijk om verschillende karakteristieken te gebruiken voor verschillende toepassingen, bijvoorbeeld een "S"- of "S²"-ramp. Bij de "S"-ramp zijn de overgangen naar en vanuit stilstand bijzonder geleidelijk.

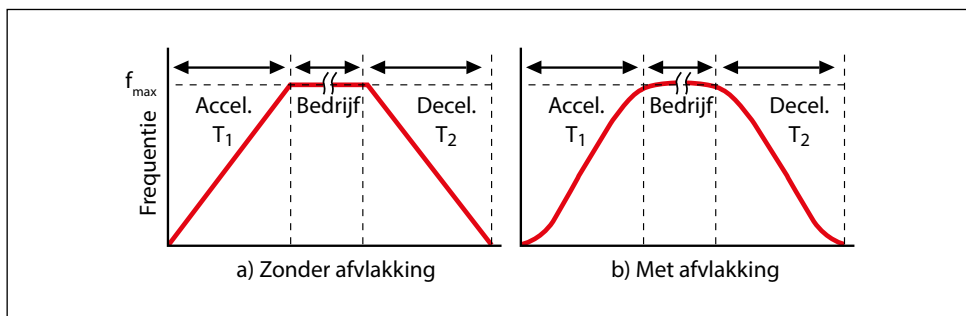


Fig. 3.9 Lineaire ramp (a) en S-ramp (b)

3.4.4 Motorkoppelregeling

Motorkoppel is een andere parameter die belangrijk is voor de toepassing, zoals te zien is in Fig. 3.5. De motorstroom kan de stroomgrens kortstondig overschrijden.

Het koppel vormt de basis voor de rotatie of beweging van een belasting. Redenen om het koppel te regelen zijn onder meer:

- begrenzing van het koppel om schade aan de machine en dergelijke te voorkomen;
- regeling van het koppel om de belasting over meerdere motoren te verdelen.

Als een toepassing plotseling overbelast wordt en de FC is gedimensioneerd voor overbelasting, kan de machine gedurende een bepaalde tijd in de overbelastingsmodus werken. Dit overbelastingskoppel kan echter desastreuze gevolgen hebben voor de machine of de levensduur van de machine verkorten. Daarom kunnen veel FC's worden geprogrammeerd om bij overbelasting een waarschuwing te genereren, maar ze kunnen ook onder specifieke omstandigheden het koppel begrenzen.

Zoals beschreven in sectie 3.1 "Basisprincipes" bestaat er een relatie tussen stroom en koppel. Deze relatie is niet direct, maar hangt af van slip, $\cos \phi$ en motortemperatuur. De begrenzing op basis van een meting van de stroom is niet nauwkeurig. Als de FC werkt op basis van een ruimtevector- of fluxregeling (zie hoofdstuk 2 "Frequentieomvormers"), wordt de stroom in vectoren gemeten in alle drie de motorfasen en is de verdeling van de stroomcomponenten eenvoudig. Met deze informatie kan de FC het koppel voldoende nauwkeurig berekenen om ervoor te zorgen dat de machine wordt beschermd.

In situaties waarbij meerdere motoren op een gemeenschappelijk mechanisch systeem zijn aangesloten, is het van essentieel belang dat de belasting gelijkmatig over de motoren wordt verdeeld. Als de slipcompensatiefactor wordt verlaagd, zullen de motoren hun koppel automatisch balanceren, maar niet altijd het gewenste toerental behouden.

Een andere functie in bepaalde FC's wordt de droopfunctie genoemd. De droopfunctie houdt in dat één motor het toerental regelt en dat aanvullende FC's ditzelfde toerental aanhouden en de belasting automatisch verdelen.

Voorbeeld

Een 100 meter lange transportband heeft meerdere aandrijfstations die verspreid langs de band staan opgesteld. Als een van de motoren iets sneller loopt dan de andere, moet deze motor een hoger koppel produceren. Dit kan ertoe leiden dat:

- de motor overbelast en oververhit raakt;
- de band wordt beschadigd vanwege het gedeeltelijk hogere koppel;
- riemschijven en aandrijftrommels kunnen slippen, met overmatige slijtage als resultaat.

In dergelijke situaties zijn koppel en koppelverdeling belangrijk.

3.4.5 Watchdog

FC's kunnen het te regelen proces bewaken en ingrijpen bij operationele verstoringen. Deze bewaking is onder te verdelen in drie gebieden: machines, motor en FC.

De machines worden bewaakt aan de hand van:

- uitgangsfrequentie;
- uitgangstroom;
- motorkoppel.

Op basis van deze waarden kan een aantal begrenzings worden ingesteld die ingrijpen in de regelfunctie als ze worden overschreden. Deze begrenzings kunnen het laagste toegestane motortoerental (minimumfrequentie), de hoogst toegestane motorstroom (stroomgrens) of het hoogst toegestane motorkoppel (koppelbegrenzing) zijn. De FC kan bijvoorbeeld worden geprogrammeerd om bij overschrijding van deze begrenzings:

- een waarschuwingssignaal te genereren;
- het motortoerental te verlagen;
- de motor zo snel mogelijk stop te zetten.

Voorbeeld

In een installatie waarbij de motor via een V-riem met de rest van de installatie is verbonden, kan de FC worden geprogrammeerd om de V-riem te bewaken.

Bij een gebroken V-riem zal de belasting lager zijn dan verwacht. De combinatie van frequentie en stroom kan worden gebruikt om een waarschuwing te genereren of de motor te stoppen.

3.5 Werking dynamische rem

Machines kunnen potentiële of kinetische energie produceren die we uit de machine willen verwijderen.

Potentiële energie wordt veroorzaakt door zwaartekracht, bijvoorbeeld wanneer een last naar een positie wordt gehesen en in die positie wordt vastgehouden. Kinetische energie wordt veroorzaakt door beweging, bijvoorbeeld een centrifuge die draait met een bepaald toerental dat we willen verlagen of een wagentje dat moet worden gestopt.

Voor de dynamische karakteristieken van bepaalde belastingen is vierkwadrantenbedrijf vereist. Een verlaging van de statorfrequentie (en -spanning) door de FC stelt de motor in staat om te werken als generator en mechanische energie om te zetten in elektrische energie.

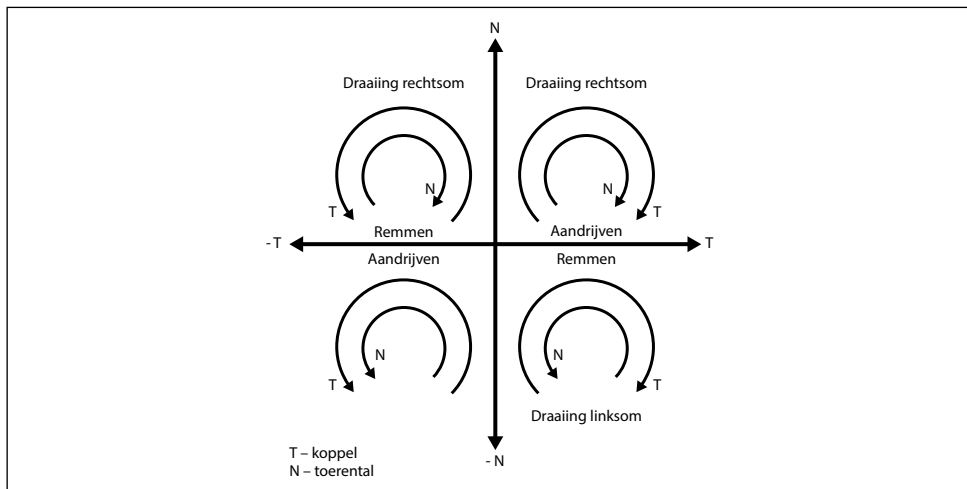


Fig. 3.10 Vierkwadrantenbedrijf: rechtsom (CW) en linksom (CCW)

Motoren die direct op het net zijn aangesloten, voeren de remenergie rechtstreeks terug naar het net.

Als een motor door een FC wordt geregeld, wordt de remenergie opgeslagen in de tussenkring van de FC. Als de remenergie hoger is dan het vermogensverlies van de FC, neemt de spanning in de tussenkring sterk toe (soms tot meer dan 1000 V DC).

Als de spanning hoger wordt dan de interne spanningslimiet, wordt de FC uitgeschakeld uit zelfbescherming en wordt gewoonlijk een alarmmelding of de foutcode "overspanning" gegenereerd. Er moeten maatregelen worden genomen om te voorkomen dat de FC uitschakelt (trip) als de motor te veel remenergie terugvoert.

Gewoonlijk worden de volgende maatregelen genomen:

- het verlengen van de vertragingstijd;
- het afvoeren van de energie in de motor, d.w.z. dat de motor wordt gebruikt als remweerstand;
- installatie van een "remchopper"-circuit en geschikte remweerstand in de FC;
- het gebruik van een regeneratieve remeenheid om energie terug te voeren naar het net;
- het gebruik van FC's met een actieve gelijkrichter om energie terug te voeren naar het net.

De eerste twee maatregelen vereisen geen extra hardwarecomponenten. Voor alle andere maatregelen zijn wel extra componenten vereist, en hiermee moet al tijdens de ontwerpfase van de machines rekening worden gehouden.

3.5.1 Verlenging van de vertragingstijd

De vertragingstijd kan door de operator worden verlengd door de betreffende parameterinstelling te wijzigen. De operator moet de belastingsverhoudingen echter zelf beoordelen.

Voorbeeld

Een poging om een door een FC geregelde 22 kW motor binnen één seconde af te remmen van 50 Hz naar 10 Hz leidt tot uitschakeling (trip) van de FC, omdat de motor, die als generator werkt, hierbij te veel energie terugvoert. De gebruiker kan uitschakeling van de FC voorkomen door de vertragingstijd te wijzigen (bijvoorbeeld naar 10 seconden).

Een andere mogelijkheid is om gebruik te maken van de regelfuncties van moderne FC's, zoals een overspanningsbeveiliging (OVC); deze moet worden ingeschakeld om uitschakeling van de FC te voorkomen of om de ramps automatisch te verlengen. Vervolgens bepaalt de FC zelf de juiste rampstijd. Dit type rampverlenging houdt automatisch rekening met wisselende massa's van de belasting. Voorzichtigheid is geboden wanneer dit type functie wordt gebruikt op machines met verticale of horizontale bewegingen (zoals takels, liften en portaalkranen), omdat een verlenging van de rampstijd ook leidt tot een grotere verplaatsingsafstand.

3.5.2 Motor als remweerstand

Fabrikanten gebruiken diverse methoden om de motor als remweerstand te gebruiken. Het basisprincipe is gebaseerd op hermagnetisering van de motor. Elke fabrikant hanteert een andere benaming voor deze methode, zoals AC-rem, fluxrem of compoundremmen. Dit type remmen wordt niet aanbevolen voor uiterst dynamische toepassingen (zoals takels of liften), omdat de motor steeds warmer wordt naarmate er vaker wordt geremd en daardoor mogelijk niet naar behoren zal werken.

3.5.3 Remchoppercircuit (remmodule) en weerstand

Het circuit bestaat in principe uit een transistor (bijvoorbeeld een IGBT) die de overtollige spanning elimineert door deze "af te chopper" en naar de aangesloten remweerstand te sturen. Bij de inbedrijfstelling moet het stuurcircuit de juiste informatie krijgen dat er een remweerstand is aangesloten. Het stuurcircuit kan ook controleren of de remweerstand nog steeds goed functioneert. Gewoonlijk moet bij het bestellen worden gespecificeerd of de FC wel of niet moet worden uitgerust met een remchopper.

Boven een bepaald vermogen veroorzaakt het gebruik van een remmodule en remweerstand problemen in verband met warmte, ruimte en gewicht.

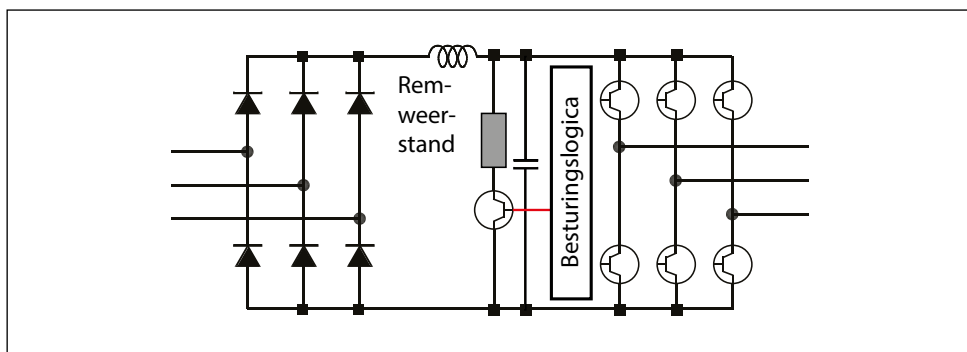


Fig. 3.11 Rem"chopper" en remweerstand

3.5.4 Gebruik van een regeneratieve remeenheid

Als de belasting vaak veel regeneratieve energie produceert, kan het nuttig zijn om gebruik te maken van een volledig regeneratieve remeenheid.

Als de spanning in de tussenkring toeneemt tot een bepaald niveau, wordt de gelijkspanning in het circuit via een omvormer teruggevoerd naar het voedingsnet met de juiste amplitude en fase.

Dit terugvoeren van energie kan worden uitgevoerd door:

- FC's met een actieve gelijkrichter – bij dit type FC kan de gelijkrichter energie van de DC-tussenkring naar de voeding overbrengen;
- externe regeneratieve remeenheden die integraal zijn aangesloten op de tussenkring van een of meer FC's en de spanning in de tussenkring bewaken.

Fig. 3.12 "Regeneratieve remeemheid" toont een vereenvoudigde versie van het werkingsprincipe.

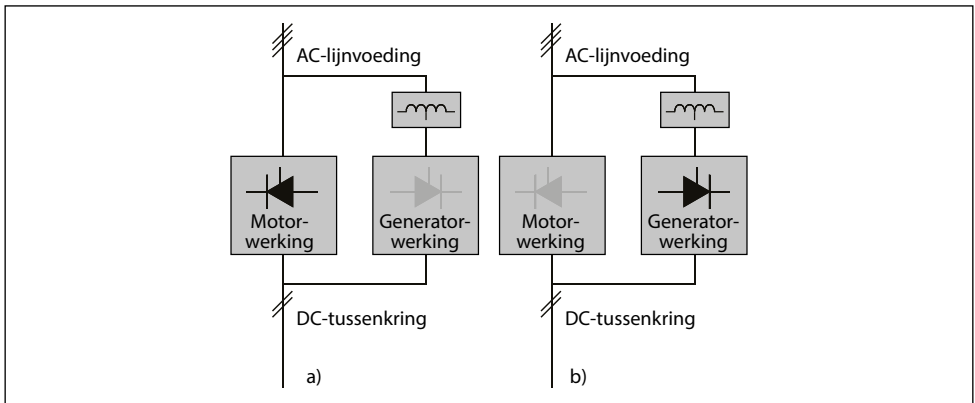


Fig. 3.12 Regeneratieve remeemheid: a) motorregeling aan; b) motorfaseregeling uit

Raadpleeg hoofdstuk 4 "Energiebesparing met frequentieomvormers" om te evalueren wanneer het economisch rendabel is om dit type apparaten te gebruiken.

3.6 Werking statische rem

De FC heeft diverse functies om de motoras te blokkeren of vrij te laten lopen, zoals:

- vrijlopen tot stilstand;
- DC-rem;
- DC-houd;
- elektromechanische rem.

De laatste drie van deze functies kunnen gewoonlijk enkel worden uitgevoerd nadat er een stopcommando is gegeven. Dit wordt in de praktijk niet altijd goed begrepen. Het is belangrijk op te merken dat een referentiewaarde van 0 Hz niet werkt als een stopcommando. In het algemeen geldt dat u deze functies niet mag gebruiken wanneer de draairichting wordt omgekeerd.

3.6.1 Vrijlopen tot stilstand

Wanneer de motor vrijloopt, worden de spanning en frequentie onmiddellijk onderbroken (0 V/0 Hz) en wordt de motor "vrijgegeven". Omdat de motor niet meer van spanning wordt voorzien, zal deze gewoonlijk uitdraaien tot stilstand. Afhankelijk van het toerental en de massa-tragheid van de belasting kan dit enkele seconden tot uren in beslag nemen (bijvoorbeeld bij zeer grote afscheiders).

3.6.2 DC-remmen

Een gelijkspanning over twee van de drie motorfasen wordt gebruikt om een stationair magnetisch veld in de stator op te wekken. Dit veld kan bij de nominale frequentie geen hoog remkoppel produceren. Het remvermogen blijft in de motor en kan leiden tot oververhitting.

Voor DC-remmen zijn drie parameters nodig:

- De frequentie waarmee de rem moet worden geactiveerd. Een frequentiewaarde lager dan 10 Hz wordt aanbevolen. Gebruik de motorslipfrequentie als uitgangspunt. Een frequentie van 0 Hz betekent dat de functie is uitgeschakeld.
- De remstroom die wordt gebruikt om de motor vast te houden. Het wordt aangeraden om de nominale stroom van de motor niet te overschrijden, om mogelijke thermische overbelasting te voorkomen.
- De duur van het DC-remmen. Deze instelling hangt af van de toepassing.

3.6.3 DC-houd

Anders dan bij de DC-rem geldt er voor DC-houd geen tijdslimiet. Voor het overige zijn de hierboven genoemde aanbevelingen voor de DC-rem van toepassing. Deze functie kan ook worden gebruikt wanneer "hulpverwarming" is geïmplementeerd voor een motor die in een zeer koude omgeving is geplaatst. Zorg dat de nominale motorstroom niet wordt overschreden, aangezien er een constante stroom door de motor loopt. Zo minimaliseert u de thermische belasting van de motor.

3.6.4 Elektromechanische rem

De elektromechanische rem is een hulpmiddel om de motor tot stilstand te brengen. Dit kan vanuit de FC worden bestuurd via een relais en er zijn diverse besturingsopties mogelijk.

Het is belangrijk om te bepalen wanneer de rem kan worden vrijgegeven, en wanneer de motor vastgehouden moet worden.

Enkele aandachtspunten zijn:

- voormagnetisering van de motor, wat inhoudt dat er een minimale hoeveelheid stroom nodig is;
- de frequentie waarbij activering of deactivering plaatsvindt;
- reactietijden (vertragingstijden) van de relaisspoelen.

Voor kritische toepassingen zoals takels of liften geldt dat de rem, nadat het startcommando is gegeven, enkel mag worden vrijgegeven nadat de motor optimaal is voorgemagnetiseerd; anders kan de last vallen. Er moet eerst een minimale stroom lopen, gewoonlijk de magnetiseringsstroom, om te garanderen dat de motor de last kan heffen wanneer de rem wordt gelost.

3.7 Motoropwarming en thermische bewaking

Energie die tijdens bedrijf in motoren verloren gaat, zal de motor opwarmen. Als de motor zwaar wordt belast, is koeling noodzakelijk. Afhankelijk van het systeem kunnen motoren op verschillende manieren worden gekoeld:

- Zelfventilatie
- Geforceerde luchtkoeling
- Vloeistofkoeling

Om de levensduur van de motor te optimaliseren, moet de motor binnen het gespecificeerde temperatuurbereik werken. De meest gangbare koelmethode is zelfventilatie, waarbij de motor wordt gekoeld door een ventilator die op de as is gemonteerd.

De temperatuurcondities van de motor zijn onderhevig aan twee invloeden:

- Wanneer het toerental afneemt, neemt het volume van de koellucht eveneens af.
- Wanneer er sprake is van een niet-sinusvormige motorstroom, wordt in de motor meer warmte geproduceerd.

Bij lage toerentallen is de motorventilator niet in staat voldoende koellucht te leveren. Dit probleem doet zich voor wanneer het belastingskoppel over het volledige regelbereik constant is. Deze verminderde ventilatie bepaalt het toelaatbare koppel in continubedrijf.

Wanneer de motor continu werkt op 100% van het nominale koppel, bij een toerental dat lager is dan de helft van het nominale toerental, heeft de motor extra lucht nodig voor koeling. Deze extra luchtkoeling wordt aangegeven door de gearceerde gebieden in Fig. 3.13 "T/n-karakteristieken met en zonder externe koeling".

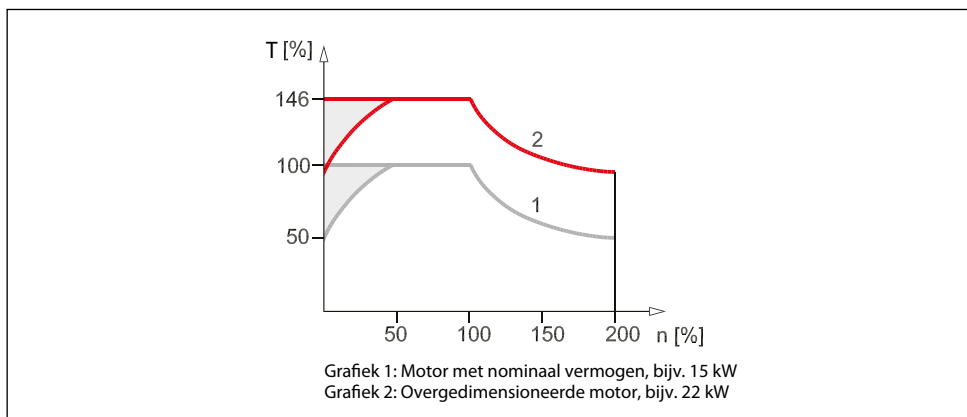


Fig. 3.13 T/n-karakteristieken met en zonder externe koeling

Een alternatief voor het toevoeren van extra koeling is het verlagen van de motorbelastingsverhouding. Om de motorbelastingsverhouding te verlagen, moet u een grotere motor selecteren. De specificatie van de FC legt echter beperkingen op ten aanzien van de motormaat die kan worden aangesloten.

Wanneer de motorstroom niet-sinusvormig is, krijgt de motor harmonische stromen die de motortemperatuur verhogen, zoals aangegeven in Fig. 3.14 "Relatie tussen maximaal continu koppel en vorm van de stroom". De grootte van de harmonische stromen bepaalt in hoeverre de warmte toeneemt. Laat een motor daarom niet continu met een belasting van 100% werken wanneer de stroom niet-sinusvormig is.

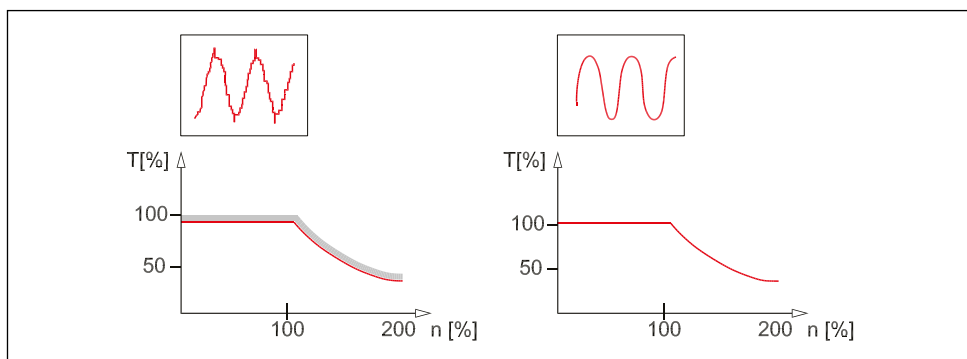


Fig. 3.14 Relatie tussen maximaal continu koppel en vorm van de stroom

Wanneer de toepassing voornamelijk lage toerentallen vereist, wordt het gebruik van een extra ventilator aanbevolen om de motor te koelen en een volledig koppel mogelijk te maken. De ventilator moet echter worden gevoed via een afzonderlijke voeding en mag niet worden aangesloten op de uitgang van de FC.

In plaats van lucht kan vloeistof worden gebruikt om de motor te koelen. Vloeistofkoeling wordt doorgaans geïmplementeerd in speciale motorontwerpen.

In de FC zijn twee temperatuurbewakingsmethoden geïmplementeerd om de motor te beschermen:

Berekening:

De motortemperatuur wordt berekend op basis van een wiskundig motormodel.

Meting:

In de motor geplaatste thermistoren of PTC's kunnen op de FC worden aangesloten om de temperatuur te bewaken.

Welke corrigerende maatregel nodig is wanneer de motor oververhit raakt, wordt geprogrammeerd op basis van de toepassingsvereisten.

3.8 Functionele veiligheid

Onder functionele veiligheid verstaat men bescherming tegen gevaren die worden veroorzaakt door een onjuiste werking van componenten of systemen. In Europa valt functionele veiligheid onder de Machinerichtlijn 2006/42/EG.

De Machinerichtlijn beschrijft het doel van functionele veiligheid als volgt:

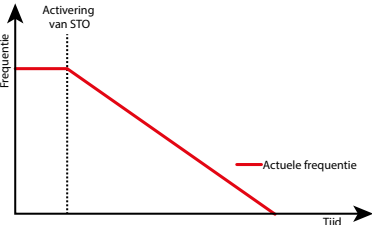
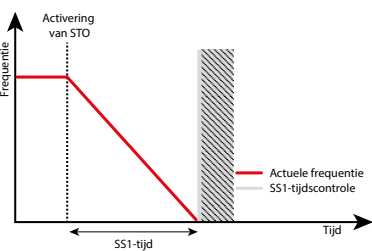
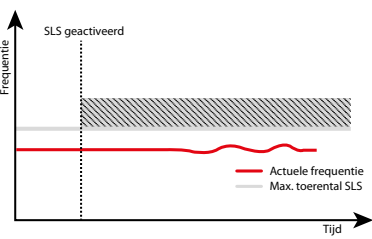
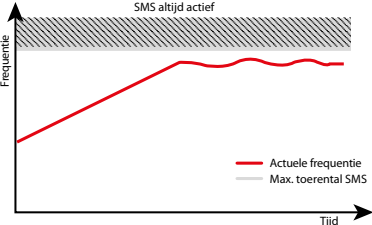
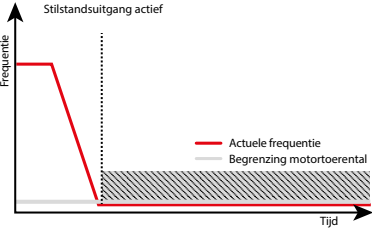
“De machine moet zodanig ontworpen en gebouwd zijn dat zij bediend, afgesteld en onderhouden kan worden zonder dat personen aan een risico worden blootgesteld, wanneer deze handelingen onder de vastgestelde omstandigheden worden verricht, tevens rekening houdend met redelijkerwijs voorzienbaar verkeerd gebruik.”

Afhankelijk van de toepassingsnorm waaraan moet worden voldaan, moet het systeem een gedefinieerd veiligheidsniveau behalen. Het vereiste veiligheidsniveau wordt bepaald via de risicobeoordeling. De Machinerichtlijn verwijst naar verschillende normen, op basis van het vereiste veiligheidsniveau.

Veiligheidsniveau	Afkorting	Norm
Categorie	Cat	EN 954-1
Prestatieniveau	PL	EN-ISO 13849-1
Safety Integrity Level (veiligheidsintegriteitsniveau)	SIL	IEC 61508/IEC 62061

De Europese voorschriften ten aanzien van functionele veiligheid zijn vergelijkbaar met veel andere voorschriften wereldwijd. Zo is in Noord-Amerika de OSHA (Occupational Safety and Health Act) van toepassing, en in Canada biedt de CCOHS (Canadian Centre for Occupational Health and Safety) het raamwerk voor het toepassen van veiligheidsmaatregelen. Hoewel de relevante normen per regio verschillen, zijn de veiligheidsprincipes nauw aan elkaar verwant.

Over het algemeen worden binnen de verschillende wettelijke raamwerken en de normen afkortingen gebruikt om de veiligheidsfunctie en het veiligheidsniveau aan te geven.

Functie	Beschrijving	Afbeelding
<p>Safe Torque Off STO</p>	<p>De motor krijgt geen energie om koppel/rotatie te produceren. Deze functie voldoet aan stopcategorie 0 overeenkomstig IEC 60204-1.</p>	
<p>Safe Stop 1 SS1</p>	<p>Een geregelde stop waarbij de aandrijfelementen van de machine bekrachtigd blijven om de machine te stoppen. Het vermogen wordt pas onderbroken wanneer de machine tot stilstand is gekomen. Deze functie voldoet aan stopcategorie 1 overeenkomstig IEC 60204-1.</p>	
<p>Safe Limited Speed SLS</p>	<p>Een veilige toerentaltoestand wordt Safe Limited Speed (veilig begrensd toerental) genoemd. Deze zorgt ervoor dat een machine op een constant veilig toerental loopt. Als deze sneller loopt, wordt er een stopfunctie geactiveerd.</p>	
<p>Safe Maximum Speed SMS</p>	<p>Zorgt ervoor dat de machine niet op een hoger niveau dan een gedefinieerd maximaal toerental loopt. Dit voorkomt schade aan de machine en beperkt gevaren. Functioneel gezien is dit principe identiek aan SLS.</p>	
<p>Safe Speed Monitor SSM</p>	<p>SSM bewaakt op nultoerental en zet een uitgangssignaal "hoog" als het nultoerental wordt bereikt. Deze functie kan worden gebruikt om deuren te ontgrendelen of om simpelweg aan te geven dat de machine stilstaat.</p>	

Tabel 3.15 Algemene veiligheidsfuncties van de FC en hun functie

De FC heeft diverse aanvullende functies voor functionele veiligheid:

- SOS Safe Operating Stop – veilige bedrijfsstop
- SS2 Safe Stop 2 – veilige stop 2
- SDI Safe Direction – veilige draairichting
- SBC Safe Brake Control – veilige rembesturing
- SAM Safe Acceleration Monitor – bewaking veilige versnelling
- SLP Safe Limited Position – veilig begrensde positie
- SCA Safe Cam – veilige nokkenregeling
- SLI Safely Limited Increment – veilig begrensde stappen
- SSR Safe Speed Range – veilig toerentalbereik
- SBT Safe Break Test – veilige remtest

SISTEMA

Onafhankelijke softwaretools zoals SISTEMA (Safety Integrity Software Tool for the Evaluation of Machine Applications – veiligheidsintegriteitssoftware voor evaluatie van machinetoepassingen) helpen de machinebouwer om alle berekeningen voor de veiligheidstoepassing uit te voeren.

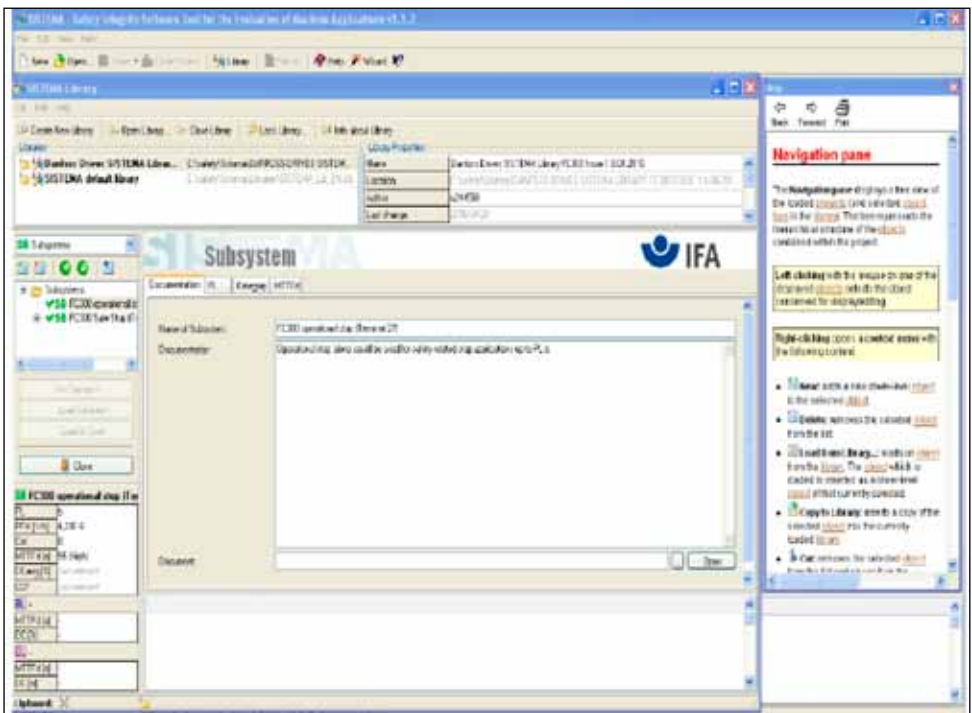


Fig. 3.16 Schermafbeelding van de SISTEMA-startpagina

De SISTEMA-softwaretool ondersteunt ontwikkelaars en testers van veiligheidsgerelateerde machinebesturingen bij het evalueren van de veiligheid binnen de context van ISO 13849-1. De software maakt het mogelijk om de structuur van de veiligheidsgerelateerde besturingscomponenten te modelleren op basis van de aangewezen architecturen. Deze modellering maakt geautomatiseerde berekening mogelijk van de betrouwbaarheidswaarden met diverse detailleringniveaus, waaronder die van het behaalde prestatieniveau (PL – performance level).

Relevante parameters worden stapsgewijs ingevoerd via invoerdialoogvensters, bijvoorbeeld:

- risicoparameters voor het bepalen van het vereiste prestatieniveau (PLr);
- de categorie van de SRP/CS;
- maatregelen tegen veelvoorkomende fouten (CCF – common-cause failures) op multikanaalssystemen;
- de gemiddelde kwaliteit van componenten (MTTFd);
- gemiddelde kwaliteit van testen (DCavg) van componenten en blokken.

De impact van elke parameterwijziging op het volledige systeem is onmiddellijk zichtbaar in de gebruikersinterface. De uiteindelijke resultaten kunnen worden afgedrukt in een samenvattend document.

4 Energiebesparing met frequentieomvormers

4.1 Potentieel

Elektromotoren zijn verantwoordelijk voor circa 48% van het elektriciteitsverbruik wereldwijd (1). In industriële toepassingen ligt dit percentage zelfs nog hoger. Afhankelijk van regio en industrietak wordt 65-75% van de elektrische energie gebruikt door elektromotoren. Daarom biedt elektrische-omvormertechnologie veel potentieel voor het terugdringen van het wereldwijd energieverbruik.

Frequentieomvormers maken de ontwikkeling en verbetering van energie-efficiëntere motortechnologieën mogelijk. Een nog belangrijker pluspunt is de hoofdreden waarom FC's werden ontwikkeld: instelbare toerenregeling. Toerenregeling helpt om processen te optimaliseren en motoren te laten werken bij optimaal toerental en koppel.

Als we de totale potentiële besparingen die in een systeem te behalen zijn, op 100% stellen, kan grofweg 10% van dat potentieel worden behaald door gebruik te maken van efficiëntere componenten, zoals motoren. Bedrijf met instelbare toerenregeling biedt een potentiële energiebesparing van circa 30%. De grootste besparing (circa 60%) is echter te behalen door het volledige systeem te optimaliseren.

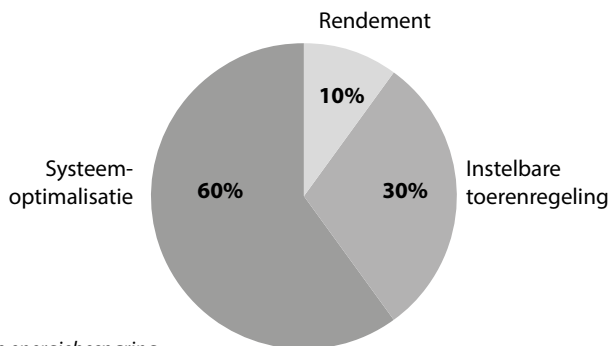


Fig. 4.1 Potentiële energiebesparing

Als rekening wordt gehouden met enkele essentiële punten, kunnen FC's leiden tot hoge energiebesparingen die snel en eenvoudig te realiseren zijn, aangezien de meeste toepassingen (circa 60-70%) geschikt zijn voor toerenregeling. Met name ventilatoren en pompen – die bijna 50% van de toepassingen uitmaken – zijn overduidelijke doelen vanwege hun enorme besparingspotentieel.

(1) Bron: 2008 – Internationaal energieagentschap

4.2 Rendement motor + frequentieomvormer

Het rendement van een systeem bestaande uit een toerengeregelde motor en een FC kan worden berekend door de afzonderlijke rendementen met elkaar te vermenigvuldigen.

$$\eta_{\text{Systeem}} = \eta_{\text{Motor}} * \eta_{\text{Frequentieomvormer}}$$

Typische FC-rendementscurves bij twee verschillende belastingen zijn te zien in Fig. 4.2 "Rendementsvoorbeeld van frequentieomvormers" (A = 100% belasting/B = 25% belasting). Het rendement van de FC is hoog over het volledige regelbereik, bij zowel hoge als lage belastingsniveaus.

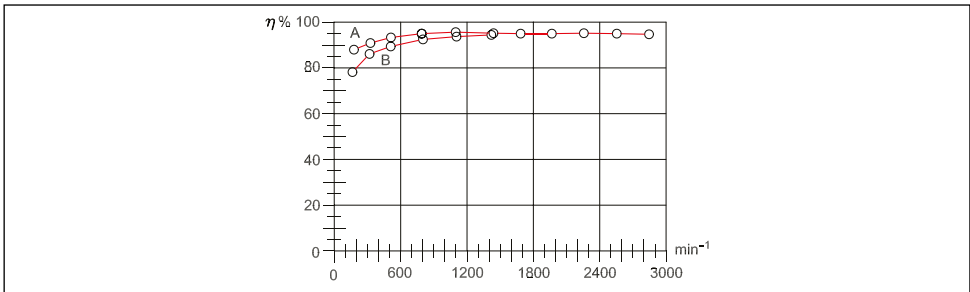


Fig. 4.2 Rendementsvoorbeeld van frequentieomvormers

Naast het economische aspect dat het hoge rendement van FC's leidt tot een lager energieverbruik, wordt ook het uit de installatie af te voeren gedissipeerde vermogen (warmte) verlaagd. Dit is belangrijk als de FC in een kast wordt geïntegreerd. Als de verliezen hoog zijn, zijn aparte koelapparaten nodig die eveneens energie verbruiken.

Motorrendementen bij normale en deelbelastingen worden vergeleken met die van de FC, zoals te zien is in Fig. 4.3 "Rendementsvoorbeeld" van een 2-polige motor (A = 100% belasting/B = 25% belasting).

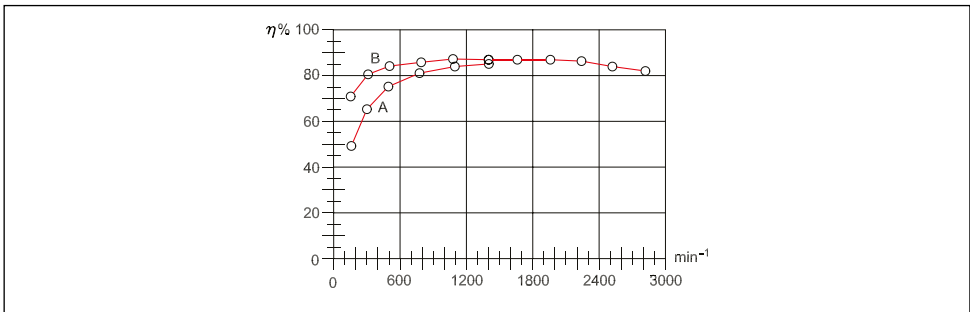


Fig. 4.3 Rendementsvoorbeeld van een 2-polige motor

Als gevolg hiervan heeft de motor een belangrijke invloed op het systeemrendement (Fig. 4.4 "Rendementsvoorbeeld van een combinatie van frequentieomvormer en motor" (A = 100% belasting/B = 25% belasting)).

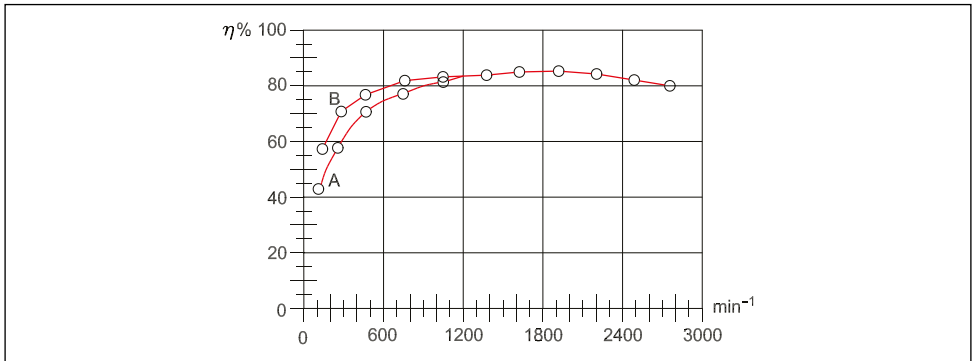


Fig. 4.4 Rendementsvoorbeeld van een combinatie van frequentieomvormer en motor

Hoewel het gebruikelijk is om het rendement van de verschillende componenten te specificeren, hangt de nauwkeurigheid van deze waarde sterk af van het aantal gebruikte decimalen. Daarom worden vaak ook de verliezen van de verschillende componenten vermeld. Zo zeggen verliezen van 143 W veel meer dan een rendement van 90,467% (gerelateerd aan 1,5 kW).

4.3 Classificatie van energie-efficiënte componenten

Het afstemmen van afzonderlijke componenten op een specifiek aandrijfsysteem biedt diverse voordelen ten opzichte van voorgeconfigureerde systemen, omdat het de technicus in staat stelt om het systeem te optimaliseren op basis van zijn vereisten. Voorgeconfigureerde systemen zijn altijd geoptimaliseerd voor algemene toepassingen en zijn nooit perfect voor alle toepassingen. Een mogelijke indicatie van het rendement van componenten is de rendementsklasse, indien vermeld.

Frequentieomvormer

De norm EN 50598-2 definieert rendementsklassen voor FC's. Omdat vermogens-elektronica diverse configuraties kent, zijn de klassen IE0-IE2 gedefinieerd voor complete aandrijfmodules (CDM's), bestaande uit gelijkrichter, tussenkring en omvormer (zie Fig. 4.5 "Definitie van CDM en PDS"). CDM's die in staat zijn om bijvoorbeeld remenergie naar het net terug te voeren, worden wel genoemd maar vallen hier niet onder, omdat ze doorgaans tweemaal zo hoge verliezen hebben.

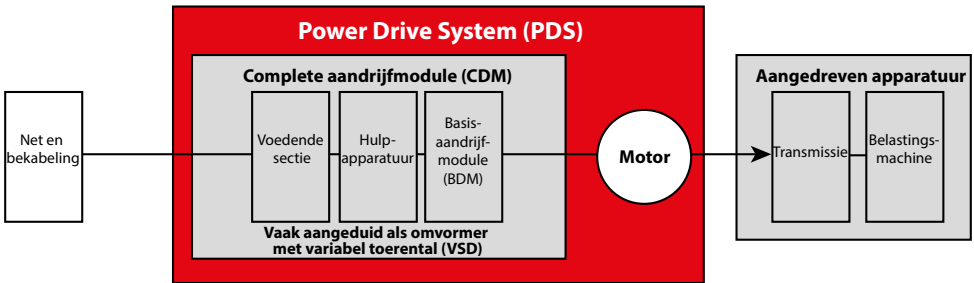


Fig. 4.5 Definitie van CDM en PDS

De IE-classes zijn gedefinieerd ten opzichte van een referentie-CDM (RCDM). Door dezelfde schaal aan te houden voor alle vermogensklassen, worden de klassen gedefinieerd op basis van relatieve verliezen. CDM's met relatieve verliezen in het bereik van $\pm 25\%$ van de RCDM worden geclassificeerd als IE1. CDM's met hogere verliezen zijn in IE0 ingedeeld, terwijl CDM's met lagere verliezen tot klasse IE2 behoren (zie Fig. 4.7 "Definitie van rendementsklassen voor CDM en PDS").

De classificatie houdt geen rekening met het rendement van de CDM bij lager(e) toerentallen/koppel, maar is gebaseerd op een relatief toerental van 100% en een relatieve koppel producerende stroom van 90%.

Ter verificatie wordt de CDM getest met alle opgenomen componenten bij een gedefinieerde testbelasting. Fijnafstelling of een speciale testmodus is niet toegestaan.

Transmissie

Hoewel het type transmissie een enorme impact op het systeemrendement kan hebben, zijn er geen rendementsklassen gedefinieerd. De volgende tabel geeft een indicatie van typische rendementen:

Direct aangedreven	100%	Platte riem	96...98%
Recht tandwiel	98%	V-riem	92...94%
Kegeltandwiel	98%	Tandriem	96...98%
Wormwiel	95%	Ketting	96...98%

Tabel 4.1 Typische transmissierendementen



Fig. 4.6 OneGearDrive is een direct aangedreven motor die geen tandwielkast heeft maar wel een hoog koppel produceert met hoog rendement

Motoren

Voor het vermogensbereik 0,12-1000 kW zijn de rendementsklassen IE1-IE4 voor elektromotoren gedefinieerd in de norm EN-IEC 60034-30-1. Hoewel de norm voor alle motortypen geldt, zijn bepaalde motorconstructies (bijv. remmotoren) niet opgenomen in de norm. Diverse landen en regio's gebruiken de IE-classificatielimieten om Minimum Efficiency Performance Standards (MEPS) te definiëren om het gebruik van motoren met laag rendement aan banden te leggen. De rendementsklasse is gerelateerd aan het nominale werkpunt van de motor. Rendementen bij volledig toerental maar met verlaagd koppel moeten worden vermeld op het typeplaatje of in de documentatie. Er gelden andere limieten voor voedingsfrequenties (50/60 Hz) en het aantal motorpolen (2, 4 of 6 polen).

Over klassen voor motoren die door FC's worden geregeld, wordt momenteel overlegd. Deze zullen worden gedefinieerd in EN-IEC 60034-30-2.

Combinatie van frequentieomvormer + motor

Rendementsklassen voor combinaties van frequentieomvormer en motor zijn in de norm EN 50598-2 gedefinieerd op basis van een IES-classificatie. Net als bij de CDM zijn de klassen voor het zogenaamde elektrische aandrijvingsysteem (PDS – power drive system), bestaande uit de combinatie van motor + FC (zie Fig. 4.5 "Definitie van CDM en PDS") gerelateerd aan een referentiesysteem (zie Fig. 4.7 "Definitie van rendementsklassen voor CDM en PDS"). PDS'en met 20% hogere verliezen dan de referentie zijn ingedeeld in klasse IE0, terwijl systemen met 20% lagere verliezen zijn opgenomen in klasse IES2.

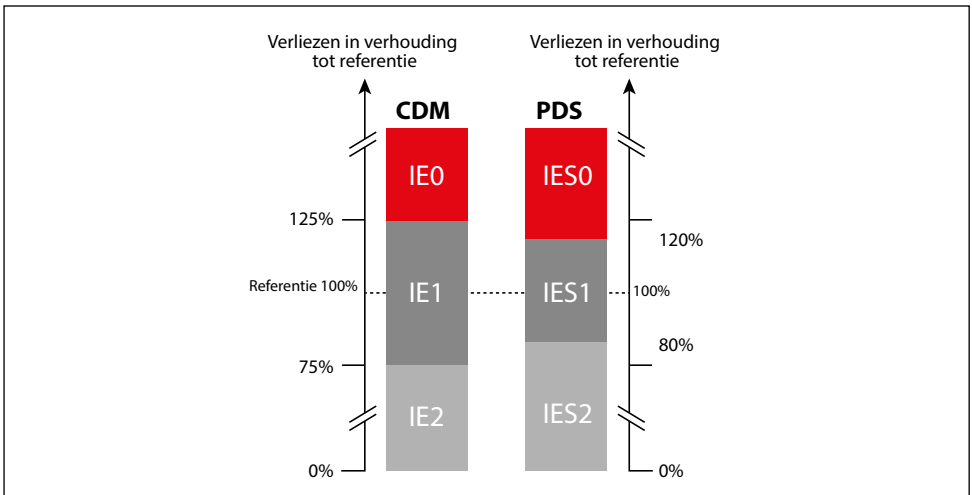


Fig. 4.7 Definitie van rendementsklassen voor CDM en PDS

De classificatie is gebaseerd op 100% relatief toerental en 100% relatief koppel. Wanneer de FC is ontworpen voor een kortere kabel of direct op de motor wordt gemonteerd, waarbij een kortere kabel kan worden gebruikt, moet dit in de documentatie worden vermeld. In het algemeen zijn allerlei typen optimalisaties mogelijk, zolang deze in de documentatie worden vermeld. Dit maakt het lastig om twee PDS-klassen met elkaar te vergelijken, omdat ze hoogstwaarschijnlijk een verschillende grondslag hebben.

De IES-klasse voor combinaties van FC en aandrijvingen onderstrepen hoe lastig het is om een systeem te optimaliseren en dat alle componenten zorgvuldig moeten worden geselecteerd om de toepassing te optimaliseren. Het verschil tussen voorgeconfigureerde en niet-geoptimaliseerde vrij gecombineerde systemen zal in de meeste gevallen gering zijn, maar het afstemmen van verschillende componenten maakt over het algemeen een fijnere afstelling van de machine mogelijk, waarmee de machinebouwer concurrentievoordeel realiseert.

4.4 Energie-efficiënte motorstart

De energie voor het starten van de motor kan worden opgedeeld in 3 belangrijke delen:

- energie die vereist is voor het aandrijven van de belasting;
- energie die vereist is voor het versnellen van de belasting en de motor;
- verliezen in motoren en besturing.

De eenvoudigste manier om een motor te starten, is om de motor direct op lijn (DOL) aan te sluiten, maar dit is geen efficiënte oplossing. De motor zal bij het starten hoge verliezen hebben vanwege de enorme slip bij het inschakelen van de spanning. Tijdens het versnellen van de motor worden de slip, en daarmee de verliezen, verlaagd.

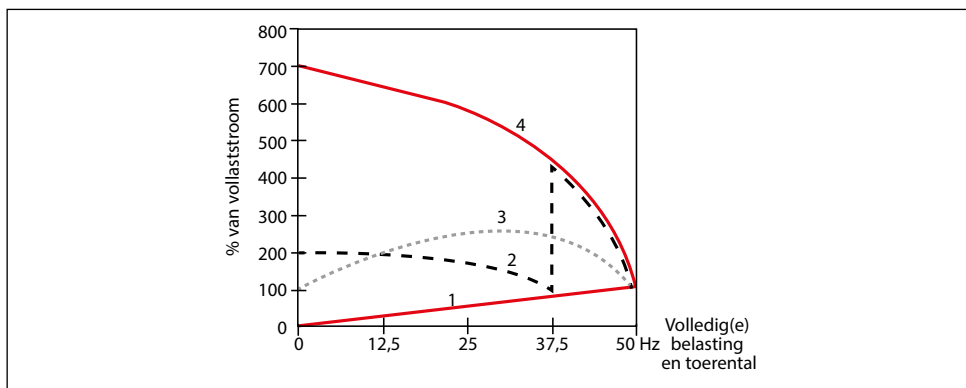


Fig. 4.8 Typische motorstroomcurves bij starten via (1): frequentieomvormer bij VT-belasting (2): ster-driehoekschakeling (3): softstarter (4): direct op lijn (DOL)

Het is mogelijk softstarters te gebruiken; deze passen de motorspanning net zo aan als ster-driehoekschakelingen, maar dan linear. Het apparaat verhoogt de spanning totdat een geprogrammeerde stroomgrens wordt bereikt. De begrenzing is afhankelijk van de toepassing, maar ligt meestal in het bereik van 300-500% FLC. Wanneer de motor versnelt, daalt de stroom en verhoogt de softstarter de spanning nog verder. Dit herhaalt zich tot de netspanning op de motor wordt geschakeld.

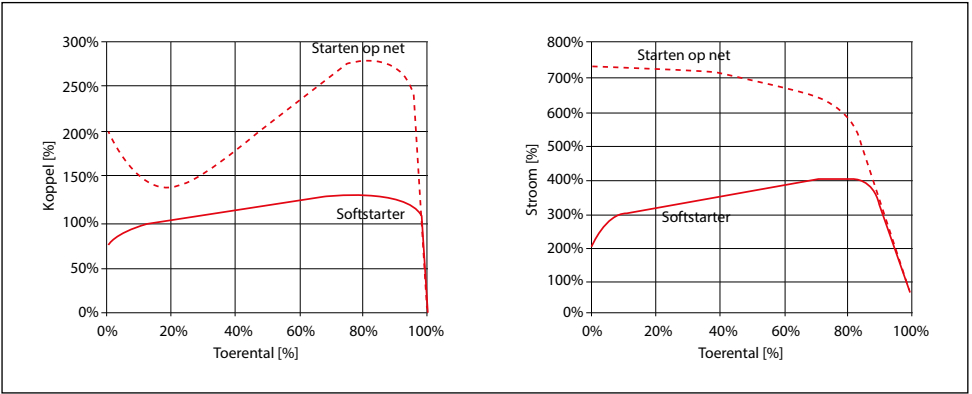


Fig. 4.9 Vergelijking tussen motorstart direct op net en motor gestart door een softstarter (400% stroomgrens)

Om de verliezen te minimaliseren, werken softstarters gewoonlijk via een bypass nadat de motor is gestart. Tijdens de startfase zijn de verliezen circa 4,5 W per A.

De efficiëntste manier om een motor te starten, is om FC's te gebruiken. Omdat spanning en frequentie worden geregeld, worden de slip, en daarmee de verliezen, verlaagd. Er kan een bypass worden gebruikt, zoals bij softstarters, maar dit wordt zelden toegepast.

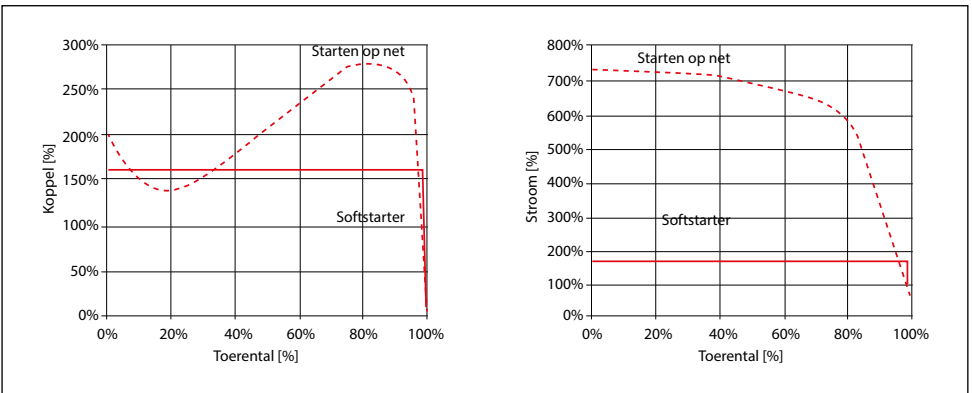


Fig. 4.10 Vergelijking tussen motorstart direct op net en een motor die door een frequentieomvormer wordt gestart bij 160% overbelasting

De karakteristieke curves voor koppel en stroom voor het starten van een motor met constante belasting direct op het net, met een softstarter en met een frequentieomvormer, zijn te zien in Fig. 4.9 "Vergelijking tussen motorstart direct op net en motor gestart door een softstarter" en Fig. 4.10 "Vergelijking tussen motorstart direct op net en een motor die wordt gestart door een frequentieomvormer bij 160% overbelasting". De curves zullen er anders uitzien bij andere belastingen.

4.5 Energie-efficiënte motorregeling

Alle motoren werken door het schakelen van de juiste spanning bij een bepaalde frequentie. Een draaiende as betekent niet automatisch dat de motor efficiënt werkt. Om een motor te regelen, zijn een besturingsalgoritme (U/f, spanningsvector, flux-vector...) en een besturingsstrategie nodig. Dat beide componenten afgestemd moeten zijn op een motortype is goed te zien bij motoren met permanentmagneten. Voor een energieoptimale werking moet de regelaar de golfvorm van de voedingsspanning zo nauwkeurig mogelijk afstemmen op de golfvorm van de tegen-EMK. Blokcommutatie wordt gebruikt voor trapeziumvormige tegen-EMK en sinuscommutatie voor sinusvormige tegen-EMK.

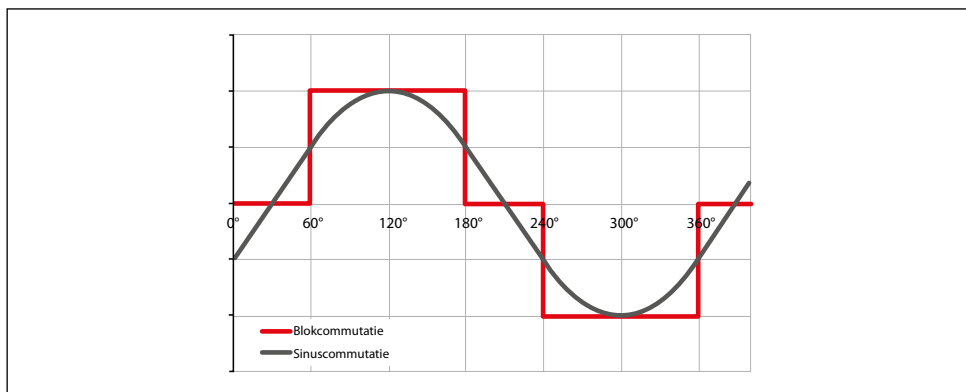


Fig. 4.11 Blok- t.o. sinuscommutatie

Blokcommutatie staat bekend om bepaalde nadelen zoals koppelrimpel en overmatige ruis. Wat betreft de efficiëntie zijn de twee technologieën echter vergelijkbaar.

Besturingsstrategieën die vaak worden toegepast in verschillende besturingsalgoritmes, zijn:

Constante koppelhoek

Maximaal koppel wordt geproduceerd wanneer de koppelhoek constant op 90° wordt gehouden. De constante-koppelhoekstrategie houdt de hoek constant door de stroom op de d-as van de rotor op nul te regelen en de stroomvector op de y-as te laten.

Maximaal koppel per ampère

Deze strategie minimaliseert de statorstroomsterkte voor een vereist koppel, terwijl rekening wordt gehouden met reluctantiemomenten. Schommelingen in inductanties tijdens bedrijf moeten worden meegenomen voor de beste resultaten.

Regeling met constante arbeidsfactor van 1

Bij deze strategie wordt de hoek tussen de stroom- en spanningsvector constant gehouden, zodat het nominale schijnbare vermogen van de omvormer kan worden verlaagd.

Daarnaast bieden FC's extra functionaliteit voor verlaging van de magnetische veldsterkte bij een lagere belasting. Dit kan worden gedaan via speciale U/f-karakteristieken of functies voor automatische energieoptimalisatie (AEO).

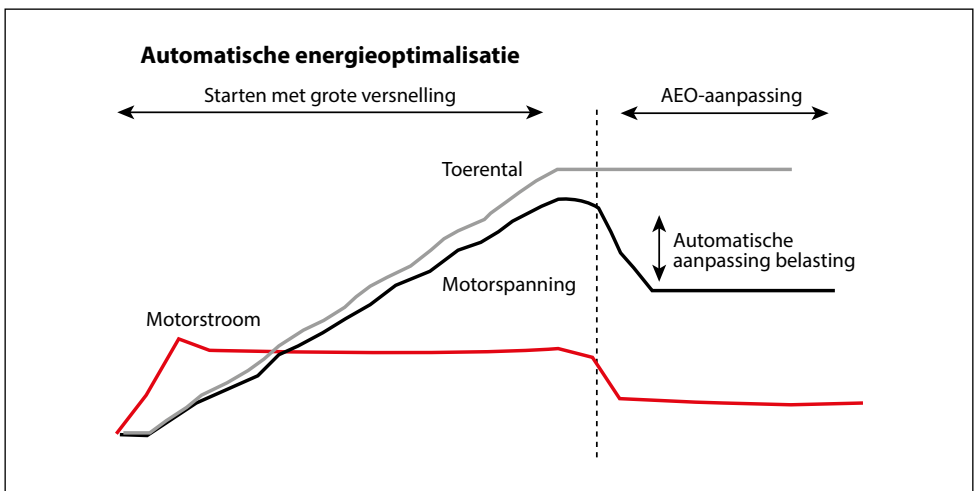


Fig. 4.12 Automatische energieoptimalisatie

Automatische aanpassingen vinden plaats nadat de toepassing een stabiele toestand heeft bereikt. De toegepaste besturingsstrategie verlaagt het magnetiseringsniveau en daarmee het energieverbruik. Om een betrouwbare werking te garanderen, is een geoptimaliseerde balans nodig tussen energiebesparing en de beschikbaarheid van voldoende magnetisering om plotselinge belastingspieken op te vangen. Zie Fig. 4.12 "Automatische energieoptimalisatie".

Het gemiddelde energiebesparingspotentieel voor kleine tot middelgrote omvormers is 3-5% van het nominale motorvermogen tijdens bedrijf bij lage belastingen. Een zeer belangrijk neveneffect is dat de motor bijna geluidloos werkt bij lage belastingen – ook bij lage tot gemiddelde schakelfrequenties.

4.6 Belasting over tijd

Elke component in een systeem heeft verliezen; vandaar dat het toevoegen van extra componenten aan een systeem zo mogelijk moet worden vermeden. Dit geldt ook voor FC's. Het toevoegen van een FC aan een motor die de hele dag door draait op volledige belasting en volledig toerental zal leiden tot extra verliezen. Zodra verlaging van toerental en koppel echter zinvol is voor de toepassing, zal toepassing van een FC het energieverbruik verlagen. De haalbare besparing hangt af van het belastingsprofiel over tijd, de koppelkarakteristieken en het rendement van de motor en het aandrijfsysteem bij de specifieke deellastpunten.

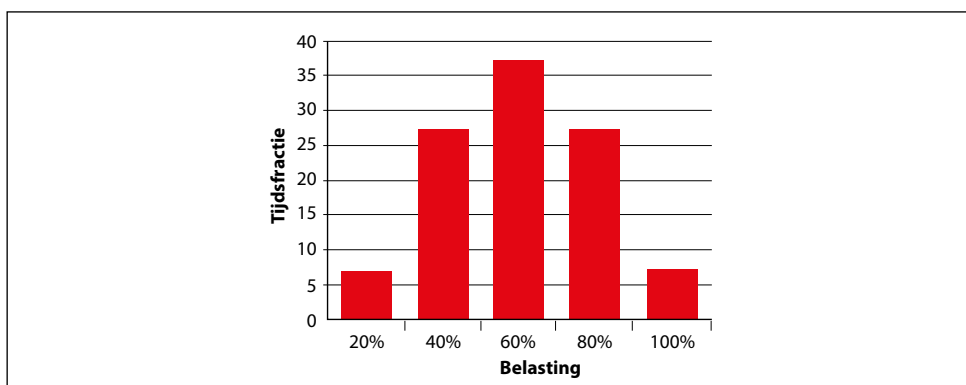


Fig. 4.13 Belasting-over-tijdsfractiegrafiek geeft aan hoe lang een belasting wordt aangedreven bij deellast

Deellast wordt gebruikt in twee verschillende contexten. Wanneer een motor werkt op het net, is de toegevoerde motorfrequentie vast en varieert het toerental enkel op basis van de belasting. Wanneer de motor wordt bestuurd door een FC, verwijst deellast naar het koppel bij een bepaald toerental waarbij de koppelkarakteristiek wordt gegeven door de toepassing. In feite werken de meeste toepassingen in deellast. Dit geldt ook voor motoren die direct op het net werken, aangezien deze gewoonlijk overgedimensioneerd zijn.

4.6.1 Toepassingen met variabel koppel

Toepassingen met variabel koppel betreffen vaak pompen en ventilatoren. In geval van pompen moet er echter een onderscheid worden gemaakt. Hoewel de meest gangbare typen centrifugaalpompen een kwadratisch koppelkarakteristiek hebben, hebben excentrische, vacuüm- of verdringerpompen een constantkoppelkarakteristiek.

Het energiebesparingspotentieel van centrifugaalpompen en ventilatoren is zeer hoog, aangezien deze machines de affiniteitswetten volgen.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \text{ Debiet is evenredig aan toerental}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \text{ Druk of opvoerhoogte is evenredig aan kwadraat van toerental}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \text{ Vermogen is evenredig aan derde macht van toerental}$$

De flow Q neemt lineair toe met een toenemend toerental (tpm), terwijl de druk/opvoerhoogte H kwadratisch toeneemt en het opgenomen vermogen P kubiek toeneemt. In theorie resulteert een toerentalverlaging van 20% in een energiebesparing van 50%.

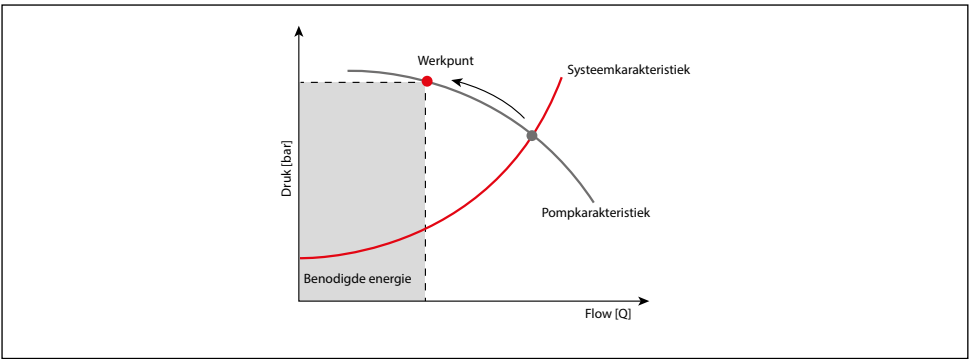


Fig. 4.14 Vereiste energie in een pomptoepassing met variabel koppel voor smookklepregeling

In veel ventilator- en pompsystemen worden wervelkleppen, luchtregelkleppen of smookkleppen gebruikt om het systeemdebiet te regelen. Als een centrifugaalpomp wordt geregeld met behulp van een smookklep, wordt het werkpunt van de machine door smoren verplaatst langs de pompkarakteristiek. De behaalde vermindering van de energiebehoefte ten opzichte van het nominale werkpunt van de pomp is minimaal.

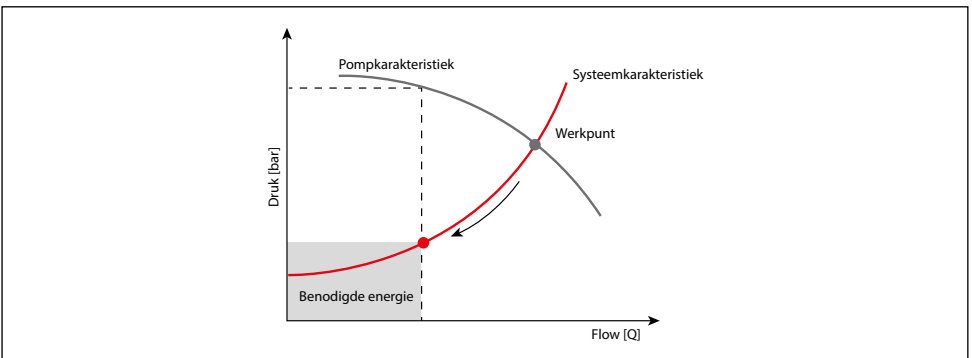


Fig. 4.15 Benodigde energie in een pomptoepassing met variabel koppel voor toerenregeling

Bij een toerengeregelde ventilator/pomp beweegt het werkpunt langs de systeemkarakteristiek. Hierdoor verwijderd de eenheid zich van het optimale rendementspunt en zal het rendement gewoonlijk iets afnemen, maar de energiebesparing die wordt gerealiseerd vanwege het verlaagde toerental is nog altijd veel hoger dan bij het gebruik van smookkleppen of andere mechanische regelingen. In de praktijk zal de gerealiseerde energiebesparing afwijken van de theoretische, omdat verliezen in buizen en leidingwerk resulteren in een basisbelasting en dus extra verliezen.

In pomptoepassingen is vaak een minimaal toerental (afhankelijk van toepassing en type/merk pomp) vereist om bezinking van vaste stoffen te vermijden en voldoende smering van de pomp te waarborgen. Als het bereik tussen het minimale toerental en het toerental voor het maximaal vereiste vermogen te groot is, kan het systeem in cascade worden geschakeld. Wanneer pompen in cascade worden geschakeld, neemt één toerengeregelde pomp de basisbelasting voor zijn rekening. Als het verbruik toeneemt, zal de frequentieomvormer een voor een meer pompen inschakelen. De pompen werken hierdoor waar mogelijk met maximaal rendement. De pompregeling zorgt ervoor dat het systeem altijd zo energie-efficiënt mogelijk is. Bij bepaalde toepassingen hebben meerdere pompen toerenregeling. Cascades kunnen op vergelijkbare wijze worden gebruikt voor andere toepassingen, zoals ventilatoren of compressoren.

4.6.2 Toepassingen met constant koppel

Toepassingen met constant koppel zijn toepassingen waarbij de belasting gewoonlijk niet noemenswaardig verandert bij gewijzigd toerental. Dit geldt onder meer voor transportbanden, takels en mixers.

Als een motorblok bijvoorbeeld op een horizontale transportband wordt geplaatst, zal het gewicht van dat motorblok niet veranderen, ongeacht de snelheid van de transportband. Het koppel dat nodig is om dit motorblok te verplaatsen, blijft altijd hetzelfde. Het wrijvingskoppel en het versnellingskoppel zullen uiteraard veranderen op basis van de bedrijfscondities, maar het koppel dat nodig is om de last te verplaatsen, blijft altijd gelijk.

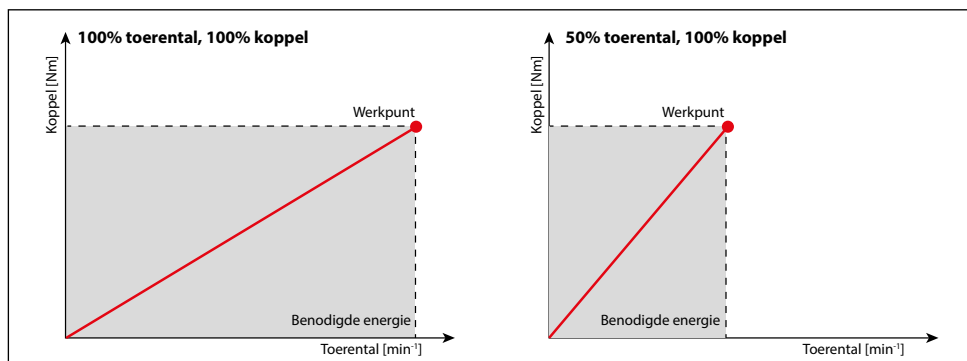


Fig. 4.16 Benodigde energie bij verschillende toerentalen en belastingen

De voor een dergelijk systeem benodigde energie is evenredig met het vereiste koppel en het toerental van de motor.

$$P \sim T \times n$$

Als het toerental kan worden verlaagd van een constant-koppelbelasting, zoals bij koelcycli, leidt dit onder meer tot een directe energiebesparing. Bij andere toepassingen met een constant-koppelbelasting zal een verlaagd toerental niet veel impact hebben. Als het toerental van een transportband bijvoorbeeld wordt verlaagd, is ongeveer dezelfde hoeveelheid energie nodig om de goederen van A naar B te transporteren, omdat de afstand gelijk blijft. Enige besparing wordt gerealiseerd dankzij factoren zoals lagere wrijvingsverliezen of geoptimaliseerde versnelling. Desondanks neemt het gebruik van toerenregeling bij toepassingen met constant-koppelbelasting steeds verder toe, vanwege de voordelen voor het proces zelf.

4.7 Levenscycluskosten

Potentiële energiebesparingen zijn te vinden in bijna alle sectoren, zoals gebouw-automatisering, transportbandsystemen en chemische processen.

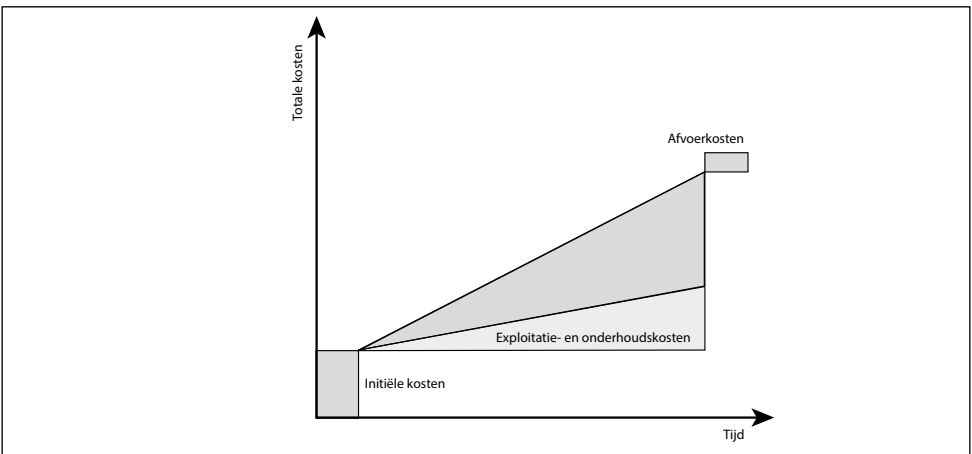


Fig. 4.17 De initiële kosten bedragen gewoonlijk slechts 10% van de totale levensduurkosten. De hogere initiële kosten van een energiebesparend apparaat worden vaak binnen de kortste tijd terugverdiend.

4.8 Systeembesparingen

Ongeacht of het energierendement van een nieuw(e) of een bestaand(e) proces/machine zal worden verbeterd, er moet altijd naar het gehele systeem worden gekeken. Bestaande installaties hebben het voordeel dat er metingen kunnen worden uitgevoerd om de verliezen te bepalen, wat een referentiepunt creëert op basis waarvan kan worden beoordeeld of verbeteringen aan het systeem het verwachte resultaat hebben.

Fig. 4.18 “Overzicht van een motoraandrijfsysteem met verschillende onderdelen” - toont een aandrijfsysteem van een transportband inclusief een aantal componenten die standaard of optioneel in een aandrijfsysteem aanwezig zijn.

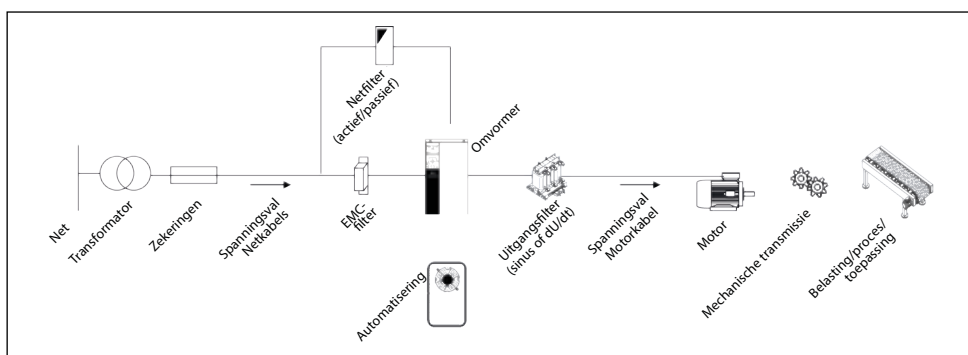


Fig. 4.18 Overzicht van een motoraandrijfsysteem met verschillende onderdelen

De configuratie en dimensionering van het systeem hangen af van de toepassing (transmissie, motor, uitgangsfiler en motorkabel) en de omgeving (EMC-filer, uitgangsfilters, kabels, net, klimaat enz.). Daarom moeten het ontwerp en de energiebesparingsanalyse altijd beginnen met een evaluatie van de toepassing. Het heeft geen zin om een of twee uiterst efficiënte componenten te selecteren als deze een negatief effect op het rendement van het systeem als geheel hebben. Dit wordt geïllustreerd in het volgende voorbeeld.

Voordat een investeringsbesluit wordt genomen, moeten niet alleen de technische, maar ook de commerciële en logistieke aspecten worden onderzocht, zodat onrendabele of contraproductieve maatregelen kunnen worden vermeden of tot een minimum worden beperkt. TCO (Total Cost of Ownership = totale exploitatiekosten) en LCC (Life Cycle Costs = kosten gedurende de volledige levensduur) zijn methoden die voor een dergelijke evaluatie worden gebruikt.

Een analyse van de levenscycluskosten omvat niet alleen de aanschaf- en installatiekosten, maar ook de kosten van energie, bediening, onderhoud, stilstandtijd, het milieu en het afvoeren. Twee factoren – energiekosten en onderhoudskosten – zijn van doorslaggevende betekenis voor de levenscycluskosten.

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_{env} + C_d$$

C_{ic} = investeringskosten (aanschafkosten)

C_{in} = installatie- en inbedrijfstellingskosten

C_e = energiekosten C_s = kosten wegens stilstandtijd en verloren productie

C_o = bedrijfskosten C_{env} = milieukosten

C_m = onderhoudskosten C_d = kosten voor uitbedrijfname en afvoer

Een van de belangrijkste factoren in de levenscycluskostenformule wordt gevormd door de energiekosten. Hogere deel-investeringen die het energieverbruik nog verder terugdringen, zullen niet in alle toepassingen even veel invloed hebben.

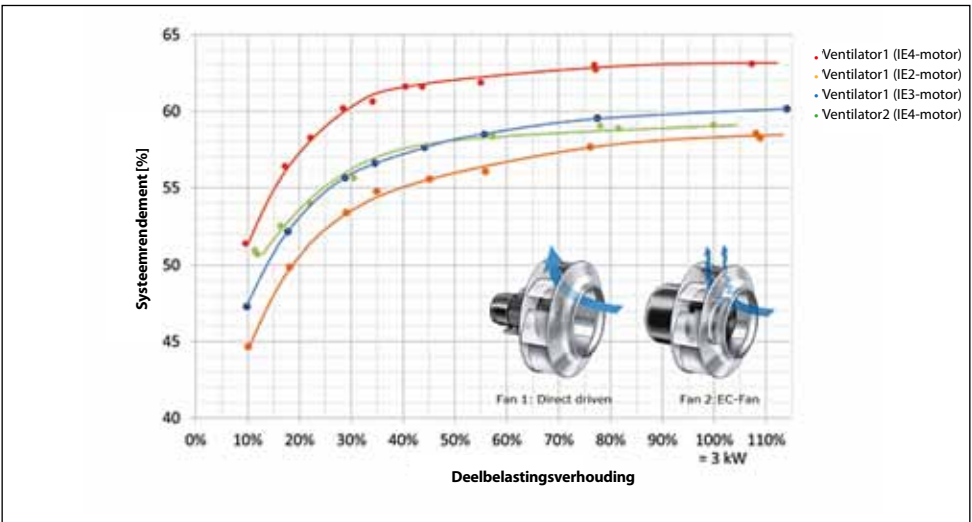


Fig. 4.19 Meting van verschillende ventilatorsystemen met 3 kW overeenkomstig DIN-EN-ISO 5801 in één ventilatie-eenheid

Ventilator 1 is een direct aangedreven type en het systeemrendement neemt toe wanneer efficiëntere motoren (hogere IE-klasse) worden gebruikt. Ventilator 2 is een EC-ventilator met motor met hoog rendement. Het lagere systeemrendement is het gevolg van het ventilatorontwerp. Omdat de motor als naaf in de EC-ventilator wordt geplaatst, wordt de luchtstroom verstoord en neemt het systeemrendement af.

De meeste toepassingen zijn geschikt voor toerenregeling, maar dit moet wel van geval tot geval worden beoordeeld. Zo zijn niet alle compressoren ontworpen voor toerenregeling en er moet rekening worden gehouden met hun minimale en maximale toerental. Bovendien kunnen te korte of te snelle ramptijden kritiek zijn.

4.9 Het gebruik van geregenereerd vermogen

Elektromotoren kunnen in generatormodus werken, bijvoorbeeld wanneer een asynchrone motor sneller loopt dan het synchrone toerental. Dit kan gebeuren wanneer de motor wordt teruggeregeld naar een lager toerental. In de meeste gevallen zal de gebruiker de gegenereerde energie vervolgens afvoeren naar remweerstand, die de energie omzetten in warmte. In de praktijk zijn er twee gangbare technische oplossingen om deze energie terug te voeren naar het net of aan andere machines te leveren.

Koppeling van tussenkringen

Sommige FC's kunnen hun DC-tussenkring koppelen aan de tussenkring van andere apparaten. Hierdoor kunnen andere apparaten rechtstreeks worden voorzien van geregenereerde energie. Er gelden echter enkele beperkingen waarmee rekening moet worden gehouden. Zo moeten gebruikers er altijd voor zorgen dat een apparaat bij kortsluiting de andere apparaten niet kan beschadigen. Gebruikers moeten uiteraard ook opletten wat er gebeurt als alle gekoppelde apparaten tegelijkertijd geregenereerde energie afgeven.

Terugleveren van vermogen (regenereren)

“Active Front End” of “Active Infeed Converters” kunnen geregenereerd vermogen terugleveren aan het net. Of het gebruik van regeneratieve apparaten rendabel is, hangt af van 3 factoren:

1. Beschikbare energie

De meeste toepassingen produceren tijdens vertragsprocessen energie. Deze energie neemt tijdens de toerentalverandering steeds verder af. In theorie staat de geregenereerde energie gelijk aan 50% van het verschil tussen de in het systeem aanwezige bewegingsenergie bij het begin en de energie aan het eind van de vertraging, maar in de praktijk ligt dit cijfer ergens tussen 10 en 20%. Uitzonderingen hierop zijn te zien in liften, kranen en takels. Daarnaast zijn de nominale motorprestaties niet gelijk aan de geregenereerde energie, aangezien overdimensionering van motoren gebruikelijk is. Slechts zelden komt het nominale motorvermogen exact overeen met het daadwerkelijk door de toepassing benodigde vermogen.

2. Verliezen

Motor, kabels, tandwielen en zelfs de AIC zelf genereren verliezen die de energie beperken die kan worden teruggevoerd naar het net.

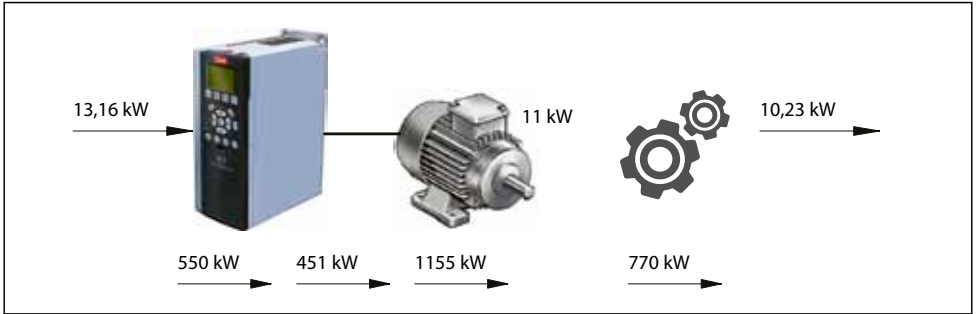


Fig. 4.20 *Systeemverliezen bij motorwerking*

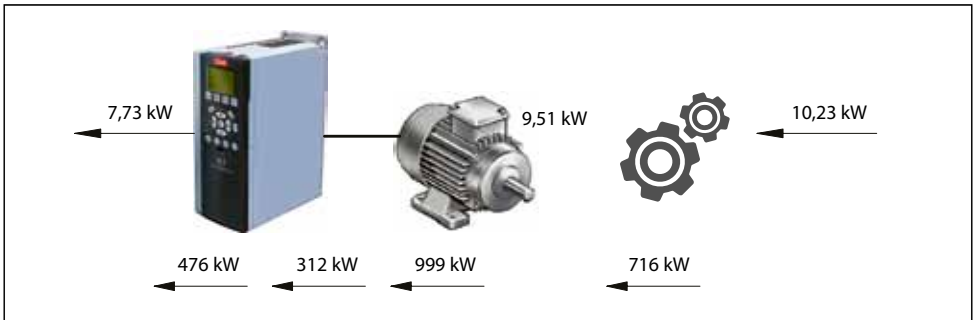


Fig. 4.21 *Systeemverliezen bij generatorwerking*

De verliezen die door de AFE of AIC zelf worden veroorzaakt, zijn veel hoger dan voor een standaard FC, vanwege de actieve gelijkrichter waarvan de verliezen twee keer zo hoog kunnen zijn, zowel tijdens bedrijf als in stand-by. Afhankelijk van de constructie produceren regeneratieve FC's zonder de benodigde filters meer harmonische stromen, die ook kunnen leiden tot hogere verliezen op het net.

3. Belastingcyclus in de praktijk

Hoe vaker de motor in generatormodus werkt, hoe meer energie er wordt teruggevoerd naar het net. Daarom is het nodig om rekening te houden met situaties tijdens een belastingscyclus waarbij energie wordt gegenereerd. Naast de belastingscyclus zelf bepaalt ook het aantal belastingscycli de totale hoeveelheid geregenereerde energie gedurende een bepaalde tijd.

Voor de meeste toepassingen is een investering in AIC niet rendabel, aangezien deze gewoonlijk duurder zijn dan standaard omvormers. Het voorbeeld van een lift laat zien dat een AIC ook een negatieve invloed kan hebben, en dat terwijl liften gewoonlijk worden gezien als de optimale toepassing voor AIC.

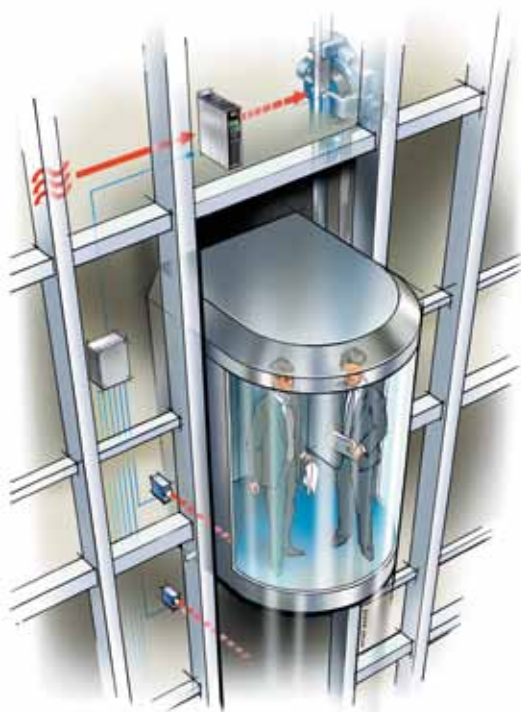
Toepassing: Lift in een wooncomplex
 Belasting: 1100 kg
 Werking: 1 uur per dag
 $\eta_{\text{gear}}=90\%$ $\eta_{\text{Hoist way}}=80\%$ $\eta_{\text{Motor}}=88\%$ (IE2) $\eta_{\text{AIC}}=95\%$ $\eta_{\text{VSD}}=97\%$
 Stand-byverliezen: AIC = 40 W, VSD = 40 W

Resultaat:

	AFE/AIC	Standaard VSD
Motorverliezen per jaar	47 kWh	34 kWh
Stand-byverliezen per jaar	336 kWh	168 kWh
Gegeneerde energie per jaar	170 kWh	–
Balans	213 kWh	202 kWh

Tabel 4.2 Voorbeeld energieverbruik voor lift

De in het voorbeeld gebruikte waarden zijn zeer conservatief. U zult het misschien niet verwachten, maar een bedrijfstijd van één uur is bijzonder hoog voor een lift in een typisch wooncomplex. Desondanks is de energiebalans negatief. Dit toont aan dat er goed moet worden nagedacht over toepassingen waarbij mogelijk AIC's kunnen worden gebruikt.



5 Elektromagnetische compatibiliteit

5.1 EMI en EMC

Elektromagnetische interferentie (EMI) is de aantasting van de prestaties van apparatuur als gevolg van elektromagnetische verstoringen.

Een voorbeeld van EMI is wanneer willekeurige punten en lijnen (vaak aangeduid als "sneeuw") op het scherm van een televisie verschijnen wanneer in dezelfde ruimte een stofzuiger wordt gebruikt. In dit voorbeeld is de stofzuiger de interferentiebron en de tv het slachtofferapparaat.

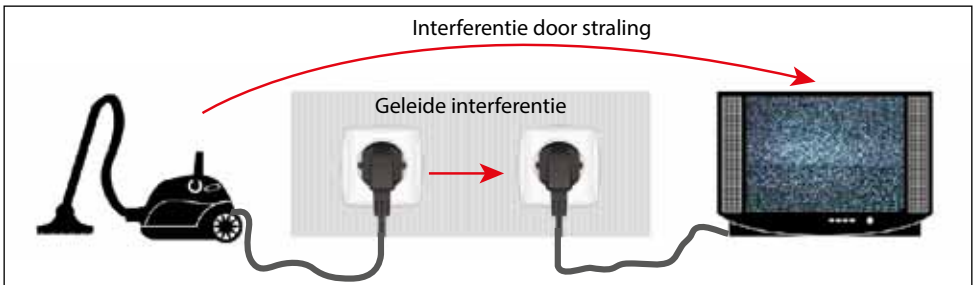


Fig. 5.1 Verschil tussen interferentie door straling en interferentie door geleiding

Elektromagnetische ruis kan zich voortplanten via geleiders (geleide interferentie) of via elektromagnetische golven (gestraalde interferentie). Er zijn vier koppelingsmechanismen voor interferentie:

- Galvanische koppeling treedt op wanneer twee circuits (interferentiebron en -slachtoffer) een gemeenschappelijke elektrisch geleidende verbinding hebben.
- Capacitieve koppeling (ook wel elektrische koppeling genoemd) treedt op wanneer twee elektrische circuits een gemeenschappelijke referentie hebben en de interferentie tussen twee geleiders wordt gekoppeld via parasitaire capaciteiten.
- Inductieve koppeling (ook wel magnetische koppeling genoemd) treedt op wanneer het magnetische veld rond een stroomvoerende geleider wordt geïnduceerd in een andere geleider.
- Elektromagnetische koppeling treedt op wanneer de interferentiebron elektromagnetische energie uitstraalt via een geleider die fungeert als zendantenne. Het slachtoffercircuit ontvangt de verstoring via een geleider die fungeert als ontvangstantenne.

Er kunnen diverse bronnen van elektromagnetische interferentie zijn, bijvoorbeeld:

- natuurlijke bronnen zoals bliksem;
- elektrische apparatuur die onbedoeld elektromagnetische straling produceert – bijvoorbeeld een frequentieomvormer of voeding;
- elektrische apparatuur die opzettelijk elektromagnetische straling produceert – bijvoorbeeld een draagbare radiozender

De kunst van EMI-foutopsporing bestaat uit het identificeren van de interferentiebron en het koppelingsmechanisme en het beperken van de interferentiekoppeling tot een aanvaardbaar niveau.

De toestand waarbij een apparaat of systeem in staat is naar behoren te werken in zijn elektromagnetische omgeving, zonder onaanvaardbare verstoringen in die omgeving te introduceren, wordt elektromagnetische compatibiliteit (EMC) genoemd. Het is belangrijk om te beseffen dat de definitie van EMC twee aspecten kent:

- Immuniteit: het vermogen van de apparatuur om te functioneren in de aanwezigheid van een bepaalde mate van elektromagnetische interferentie
- Emissie: de onbedoelde emissies van apparatuur moeten worden beperkt tot een aanvaardbaar niveau

Het verschil tussen de emissiemarge en de immuniteitsmarge wordt de compatibiliteitskloof genoemd.

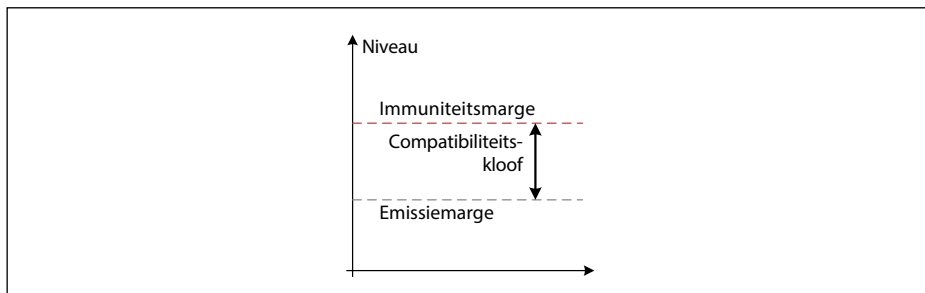


Fig. 5.2 Toelichting op compatibiliteitskloof

RFI of EMI?

De termen radiofrequente interferentie (RFI) en EMI worden vaak door elkaar gebruikt. RFI is een oudere term die verwijst naar de verstoring van de ontvangst van radiosignalen (radio, tv, draadloze communicatie). EMI is een nieuwere term die in brede zin verwijst naar interferentie van alle elektrische apparatuur, met inbegrip van frequentieomvormers.

Common mode en differentiële modus

Wanneer er wordt gesproken over interferentie door geleiding, worden vaak de termen common mode (CM) en differentiële modus (DM) gebruikt.

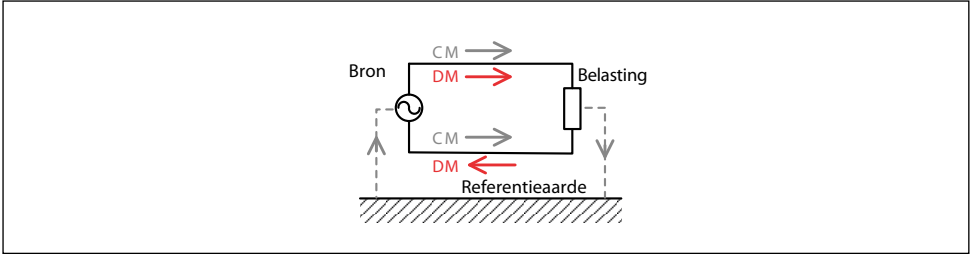


Fig. 5.3 Common mode en differentiële modus

DM-ruis (differentiële modus) wordt in tegenovergestelde richting geleid op beide lijnen van de stroomkring, in serie met het gewenste signaal. CM-ruis (common mode) wordt op beide lijnen in dezelfde richting geleid en het retourpad loopt via een gemeenschappelijke referentieaarde.

5.2 EMC en frequentieomvormers

Emissie

FC's worden gekenmerkt door een snelle schakeling van spanningen (hoge du/dt -niveaus) in het bereik van duizenden $V/\mu s$ en amplitudes in het bereik van 500-1000 V (afhankelijk van de voedingsspanning) en hoge stroomniveaus. Hierdoor zijn FC's een mogelijke bron van EMI en moet de EMC-correcte installatie nauwlettend worden gevolgd.

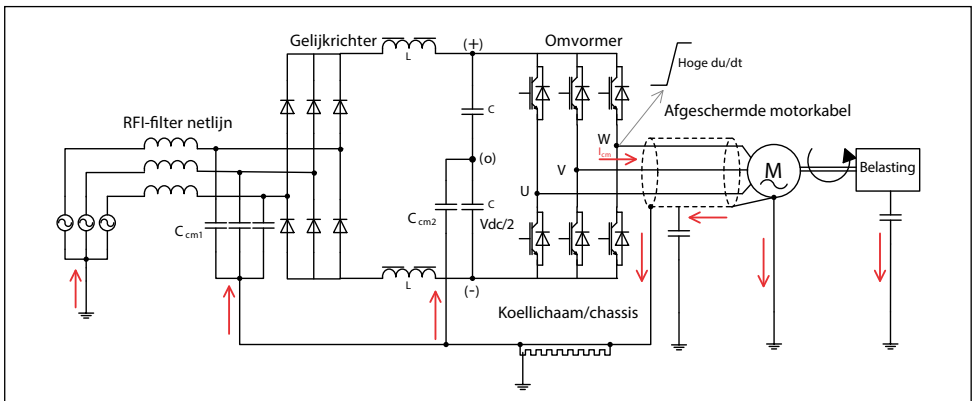


Fig. 5.4 Verspreiding van interferentie in een frequentieomvormer

De bron van de interferentie is de spanningsbronomvormer die een pulsvormige uitgangsspanning produceert met zeer korte stijg- en daaltijden (ook uitgedrukt als een hoge du/dt). Deze spanning wordt over parasitaire capaciteiten naar aarde geschakeld in de motorkabel en in de motor, en resulteert in een common-modestroom:

$$I_{cm} = C_{cm} \times \frac{du}{dt}$$

waarbij C_{cm} de parasitaire capaciteit naar aarde is.

De common-modestroom moet de kring sluiten en terugkeren naar zijn bron, de DC-tussenkring. Het regelen van het retourpad van de common-modestroom is essentieel om de elektromagnetische interferentie onder controle te houden. In de FC bevinden zich common-modecondensatoren – dat wil zeggen, condensatoren tussen het FC-circuit en aarde. De common-modecondensatoren zijn te vinden in het RFI-circuit (C_{cm1} of als ontkoppelingscondensatoren in de DC-tussenkring (C_{cm2}). Als een afgeschermd motorkabel wordt gebruikt, het motoruiteinde van de kabel is aangesloten op het motorchassis en het FC-uiteinde is aangesloten op het FC-chassis, vloeit de common-modestroom in het ideale geval via de common-modecondensatoren terug naar de DC-tussenkring. De common-modestroom die via de netvoeding terugvloeit, is ongewenst, omdat deze interferentie kan veroorzaken in andere apparatuur die op het net is aangesloten. Daarom moet deze stroom worden geminimaliseerd, bijvoorbeeld door gebruik te maken van RFI-filters. Bij gebruik van niet-afgeschermd kabels vloeit slechts een deel van de common-modestroom terug via het FC-chassis en common-modecondensatoren, waardoor meer interferentie op het net wordt veroorzaakt.

Immunititeit

In een FC-toepassing moet rekening worden gehouden met zowel immunititeit als ruisemissie. De op een FC aangesloten stuursignalen kunnen erg gevoelig zijn voor ruis. In het algemeen geldt dat analoge signalen gevoeliger zijn dan digitale signalen. Daarom is het beter om gebruik te maken van digitalebuscommunicatie in plaats van analoge referentiesignalen. Als het gebruik van analoge signalen niet kan worden vermeden, is een 4-20 mA-stroomreferentiesignaal te verkiezen boven een 0-10 V-spanningsreferentiesignaal, omdat een stroomsignaal minder gevoelig is voor ruis.

5.3 Aarding en afscherming

Aarding

Aarding is het aansluiten van elektrische apparatuur op een referentiemassa of aarde. Er zijn twee redenen om dit te doen:

- Elektrische veiligheid: veiligheidsaarding zorgt ervoor dat in geval van aantasting van de elektrische isolatie geen spanning staat op elektrisch geleidende delen die door personen kunnen worden aangeraakt, waardoor het risico op elektrische schokken wordt vermeden.
- Interferentie beperken: signaalaarding vermindert spanningsverschillen die ruisemissie of gevoeligheidsproblemen kunnen veroorzaken.

Vergeet nooit dat elektrische veiligheid altijd de hoogste prioriteit heeft – hoger dan EMC.

Er zijn diverse typen aarding gangbaar.

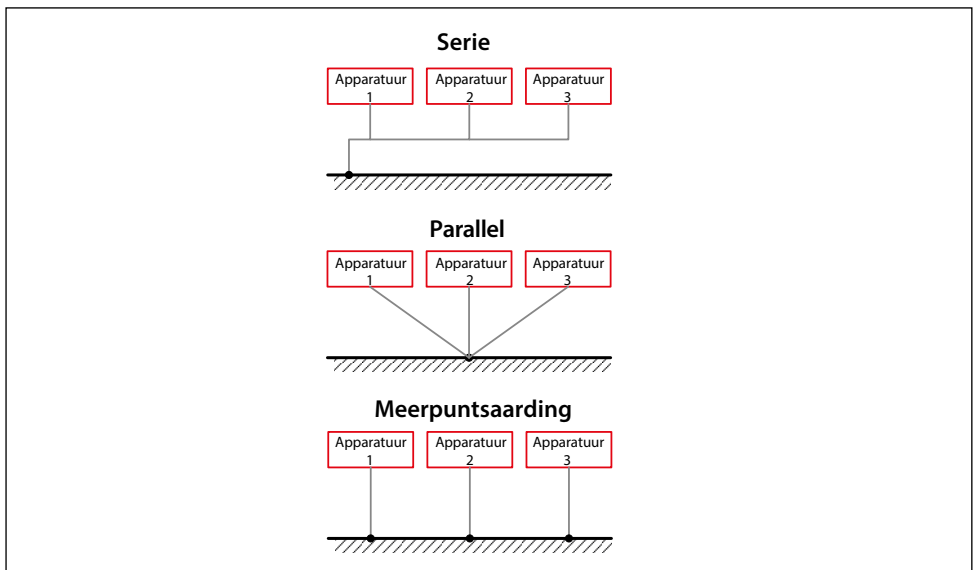


Fig. 5.5 Eenpuntsaarding in serie of parallel, of meerpuntsaarding zijn mogelijk

De verschillende typen aarding hebben voor- en nadelen. Waar het uiteindelijk echter om gaat, is dat de impedantie van de aardverbinding zo laag mogelijk is om vereffening tussen de aangesloten apparatuur mogelijk te maken.

Afscherming

Afscherming wordt gebruikt voor zowel immuniteit (bescherming tegen externe interferentie) als emissie (voorkomen dat interferentie wordt uitgestraald). In FC-toepassingen worden afgeschermd kabels gebruikt voor zowel vermogenskabels (motorkabel en remweerstandkabel) als signaalkabels (analoge referentiesignalen, buscommunicatie).

De afschermingsprestaties van een kabel worden aangeduid met de overdrachtsimpedantie Z_T . De overdrachtsimpedantie geeft het verband tussen een stroom op het oppervlak van de afscherming en de spanningsval die door deze stroom wordt geproduceerd op het oppervlak van het andere uiteinde van de afscherming:

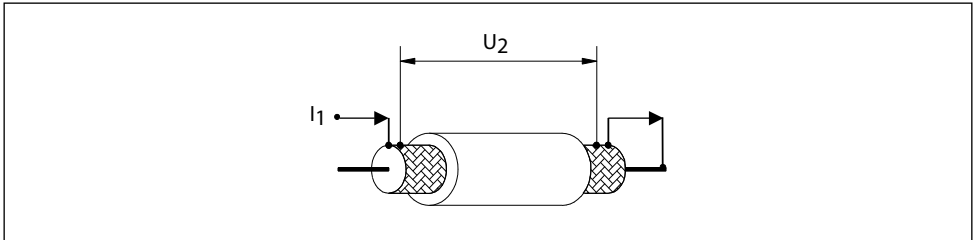


Fig. 5.6 Illustratie van overdrachtsimpedantie

$$Z_T = \frac{U_2}{I_1 L}$$

, waarbij L de kabellengte is

Hoe lager de overdrachtsimpedantiewaarde, hoe beter de afschermingsprestaties. Onderstaande tabel toont typische overdrachtsimpedantiewaarden voor verschillende typen motorkabels. Het meest gangbare type motorkabel is eenlaags gevlochten koperdraad, aangezien deze goede afschermingsprestaties biedt tegen een redelijke prijs.

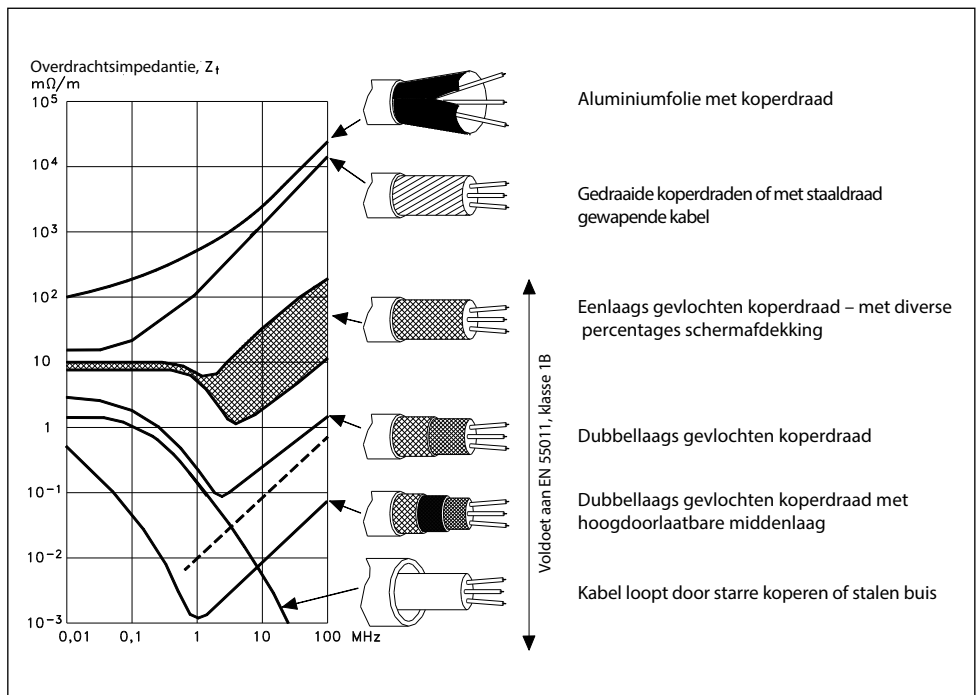


Fig. 5.7 Afschermingsprestaties van verschillenden typen kabels

De overdrachtsimpedantie kan aanzienlijk worden verhoogd door een onjuiste aansluiting van de uiteinden van de afscherming. De afscherming van een kabel moet op het chassis van de apparatuur worden aangesloten via een 360°-aansluiting. Het gebruik van "pigtaills" om de afscherming aan te sluiten, verhoogt de overdrachtsimpedantie en doet het afschermingseffect van de kabel teniet.

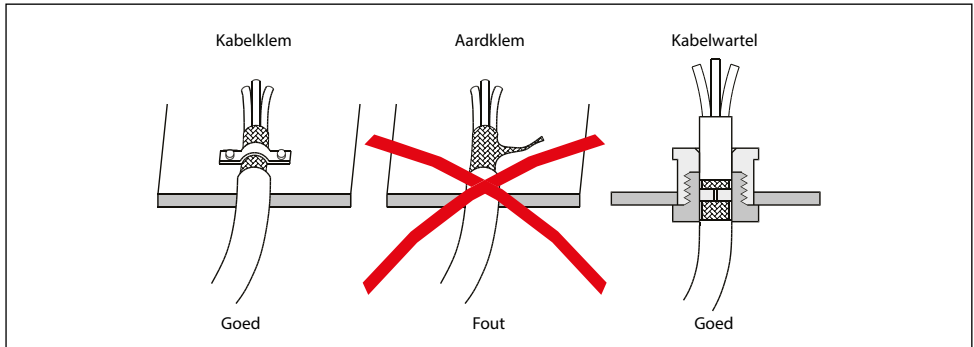
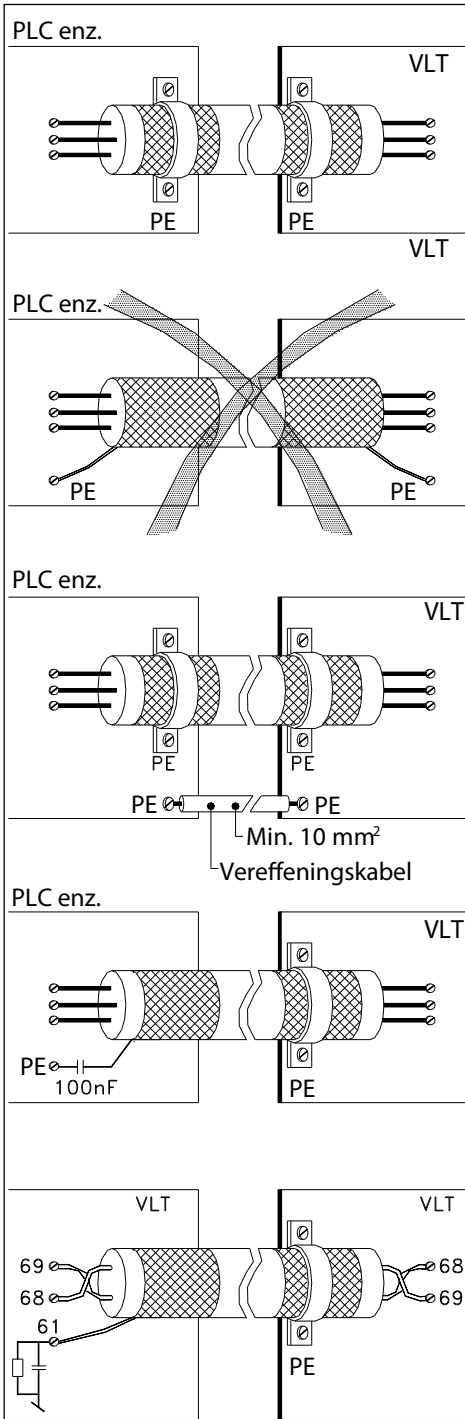


Fig. 5.8 Installatie van kabelafscherming

Vaak wordt de vraag gesteld of een afgeschermd kabel aan beide uiteinden of slechts aan één uiteinde moet worden aangesloten. Het is belangrijk om te beseffen dat het effect van een afgeschermd kabel wordt gereduceerd wanneer slechts één uiteinde wordt aangesloten. Het is zeer belangrijk beide uiteinden van de motorkabel correct aan te sluiten, omdat anders interferentieproblemen kunnen optreden.

De reden waarom in sommige situaties slechts één uiteinde wordt aangesloten, heeft te maken met aardlussen in signaalkabels. Dit betekent dat er een verschil in spanningspotentialiaal bestaat tussen de chassis van twee apparaten die met elkaar zijn verbonden (zoals frequentieomvormer en PLC); als de afscherming de twee chassis met elkaar verbindt, zal er een aardstroom optreden (met een frequentie van 50 Hz/60 Hz). Deze stroom wordt vervolgens in het nuttige signaal gekoppeld, dat hierdoor wordt verstoord. In audiotoeepassingen wordt dit effect gewoonlijk aangeduid als "brom". De beste oplossing is om een vereffeningsaansluiting te gebruiken, parallel met de afgeschermd kabel. Als dit niet mogelijk is, kan het ene uiteinde van de afgeschermd kabel worden aangesloten via een condensator van 100 nF. Dit onderbreekt de aardlus bij lage frequentie (50 Hz) terwijl de afschermingsaansluiting in het hoge frequentiebereik gehandhaafd blijft. In bepaalde apparatuur is deze condensator al ingebouwd. Zo is bij Danfoss VLT® frequentieomvormers de afschermingsaansluiting voor signaalkabels aanwezig op klem 61.



Stuurkabels en kabels voor seriële communicatie moeten gewoonlijk aan beide uiteinden worden geaard.

Sluit de afscherming nooit aan via pigtails.

Aardpotentialaal tussen PLC en omvormer: Koppel de kabels los en meet de spanning ter controle met een spanningsmeter. Gebruik een vereffeningskabel of zorg dat eenheden met bouten aan elkaar zijn bevestigd.

Aardlus van 50/60 Hz: controleer met een stroomtang.
=> Aard één uiteinde via een condensator van 100 nF met korte bedrading.

Mogelijke vereffeningsstromen in afscherming seriële-communicatiekabel tussen twee omvormers:
=> Sluit één uiteinde van de afscherming aan op de speciale afschermingsaansluitklem met RC-ontkoppeling. Let op de "correcte" pigtailinstallatie!

Fig. 5.9 Aarding van kabelafscherming

5.4 Installaties met frequentieomvormers

Het is belangrijk om bij het installeren van frequentieomvormers goede technische werkwijzen te volgen om de elektromagnetische compatibiliteit te waarborgen. Bij het ontwerpen van een installatie kan een EMC-plan worden opgesteld op basis van de volgende stappen:

- Stel een lijst op met componenten, apparatuur en zones.
- Verdeel deze onder in potentiële ruisbronnen en potentieel gevoelige apparatuur.
- Classificeer de kabels waarmee de apparatuur wordt aangesloten (potentieel ruis veroorzakend of potentieel gevoelig).
- Bepaal de vereisten en selecteer de apparatuur.
- Scheid potentiële ruisbronnen van potentieel gevoelige apparatuur.
- Regel de interfaces tussen ruisbronnen en gevoelige apparatuur.
- Leg kabels aan overeenkomstig de classificatie.

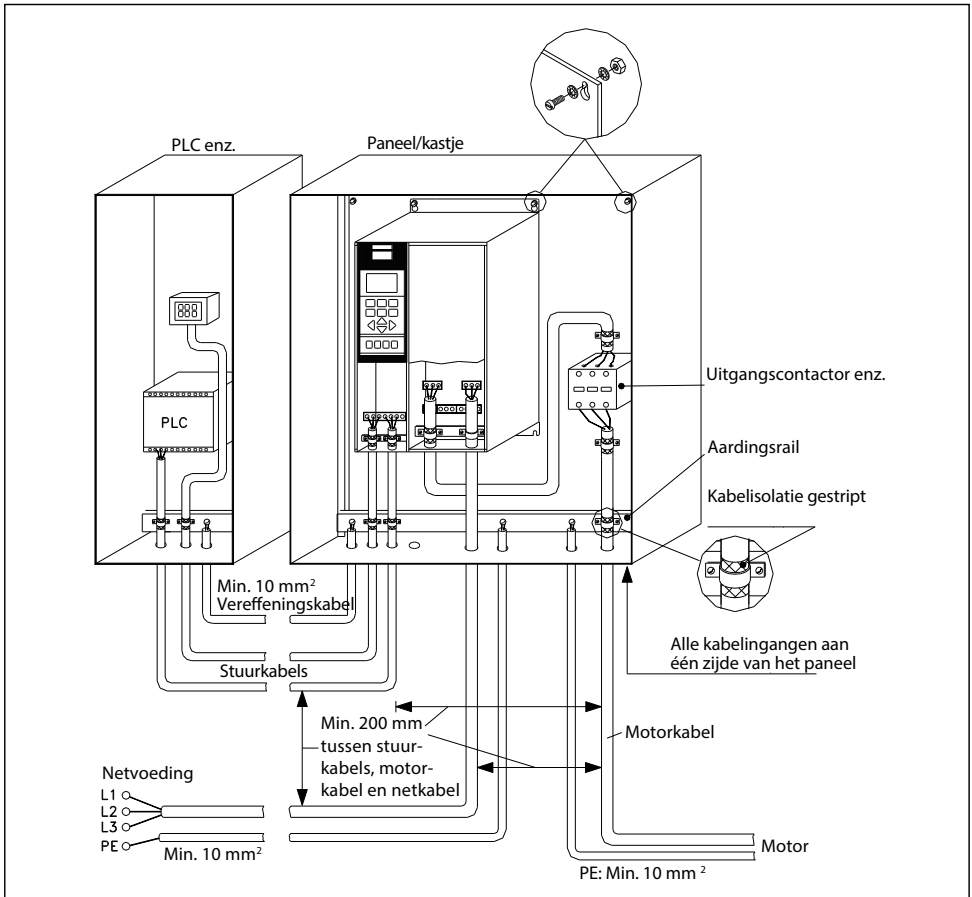


Fig. 5.10 Typische maatregelen in de praktijk in een eenvoudige frequentieomvormerinstallatie

5.5 Wetgeving en normen

Wetgeving t.o. normen

Wetgeving wordt opgesteld door de wetgevingsinstanties van nationale of lokale overheden en moet worden nageleefd – dat is wettelijk verplicht. Het betreft politieke documenten zonder specifieke technische details; deze details zijn te vinden in normen. Normen worden opgesteld door experts van relevante normalisatie-instituten (zoals de International Electrotechnical Commission, IEC, of het Europees Comité voor Elektrotechnische normalisatie, CENELEC) en weerspiegelen de huidige stand van de techniek. Normen dienen om een gemeenschappelijke technische grondslag te creëren voor samenwerking tussen marktspelers.

Europese EMC-richtlijn

De nieuwste EMC-richtlijn is 2014/30/EU en deze wordt van kracht vanaf 20 april 2016, waarbij de vorige richtlijn, 2004/108/EG, komt te vervallen. Deze richtlijn is een wettelijke vereiste binnen de Europese Unie. In principe zijn de vereisten eenvoudig:

- Producten mogen geen ongewenste elektromagnetische interferentie afgeven (beperkt emissie)
- Producten moeten immuun zijn voor een redelijke hoeveelheid interferentie (stelt immuniteitseisen vast)

De richtlijn zelf is een politiek document en bevat geen specifieke technische vereisten. Een producent heeft de mogelijkheid om geharmoniseerde normen te gebruiken om overeenstemming met de richtlijn aan te tonen. Naleving van de EMC-richtlijn (en ook van andere relevante richtlijnen zoals de laagspanningsrichtlijn – LVD) wordt vermeld in de Conformiteitsverklaring voor het product en de CE-markering wordt op het product aangebracht.

Het toepassingsgebied van de EMC-richtlijn bestaat uit de volgende twee categorieën:

- Apparaat: een afgewerkt toestel dat in de handel verkrijgbaar is als aparte functionele eenheid en bedoeld is voor de eindgebruiker. Apparaten die voldoen aan de vereisten van de richtlijn, worden voorzien van de CE-markering.
- Vaste installatie: een combinatie van apparaten of andere inrichtingen die permanent is geïnstalleerd op een vooraf bepaalde locatie. Vaste installaties worden gebouwd volgens de "goede technologische praktijken" en overeenkomstig de informatie over het beoogde gebruik van de componenten. Vaste installaties worden niet voorzien van een CE-markering.

EMC-normen

Normen zijn onder te verdelen in verschillende categorieën:

- Basisnormen hebben betrekking op algemene aspecten zoals testopstelling, meettechnieken en emissielijnen. Voor toerenregelaars worden vaak de in EN 55011 gespecificeerde emissielimieten toegepast.
- Algemene normen hebben betrekking op specifieke omgevingen en zijn hoofdzakelijk ontwikkeld om het ontbreken van specifieke productnormen op te vangen. Voor huishoudelijke, commerciële en lichtindustriële omgevingen is EN 61000-6-1 de algemene immuniteitsnorm en EN 61000-6-3 de algemene emissienorm. Voor industriële omgevingen is EN 61000-6-2 de algemene immuniteitsnorm en EN 61000-6-4 de algemene emissienorm.
- Productnormen gelden voor een specifieke productfamilie. Voor frequentieomvormers is de norm EN-IEC 61800-3 van toepassing.

De productnorm voor frequentieomvormers definieert zowel immuniteits- als emissielimieten op basis van de omgeving waarin de FC wordt gebruikt: huishoudelijke omgeving (strengere emissielimieten, minder hoge immuniteitsniveaus) of industriële omgeving (minder strenge emissielimieten, hogere immuniteitsniveaus).

Categorie EN-IEC 61800-3	Klasse EN 55011	Algemene norm
C1	Klasse B	Huishoudelijke omgeving EN 61000-6-3
C2	Klasse A, groep 1	Huishoudelijke omgeving
C3	Klasse A, groep 2	Industriële omgeving EN 61000-6-4
C3 (I > 100 A)	Klasse A, groep 2, I > 100 A	Industriële omgeving
C4	Geen limieten Steleen EMC-plan op.	Industriële omgeving

Tabel 5.1 Overzicht van verschillende EMC-normen

6 Beveiliging tegen elektrische schokken en energiegevaaren

6.1 Algemeen

Elektrische producten werken vaak met spanningen en stromen die potentieel gevaarlijk zijn voor mensen, dieren en systemen. Deze gevaren kunnen het gevolg zijn van fysieke aanraking, overbelasting, kortsluiting, onherstelbare beschadiging van componenten of de invloed van warmte of vocht.

De hieruit voortvloeiende mogelijke gevaren moeten worden voorkomen, of in elk geval worden beperkt tot een aanvaardbaar minimum, door bij de planning en het ontwerp voorzorgsmaatregelen op te nemen, in combinatie met foutanalyse en een schatting van het resterende risico.

Aandachtspunten voor het waarborgen van de veiligheid van frequentieomvormers bij installatie, normale bedrijfscondities en onderhoud moeten worden meegenomen bij het ontwerpen en bouwen van de FC. Er moet ook aandacht worden besteed aan het minimaliseren van gevaren die voortvloeien uit een redelijkerwijs te voorzien verkeerd gebruik van de FC dat tijdens de levensduur zou kunnen optreden.

De beveiliging tegen elektrische schokken wordt in principe verkregen via twee niveaus van bescherming.

- Basisbeveiliging die de gebruiker beschermt tegen elektrische schokken bij normale bedrijfscondities. De basisbeveiliging wordt gewoonlijk gerealiseerd door fysieke omsluiting of barrières, of veiligheids-/kruipafstanden.
- Foutbeveiliging die de gebruiker beschermt tegen elektrische schokken bij een enkele foutsituatie. De foutbeveiliging in FC's wordt gewoonlijk gerealiseerd door het gebruik van kunststof behuizingen of een correcte aardverbinding.

Daarnaast is voorzien in beschermende galvanische scheiding tussen de toegankelijke stuurcomponenten/-circuits en de vermogenscomponenten van FC's. Dit moet ervoor zorgen dat er geen gevaarlijke spanning (bijv. netspanning, DC-spanning en motorspanning) op de stuur-aansluitingen kan komen te staan. Dit zou de aanraking van de stuur-aansluitingen potentieel dodelijk maken en bovendien leiden tot een risico op schade aan de apparatuur.

De internationale/Europese norm EN-IEC 61800-5-1 gaat uitgebreid in op de vereisten voor beveiliging tegen elektrische schokken en andere gevaren die gelden voor FC's.

De behuizingsklasse van de FC biedt bescherming tegen letsel of schade door aanraking. Een behuizingsklasse hoger dan IP 21 voorkomt persoonlijk letsel door aanraking. Naleving van nationale voorschriften voor ongevallenpreventie (zoals BGV-A3, verplicht voor elektrische apparatuur in Duitsland) is eveneens noodzakelijk om bescherming te bieden tegen gevaren door aanraking.

Temperatuur- en brandgevaren

FC's kunnen een brandgevaar vormen als gevolg van oververhitting. Daarom moeten ze worden voorzien van een ingebouwde temperatuursensor die de werking van de FC stopt als de koelvoorziening uitvalt.

Onder bepaalde omstandigheden kan een op een FC aangesloten motor onverwachts opnieuw starten. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren als er in de FC timers zijn ingeschakeld of wanneer temperatuurbegrenzings worden bewaakt.

Noodstoppen

Afhankelijk van systeemspecifieke voorschriften kan het nodig zijn om een noodstop-schakelaar in de buurt van de motor te monteren. Deze schakelaar kan in de netvoedingslijn of de motorkabel worden toegepast zonder de FC of de motor te beschadigen.

6.2 Netvoedingssystemen

Er zijn verschillende manieren om de netvoeding aan te sluiten op aarde, elk met zijn eigen voor- en nadelen. IEC 60364 onderscheidt drie hoofdaardingssystemen:

TN, TT en IT. De letters staan voor

T – Terra (Lat.) = verbinding met aarde

N – Neutraal = rechtstreeks verbonden met de nulgeleider

I – Geïsoleerd = geen verbinding/zwevend

TN-S-systeem

De stroomverdeling in een gebouw moet voldoen aan de vereisten van een TN-S-systeem, wat betekent dat geen gecombineerde PEN-geleiders mogen worden gebruikt.

Het TN-S-systeem biedt de beste EMC-prestaties omdat de nul- en PE-geleider van elkaar worden gescheiden. Op deze wijze veroorzaakt een stroom door de N geen effecten op de spanningspotentiaal van de PE. Dit is het voorkeursysteem voor frequentieomvormertoepassingen.

Een eigenschap van het TN-S-systeem, die in het algemeen ook voor zowel TN- als TT-systemen geldt, is dat bij een aardfout op de lijn de zekeringen de installatie zullen uitschakelen.

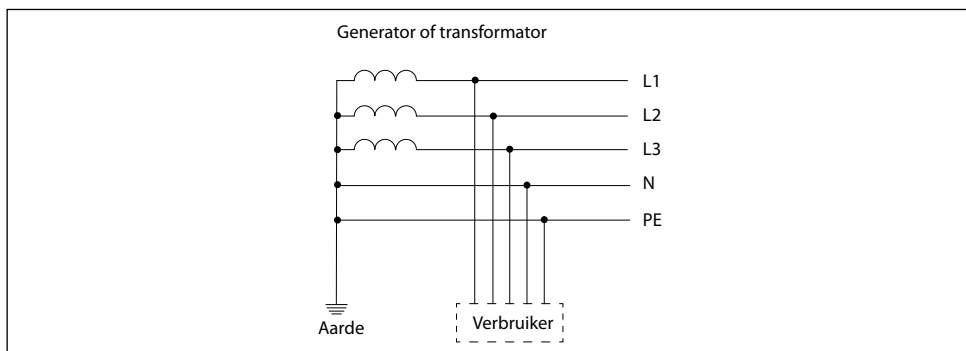


Fig. 6.1 TN-S-systeem: afzonderlijke nul- en PE-geleider

TN-C-systeem

In een TN-C-systeem zijn de PE- en N-geleider gecombineerd tot een PEN-geleider. Dit heeft als nadeel dat een stroom door de N-geleider ook een stroom door de PE is, waardoor er een spanningspotentiala tussen aarde en het chassis van de aangesloten apparatuur ontstaat. In een 50 Hz/60 Hz-wereld, met lineaire belastingen, levert dit systeem geen echte problemen op. Maar bij aanwezigheid van elektronische belastingen, waaronder FC's, kunnen de optredende hoogfrequente stromen storingen veroorzaken. Hoewel FC's op dit systeem gebruikt kunnen worden, is het beter om dit te vermijden vanwege de risico's die het met zich meebrengt. Vanuit EMC-oogpunt is het TN-C-systeem niet optimaal.

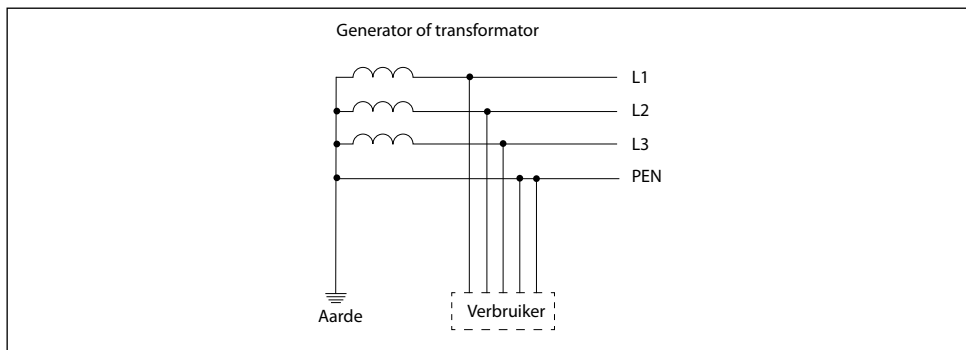


Fig. 6.2 TN-C-systeem: in het gehele systeem zijn de nulgeleider en de PE-geleider gecombineerd in de PEN-geleider

TN-C-S-systeem

Het TN-C-S-systeem is een hybride tussen TN-C en TN-S. Van de transformator tot het verdeelpunt van het gebouw zijn PE en N gemeenschappelijk (PEN), net als in het TN-C-systeem. In het gebouw zijn PE en N van elkaar gescheiden, zoals in het TN-S-systeem. Omdat de impedantie van de PEN-geleider tussen de transformator en het verdeelpunt van het gebouw gewoonlijk laag is, beperkt dit de negatieve effecten die optreden op het TN-C-net.

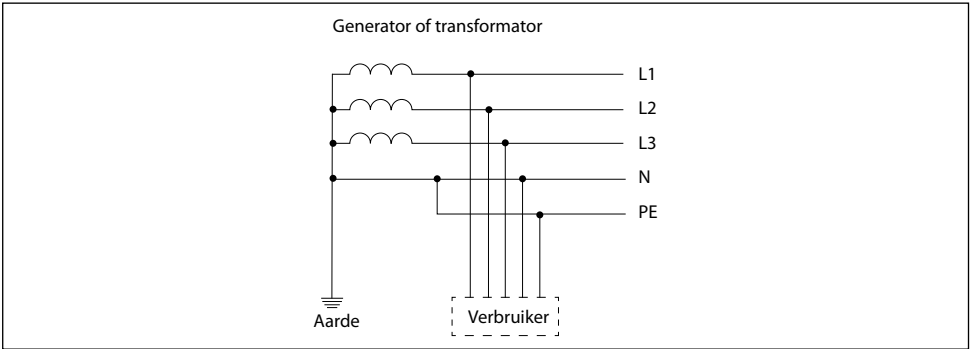


Fig. 6.3 TN-C-systeem: in het gehele systeem zijn de nulgeleider en de PE-geleider gecombineerd in de PEN-geleider

TT-systeem

In het TT-systeem wordt de PE bij de stroomverbruiker verzorgd door een aardelektrode ter plaatse. Het belangrijkste voordeel van het TT-systeem is dat hoogfrequente stromen in het PE-circuit bij de stroomverbruiker zijn gescheiden van de laagfrequente stromen in de N-geleider. Vanuit EMC-oogpunt is dit het ideale systeem.

Vanwege de onbekende impedantie van de aardverbinding tussen de aarde van de transformator en de aarde bij de stroomverbruiker kan echter niet worden gegarandeerd dat in geval van een kortsluiting van lijn naar PE bij de stroomverbreker de zekeringen snel genoeg zullen aanspreken om bescherming te bieden tegen elektrische schokken. Dit nadeel kan worden verholpen door gebruik te maken van reststroomapparaten (RCD's).

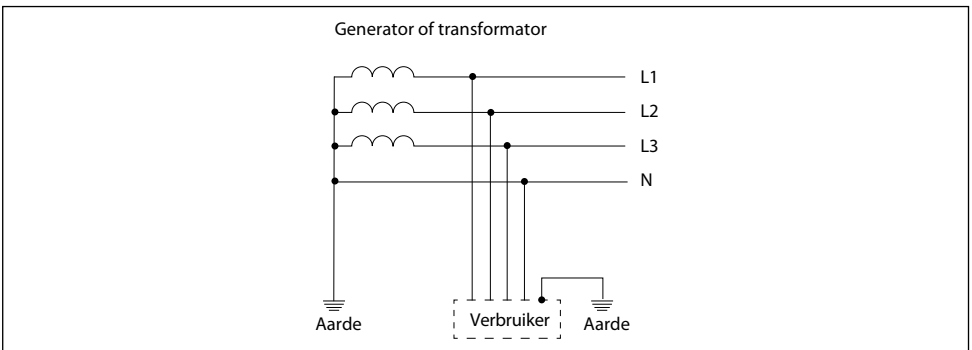


Fig. 6.4 TT-systeem: geaarde nulgeleider en afzonderlijke aarding van apparatuur/installatie

IT-systeem

In het IT-net is de transformator ongeaard en zijn de drie fasen zwevend. Het idee achter een dergelijk systeem is de mogelijkheid om het bedrijf voort te zetten nadat er een lijn-naar-aardefout optreedt. Isolatiebewakingsapparaten worden gebruikt om de integriteit van de isolatie tussen fasen en aarde te waarborgen. Bij aantasting van de isolatie kan corrigerend onderhoud worden uitgevoerd.

Het nadeel van dit systeem is gelegen in de slechte EMC-prestaties. Elke aardruisstroam zal namelijk in het gehele systeem merkbaar zijn, wat mogelijk tot storingen in elektronische apparatuur zal leiden. Wanneer FC's worden gebruikt op een IT-net, moeten er speciale maatregelen worden genomen, bijvoorbeeld door alle condensatoren naar aarde (zoals de common-modecondensatoren in het RFI-filter) los te koppelen. Als gevolg hiervan worden geleide emissies niet gefilterd en treedt er op het IT-net veel hoogfrequente ruis op.

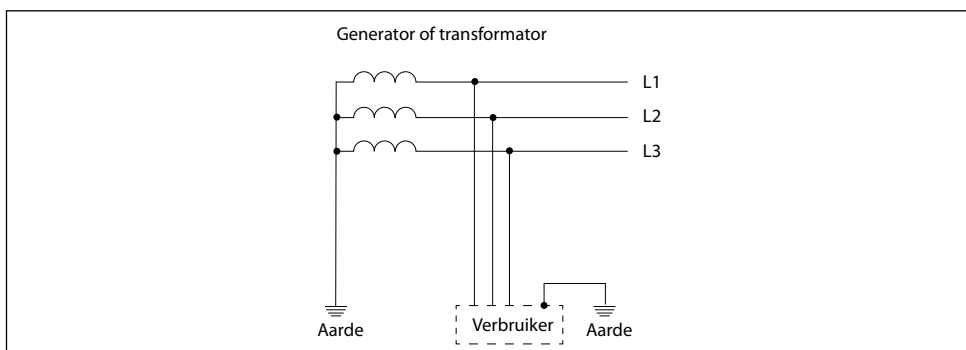


Fig. 6.5 IT-systeem: geïsoleerd net; de nulgeleider kan zijn geaard via een impedantie of ongeaard zijn

6.3 Extra beveiliging

De aantasting van de scheiding tussen spanningvoerende delen en chassis veroorzaakt aardlekstromen en kan zowel de persoonlijke veiligheid (risico op elektrische schokken) als de veiligheid van apparatuur (risico op oververhitting van componenten, eventueel uitmondend in brand) in gevaar brengen. Het gebruik van extra beveiligingsmiddelen hangt af van lokale, industriespecifieke en wettelijke voorschriften.

Er bestaan twee typen beveiligingsrelais voor extra bescherming. Het ene type maakt gebruik van een foutspanningsrelais, terwijl het andere gebruikmaakt van een reststroomrelais. Extra beveiliging via een foutspanningsrelais (FU-relais) is mogelijk in de meeste installaties. Beveiliging wordt gerealiseerd door de relaispoel aan te sluiten tussen de aardklem van de FC en het aardingspunt van het systeem. Bij een foutspanning valt het relais af en wordt de netvoeding naar de FC onderbroken.

In de praktijk zijn FU-relais gunstig in situaties waarbij aarding niet is toegestaan. Of het gebruik ervan wel of niet is toegestaan, hangt af van de voorschriften van het elektriciteitsbedrijf. Deze beveiligingsmethode wordt slechts zeer zelden toegepast. Aardlekbeveiliging met een aardlekschakelaar (RCCB – residual current operated circuit breaker) is onder bepaalde voorwaarden toegestaan. Aardlekschakelaars bevatten een somstroomtransformator. Alle voedingsgeleiders voor de FC lopen door deze transformator. De somstroomtransformator detecteert de som van de stromen door deze geleiders.

De som is nul als er geen lekstroom in de installatie aanwezig is. Als er lekstroom is, is de som niet nul en wordt er een stroom opgewekt in de secundaire wikkeling van de transformator. Deze stroom schakelt het relais uit en onderbreekt de netvoeding naar de FC. Conventionele RCCB's maken gebruik van inductieve detectie en zijn daarom alleen geschikt voor het detecteren van wisselstromen.

Bij FC's met B6-ingangsbruggelijkrichers kan er bij een fout een zuivere gelijkstroom in de voedingskabel gaan lopen. Het wordt aanbevolen om te controleren of er op de ingang van de FC een gelijkstroom aanwezig kan zijn. Als dat het geval is, moet een RCD van type B (gevoelig voor zowel AC als DC) worden gebruikt voor betrouwbare beveiliging. Dit type RCD heeft een extra geïntegreerd circuit waarmee het mogelijk is om zowel AC- als DC-reststromen te detecteren.

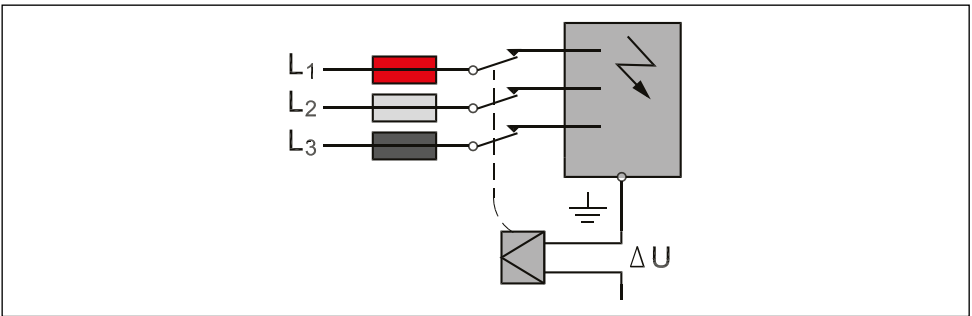


Fig. 6.6 Foutspanningsrelais

Deze apparaten staan algemeen bekend als aardlekschakelaars. Een term op hoger niveau is reststroomapparaat (RCD) overeenkomstig EN 61008-1.

Filters en componenten voor RFI-onderdrukking (common-modecondensatoren) veroorzaken altijd een bepaalde hoeveelheid lekstroom. De lekstroom die door één RFI-filter wordt geproduceerd, is gewoonlijk slechts enkele milliampère. Bij gebruik van meerdere filters of grote filters, kan de totale stroom echter oplopen tot het uitschakelniveau van de RCD.

De componenten voor onderdrukking van interferentie die in combinatie met FC's worden gebruikt, produceren lekstromen. Daarom moet de aardverbinding als volgt worden uitgevoerd:

- Als de lekstroom groter is dan 3,5 mA, moet de dwarsdoorsnede van de PE-geleider minstens 10 mm² bedragen.
- Anders moet de apparatuur worden geaard met behulp van twee afzonderlijke PE-geleiders. Dit wordt vaak "versterkte aarding" genoemd.



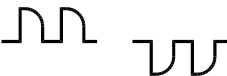


	Wisselende foutstromen
	Pulserende gelijkstromen (halve golf pos. en neg.)
	Aangesneden sinus Aansnijdingshoek 90° el. 135° el.
	Halve periode bij overlapping van een vlakke foutgelijkstroom van 6 mA
	Vlakke gelijkstroomfouten

Fig. 6.7 Golfvormen en aanduidingen van reststromen

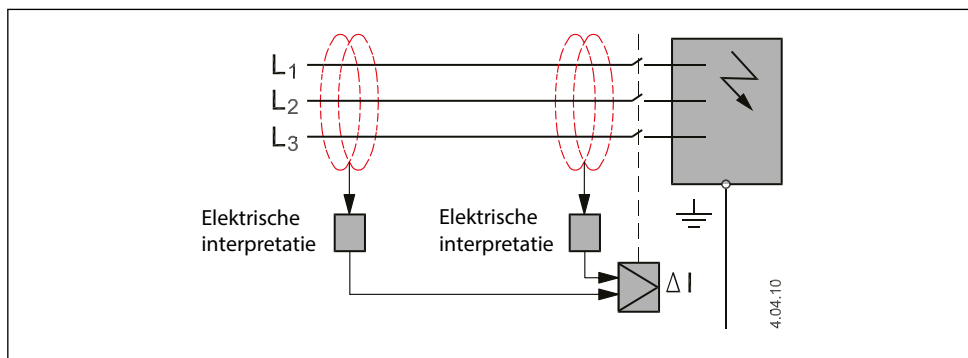


Fig. 6.8 Universele aardlekschakelaar

6.4 Zekeringen en circuitbreakers

Om FC's en de installatie te beschermen tegen elektrische gevaren en brand, moeten ze tegen kortsluiting en overstroom worden beveiligd door middel van een overstroombeveiliging (bijv. een zekering of circuitbreaker). De beveiliging moet voldoen aan de relevante lokale, nationale en internationale voorschriften.

Een zekering onderbreekt een te grote stroom, om verdere schade aan de beveiligde apparatuur te voorkomen. Een zekering wordt gekenmerkt door een nominale stroom (de stroom die een zekering continu kan geleiden) en snelheid (oftewel hoe lang het duurt voordat de zekering bij een bepaalde overstroom aanspreekt). Hoe groter de stroom, hoe korter het duurt voordat de zekering aanspreekt. Dit wordt uitgedrukt door de tijd-stroomkarakteristiek, zoals aangegeven in Fig. 6.9 "Tijd-stroomkarakteristieken van zekeringen":

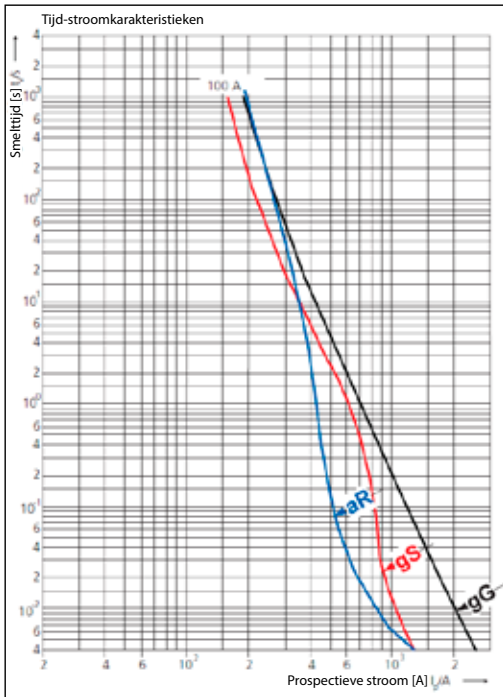


Fig. 6.9 Tijd-stroomkarakteristieken van zekeringen

Er zijn verschillende gestandaardiseerde tijd-stroomkarakteristieken afhankelijk van de beoogde toepassing. Voor de beveiliging van FC's worden gewoonlijk aR-zekeringen voor halfgeleiderbeveiliging gebruikt om de schade bij kortsluiting of bij uitval van interne componenten te beperken. In sommige situaties kunnen gG-zekeringen voor algemeen gebruik worden gebruikt. Voor het selecteren van de juiste zekeringen is het belangrijk om de documentatie van de FC te raadplegen en de vermelde aanbevelingen strikt op te volgen, aangezien de aanbevolen zekeringen samen met de FC zijn getest.

Circuitbreakers

In tegenstelling tot zekeringen, die na het doorbranden moeten worden vervangen, zijn circuitbreakers elektromechanische apparaten die na activering simpelweg kunnen worden gereset. Omdat circuitbreakers trager kunnen werken dan zekeringen, moet het gebruik ervan zorgvuldig worden afgewogen. De trage werking kan leiden tot uitgebreide schade aan het beveiligde apparaat, hieruit voortvloeiende oververhitting en zelfs brandgevaar. Niet alle FC's zijn zodanig ontworpen dat ze kunnen worden beveiligd met circuitbreakers. Tijdens de ontwerpfase van FC's worden speciale afwegingen gemaakt om de schade bij uitval van een interne component van de FC te beperken. Dergelijke maatregelen zijn bijvoorbeeld speciale interne mechanische voorzieningen in de behuizing, het gebruik van schermen, het gebruik van deflectiefolies en dergelijke, om de gevolgen van interne storingen te beperken.

Het is essentieel om de aanbevelingen in de documentatie van de specifieke FC ten aanzien van het gebruik van circuitbreakers te raadplegen en strikt op te volgen. Dit geldt ook voor het type en het merk circuitbreaker dat moet worden gebruikt, aangezien de aanbevolen circuitbreakers met die FC zijn getest.

7 Netstoringen

7.1 Wat zijn harmonischen?

7.1.1 Lineaire belastingen

Op een sinusvormige AC-voeding zal een zuiver resistieve belasting (zoals een gloeilamp) een sinusvormige stroom afnemen, in fase met de voedingsspanning.

Het vermogen dat door de belasting wordt gedissipeerd, bedraagt: $P = U \times I$

Bij reactieve belastingen (zoals een inductiemotor) is de stroom niet meer in fase met de spanning, maar loopt de stroom achter op de spanning, waardoor een naijgende werkelijke arbeidsfactor ontstaat met een waarde kleiner dan 1. Bij capacitieve belastingen loopt de stroom voor op de spanning, wat leidt tot een voorijgende werkelijke arbeidsfactor met een waarde kleiner dan 1.

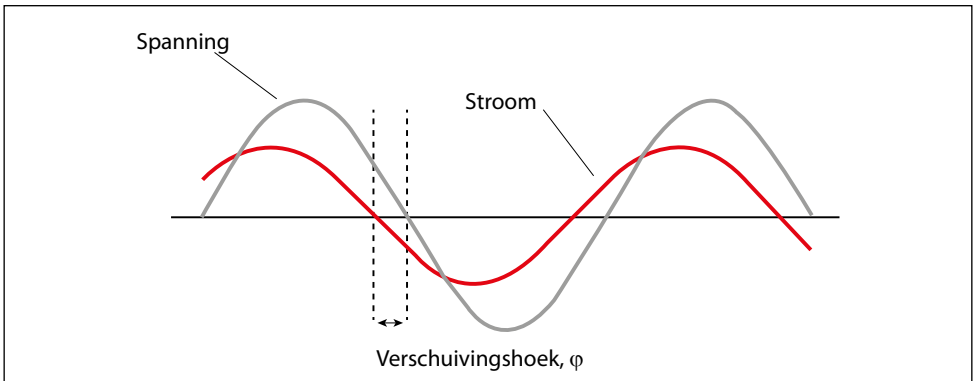


Fig. 7.1 Lineaire belasting

In dit geval heeft het AC-vermogen drie componenten: werkelijk vermogen (P), blindvermogen (Q) en schijnbaar vermogen (S).

Het schijnbare vermogen is: $S = U \times I$

In geval van een perfecte sinusgolfvorm kunnen P , Q en S worden uitgedrukt als vectoren die een driehoek vormen:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Eenheden: S in [kVA], P in [kW] en Q in [kVAR].

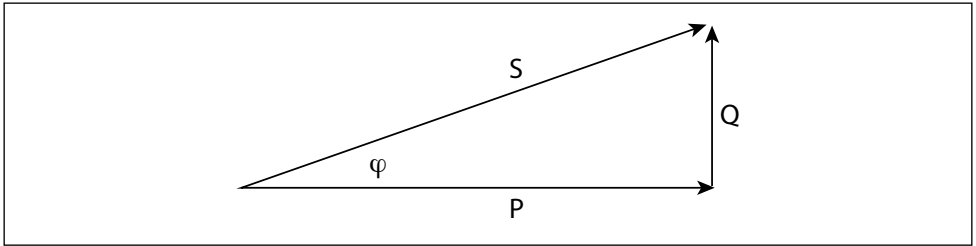


Fig. 7.2 Componenten van AC-vermogen: werkelijk vermogen (P), blindvermogen (Q) en schijnbaar vermogen (S)

De verschuivingshoek tussen stroom en spanning is φ .

De verschuivingsfactor is de verhouding tussen het actieve vermogen (P) en het schijnbare vermogen (S):

$$DPF = \frac{P}{S} = \cos(\varphi)$$

7.1.2 Niet-lineaire belastingen

Niet-lineaire belastingen (zoals diodegelijkrichters) nemen een niet-sinusvormige stroom op. Fig. 7.3 toont de stroom die wordt opgenomen door een 6-pulsgeleijkrichter op een driefasevoeding.

Een niet-sinusvormige golf kan worden ontleed als een som van sinusvormige golven met frequenties die overeenkomen met gehele veelvoudn van de grondgolfvorm.

$$f(t) = \sum ah \times \sin(h \omega 1t)$$

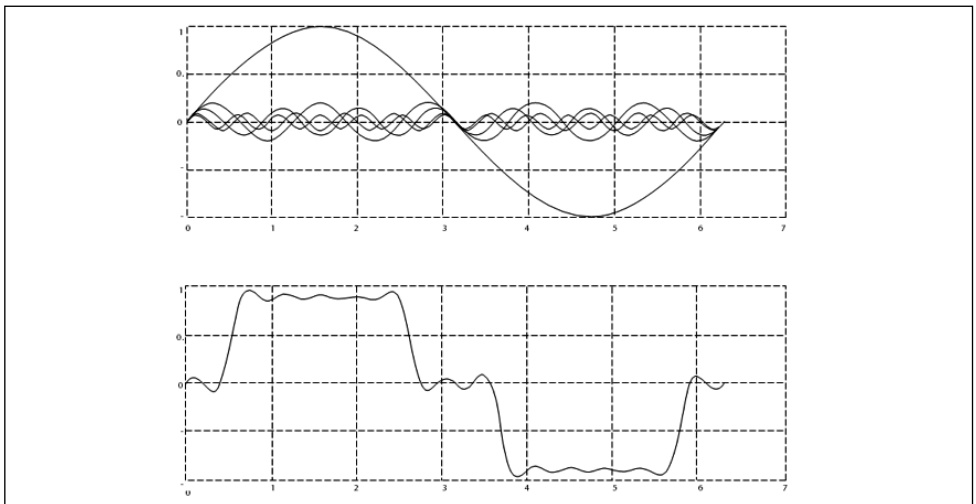


Fig. 7.3 Niet-lineaire belasting: stroom die wordt opgenomen door een 6-pulsgeleijkrichter op een driefasevoeding

De gehele veelvouden van de grondfrequentie ω_1 worden harmonischen genoemd. De RMS-waarde van een niet-sinusvormige golf (stroom of spanning) wordt uitgedrukt als:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{h_1}^{h_{\text{max}}} I_h^2}$$

De hoeveel harmonischen in een golfvorm geeft de vervormingsfactor, of totale harmonische vervorming (THD), die wordt aangeduid als de verhouding tussen de RMS-waarde van de harmonische component en de RMS-waarde van de grondwaarde, uitgedrukt als een percentage van de grondwaarde:

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h_2}^{h_{\text{max}}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \times 100 \%$$

Met behulp van de THD kan de relatie tussen de RMS-stroom I_{RMS} en de grondstroom I_1 worden uitgedrukt als:

$$I_{\text{RMS}} = I_1 \times \sqrt{1 + \text{THD}^2}$$

Hetzelfde geldt voor spanning.

De werkelijke arbeidsfactor (λ) bedraagt:

$$\text{PF} = \frac{P}{S}$$

In een lineair systeem is de werkelijke arbeidsfactor gelijk aan de verschuivingsfactor:

$$\text{PF} = \text{DPF} = \cos(\varphi)$$

In niet-lineaire systemen is de relatie tussen de werkelijke arbeidsfactor en de verschuivingsfactor:

$$\text{PF} = \frac{\text{DPF}}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}}$$

De arbeidsfactor neemt af door blindvermogen en harmonische belastingen. Een lage arbeidsfactor resulteert in een hogere RMS-stroom die hogere verliezen produceert in de voedingskabels en transformatoren.

In de context van vermogenskwaliteit komt men vaak de term Total Demand Distortion (TDD) tegen. De TDD karakteriseert niet de belasting; het is een systeemparameter.

TDD geeft de harmonische stroomvervorming als percentage van de maximale laststroom I_L .

$$TDD = \sqrt{\sum_{h_2}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_L}\right)^2} \times 100 \%$$

Een andere term die in de literatuur vaak wordt gebruikt, is Partial Weighted Harmonic Distortion (PWHd). PWHd duidt een gewogen harmonische vervorming aan die enkel de harmonischen tussen de 14e en 40e harmonische bevat, zoals getoond in de volgende definitie.

$$PWHd = \sum_{h=14}^{40} h \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times 100 \%$$

7.1.3 Het effect van harmonischen in een stroomverdeelsysteem

Onderstaande afbeelding toont een voorbeeld van een klein verdeelsysteem. Aan de primaire zijde is een transformator aangesloten op een PCC1 (Point of Common Coupling – gemeenschappelijk koppelpunt), op de middenspanningsvoeding. De transformator heeft impedantie Z_{xfr} en wordt gebruikt om een aantal belastingen te voeden. Het gemeenschappelijke koppelpunt waar alle belastingen gezamenlijk zijn aangesloten, is PCC2. Elke belasting is aangesloten via kabels met respectievelijk de impedantie Z_1, Z_2, Z_3 .

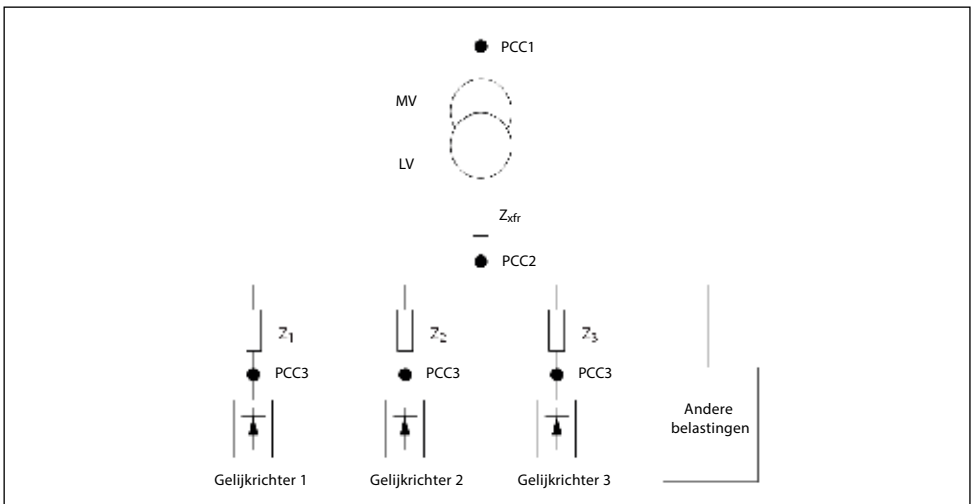


Fig. 7.4 Voorbeeld van een verdeelsysteem

Harmonische stromen die door niet-lineaire belastingen worden opgewekt, veroorzaken vervorming van de spanning, vanwege de spanningsval over de impedanties van het verdeelsysteem. Hogere impedanties leiden tot hogere niveaus van spanningsvervorming.

Stroomvervorming heeft betrekking op de prestaties van de apparatuur en op de individuele belasting. Spanningsvervorming heeft betrekking op de systeemprestaties. Het is niet mogelijk om de spanningsvervorming in het PCC te bepalen als alleen de harmonische prestaties van de belasting bekend zijn. Om de vervorming in het PCC te bepalen, moeten de configuratie van het verdeelsysteem en de relevante impedanties bekend zijn.

Een gangbare term voor het beschrijven van de impedantie van een net is de kortsluitverhouding R_{sce} , gedefinieerd als de verhouding tussen het kortsluitvermogen van het net bij het PCC (S_{sc}) en het nominale schijnbare vermogen van de belasting (S_{equ}).

$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{S_{equ}}$$

$$\text{waarbij } S_{sc} = \frac{U_2^2}{Z_{supply}} \text{ en } S_{equ} = U \times I_{equ}$$

Het negatieve effect van harmonischen is tweeledig:

- Harmonische stromen dragen bij aan systeemverliezen (in bekabeling, transformator).
- Harmonische spanningsvervorming zorgt voor verstoring van andere belastingen en verhoogt de verliezen in andere belastingen.

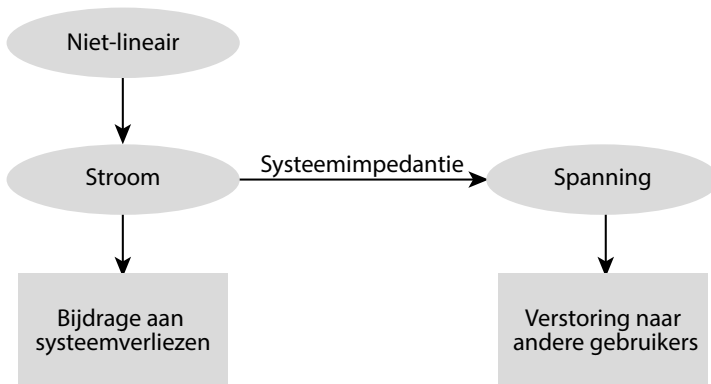


Fig 7.5 Negatieve effecten van harmonischen: systeemverliezen en verstoring

7.2 Normen en voorschriften voor het beperken van harmonischen

De vereisten voor het beperken van harmonischen kunnen voortvloeien uit:

- toepassingsspecifieke vereisten;
- vereisten voor naleving van normen.

De toepassingsspecifieke vereisten hebben betrekking op een specifieke installatie waar technische redenen aanwezig zijn om de harmonischen te beperken.

Voorbeeld: transformator van 250 kVA waarop twee motoren van 110 kW zijn aangesloten.

Motor A is rechtstreeks aangesloten op de netvoeding, terwijl motor B wordt gevoed via frequentieomvormer B. Er is een behoefte om FC A te installeren zodat motor A wordt gevoed via een eigen FC, maar in dat geval is de transformator ondergedimensioneerd. Oplossing: om de aanpassing uit te voeren zonder de transformator te vervangen, kan de harmonische vervorming van FC A en B worden beperkt door middel van harmonischenfilters.

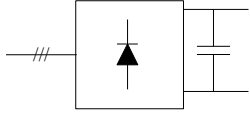
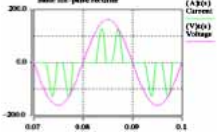
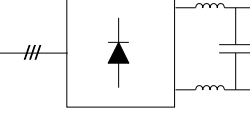
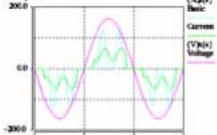
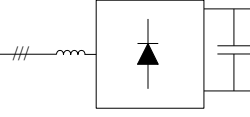
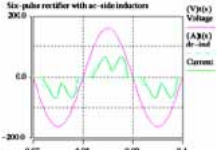
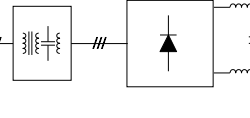
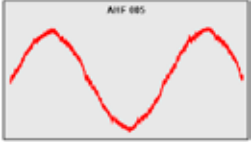
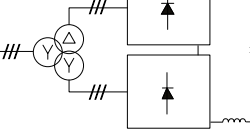
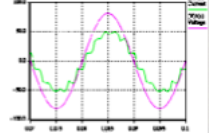
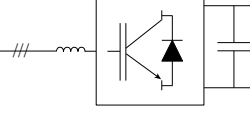
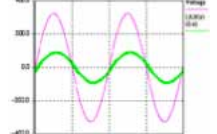
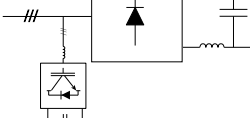
Er bestaan diverse normen, voorschriften en aanbevelingen voor het beperken van de harmonischen. Voor de diverse industrieën en geografische regio's gelden verschillende normen. De meest gangbare zijn:

- NEN-EN-IEC 61000-3-2, Limietwaarden voor de emissie van harmonische stromen (ingangsstroom van de toestellen ≤ 16 A per fase)
- NEN-EN-IEC 61000-3-12, Limietwaarden voor harmonische stromen geproduceerd door materieel aangesloten op het openbare laagspanningsnet met ingangsstroom > 16 A en ≤ 75 A per fase
- NPR-IEC 61000-3-4, Limietwaarden voor de emissie van harmonische stromen in laagspanningsvoedingssystemen voor uitrusting met een nominale stroom hoger dan 16 A
- NEN-EN-IEC 61000-2-2 en NEN-EN-IEC 61000-2-4, Compatibiliteitsniveaus voor laagfrequente geleide storingen
- IEEE519, door IEEE aanbevolen praktijken en vereisten voor het beheersen van harmonischen in elektrische voedingssystemen.
- G5/4, technische aanbeveling, planningsniveaus voor harmonische spanningsvervorming en de aansluiting van niet-lineaire apparatuur op transmissiesystemen en distributienetwerken in het Verenigd Koninkrijk.

7.3 Methoden voor harmonischenreductie in frequentieomvormers

De netstroom van niet-aangepaste diodegelijkrichters heeft een totale harmonische vervorming (THD) van minimaal 80%. Deze hoge vervormingswaarde is onacceptabel in de meeste toepassingen met FC's. Daarom is het nodig om de harmonischen te beperken. Zoals eerder is uitgelegd, hangt het niveau van de harmonischenbeperking af van de specifieke installatie en de harmonischennormen waaraan de installatie moet voldoen.

Een overzicht van de diverse methoden voor beperking van harmonische stromen wordt gegeven in Tabel 7.1 Methoden voor beperking van harmonischen.

Beperkingsmethode	Circuitschema	Typische stroomvorm
Geen beperking THDi > 80%		
DC-smoorspoelen THDi < 40%		
AC-smoorspoelen THDi < 40%		
Passief harmonischenfilter THDi < 10%		
Multipulsgeleijkrichter (12/18) THDi < 10%		
Active Front End THDi < 5%		
Actief filter THDi < 5%		<p>Golfvorm vergelijkbaar met AFE</p>

Tabel 7.1 Methoden voor beperking van harmonischen

Beperking van harmonischen kan worden gerealiseerd door middel van passieve of actieve circuits.

7.3.1 Passieve beperking van harmonischen

DC-smoorspoelen

DC-smoorspoelen worden in de DC-tussenkring geplaatst, tussen de gelijkrichter en de DC-condensator. Er kan één smoorspoel in de + dan wel de - zijde worden gebruikt, of er kunnen twee smoorspoelen worden gebruikt. Met deze oplossing wordt de THDi teruggebracht tot waarden tussen 35 en 45%.

AC-smoorspoelen

AC-smoorspoelen worden op de netzijde van de gelijkrichter geplaatst. Hun harmonischenprestaties zijn vergelijkbaar met die van DC-smoorspoelen en verlagen de THDi tot typische waarden tussen 35 en 45%, afhankelijk van de waarde van de smoorspoel.

DC- vergeleken met AC-smoorspoelen

Omdat DC- en AC-smoorspoelen vergelijkbare prestatieniveaus op het gebied van harmonischen hebben, rijst vaak de vraag over de verschillen tussen de twee oplossingen. Om te beginnen zijn de effecten van de twee oplossingen op de componenten van het harmonischenspectrum verschillend, ook al is de THDi-waarde vergelijkbaar. DC-smoorspoelen verlagen vooral de laagfrequente componenten (5e, 7e, 11e harmonische), terwijl AC-smoorspoelen betere prestaties bieden voor de hoogfrequente harmonischen.

Over smoorspoelen treedt een AC-spanningsval op. Bij AC-smoorspoelen zal een spanningsval optreden, meestal circa 4%. Bij DC-smoorspoelen veroorzaakt de DC-stroom geen spanningsval. De enige spanningsval over DC-smoorspoelen is het gevolg van de stroomrimpel van de gelijkrichter. Daarom zal het gebruik van DC-smoorspoelen resulteren in een hogere DC-tussenkringspanning, wat het mogelijk maakt om meer koppel te produceren op de motoras. Dit is het belangrijkste voordeel van DC-smoorspoelen. Het belangrijkste voordeel van AC-smoorspoelen is dat ze de gelijkrichter beschermen tegen transiënten van het net.

Passieve harmonischenfilters

Passieve harmonischenfilters worden in serie met de netvoeding aangesloten. Ze kunnen worden gerealiseerd door middel van diverse circuittopologieën die gewoonlijk bestaan uit combinaties van smoorspoelen (L) en condensatoren (C), en soms ook dempingsweerstand R. Het filtercircuit kan een laagdoorlaatcircuit zijn, dat is afgestemd op specifieke harmonischen (5e, 7e enz.) of iets ontstemd is om het risico op resonantie te vermijden. De prestaties van passieve filters hangen af van de DC-tussenkringconfiguratie van de specifieke FC (met/zonder DC-smoorspoelen, waarde van capaciteit) en er kan een prestatieniveau worden bepaald voor een specifieke configuratie. Danfoss Advanced Harmonic Filters (AHF) zijn speciaal ontworpen voor Danfoss VLT® frequentieomvormers en kunnen de THDi beperken tot 10% (AHF10-serie) of zelfs 5% (AHF 5-serie). Deze filters maken gebruik van een bedrijfseigen topologie met een tweetraps ontstemd LC-circuit voor het absorberen van harmonischen.

Passieve filters hebben het nadeel dat ze nogal omvangrijk zijn (qua maat vergelijkbaar met de FC). Ze hebben een capacatieve arbeidsfactor waarmee rekening moet worden gehouden bij het ontwerpen van het systeem, om resonanties te voorkomen.

Multipulsgelijkrichters

Multipulsgelijkrichters worden gevoed via faseverschuivingstransformatoren. De meest gangbare oplossingen werken op basis van 12 pulsen (2 x 3 fasen) of 18 pulsen (3 x 3 fasen). Door faseverschuiving bevinden lage harmonischen zich 180° ten opzichte van elkaar, waardoor ze elkaar opheffen. In geval van 12-pulsgelijkrichting, bijvoorbeeld, zijn de fasen van de secundaire trafowikkelingen 30° ten opzichte van elkaar verschoven (de offset tussen de D- en Y-wikkeling). In deze configuratie worden de 5e en 7e harmonische opgeheven en zijn de hoogste harmonischen de 11e en 13e.

Voor multipuls-harmonischenbeperking zijn grote transformatoren nodig – groter dan de FC. Een ander nadeel is dat de prestaties worden verlaagd naar suboptimale condities, zoals onbalans van de spanning.

7.3.2 Actieve beperking van harmonischen

Active Front End (AFE)

De diodegelijkrichter kan worden vervangen door een omvormer met actieve schakelaars (gewoonlijk IGBT-transistoren), vergelijkbaar met de omvormer aan de motorzijde. De omvormer aan de netzijde heeft pulsbreedtemodulatie en de ingangsstroom is bijna sinusvormig. De harmonischen van de netfrequentie zijn niet aanwezig. Aan de andere kant worden de schakelfrequentiecomponenten in het net geïnjecteerd. Om de schakelruis te beperken, wordt een passief filter gebruikt, gewoonlijk in een tweetraps L-C-L-topologie (twee smoorspoelen en condensatoren tussen de smoorspoelen).

Het belangrijkste voordeel van de AFE is dat deze vierkwadrantenbedrijf mogelijk maakt: dit betekent dat de energiestroom bidirectioneel is en de energie in geval van regeneratief remmen weer in het net kan worden geïnjecteerd. Dit is gunstig in toepassingen waarbij vaak of langdurig wordt geremd, zoals bij kranen of centrifuges.

Het nadeel van een AFE-oplossing is een relatief laag rendement en een hoge complexiteit. Wanneer een toepassing geen bidirectionele energiestroom vereist, is het energierendement van de AFE lager dan dat van een oplossing met een actief filter.

Actieve filters

Actieve filters (AF) bestaan uit een omvormer die harmonische stromen produceert in tegenfase met de harmonische vervormingen op het net, waardoor een 180° -opheffingseffect wordt gerealiseerd. Het werkingsprincipe wordt geïllustreerd in de onderstaande afbeelding, waarbij de AF de harmonische stromen van een diodegelijkrichter opheft.

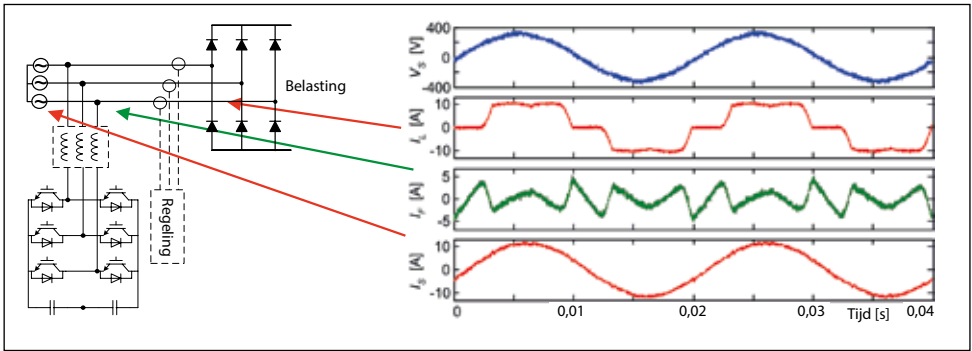


Fig. 7.6 Weringsprincipe van een actief filter

Net als bij een AFE is er een LCL-filter nodig om de ruis op de schakelfrequentie te elimineren.

Actieve filters worden parallel geschakeld met de niet-lineaire (harmonischen producerende) belasting. Dit biedt diverse mogelijkheden voor harmonischenbeperking:

- Individuele compensatie van niet-lineaire belastingen: een actief filter compenseert harmonischen van één belasting. Danfoss biedt een geoptimaliseerd pakket met filter + FC genaamd "Low Harmonic Drive (LHD)".
- Groepscompensatie: harmonischen van een groep diverse belastingen (bijvoorbeeld FC's) worden gecompenseerd door één filter.
- Centrale compensatie: harmonischen worden direct gecompenseerd bij het gemeenschappelijke koppelpunt van de hoofdtransformator.

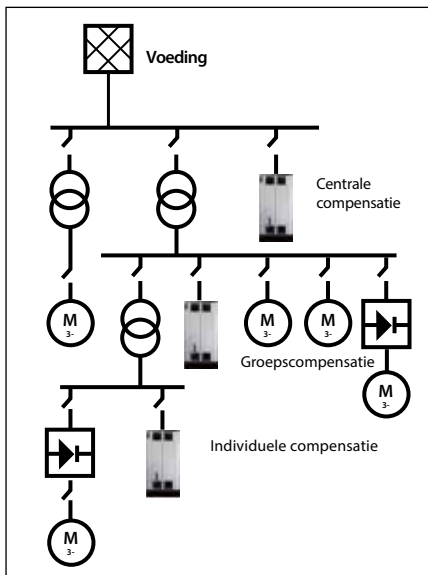


Fig. 7.7 Harmonischencompensatie kan plaatsvinden in verschillende gebieden van het netwerk

7.4 Tools voor analyse van harmonischen

Tools voor analyse van harmonischen kunnen worden gebruikt om de harmonischen in een systeem te berekenen en een optimale oplossing voor harmonischenreductie te ontwerpen die aan specifieke vereisten voldoet. Het voordeel van softwaretools is dat verschillende oplossingen met elkaar kunnen worden vergeleken, zodat de beste oplossing kan worden geselecteerd.

Er zijn diverse softwaretools in de handel verkrijgbaar, variërend van eenvoudige rekenprogramma's voor een niet-lineaire belasting tot complexe softwarepakketten waarmee een volledig voedingssysteem kan worden ontworpen.

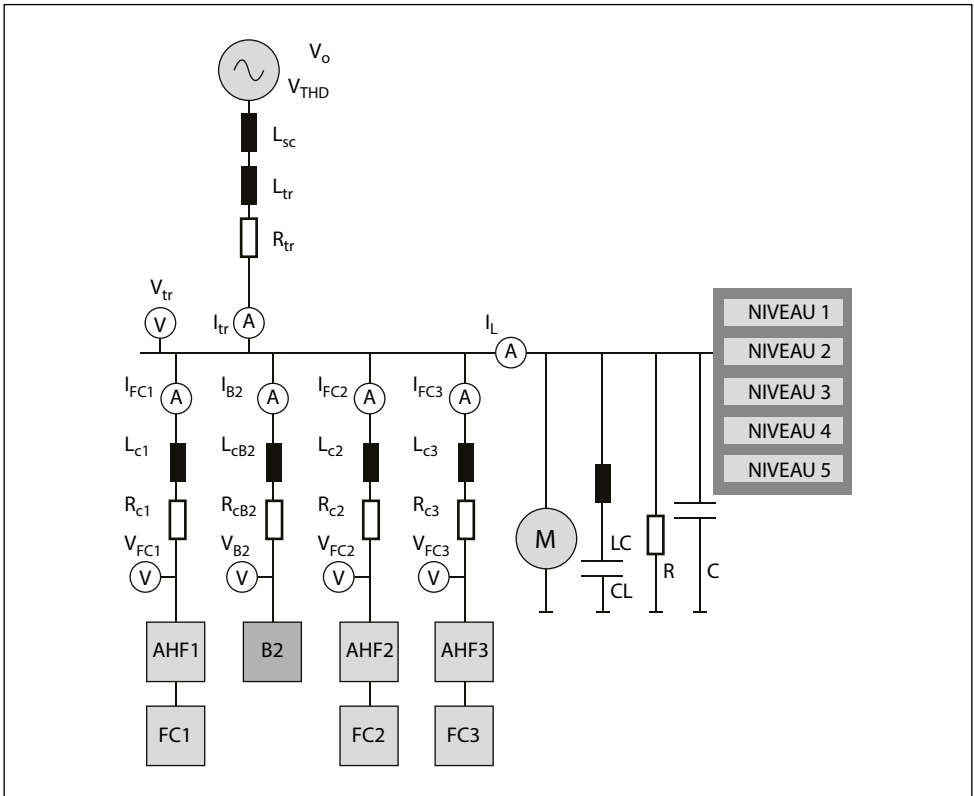


Fig. 7.8 Rekenmodel met stroom- en spanningsmeetpunten

Danfoss biedt twee softwaretools:

- de offline tool VLT® Motion Control Tool MCT 31 en
- de online tool HCS (Harmonic Calculation Software)

7.4.1 VLT® Motion Control Tool MCT 31

MCT 31 is een offline softwarepakket voor het berekenen van harmonischen op basis van polynomische interpolatie tussen vooraf gedefinieerde simulatieresultaten. Het voordeel van deze methode is snelheid en het nadeel is dat ze minder nauwkeurig is dan een simulatie.

MCT 31 maakt simulaties mogelijk met alle Danfoss-producten, waaronder oplossingen voor de beperking van harmonischen zoals AHF passieve filters en AAF actieve filters. Generieke frequentieomvormers van andere fabrikanten kunnen ook worden gesimuleerd. MCT 31 kan harmonischenrapporten genereren.

7.4.2 Harmonic Calculation Software (HCS)

Het HCS-programma is online beschikbaar via www.danfoss-hcs.com. Het is verkrijgbaar in twee versies: Basic, voor eenvoudige berekeningen, en Expert, voor complexere berekeningen op systeemniveau.

Achter de webinterface van de HCS-tool schuilt een krachtige circuitsimulator die een simulatie uitvoert van het specifieke systeem dat door de gebruiker is ontworpen. Daardoor is deze tool nauwkeuriger dan de op interpolatie gebaseerde MCT 31.

HCS beschikt over een enorme bibliotheek waarin Danfoss FC's, AHF passieve filters en AAF actieve filters zijn opgenomen. Het biedt ook grafische visualisaties in zowel het tijdsdomein als het frequentiedomein van de spanningen en stromen in een systeem en kan de harmonischen vergelijken met verschillende begrenzingslijnen. HCS kan ook rapporten genereren in html- of pdf-formaat.

8 Interfaces

8.1 Mens-machine-interface (MMI)

De mens-machine-interface (MMI, of HMI – Human Machine Interface) is tegenwoordig een belangrijk en essentieel onderdeel van frequentieomvormers. De MMI-interface kan variëren van een eenvoudige ledstatusindicator tot een geavanceerd veldbussysteem met uitgebreide FC-gegevens. De MMI vormt de interface tussen een mens en een toepassing waarmee de gebruiker de toepassing kan besturen, bewaken en diagnosticeren.

Moderne FC's zijn tegenwoordig vaak uitgerust met dergelijke MMI-interfaces:

Led



Fig. 8.1 Ledindicatie

Een led om aan te geven dat de FC spanning ontvangt

Een led om aan te geven dat er een waarschuwing actief is

Een led om een alarm op de FC aan te geven

Numerieke en/of alfanumerieke panelen



Fig. 8.2 Numerieke en alfanumerieke panelen

Deze voorzieningen bieden eenvoudige mogelijkheden om de FC te besturen, de actuele status daarvan te bewaken en de toepassing op eenvoudige wijze in bedrijf te stellen.

In- en uitgangsklemmen



Fig. 8.3 In- en uitgangsklemmen

Speciale in- en uitgangsstuurklemmen zijn beschikbaar om een interface te bouwen tussen een PLC-besturing en de FC.

Ingangsstuursignalen zoals start/stop, vrijloop of omgekeerde regeling zorgen ervoor dat de gebruiker beschikt over functies waarmee hij de FC kan regelen voor de specifieke toepassing. Voor het regelen van het toerental en terugkoppelingssignalen van de toepassing kunnen analoge ingangssignalen zoals 0-10 V of 0/4-20 mA worden gebruikt.

Voor terugkoppelingssignalen van de FC naar de PLC zijn digitale uitgangen of relaisuitgangen beschikbaar die kunnen worden geconfigureerd voor het aanduiden van de status zoals "motor draait" of "alarm". Ook analoge uitgangssignalen uit de FC kunnen worden geconfigureerd, bijvoorbeeld om de actuele belastingscondities te bewaken.

Softwaretools



Fig. 8.4 Softwaretools

Integratie van de FC in pc-software geeft de gebruiker alle mogelijkheden voor configuratie en regeling van het systeem. Met de pc-software is het mogelijk om het volledige systeem effectiever te bewaken voor snellere diagnose en beter preventief onderhoud.

Een modern pc-softwaretool kan als volgt worden gebruikt:

- Voor het offline plannen van een nieuw communicatienetwerk; pc-softwaretools bevatten een complete database met ondersteunde FC-producten
- Voor het offline in bedrijf stellen van FC's
- Voor eenvoudige vervanging van een FC in geval van uitval
- Voor eenvoudige uitbreiding van het netwerk met meer FC's
- Voor het maken van een backup van parameterinstellingen van FC's in een communicatienetwerk
- De software ondersteunt het veldbusprotocol; hierdoor is geen extra communicatienetwerk meer nodig

Veldbus

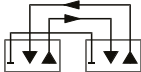
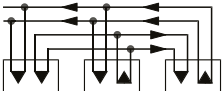
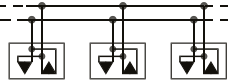
Gebruik een gestandaardiseerde veldbusinterface tussen de PLC en de FC voor het in bedrijf stellen, regelen en bewaken van de toepassing.



Fig. 8.5 Veldbusaansluiting

8.2 Werkingsprincipes van seriële interfaces

Bij seriële gegevensoverdracht worden de bits (met de status 0 of 1) afzonderlijk, een voor een, verzonden. Een logische 0 of een logische 1 wordt gedefinieerd door gespecificeerde spanningsniveaus. Er zijn diverse methoden en standaarden ontwikkeld om snelle, foutloze gegevensoverdracht mogelijk te maken. De gebruikte methode hangt af van de specificatie van de interface. Als we kijken naar het laagste niveau van gegevensoverdracht, kan onderscheid worden gemaakt tussen de wijze waarop de bits elektrisch worden verzonden (stroom- of spanningssignaal) en het gebruikte systeem (lineaire codering). Als de bits worden verzonden via een spanningsniveau, ligt de focus minder op het spanningsniveau dan op de referentiepotentiala van het niveau.

Principe	Standaard (toepassing)	Apparaten aangesloten per hoofdcircuit	Max. afstand in m	Aantal lijnen	Signaal-niveau
	RS232 (punt naar punt)	1 zender 1 ontvanger	15	Duplex min. 3+ diverse statussignalen	$\pm 5\text{ V min.}$ $\pm 15\text{ V max.}$
	RS422 (punt naar punt)	1 zender 10 ontvangers	1200	Duplex: 4	$\pm 2\text{ V min.}$
	RS485 (Bus)	32 zenders 32 ontvangers	1200	Half-duplex: 2	$\pm 1,5\text{ V min.}$

Tabel 5.1 3 veldbusprincipes en typische specificaties

RS232/EIA232-interface

De RS232-interface, die al in 1962 werd gelanceerd, gold lange tijd als dé seriële interface. Wanneer werd gesproken over een seriële interface met betrekking tot pc's, werd RS232 bedoeld. RS232 werd ontwikkeld voor communicatie tussen twee apparaten (punt-naar-puntaansluiting) bij lage overdrachtssnelheden.

RS422/EIA422-interface

RS422 maakt het mogelijk om zowel punt-naar-puntnetwerken als multidropnetwerken te bouwen. In multidropnetwerken is het mogelijk om meerdere ontvangers op één zender aan te sluiten.

De gegevens worden differentieel verzonden via getwiste datakabels. Voor volledige duplexwerking is één paar lijnen nodig voor elke zendrichting.

RS485/EIA485-interface

RS485 wordt beschouwd als een versie op hoger niveau van de RS422-standaard en heeft dan ook vergelijkbare elektrische kenmerken.

In tegenstelling tot RS422 is RS485 echter ontworpen als een multi-point-interface (geschikt voor buscommunicatie) waarover tot 32 apparaten kunnen communiceren. Er zijn nu ook transceivermodules (gecombineerde zend- en ontvangmodules) waarmee netwerken met maximaal 256 apparaten kunnen worden geïmplementeerd. De daadwerkelijke maximaal haalbare netwerk grootte hangt af van de overdrachtssnelheid (lijn lengte) en de structuur van het netwerk (netwerktopologie).

USB-interface

De USB (universele seriële bus)-standaard werd in 1995 ontwikkeld door Intel, samen met bedrijven in de IT-sector. De USB 2.0-uitbreiding van de standaard in 2000 verhoogde de overdrachtssnelheid van 12 Mbps naar 480 Mbps. In 2008 werd vervolgens USB 3.0 geïntroduceerd, waarmee overdrachtssnelheden tot 5 Gbps mogelijk werden. De gegevens worden differentieel verzonden via "twisted pair"-bedrading (gedraaide aderpennen). De kabellengte tussen twee apparaten mag maximaal 5 m bedragen.

Ondanks de naam is USB geen fysieke databus, maar een punt-naar-puntinterface. De term "bus" in de naam USB verwijst enkel naar de structuur waarmee een netwerk kan worden gebouwd. De USB-specificatie voorziet in een centrale host (master) waarop tot 127 verschillende apparaten kunnen worden aangesloten. Slechts één apparaat kan rechtstreeks op een poort worden aangesloten. Een extra hub is nodig om meerdere apparaten op een poort aan te sluiten.

Ethernetinterface

De Ethernetstandaard werd al aan het begin van de jaren 70 ontwikkeld. Sinds die tijd heeft Ethernet een sterke opmars gemaakt in allerlei producten. In de jaren 90 vond Ethernet z'n weg naar de automatiseringswereld via protocollen zoals: MAP, Modbus TCP en EtherNet/IP. Ethernet werkt typisch op 100 Mbps, over STP-kabels (shielded twisted pair – afgeschermd gedraaide pennen), maar is ook beschikbaar als draadloos, glasvezel en andere media. Het voordeel van het gebruik van Ethernet is niet alleen gelegen in de hoge snelheid en de gestandaardiseerde kabels & connectoren, maar ook in de mogelijkheid om vanuit het kantoor netwerk toegang te krijgen tot gegevens in automatiseringsapparatuur. Dit maakt het mogelijk om de status vanaf elke locatie in de fabriek uit te lezen, of zelfs vanaf een ander continent.

Hoewel alle Ethernetproducten op Ethernet werken, betekent dit niet dat het mogelijk is om verschillende Ethernettechnologieën in hetzelfde netwerk te gebruiken. Technologieën kunnen de arbitrage veranderen of strikte eisen stellen aan timing, waardoor het gemengd gebruik van technologieën onmogelijk is. De meest gangbare Ethernettechnologieën van dit moment zijn PROFINET, EtherNet/IP, Modbus TCP, POWERLINK en EtherCAT. Op dit moment beslaan deze technologieën ruim 90% van het marktaandeel in nieuwe installaties.

8.3 Standaard seriële interface in frequentieomvormers

Tegenwoordig worden de meeste FC's standaard uitgerust met een seriële systeeminterface die kan worden gebruikt voor aansluiting op een netwerk.

Diverse gestandaardiseerde protocollen worden meestal ondersteund, naast niet-gepubliceerde, fabrikantspecifieke (bedrijfseigen) protocollen. Fysiek zijn deze interfaces heel vaak gebaseerd op de specificatie van de RS485-interface.

Omdat op FC's gewoonlijk alleen een seriële RS485-interface beschikbaar is, zijn interfaceomzetters vereist voor implementatie. Fabrikantsspecifieke oplossingen waarin een specifieke FC vereist is, zijn wijdverbreid. Als de interfacespecificatie is gepubliceerd, kunnen eenvoudige industriest specifieke omzetters (zoals USB naar RS485) worden gebruikt.

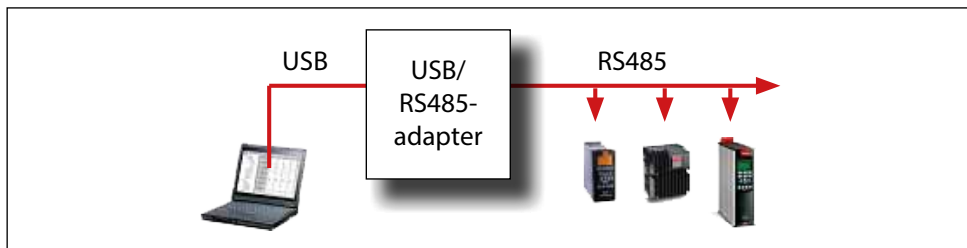


Fig. 8.6 USB-naar-RS485-communicatie

FC's worden steeds vaker uitgerust met USB-interfaces voor eenvoudige gegevensuitwisseling met een pc. Omdat veel pc's USB-interfaces hebben, wordt het gebruik van interfaceomzetters overbodig.

8.4 Veldbusinterfaces in frequentieomvormers

Het gebruik van moderne FC's zonder interface voor seriële communicatie is tegenwoordig bijna ondenkbaar. In het eenvoudigste geval bestaat de interface uit twee datalijnen waarmee de FC kan worden geregeld, bewaakt, geconfigureerd en gedocumenteerd. Bijna alle bussystemen maken het mogelijk om meerdere apparaten op hetzelfde netwerk te gebruiken.

In vergelijking met een conventionele FC-regeling via digitale en analoge in- en uitgangen is er bij seriëlebussystemen minder bekabeling nodig, waardoor de installatiekosten lager zijn. Daar staat tegenover dat er wel kosten moeten worden gemaakt voor de interfaces en extra componenten die nodig zijn om het bussysteem te besturen. Afhankelijk van het gebruikte bussysteem wordt bij slechts enkele netwerkapparaten al een aanzienlijke kostenverlaging gerealiseerd ten opzichte van een conventionele regeling.

Traditionele bedrading zonder veldbus.

In dit type netwerk is voor de communicatie tussen omvormer en PLC één kabel nodig voor elke parameter die moet worden geregeld. Het voordeel van een dergelijk systeem is dat de afzonderlijke componenten zelf relatief goedkoop zijn en dat het systeem zelf niet al te complex is.

Hier hangt echter wel een prijskaartje aan, aangezien dergelijke systemen relatief duur zijn, zowel om te installeren als om uit te breiden, omdat er voor elke extra parameter of omvormer nieuwe bekabeling, PLC-programmering en vaak meer I/O-hardware nodig is. Voor eigenaren betekent dit hogere kapitaalkosten en beperkte flexibiliteit. Daar komt bij dat de kans op fouten groot is, aangezien de kans op een foutieve aansluiting op de PLC toeneemt met het aantal kabels.



Fig. 8.7 Traditionele bedrading zonder veldbus.

Veldbusbedrading

Een typisch veldbussysteem gebruikt alleen kabels met gedraaide paren om de omvormer aan te sluiten op de PLC. Ondanks de hogere kosten van componenten bieden veldbussystemen diverse voordelen ten opzichte van oudere, bedrade systemen: minder kabels, snellere inbedrijfstelling en minder kans op fouten.

Extra frequentieomvormers worden aangesloten op een serieel Ethernet-netwerk dat eenvoudig uit te breiden is. Nieuwe parameters hoeven alleen maar in de PLC te worden gecodeerd, wat behalve sneller en veiliger ook aanzienlijk goedkoper is dan een bedraad systeem.

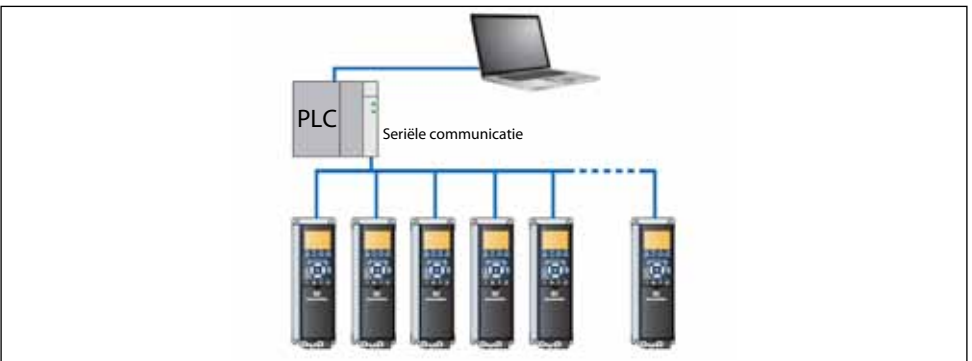


Fig. 8.8 Veldbusbedrading

Veldbus over Ethernet

De Ethernetinterface maakt het mogelijk om vanaf locaties buiten de productiefaciliteit toegang te krijgen tot omvormerparameters en andere gegevens. Deze methode omzeilt de traditionele besturingshiërarchie, aangezien communicatie met frequentieomvormers en andere apparatuur die van veldbus zijn voorzien, niet per se via de PLC hoeft te lopen. Externe toegang verloopt via een firewall, wat communicatie met de in de veldbusoptie ingebouwde webserver mogelijk maakt.

Dit biedt niet alleen een hoge mate van flexibiliteit tijdens de inbedrijfstelling, maar biedt ook voordelen als externe bewaking en ondersteuning van toepassingen.

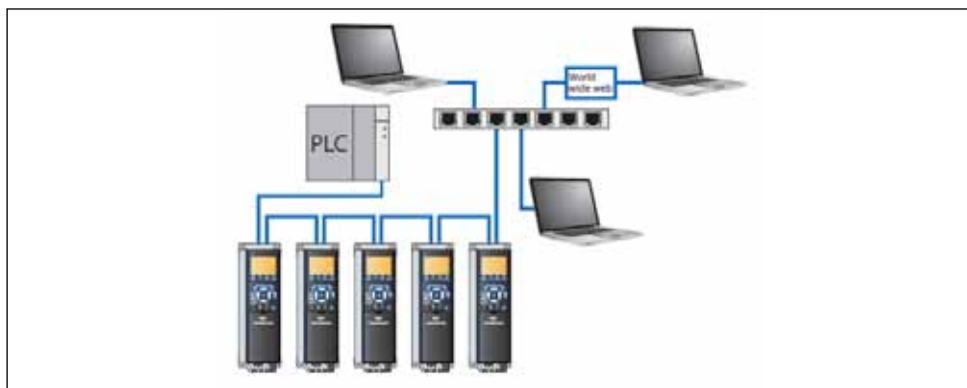


Fig. 8.9 Veldbus over Ethernet

8.5 Standaardisatie van veldbussen

De ontwikkeling van veldbussen begon in de jaren '80 met het doel om de voordelen van seriële communicatie ook in het veld te kunnen gebruiken. De drijvende kracht achter deze ontwikkeling was niet enkel de potentie om tijdens de planning en installatie kosten en tijd te besparen, maar ook de eenvoudige uitbreidingsmogelijkheden en een hogere interferentie-immuniteit bij het doorgeven van analoge signalen.

In de jaren daarop werd duidelijk dat het succes van een systeem niet alleen afhangt van de industriële mogelijkheden in een veeleisende omgeving maar ook van de "openheid". In open-bussystemen zijn de installatie en besturing altijd hetzelfde, ongeacht de fabrikant van de buscomponenten. Daarom kan de eindgebruiker een (defect) apparaat van de ene fabrikant vervangen door een apparaat van een andere fabrikant zonder grote aanpassingen in het systeem te hoeven aanbrengen.

Het essentiële verschil tussen de op de markt verkrijgbare interfaces en bussystemen is gelegen in het fysieke ontwerp en de gebruikte protocollen. Welk systeem wordt gebruikt, hangt af van de vereisten van de betreffende toepassing.

Snelle processen zoals verpakkingsmachines hebben mogelijk buscyclustijden van slechts enkele milliseconden nodig, terwijl responstijden van enkele seconden voldoende kunnen zijn voor klimaatregelsystemen.

Voor een betere classificatie kunnen communicatiesystemen worden beoordeeld op basis van datavolume, overdrachtstijd en transmissiefrequentie. Onderstaand schema toont de basisverdeling in drie verschillende niveaus.

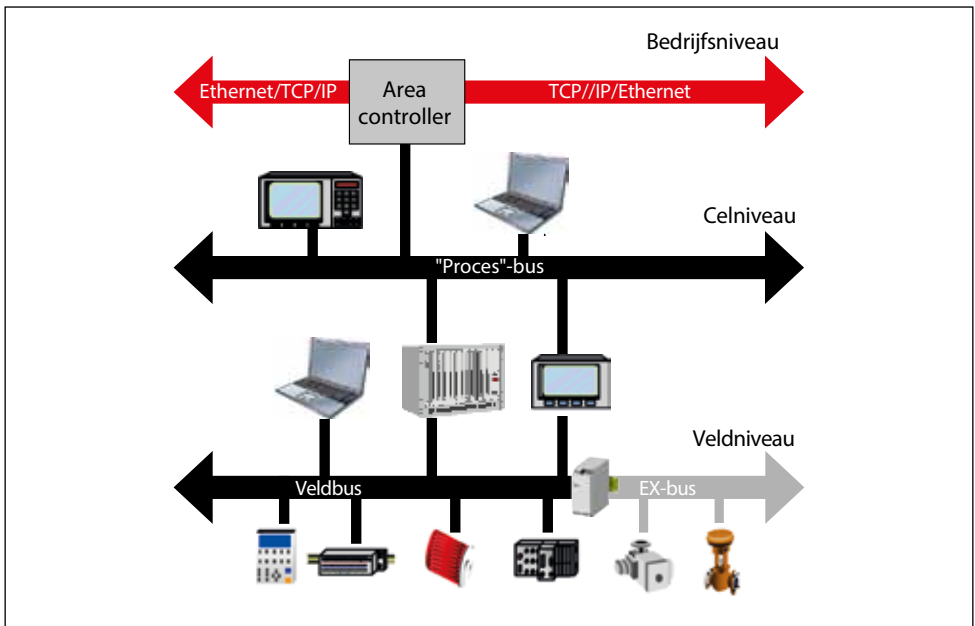


Fig. 8.10 Productiepiramide

- Op bedrijfsniveau worden grote datavolumes in de orde van grootte van megabytes uitgewisseld. De overdrachtstijden kunnen in de uren lopen.
- Op celniveau neemt het datavolume af tot het kilobytebereik. Tegelijkertijd neemt de overdrachtstijd af (seconden) en neemt de frequentie van gegevensuitwisseling (minuten/uren) toe.
- Op veldniveau worden zeer kleine datavolumes van enkele bytes of zelfs bits uitgewisseld. De overdrachtstijd en transmissiefrequentie beperken zich tot milliseconden.

De belangrijkste veldbussen ter wereld zijn sinds 1999 gestandaardiseerd in IEC 61158.



Fig. 8.11 Typische veldbussen

Het belang van diverse bussystemen is afhankelijk van de regio en de toepassing. Als het gaat om omvormertechnologie kunnen we stellen dat Profibus en zijn Ethernetgebaseerde opvolger (PROFINET) een groter marktaandeel hebben in Europa. Daar staat tegenover dat DeviceNet en EtherNet/IP veelvuldig worden gebruikt in Noord- en Zuid-Amerika, en ook in Azië. Dit verklaart de hoge marktacceptatie van de respectievelijke, op Ethernet gebaseerde, opvolgers PROFINET in Europa en EtherNet/IP in Noord-Amerika.

9 Dimensionering en selectie van frequentieomvormers

9.1 De juiste vermogensklasse van de omvormer

Het selecteren van de juiste frequentieomvormer is een essentieel aspect bij het ontwerpen van een aandrijfsysteem met toerenregeling. Als de geselecteerde eenheid te klein is, zal deze niet in staat zijn om de aangesloten motor optimaal te regelen bij alle vereiste werkpunten. Als hij echter te groot is, bestaat de kans dat de motor niet altijd correct wordt geregeld, en het ontwerp is mogelijk niet kosteneffectief.

Voor het ontwerp van de meeste FC's is kennis over de volgende basisparameters voldoende:

- FC-classificatie op basis van motorspecificaties
- Stroomverdeling in de FC ($\cos \varphi$ van de motor)
- Overbelastingscapaciteit
- Regelbereik en veldverzwakking
- Reductie van FC
- Regeneratieve energie
- Lengte motorkabel
- Omgeving
- Centrale versus decentrale installatie

Nadat de elementaire ontwerpparameters voor een toepassing zijn bepaald, is het tijd voor het ontwerp en de analyse van de mechanische componenten. Voordat een geschikte FC kan worden geselecteerd, moet eerst de motor worden bepaald. In gebouwbeheersystemen, bijvoorbeeld, wordt de uiteindelijke keuze vaak pas gemaakt vlak voordat het gebouw voltooid is.

Op dat moment zijn de meeste te gebruiken componenten bekend, zodat een geoptimaliseerde analyse van de flowcondities op betrouwbare wijze kan worden uitgevoerd.

Hoe dynamischer en uitdagender de toepassing, hoe meer factoren moeten worden meegenomen bij het ontwerp. Omdat fabrikanten van FC's kosten kunnen besparen door de technische functies te beperken, is het in elk specifieke geval nodig na te gaan of de voor de toepassing vereiste functies ook daadwerkelijk in de frequentieomvormer beschikbaar zijn.

9.2 Classificatie van de frequentieomvormer op basis van de motorspecificaties

Een veelgebruikte methode voor het selecteren van FC's is simpelweg gebaseerd op het nominale vermogen van de te gebruiken motor. Hoewel fabrikanten de vermogensklasse van hun FC's specificeren, hebben deze gegevens gewoonlijk betrekking op standaard vierpolige motoren. Omdat de nominale stromen van motoren bij hetzelfde vermogen aanzienlijk uiteenlopen, afhankelijk van de motorconstructie (bijv. standaardmotor en motorreductor) en het aantal poolparen, is deze methode alleen geschikt voor een ruwe schatting van het juiste FC-vermogen. Fig. 9.1 "Nominale stroom voor 1,50 kW-motoren met verschillende pooltallen en van diverse fabrikanten" toont voorbeelden van de nominale stromen van diverse 1,5 kW-motoren.

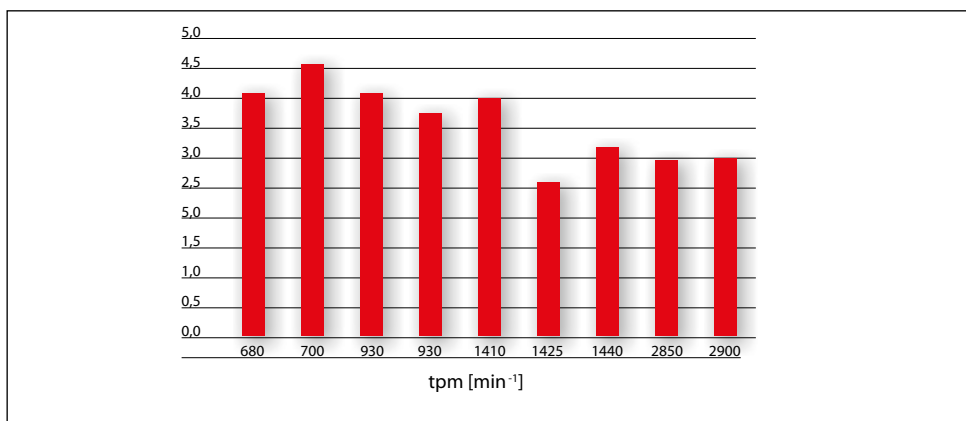


Fig. 9.1 Nominale stromen voor 1,50 kW-motoren met verschillende pooltallen en van diverse fabrikanten

Bovendien geldt dat de door een motor opgenomen stroom ervan afhangt of hij in ster of driehoek is aangesloten. Daarom moeten FC's worden geselecteerd op basis van de nominale stroom voor de configuratie die is geselecteerd (ster of driehoek).

Behalve de motorstroom is ook de vereiste motorspanning van belang. Veel FC's kunnen werken over een breed netspanningsbereik (bijv. 3 x 380-500 V) en bieden hiermee een breed uitgangsspanningsbereik. Het schijnbare vermogen dat de eenheid kan leveren, is echter constant over het volledige spanningsbereik. Dat betekent dat de maximale uitgangsstroom hoger is bij een lagere netspanning en andersom lager bij een hogere spanning.



Fig. 9.2 Identificatiegegevens van een Danfoss frequentieomvormer

Het typeplaatje in Fig. 9.2 "Identificatiegegevens van een Danfoss frequentieomvormer" is afkomstig van een frequentieomvormer van 0,75 kW. De gespecificeerde stroomwaarden gelden voor twee verschillende spanningsbereiken. De FC kan 2,4 A leveren bij een netspanning van 380-440 V. Als de eenheid wordt gevoed met een netspanning van 441-500 V, kan hij 2,1 A leveren. Het schijnbare vermogen dat bij beide spanningsbereiken beschikbaar is, is echter altijd 1,70 kVA.

9.3 Overbelastingscapaciteit

Bij het selecteren van een FC moet in de eerste plaats altijd rekening worden gehouden met de belastingscondities van de toepassing. Er wordt een fundamenteel onderscheid gemaakt tussen kwadratische- en constant-koppel belastingskarakteristieken; deze karakteristieken komen in de praktijk het vaakst voor.

Wanneer een FC een motor regelt, kunnen er voor die motor koppelbegrenzingen worden ingesteld. Het selecteren van een FC met een nominaal schijnbaar vermogen dat overeenkomt met de nominale stroom of het nominale vermogen van de motor, zorgt ervoor dat de vereiste belasting op betrouwbare wijze kan worden aangedreven. Een extra reserve is echter nodig om een soepele versnelling van de belasting mogelijk te maken en incidentele piekbelastingen op te vangen.

Hieronder vindt u voorbeelden van de constantkoppelkarakteristiek. Als een last op een transportband wordt geplaatst, is het koppel dat wordt toegepast om de last te verplaatsen, constant over het volledige toerentalbereik.

Toepassing	Overbelasting
Hijs- en hefapparatuur	160%
Transportband	160%
Roerder/mixer/centrifuge	160%
Roterende zuigercompressor/zuigercompressor	150%
Spiraalpomp (dik slib)	150%
Slibontwateringspers	150%
Zuigerpomp	150%
Roterende schuifklep	150%
Roterende zuigerblower	110%
Oppervlaktebeluchter	110%
Doseerpomp	110%
Boosterpompen (2-traps)	110%
Recirculatiepomp	110%
Zijkanaalblower voor zwembadbeluchting	110%

Tabel 9.1 *Typische overbelastingen in toepassingen met constant koppel*

Bij een constantkoppelbelasting is een overbelastingsreserve van ongeveer 50 tot 60% gedurende 60 seconden gebruikelijk. Bij het bereiken van de maximale overbelastingslimiet hangt het van de gebruikte FC af hoe hierop wordt gereageerd. Sommige typen schakelen het uitgaande vermogen uit en verliezen de controle over de last. Andere zijn in staat om de motor bij de maximale overbelastingslimiet te besturen totdat ze om thermische redenen uitschakelen (trip).

Een kwadratische belastingskarakteristiek komt gewoonlijk voor in toepassingen waarbij een toenemend toerental leidt tot een kwadratisch toenemend belastingskoppel. Ventilatoren en centrifugaalpompen behoren tot het soort apparatuur dat dit type gedrag vertoont. Bovendien vereisen de meeste toepassingen met een kwadratische koppelkarakteristiek, zoals centrifugaalpompen of ventilatoren, geen snelle versnellingsfasen. Daarom worden voor kwadratische koppels meestal een overbelastingsreserve van 10% gekozen.

Zie de volgende pagina met voorbeelden van een koppelkarakteristiek voor kwadratische belastingen.

Toepassing	Overbelasting
Ventilator	110%
Bronpomp	110%
Boosterpomp/centrifugaalpom	110%
Filtertoevoerpomp	110%
Grondwaterpomp	110%
Heetwaterpomp	110%
Verstopingsvrije pomp (vaste materialen)	110%
Centrifugaalpom/-ventilator	110%
Primaire en secundaire verwarmingspom	110%
Primaire en secundaire koelwaterpom	110%
Evacuatiepom voor regenwaterbassins	110%
Slibrecirculatiepom	110%
Spiraalpom (dun slib)	110%
Dompelpom	110%
Spuislibpom	110%

Tabel 9.2 Typische overbelastingen in toepassingen met variabel koppel

Zelfs bij kwadratisch-koppelbelasting en een overbelastingscapaciteit van 10% kunnen motoren zodanig worden geconfigureerd dat ze bij het starten een hoger losbreekkoppel hebben om een goede start van de toepassing te waarborgen. Bedenk altijd of de toepassing voortdurend een kwadratisch koppel vereist. Zo vereist een mixer een kwadratisch koppel wanneer deze wordt gebruikt om een zeer vloeibaar medium te mengen; als het medium tijdens de verwerking echter zeer viskeus wordt, verandert de koppelkarakteristiek in een karakteristiek voor constant koppel.

9.3.1 Afwegingen ten aanzien van energierendement

In hoofdstuk 4 "Energiebesparing met frequentieomvormers" hebben we gezien dat er diverse afwegingen moeten worden gemaakt om energie te besparen. Hierbij mag niet uit het oog worden verloren dat de meest energie-efficiënte oplossing er eentje is waarbij de machine, motor en FC zijn geselecteerd om het beste systeemrendement te realiseren. Zo zal het toerental van ventilatoren gewoonlijk afwijken van het nominale toerental. Dit geldt ook voor de motor, maar veel motoren bieden het hoogste rendement bij een toerental tussen 75 en 100% van het nominale toerental.

Sommige FC-merken hebben een ingebouwde softwarefunctie die het optimale motorvermogen bepaalt op basis van het ingangsvermogen van de FC.

9.4 Regelbereik

Het voordeel van een FC is de mogelijkheid om het toerental van de motor soepel te regelen. Er gelden echter zeer uiteenlopende beperkingen voor het beschikbare regelbereik.

Eenzijds is het mogelijke regelbereik (toerentalbereik) afhankelijk van de besturingsalgoritmes die voor de eenheid beschikbaar zijn. Met de eenvoudige U/f-regeling zijn regelbereiken haalbaar die kunnen variëren binnen 1:15. Als een besturingsalgoritme met Voltage Vector Control wordt gebruikt, is een bereik van 1:100 haalbaar. Als het actuele motortoerental door een encoder wordt teruggekoppeld naar de FC, zijn regelbereiken van 1:1.000 tot 1:10.000 te realiseren.

Behalve met de grenzen van de gebruikte besturingsalgoritmes moet ook rekening worden gehouden met het veldverzwakkingsbereik rond de nominale frequentie van de motor en met de werking bij lage toerentallen. Bij lage toerentallen neemt het zelfkoelend vermogen van de motor af. Daarom moet bij continue werking in dit toerentalbereik een externe ventilator met afzonderlijke voeding worden gebruikt om de motor te koelen, of moet de asbelasting worden verlaagd. Het toerental waaronder het koppel moet worden verlaagd, is te vinden in de datablad van de fabrikant.

Als de motor wordt gebruikt in het veldverzwakkingsbereik, moet ook rekening worden gehouden met een verlaging van het beschikbare koppel met $1/f$ en het kippkoppel met $1/f^2$. Het veldverzwakkingsbereik begint wanneer de FC de U/f-verhouding niet meer constant kan houden. In Europa ligt dit punt gewoonlijk bij 400 V/50 Hz en in Noord-Amerika bij 460 V/60 Hz.

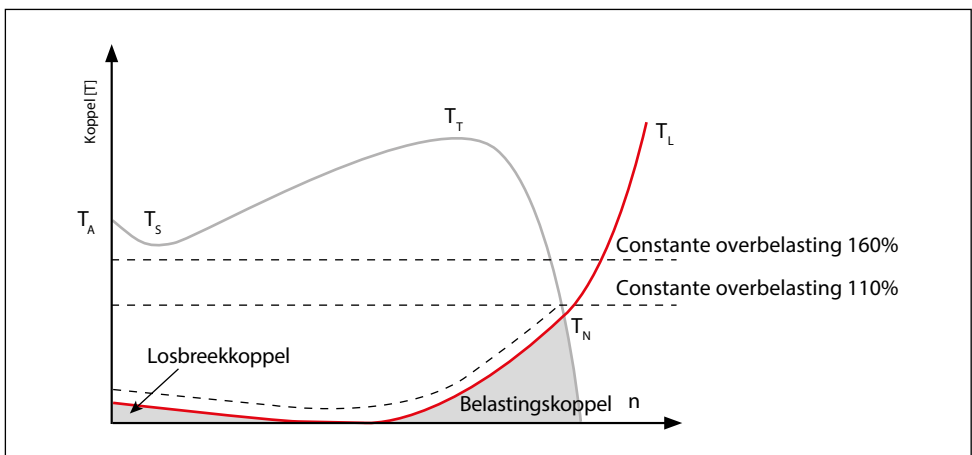


Fig. 9.3 Frequentieomvormer met een geoptimaliseerde karakteristiek voor kwadratisch-koppelbelasting en een overbelasting van 110%. Om een hoger losbreekkoppel te realiseren, wordt de omvormer soms gestart met een constant koppel voordat de kwadratische karakteristiek wordt gebruikt.

Soms specificeren motorfabrikanten een hoger beschikbaar koppel bij een lagere belastingscyclus. Een ontwerp dat is geoptimaliseerd voor intermitterend bedrijf kan zuinig zijn, maar vereist een complexer ontwerp, zoals te zien is in Fig. 9.4 Bepaling van het optimale toerental.

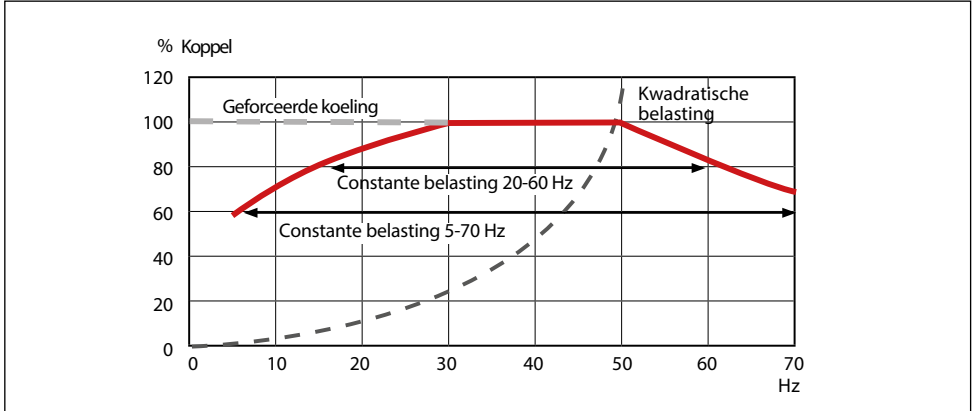


Fig. 9.4 Bepaling van het optimale toerental

9.5 Reductie van het FC-vermogen

Net als voor alle elektronische eenheden zijn ook voor FC's maximale omgevingstemperaturen gedefinieerd. Als de maximale omgevingstemperatuur wordt overschreden, kan dit leiden tot uitval van de FC. Bovendien verkort het de levensduur van de elektronica. Volgens de vergelijking van Arrhenius wordt de levensduur van een elektronisch component met 50% verkort bij elke 10 °C dat deze boven de voor de component gespecificeerde temperatuur werkt. Als FC's continu moeten werken in de buurt van de maximale nominale bedrijfstemperatuur en de gespecificeerde levensduur van de FC toch moet worden gehandhaafd, is het een optie om het vermogen te reduceren.

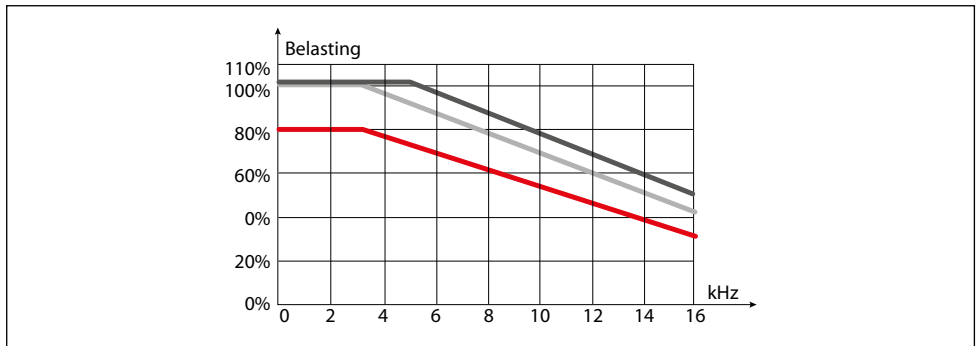


Fig. 9.5 Vermogensreductieschema voor schakelfrequentie en temperatuur

In Fig. 9.5 “Vermogensreductieschema voor schakelfrequentie en temperatuur” is de schakelfrequentie van de omvormer uitgezet op de x-as. De uitgangsstroom (in %) van de eenheid is uitgezet op de y-as.

Hogere schakelfrequenties leiden tot minder irritante motorgeluidsniveaus. De vermogensdissipatie in de omvormer neemt echter toe met de schakelfrequentie en dit leidt tot extra opwarming van de eenheid. Door het verlagen van de schakelfrequentie kunnen de schakelverliezen worden beperkt. Als de schakelfrequentie te laag is, loopt de motor gewoonlijk minder soepel. De schakelfrequentie is dus altijd een compromis tussen geluidsniveau, soepele werking en verliezen.

Als een eenheid bijvoorbeeld werkt bij een omgevingstemperatuur van 45 °C, kan deze continu 100% van de nominale uitgangsstroom leveren bij een schakelfrequentie van 4 kHz. Als de omgevingstemperatuur toeneemt tot 55 °C, is een stroom van circa 75% bij continu bedrijf mogelijk zonder verkorting van de levensduur. Als verkorting van de levensduur niet acceptabel is, moet een grotere FC met voldoende vermogensreserve worden gebruikt.

Vermogensreductiecurves moeten niet alleen worden gevolgd bij verhoogde temperaturen, maar ook bij lagere luchtdruk, zoals bij FC's die worden gebruikt bij hoogtes boven 1000 meter.

9.6 Regeneratieve energie

Als een motor wordt bestuurd door een FC en de rotor tijdens het vertragen sneller draait dan het magnetisch draaiveld, gaat de motor als generator werken.

Afhankelijk van de hoeveelheid energie die vanaf de motor wordt teruggevoerd en hoe vaak, kunnen verschillende maatregelen worden genomen. Als het vermogen groter is dan de totale vermogensverliezen van de motor en de FC, zal de tussenkringspanning toenemen totdat de FC, bij een gedefinieerde spanning, de uitgangstrap uitschakelt en als gevolg hiervan de controle over de motor verliest.

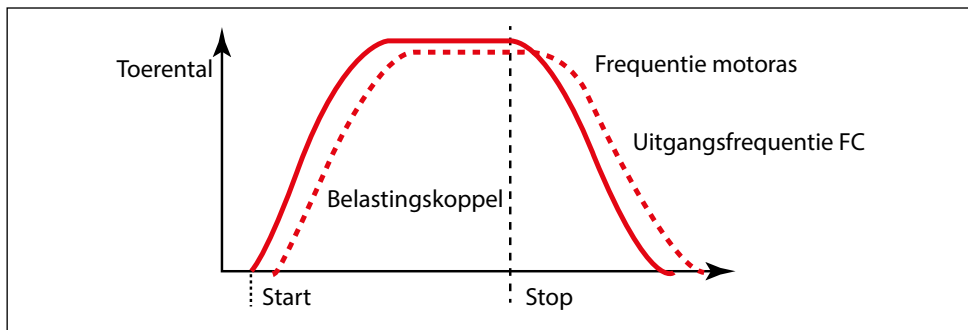


Fig. 9.6 Start/stop-illustraties voor het regeneratieve principe

Een eenvoudige manier om een dergelijke overspanningssituatie te vermijden, is overdimensionering van de FC, zodat deze meer regeneratieve energie kan absorberen en het risico op overspanning hierdoor wordt beperkt. Dit is echter vaak een duurdere oplossing in vergelijking met dynamische remmethodes, zoals een oplossing die de mogelijkheid biedt remenergie terug te voeren naar het voedingsnet. Zie voor meer informatie de relevante subsecties in hoofdstuk 3 "Frequentieomvormers en motoren".

9.7 Motorkabels

De vermogenscomponenten van FC's zijn ontworpen voor motorkabels met een specifieke lengte. Als de gespecificeerde lengte van de motorkabels wordt overschreden, kunnen er storingen optreden en kan de FC uitschakelen (trip) en een fout-/alarmmelding genereren. De capaciteit van de gebruikte kabel is hiervoor deels verantwoordelijk. Als de capaciteit aan de FC-uitgang een gespecificeerde waarde overschrijdt, kunnen er op de kabels transiënten optreden die kunnen leiden tot een storing van de FC.

De meeste fabrikanten schrijven voor hun FC's afgeschermdes kabels voor om mogelijke EMC-problemen te voorkomen. Als de gebruiker besluit om andere geschikte maatregelen te nemen om te voldoen aan de EMC-vereisten, kunnen niet-afgeschermdes kabels worden gebruikt. Omdat niet-afgeschermdes kabel een lagere capacitieve belasting op de FC geeft, is in dit geval het gebruik van een langere kabel mogelijk. De maximale kabellengte die typisch kan worden gebruikt, bedraagt 50 m/75 m (afgeschermd) of 150 m/300 m (niet-afgeschermd).

Het gebruik van niet-afgeschermdes kabels is alleen aan te raden als er andere maatregelen worden getroffen. Zelfs als een installatie tijdens de acceptatietest correct werkt zonder afgeschermdes motorkabels, kunnen er sporadisch EMC-problemen optreden. Dit kan ook gebeuren bij modificatie of uitbreiding van de installatie. De financiële inspanningen die dan nodig zijn om dergelijke problemen te elimineren, wegen gewoonlijk niet op tegen het geld dat is bespaard door het gebruik van niet-afgeschermdes kabels.

Let bij de installatie van kabels goed op dat u geen extra inductantie veroorzaakt doordat u kabels in de vorm van een luchtkernspoel aanlegt. Voorkom ook extra capaciteit als gevolg van parallelle geleiders.

Als meerdere motoren parallel worden aangesloten op de uitgang van een FC, moeten de lengtes van de afzonderlijke motorkabels bij elkaar worden opgeteld om de aangesloten kabellengte te bepalen. Houd er rekening mee dat sommige fabrikanten de geometrie van de afzonderlijke kabels specificeren, zoals ster- of busconfiguratie. In dergelijke gevallen is het aan te raden om de motorkabel door te lussen. (Fig. 9.7 "Totale motorkabellengte is de som van alle aangesloten delen"). Een stervormige configuratie kan problemen veroorzaken vanwege de extra capaciteit tussen de afzonderlijke geleiders. Raadpleeg de leveranciersdocumentatie voor gedetailleerde informatie.

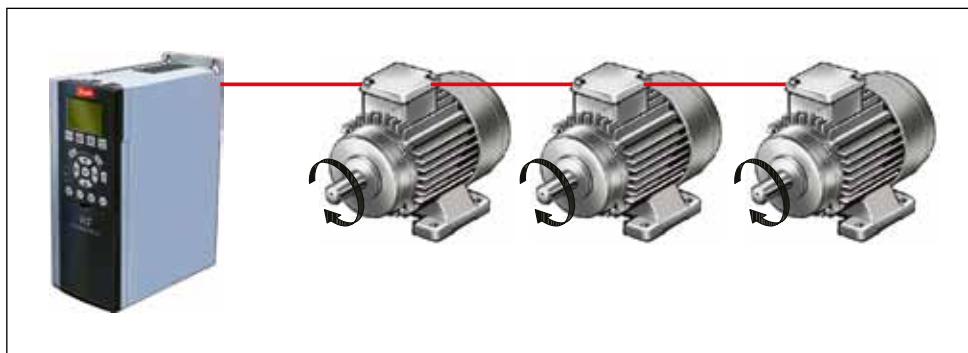


Fig. 9.7 Totale motorkabellengte is de som van alle aangesloten delen

9.8 Omgeving

Voordat een FC wordt geïnstalleerd, moeten diverse afwegingen worden gemaakt ten aanzien van de omgeving. De volgende factoren moeten worden gecontroleerd:

- Omgevingstemperatuur
- Opstellingshoogte
- Omgeving
- EMC
- Harmonische vervorming

Voor alle FC's is een minimale en een maximale omgevingstemperatuur gespecificeerd. Het vermijden van extreme omgevingstemperaturen verlengt de levensduur van de apparatuur en optimaliseert de algehele systeembetrouwbaarheid. Als de FC wordt geïnstalleerd in een omgeving waar de omgevingstemperatuur hoger is dan gespecificeerd, moet het vermogen worden gereduceerd; zie Reductie van FC.

Bij een lage luchtdruk vermindert de koelcapaciteit van lucht. Boven 1000 m is reductie van FC's meestal noodzakelijk.

Elektronische apparatuur is gevoelig voor de omgeving. Zo kunnen vocht, stof en temperatuur de betrouwbaarheid van elektronica beïnvloeden. Een verminderde betrouwbaarheid veroorzaakt stilstandtijd in de toepassing en dat leidt weer tot een lagere productiviteit. Daarom is het belangrijk de juiste oplossing voor de feitelijke toepassing te kiezen.

Het gaat er in principe om dat de elektronica wordt beschermd tegen een agressieve omgeving. De beste manier om dit te doen, is om de agressieve omgeving te vermijden door de elektronica buiten de agressieve omgeving te plaatsen.

In veel gevallen is niet meteen te zien hoe kritiek de omgeving is. Dit hangt hoofdzakelijk af van 4 factoren: de concentratie van aanwezige verontreinigende stoffen, vuil, de relatieve vochtigheid en de temperatuur. De meeste fabrikanten van FC's dragen de volgende oplossingen aan om de effecten van de omgeving te minimaliseren:

- De FC's monteren in een centrale kast met lange motorkabels. Op deze manier worden de FC's uit de kritieke omgeving gehouden.
- Airconditioning in de schakelkast installeren om ervoor te zorgen dat de kritieke omgeving niet in aanraking komt met de FC's en andere elektronica (overdruk).
- Sommige FC's worden uitgerust met een koude plaat. Met deze oplossing kunt u de FC in een kast plaatsen, waarbij de warmte via de koude plaat naar buiten wordt geleid. Zo wordt de elektronica van de FC's gescheiden gehouden van de kritieke omgeving.
- Een FC gebruiken die is uitgerust met een afgedichte behuizing. Fabrikanten van FC's bieden tegenwoordig IP-bescherming tot IP 66/NEMA 4X, die de elektronica beschermt tegen het buitenklimaat en de kosten van een afzonderlijke behuizing overbodig maakt.
- FC's bestellen met vormvolgende coating op de printkaarten. Dit biedt een aanzienlijke verbetering van de bescherming tegen chloor, waterstofsulfide, ammoniak en andere corrosieve en agressieve omgevingen.



Fig. 9.8 *Printplaat met vormvolgende coating*

De FC wordt gewoonlijk door professionals gebruikt als een complex onderdeel van een omvangrijker(e) uitrusting, systeem of installatie. Houd er daarom rekening mee dat de verantwoordelijkheid voor de uiteindelijke EMC- en harmonische eigenschappen van een uitrusting, systeem of installatie berust bij de installateur, die ervoor moet zorgen dat wordt voldaan aan de lokale voorschriften.

Zie hoofdstuk 5 "Elektromagnetische compatibiliteit" en hoofdstuk 7 "Netstoring" voor meer informatie over EMC en harmonischen.

9.9 Centrale versus decentrale installaties

De meest gangbare installatiewijze is ongetwijfeld de centrale installatie van FC's in schakelkasten. De voordelen van centrale schakelkasttechnologie zijn vooral gelegen in de beschermde installatie van de eenheden en de centrale toegang tot de apparatuur voor voeding, besturing, onderhoud en foutanalyse.

Bij installatie in de schakelkast moet primair rekening worden gehouden met warmtebeheer, niet alleen in de eenheden zelf maar ook in de installatie als geheel. Vanwege de warmtedissipatie in de schakelkast kan extra koeling van de schakelkast noodzakelijk zijn.

Afhankelijk van de montagevoorschriften van de FC-fabrikant moeten boven en onder de eenheid en tussen de eenheid en aangrenzende componenten minimale afstanden worden aangehouden. Voor een betere warmteafvoer wordt directe montage op de achterwand van de schakelkast aanbevolen. Sommige fabrikanten specificeren ook minimale afstanden tussen de afzonderlijke eenheden. Het is echter beter om de eenheden waar mogelijk naast elkaar te installeren om het montageoppervlak effectief te gebruiken.

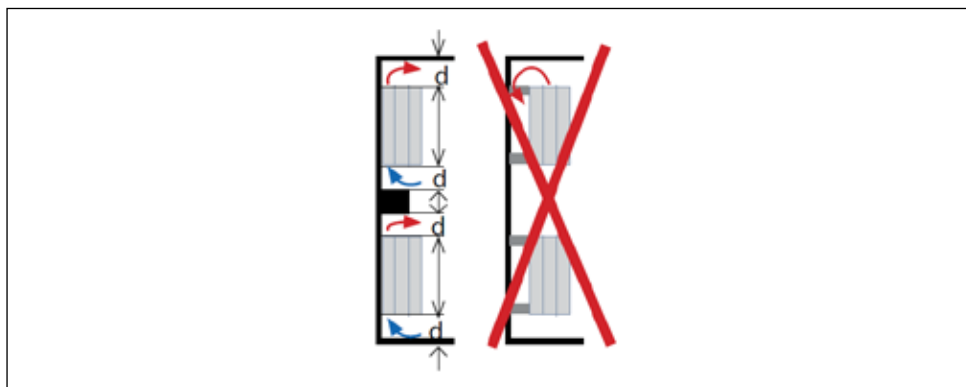


Fig. 9.9 Aanbevelingen voor installatie van omvormers (centrale oplossing)

Een nadeel van centrale installatie is in sommige gevallen de lange kabellengtes naar de motoren. Hoewel het gebruik van afgeschermd kabels de RFI-effecten van de motorkabels zeker beperkt, kunnen deze effecten niet volledig worden geëlimineerd.

In plaats van een centrale installatie kan ook worden gekozen voor een decentrale aanpak van de inrichting van een faciliteit. Hierbij wordt de FC dicht bij of direct op de motor gemonteerd.

Zo worden de motorkabellengtes tot een minimum beperkt. Bovendien biedt een decentrale installatie voordelen bij foutopsporing, aangezien de relatie tussen de regelaars en de bijbehorende motoren eenvoudig te zien is. In decentrale configuraties wordt meestal een veldbus gebruikt om de omvormers te besturen.

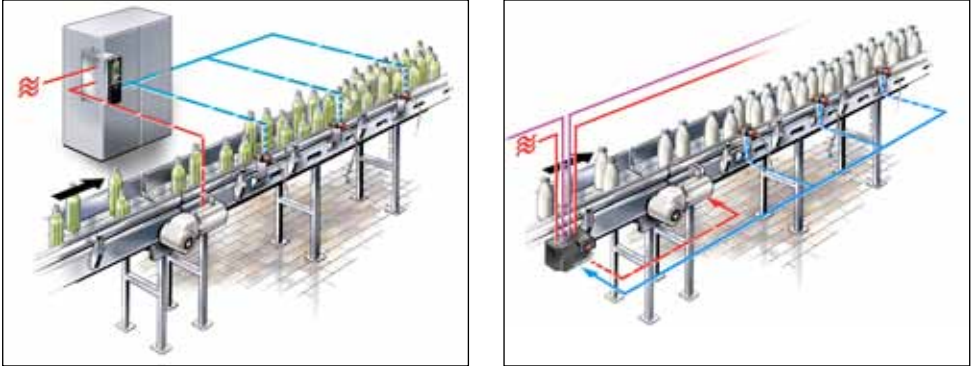


Fig. 9.10 Twee concepten – verschillende voordelen

Bij het plannen van een decentrale installatie moet rekening worden gehouden met factoren als omgevingstemperatuur, netspanningsval en beperkte motorkabellengte. Dergelijke belangrijke factoren worden vaak over het hoofd gezien bij het conceptueel ontwerp van technische projecten.

Zo moeten niet alleen de decentrale eenheden maar ook de voedingskabels geschikt zijn voor de installatieomgeving. De veldbuskabel moet bijvoorbeeld geschikt zijn voor een productieomgeving en soms ook flexibel zijn. Daarnaast moet installatie van eenheden op ontoegankelijke locaties worden vermeden, om snelle toegang voor servicewerkzaamheden mogelijk te maken.

Een ander belangrijk aandachtspunt is de segmentatie van een decentraal netwerk. Om economische redenen is het gunstig om eenheden te combineren tot groepen of segmenten. Een zorgvuldige afweging is nodig om te bepalen welke segmenten voor hun werking afhankelijk zijn van andere segmenten en welke segmenten autonoom kunnen, moeten of mogen blijven werken. Als bijvoorbeeld bepaalde chemische processen niet kunnen worden onderbroken, mag uitval van een segment op lager niveau geen storing veroorzaken in belangrijke segmenten.

Tot slot moet de expertise die nodig is voor de installatie van een decentraal netwerk niet worden onderschat. Behalve kennis over het gebruikte veldbussysteem moet de technicus beschikken over kennis over de structuur (wat gebeurt er met het totale systeem als een individuele eenheid uitvalt), de omgevingscondities van een decentraal netwerk, en in staat zijn deze effecten in te schatten.

Hoewel decentrale eenheden altijd duurder zijn dan centrale eenheden, kan met goed doordachte decentralisatieconcepten een besparing van circa 25% worden gerealiseerd ten opzichte van centrale systemen. Het potentieel voor besparingen in de installatie vloeit voort uit kortere kabellengtes en het gebruik van apparatuurmodules die al zijn gebouwd en getest door de fabrikant of leverancier van de machine.

9.10 Voorbeelden

De volgende voorbeelden illustreren de basisprocedure voor het selecteren van een FC tijdens het ontwerpproces. In deze voorbeelden wordt het hieronder getoonde datablad gebruikt bij het selectieproces. De VLT® AutomationDrive FC 302 is geselecteerd als een FC die kan werken met een afgeschermd kabel van 150 m.

		P11K		P15K		P18K		P22K	
		HO	NO	HO	NO	HO	NO	HO	NO
Uitgangsstroom									
Continu (380-440 V)	[A]	24	32	32	37,5	37,5	44	44	61
Intermitterend (380-440 V)	[A]	38,4	35,2	51,2	41,3	60	48,4	70,4	67,1
Continu (441-500 V)	[A]	21	27	27	34	34	40	40	52
Intermitterend (441-500 V)	[A]	33,6	29,7	43,2	37,4	54,4	44	64	57,2
Uitgangsvermogen									
Continu (400 V)	[kVA]	16,6	22,2		26		30,5		42,3
Continu (460 V)	[kVA]	21,5		27,1		31,9		41,4	
Typisch asvermogen	[kW]	11	15		18,5		22,0		30,0
Max. ingangsstroom									
Continu (380-440 V)	[A]	22	29		34		40		55
Intermitterend (380-440 V)	[A]	35,2	31,9	46,4	37,4	54,4	44	64	60,5
Continu (441-500 V)	[A]	19	25		31		36		47
Intermitterend (441-500 V)	[A]	30,4	27,5	40	34,1	49,6	39,6	57,6	51,7
Geschat vermogensverlies bij nominale max. belasting	[W]	291	392	379	465	444	525	547	739
Rendement 0,98									
Max. kabelgrootte (mm ²) ([AWG ²])		16 (6)				35 (2)			
Max. voorzekerings	[A]	63				80			

Tabel 9.3 Gegevens voor de VLT® AutomationDrive

Voorbeeld 1

Een (4-polige) motor van 15,0 kW, 3 x 400 V wordt geïnstalleerd in combinatie met een transportsysteem (een schroeftransporteur met een losbreekkoppel van ongeveer 160%). Het stroomverbruik van de motor bedraagt 30,0 A bij continu bedrijf.

Aanbevolen oplossing 1

Een VLT® AutomationDrive P15K (typisch voor een 15 kW-motor met een hoog constant belastingskoppel) kan 32 A bij continu bedrijf leveren en heeft voldoende overbelastingsreserve (160%/60 s) om de motor in deze toepassing te kunnen aandrijven.

Voorbeeld 2

Een (4-polige) motor van 15,0 kW, 3 x 400 V wordt geïnstalleerd in combinatie met een centrifugaalpomp (losbreekkoppel van ongeveer 60%). Het stroomverbruik van de motor bedraagt 30,0 A bij het nominale toerental.

Aanbevolen oplossing 2

Een VLT® AutomationDrive P11K (typisch voor een 11 kW-motor met een hoog constant belastingskoppel) kan desondanks 32 A leveren met een nominaal overbelastingskoppel van 110%/60 s (max.) en kan daarom worden gebruikt in deze toepassing. De eenheid beschikt over specifieke functies voor extra energiebesparing.

Met bijdragen van:

John Bargmeyer, Michael Burghardt, Norbert Hanigovszki, Marie Louise Hansen, Anna Hildebrand Jensen, Johnny Wahl Jensen, Hans Seekjar, Ana-Mari Tataru-Kjar, Firuz Zare, Thomas Jansen en Martin Černý.