

The Danfoss logo is written in a white, elegant script font on a red rectangular background.

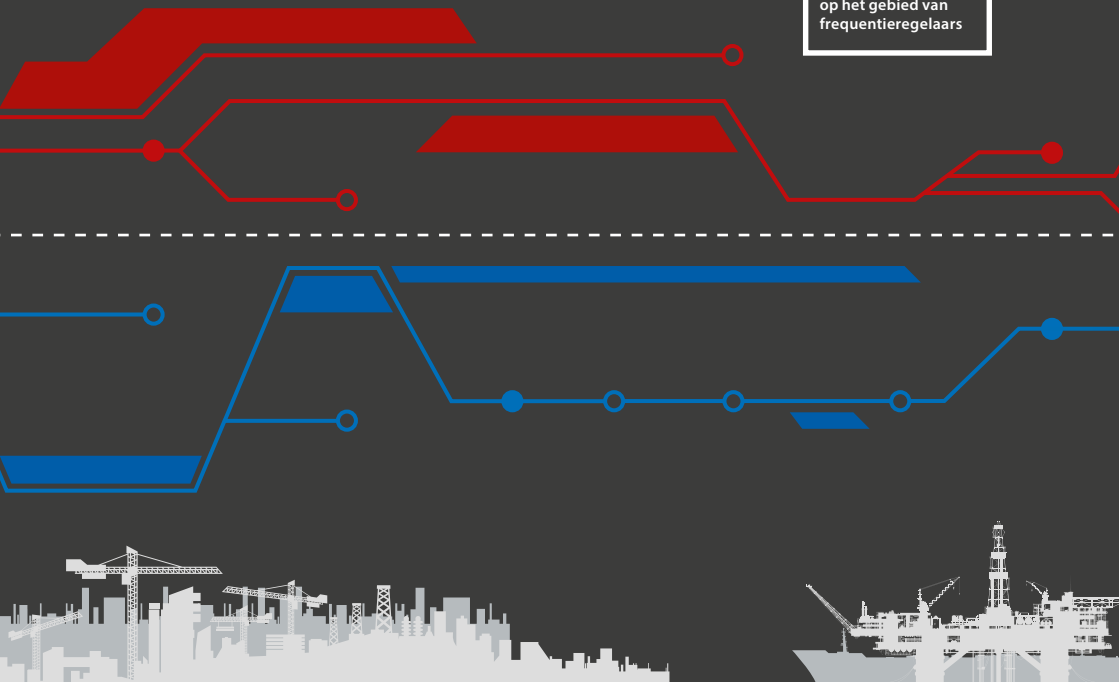
ENGINEERING
TOMORROW

Wetenswaardigheden over frequentieregelaars

Al meer dan

50

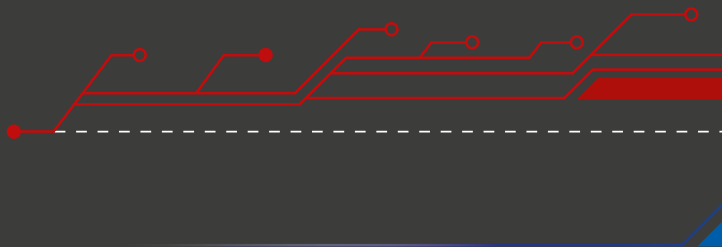
jaar toonaangevend
op het gebied van
frequentieregelaars



Al meer dan

50

jaar toonaangevend
op het gebied van
frequentieregelaars



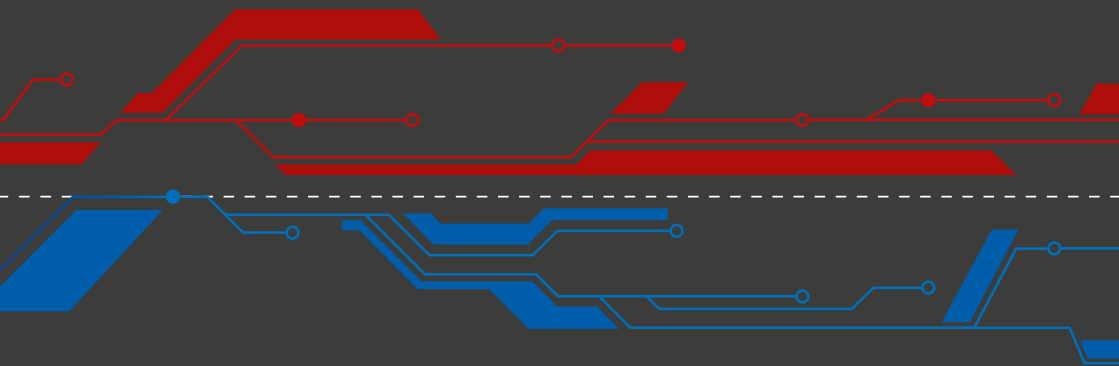
Voorwoord

In 1968 was Danfoss het eerste bedrijf ter wereld dat begon met het in serie produceren van frequentieregelaars, voor toerenregeling van driefase-inductiemotoren.

Tegenwoordig vormen frequentieregelaars een steeds belangrijkere component voor optimalisatie van motorprestaties en het systeem dat met de motor verbonden is. Inmiddels worden frequentieregelaars gebruikt in een groeiend aantal toepassingen, waarbij de volgende doelstellingen vooropstaan:

- Een optimaal energierendement: het omzetten van een vast toerental naar een variabel toerental in toepassingen met wisselende belasting levert aanzienlijke energiebesparingen op. 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 -optimalisering: een verbeterde procesregeling vereist vaak een toerenregeling van de motor en leidt tot een nauwkeurigere regeling, een hogere doorvoersnelheid of groter comfort, afhankelijk van de toepassing.
- Hybridisatie: het oplossen van problemen ten aanzien van de energiebehoefte op de meest kosteneffectieve en geschikte manier door middel van energieopslag.





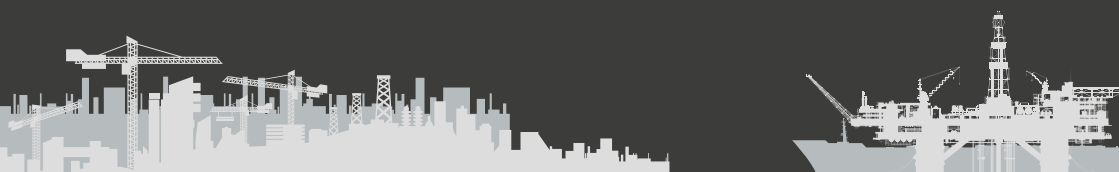
De basisprincipes van de frequentieregelaar-technologie blijven ongewijzigd, maar er zijn ook veel elementen die snel veranderen. In moderne producten is steeds vaker software geïntegreerd. Dat biedt nieuwe functies en stelt de frequentieregelaar in staat om een grotere rol te spelen binnen het systeem. Er komen nieuwe motortypen op de markt, wat extra eisen aan de motorregeling stelt. Dit betekent op zijn beurt dat de frequentieregelaar 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 frequentieregelaar zullen worden geregeld. Met deze nieuwste versie van "Wetenswaardigheden over frequentieregelaars" 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 frequentieregelaars. 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
Senior Vice President
Danfoss Drives Technology*



01

INLEIDING

PAGINA 12-15

02

ELEKTRO-
MOTOREN

PAGINA 16-45

03

FREQUENTIERE-
GELAARS

PAGINA 46-85

04

MOTOR-
AANDRIJVING
MET VARIABEL
TOERENTAL

PAGINA 86-121

05

ENERGIE
BESPAREN MET
FREQUENTIERE-
GELAARS

PAGINA 114-139



06

ELEKTRO-
MAGNETISCHE
COMPATIBILITEIT

PAGINA 132-151

07

BEVEILIGING
TEGEN
ELEKTRISCHE
SCHOKKEN
EN ENERGIE-
GEVAREN

PAGINA 152-163

08

NETSTORINGEN

PAGINA 164-177

09

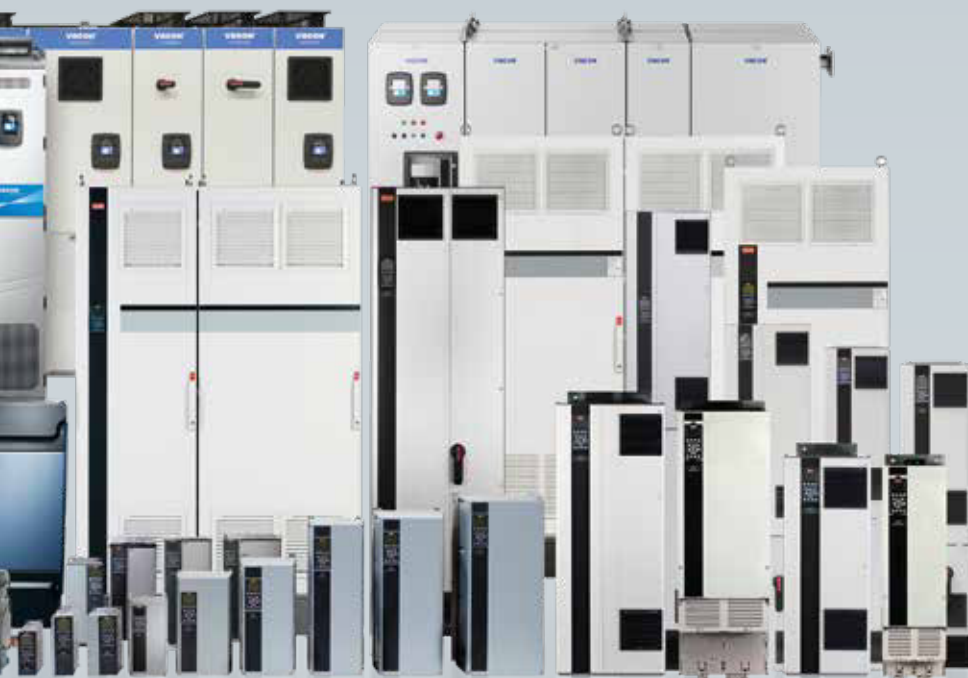
INTERFACES

PAGINA 178-189

10

DIMENSIO-
NERING EN
SELECTIE VAN
FREQUENTIERE-
GELAARS

PAGINA 190-207



Inhoud

1	Inleiding	13
1.1	Terminologie.....	13
1.2	Het nut van toerenregeling.....	13
1.3	Hoe wordt het motortoerental aangepast?.....	14
1.4	Frequentieregelaars.....	14
1.5	Systeemoptimalisatie.....	15
2	Elektromotoren	17
2.1	Overzicht.....	17
2.2	Basisprincipes.....	18
2.2.1	Stator en rotor	18
2.2.2	Vermogen en koppel	18
2.2.3	AC- en DC-motoren.....	19
2.2.4	Elektromagnetische inductie.....	20
2.2.5	Polen, synchroon toerental en asynchroon toerental.....	21
2.2.6	Rendement en verliezen	22
2.3	Inductiemotoren.....	23
2.3.1	Draaiveld.....	23
2.3.2	Kooiankermotor	25
2.3.3	Slip, koppel en toerental.....	26
2.3.4	Typische bedrijfscondities	28
2.3.5	Toerental wijzigen.....	30
2.3.6	Motortypeplaatje en ster- of driehoekconfiguratie.....	32
2.4	Synchroonmotoren.....	34
2.4.1	Permanentmagneetmotoren (PM-motoren).....	35
2.4.1.1	Tegen-EMK	36
2.4.1.2	Koppel en toerentalbereik.....	37
2.4.2	Borstelloze DC-motoren (BLDC) of elektronischecommutatiemotoren (EC-motoren).....	38
2.4.3	Netstart-PM-motor (LSPM-motor).....	39
2.4.4	Reluctantiemotoren	40
2.4.5	Synchrone reluctantiemotor met kooianker.....	41
2.4.6	Synchrone reluctantiemotor (SynRM).....	42
2.4.7	Permanentmagneet-ondersteunde synchrone reluctantiemotor (PMaSynRM).....	43
2.4.8	Geschakelde reluctantiemotor (SRM).....	44
2.5	Medium Voltage motoren.....	45

3	Frequentieregelaars.....	47
3.1	Directe regelaars	47
3.2	Frequentieregelaars met tussenkring.....	48
3.3	Gelijkrichter	50
3.3.1	Ongestuurde gelijkrichters.....	50
3.3.2	Halfgestuurde gelijkrichters.....	51
3.3.3	Volledig gestuurde gelijkrichters.....	52
3.3.4	Active Front End/Active Infeed.....	53
3.4	Tussenkring	53
3.4.1	Variabele tussenkring.....	53
3.4.2	Constante tussenkring	55
3.4.3	Condensatorloze tussenkring	56
3.4.4	Common DC Bus.....	56
3.5	Inverter.....	57
3.6	Modulatieprincipes	60
3.6.1	Pulsamplitudemodulatie (PAM).....	60
3.6.2	Pulsbreedtemodulatie (PWM)	60
3.6.3	Asynchrone PWM.....	62
3.6.3.1	SFAVM.....	63
3.6.3.2	60° AVM	65
3.7	Stuurschakeling en -methoden.....	66
3.7.1	Eenvoudige regelmethode.....	69
3.7.2	Scalaire regeling met compensatie	70
3.7.3	Ruimtevector met en zonder terugkoppeling.....	71
3.7.3.1	Ruimtevector (zonder terugkoppeling)	71
3.7.3.2	Ruimtevector (met terugkoppeling).....	72
3.7.4	Flux-vectorregeling met en zonder terugkoppeling	72
3.7.4.1	Flux-vector (zonder terugkoppeling).....	72
3.7.4.2	Flux-vector (met terugkoppeling)	73
3.7.5	Servo Drive Control.....	74
3.7.6	Integrated Motion Controller	74
3.7.7	Conclusies over regeling	75
3.8	Danfoss-besturingsprincipes.....	75
3.8.1	Besturingsprincipe Danfoss-VVC+.....	76
3.8.2	Danfoss-flux-vectorregelingsprincipe	80
3.9	Medium Voltage Drives.....	80
3.9.1	MV-halfgeleiders.....	81
3.9.2	MV-frequentieregelaartopologieën.....	81
3.10	Normen en wetgeving.....	84

4	Motoraandrijving met variabel toerental	87
4.1	Basisprincipes	87
4.1.1	U/f-bedrijf en veldverzwakking	87
4.1.2	Ster- en driehoekconfiguratie bij veldverzwakking	88
4.1.3	Draaien binnen de stroombegrenzing	90
4.2	Compensaties	90
4.2.1	Belastingonafhankelijke startcompensaties	90
4.2.2	Belastingafhankelijke startcompensaties	91
4.2.3	Belastingcompensaties	92
4.2.4	Slipcompensaties	92
4.2.5	PM-motor- en SynRM-compensaties	92
4.3	Automatische aanpassing motorgegevens (AMA) van Danfoss	93
4.4	Werking	94
4.4.1	Regeling motortoerental	94
4.4.2	Omkeren	95
4.4.3	Acceleratie- en deceleratiehelling (aanloop en uitloop)	96
4.4.4	Motorkoppelregeling	98
4.4.5	Watchdog	98
4.4.6	Energie-efficiënte motorstart	99
4.4.7	Energie-efficiënte motorbesturing	101
4.5	Werking dynamische rem	103
4.5.1	Verlenging deceleratiehelling	104
4.5.2	Motor als remweerstand	104
4.5.3	Remchoppercircuit (remmodule) en weerstand	104
4.5.4	Gebruik van een regeneratieve remeenheid	105
4.6	Werking statische rem	106
4.6.1	Vrijlopen tot stilstand	106
4.6.2	DC-rem	106
4.6.3	DC-houd	106
4.6.4	Elektromechanische rem	107
4.7	Motoropwarming en thermische bewaking	107
4.8	Functionele veiligheid	109
5	Energie besparen met frequentieregelaars	115
5.1	Potentieel	115
5.2	Rendement van motor + frequentieregelaar	115
5.3	Classificatie van energie-efficiënte componenten	117
5.4	Belasting over tijd	121
5.4.1	Toepassingen met variabel koppel	121
5.4.2	Toepassingen met constant koppel	123
5.5	Levenscycluskosten	124
5.6	Systeembesparingen	124
5.7	Het gebruik van geregenereerd vermogen	126
5.8	Hybridisatie	128
5.8.1	Netconverter	130
5.8.2	DC/DC-converter	130

6	Elektromagnetische compatibiliteit	133
6.1	EMI en EMC.....	133
6.2	EMC en frequentieregelaars.....	134
6.3	Aarding en afscherming.....	136
6.4	Installaties met frequentieregelaars.....	140
6.5	Uitgangsfilters.....	141
6.1.1	dU/dt-filters.....	142
6.1.2	Sinusfilter.....	143
6.1.3	Common-modefilter.....	144
6.6	Elektrische lagerbelasting.....	145
6.7	Europese EMC-richtlijn en EMC-normen.....	149
7	Beveiliging tegen elektrische schokken en energiegevaaren.....	153
7.1	Algemeen.....	153
7.2	Netvoedingssysteem.....	154
7.3	DC-voedingssystemen.....	157
7.4	Aardfoutbeveiliging.....	158
7.5	Zekeringen en circuitbreakers.....	160
7.6	DC-beveiliging voor Common DC Bus-systemen.....	162
8	Harmonischen.....	165
8.1	Wat zijn harmonischen?	165
8.1.1	Lineaire belastingen.....	165
8.1.2	Niet-lineaire belastingen.....	166
8.1.3	Het effect van harmonischen in een energieverdeelsysteem.....	168
8.1.4	Het effect van harmonischen op motoren.....	170
8.2	Normen en voorschriften voor het beperken van harmonischen.....	170
8.3	Methoden voor beperking van harmonischen in frequentieregelaars.....	171
8.3.1	Passieve beperking van harmonischen.....	173
8.3.2	Actieve beperking van harmonischen.....	174
8.4	Tools voor analyse van harmonischen.....	175
8.4.1	VLT® Motion Control Tool MCT 31.....	176
8.4.2	Harmonic Calculation Software (HCS).....	176
9	Interfaces	179
9.1	Mens-machine-interface (MMI).....	179
9.2	Werkingsprincipes van seriële interfaces.....	181
9.3	Standaard seriële interfaces in frequentieregelaars.....	183
9.4	Veldbusinterfaces in frequentieregelaars.....	184
9.5	Veldbusstandaardisering.....	185
9.6	Industrieel ethernet en Internet of Things.....	187

10 Dimensionering en selectie van frequentieregelaars 191

- 10.1 De juiste vermogensklasse van de frequentieregelaar 191
- 10.2 Classificatie van de frequentieregelaar op basis van de motorspecificaties..... 191
- 10.3 Overbelastingscapaciteit 193
 - 10.3.1 Afwegingen ten aanzien van energierendement..... 194
- 10.4 Regelbereik..... 195
- 10.5 Warmteverliezen en koelen van de frequentieregelaar 196
 - 10.5.1 Luchtgekoelde frequentieregelaars..... 197
 - 10.5.2 Vloeistofgekoelde frequentieregelaars 199
- 10.6 Reduceren van een frequentieregelaar 200
- 10.7 Regeneratieve energie 201
- 10.8 Motorkabels 201
- 10.9 Omgeving 202
- 10.10 Centrale versus decentrale installatie 204
- 10.11 Voorbeelden..... 206



01

INLEIDING

1	Inleiding	13
1.1	Terminologie	13
1.2	Het nut van toerenregeling.....	13
1.3	Hoe wordt het motortoerental aangepast?.....	14
1.4	Frequentieregelaars.....	14
1.5	Systeemoptimalisatie.....	15

1 Inleiding

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

Hoewel het principe van het omzetten van een vaste netspanning en -frequentie naar variabele waarden altijd praktisch ongewijzigd is gebleven, zijn er veel verbeteringen doorgevoerd sinds de eerste frequentieregelaars, 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.

Vandaag de dag is de met frequentieregelaar gestuurde draaistroommotor een standaard onderdeel van alle geautomatiseerde toepassingen. Hoogefficiënte inductiemotoren, maar met name motorontwerpen zoals permanentmagneetmotoren, EC-motoren en synchrone reluctantiemotoren, vereisen een regeling met frequentieregelaars. Veel motoren kunnen niet eens werken wanneer ze rechtstreeks op een standaard 3-fasevoeding zijn aangesloten.

1.1 Terminologie

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

- Frequentieregelaar
- Frequentieomvormer (FC – frequency converter)
- Frequentieregelaar met een variabel toerental (VSD – variable speed drive)
- Toerenregelaar (ASD – adjustable speed drive)
- Frequentieregelaar (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, VFD en FC rechtstreeks naar het aanpassen van de voedingsfrequentie van een motor. In deze context worden ook frequentieregelaar en de afkorting 'regelaar' gebruikt. Deze twee termen zullen veel worden gebruikt in dit boek. De termen hebben betrekking op het vermogenslektronische deel van de apparaten en de ondersteunende componenten zoals stroomsensoren, I/O's en mens-machine-interface (MMI).

1.2 Het nut 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 regelaar aanpassen aan de procesvereisten

- Het koppel of vermogen van een regelaar 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.

1.3 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 mijnbouwinstallaties. 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 veel technici – met name werktuigbouwkundigen – nog steeds de voorkeur aan mechanische oplossingen, vooral vanwege hun eenvoud en lage aankoopprijs.

Elektrisch

- Frequentieregelaar met elektrische motor
- Servosystemen (bijvoorbeeld servoversterker en servo-PM-motor)
- DC-motor met besturingselektronica
- Sleepringmotor (slipregeling met een inductiemotor met gewikkelde rotor)

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

De verstrekte lijst met technische oplossingen voor een toerenregeling van motoren is niet compleet en geeft alleen een indicatie van de mogelijkheden. Dit boek richt zich op toerenregeling van elektromotoren met behulp van frequentieregelaars.

1.4 Frequentieregelaars

Moderne frequentieregelaars 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 rendement 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 een technisch geavanceerde regeling.

In principe kunnen bijna alle motoren werken met besturingsalgoritmes die speciaal zijn afgestemd op elk motortype. Sommige fabrikanten van frequentieregelaars 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 regelaar 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 is ingesteld als verwacht. Daarom zijn online metingen van het daadwerkelijke energieverbruik en eenvoudige toegang tot belangrijke gegevens over de werking essentieel.

1.5 Systeemoptimalisatie

Om de selectie van componenten te vereenvoudigen en te voldoen aan de diverse doelstellingen van overheden voor verlaging van het energieverbruik, wordt er veel belang gehecht aan een complete reeks internationale voorschriften.

Volgens de Duitse organisatie van elektrotechniek- en elektronicafabrikanten (ZVEI) kan ongeveer 10% van de besparingen worden gerealiseerd door gebruik 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 te kijken naar het totale systeem 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.



02

ELEKTROMOTOREN

2	Elektromotoren	17
2.1	Overzicht.....	17
2.2	Basisprincipes.....	18
2.2.1	Stator en rotor	18
2.2.2	Vermogen en koppel	18
2.2.3	AC- en DC-motoren.....	19
2.2.4	Elektromagnetische inductie.....	20
2.2.5	Polen, synchroon toerental en asynchroon toerental.....	21
2.2.6	Rendement en verliezen	22
2.3	Inductiemotoren.....	23
2.3.1	Draaiveld.....	23
2.3.2	Kooianker motor	25
2.3.3	Slip, koppel en toerental.....	26
2.3.4	Typische bedrijfscondities	28
2.3.5	Toerental wijzigen.....	30
2.3.6	Motortypeplaatje en ster- of driehoekconfiguratie	32
2.4	Synchroonmotoren.....	34
2.4.1	Permanentmagneetmotoren (PM-motoren).....	35
2.4.1.1	Tegen-EMK	36
2.4.1.2	Koppel en toerentalbereik.....	37
2.4.2	Borstelloze DC-motoren (BLDC) of elektronischecommutatiemotoren (EC-motoren).....	38
2.4.3	Netstart-PM-motor (LSPM-motor).....	39
2.4.4	Reluctantiemotoren	40
2.4.5	Synchrone reluctantiemotor met kooianker.....	41
2.4.6	Synchrone reluctantiemotor (SynRM).....	42
2.4.7	Permanentmagneet-ondersteunde synchrone reluctantiemotor (PMaSynRM).....	43
2.4.8	Geschakelde reluctantiemotor (SRM).....	44
2.5	Medium Voltage motoren.....	45

2 Elektromotoren

2.1. 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.

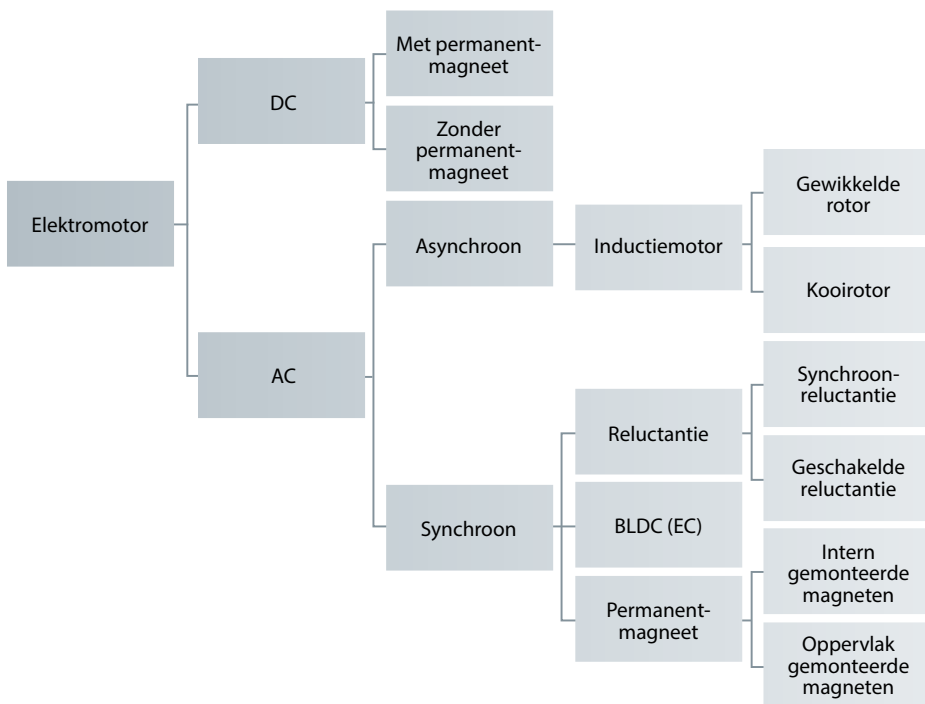


Fig. 2.1 Overzicht van de meest gangbare elektromotortechnologieën

2.2 Basisprincipes

2.2.1 Stator en rotor

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



Fig. 2.2 Constructie van de inductiemotor

Stator

De stator (1) is het stilstaande deel van de motor en bevat het blikpakket waarin de elektrische windingen worden geplaatst.

Rotor

De rotor (2) 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 rotorwindingen bevatten.

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 typische 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.

2.2.2 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 355 (ca. 400 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 2.1 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 2.1 Nominaal 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.

$$P = T \times \frac{(2 \times \pi \times n)}{60 \times 1000} \approx \frac{(T \times n)}{9550}$$

P = Vermogen [kW]
T = Koppel [Nm]
n = Toerental [tpm]

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 rad/s (radialen per seconde) naar s⁻¹ (toeren per seconde) en vervolgens naar de typeplaatje-eenheid min⁻¹ (toeren per minuut)

2.2.3 AC- en DC-motoren

De eerste elektromotor, een DC-motor, werd rond 1833 gebouwd. De toerenregeling voor dit type motor is eenvoudig en voldeed destijds aan de vereisten van zeer uiteenlopende typen toepassingen. De DC-motor wordt gestuurd door het leveren van een DC-spanning waarvan de hoogte het roortoerental 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 DC-motoren is in de loop der tijd afgenomen en ze worden tegenwoordig zelden gebruikt in vermogensbereiken boven een paar honderd watt.

In vergelijking met DC-motoren zijn AC-motoren aanzienlijk eenvoudiger en robuuster. AC-motoren hebben echter meestal een vast toerental en een vaste koppelkarakteristiek. Daarom was het lange tijd onmogelijk om AC-motoren 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 AC-motoren is gebaseerd op de effecten van een draaiend magnetisch veld. Het draaiend veld wordt opgewekt door hetzij een meerfasige AC-bron (typisch driefasig) of een eenfasige bron in combinatie met condensatoren of inductanties om de faseverschuiving te realiseren.

Dit boek richt zich op AC-motoren, met name op inductiemotoren, aangezien de vereisten voor bedrijf met frequentieregelaars in toepassingen met toerenregeling voor diverse motortypen kunnen worden afgeleid uit deze motortechnologie. We gaan niet verder in op DC-motoren.

2.2.4 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. 2.3 Principe van elektromagnetische inductie.

b) Motorprincipe

In motoren wordt het inductieprincipe in omgekeerde volgorde benut: een kracht (F) wordt opgewekt die werkt op een stroomvoerende geleider, waardoor beweging ontstaat.

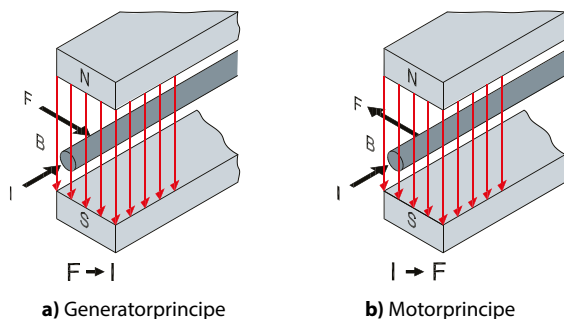


Fig. 2.3 Principe van elektromagnetische inductie

In beide gevallen is een magnetisch veld vereist. In Fig. 2.3 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.

2.2.5 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 frequentieregelaar, wordt het aantal polen bepaald door de manier waarop de statorinductoren zijn aangesloten.

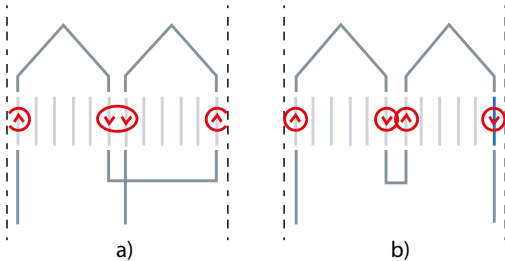


Fig. 2.4 Twee inductoren in één fase in serie aangesloten op a) twee polen b) vier polen

Tabel 2.2 Poolparen (p) of pooltal en synchroonmotortoerental – 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	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 2.2 Poolparen (p) of pooltal en synchroonmotortoerental

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 2.3.3 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'.

2.2.6 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.

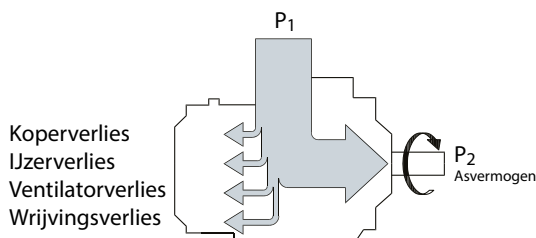


Fig. 2.5 Typische verliezen in de motor

De verliezen in de motor zijn afgebeeld in Fig. 2.5 Typische verliezen in de motor. De typische verliezen 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. 2.6 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.

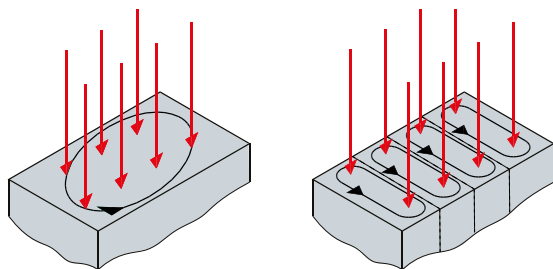


Fig. 2.6 Wervelstromen worden beperkt door de gelamineerde vorm van het blikpakket van de motorkern

- 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.

2.3 Inductiemotoren

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

De informatie in dit boek is voornamelijk van toepassing op de zogenaamde driefase-inductiemotor (of kooianker motor), het type motor dat veel wordt gebruikt in combinatie met frequentieregelaars.

2.3.1 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.

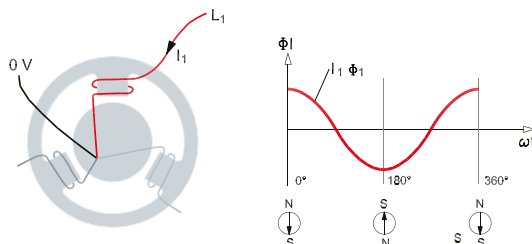


Fig. 2.7 Eén fase wekt een wisselend veld op (wisselveld)

Het magnetische veld in de statorkern heeft een vaste locatie, maar de richting varieert, zoals aangegeven in Fig. 2.7 Eén fase wekt een wisselend veld op (wisselveld). Het toerental wordt bepaald door de netfrequentie. Bij een frequentie van 50 Hz wijzigt het veld 100 keer per seconde van richting (twee keer per periode).

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. 2.8 Twee fasen wekken een asymmetrisch draaiveld op.

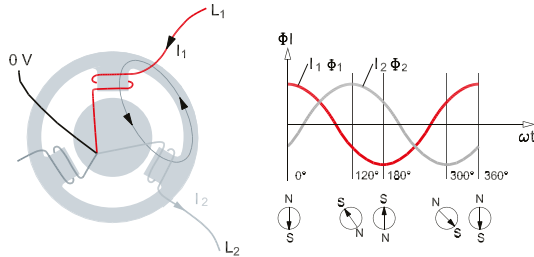


Fig. 2.8 Twee fasen wekken een asymmetrisch draaiveld op

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. 2.9 Drie fasen wekken een symmetrisch draaiveld op.

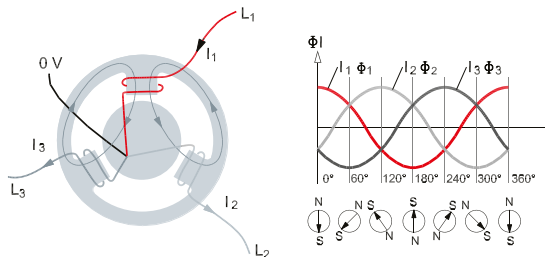


Fig. 2.9 Drie fasen wekken een symmetrisch draaiveld op

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 ($\phi_{\max}$) van de wisselvelden. Het draaiveld draait met het synchrone toerental dat wordt bepaald door het aantal poolparen en de netfrequentie (zie ook sectie 2.3.3 Slip, koppel en toerental).

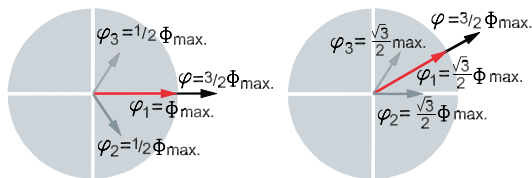


Fig. 2.10 Componenten van een magnetisch veld

De weergave van het draaiveld als een vector met een overeenkomstige hoeksnelheid beschrijft een cirkel, zoals aangegeven in Fig. 2.10 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). Drie sinusvormige velden met een faseverschuiving van 120 graden vormen een circulair draaiend magnetisch veld. 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.

2.3.2 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 inductoren 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 inductoren heeft voor elke fase. De inductoren 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 2.3.5 Toerental wijzigen). Als de sleepringen worden kortgesloten, werkt de rotor als een kooianker.

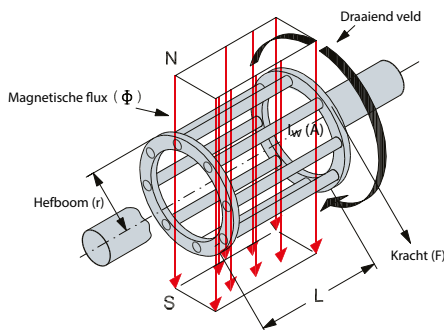


Fig. 2.11 Werkingsgebied en kooianker

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. 2.11. 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. 2.12b Inductie in de rotorstaven.

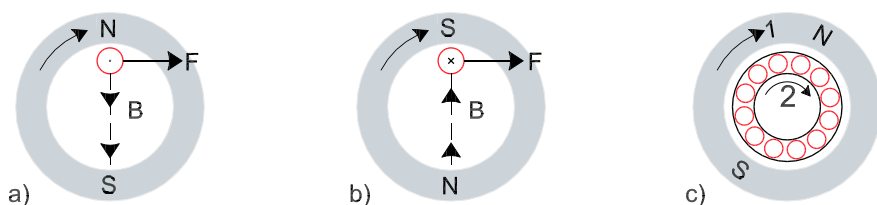


Fig. 2.12 Inductie in de rotorstaven

Wanneer de volledige rotor zich in het draaiveld bevindt (zie Fig. 2.12c 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 draaien met hetzelfde toerental als het veld.

2.3.3 Slip, koppel en toerental

Zoals aangegeven in de secties 2.2.5 Polen, synchroon toerental en asynchroon toerental en 2.3.2 Kooiankermotor, is het rotortoerental (n_n) van inductiemotoren in normale omstandigheden iets lager dan het toerental (n_0) van het draaiveld. Het verschil tussen de toerentallen van het draaiveld en de rotor wordt slip (s) genoemd, waarbij:

$$s_a = n_0 - n_n$$

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

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

De afzonderlijke krachten in de rotorstaven vormen samen het koppel (T) op de motoras (zie sectie 2.3.2 Kooiankermotor). Bij een gegeven waarde van kracht (F) en straal (r), bedraagt het motorkoppel: $T = F \times r$.

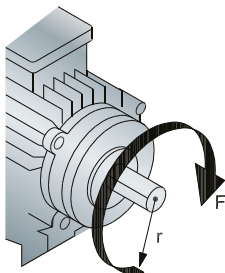


Fig. 2.13 Koppel op de motoras is kracht (F) x straal (r)

De relatie tussen motorkoppel, toerental en stroom van inductiemotoren heeft een karakteristieke curve, zoals te zien is in Fig. 2.14 Belangrijkste motorstroom- en koppelkarakteristieken. Deze curve hangt af van het ontwerp van de rotorsleuven en het materiaal van de staven.

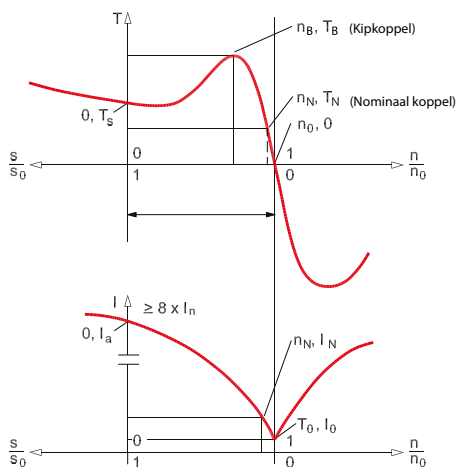


Fig. 2.14 Belangrijkste motorstroom- en koppelkarakteristieken

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

- Startbereik ($0 - n_B$)
- Werkbereik ($n_B - n_0$)

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 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 of motorklasse 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.

2.3.4 Typische bedrijfscondities

In principe hebben inductiemotoren zes inductoren: drie inductoren in de stator en drie inductoren in het kooianker (dat zich magnetisch gedraagt alsof het uit drie inductoren bestaat). Een subset van deze inductoren 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.

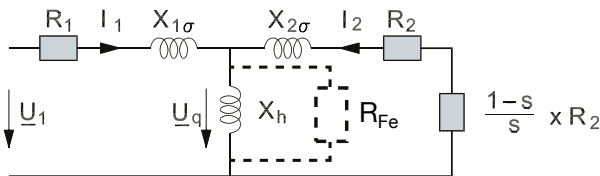


Fig. 2.15 Equivalentiedigram (eenfase) voor een motor die belast werkt

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_{1o}) en de rotor (X_{2o}). De weerstand is onafhankelijk van de netfrequentie, 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 inductoren beïnvloeden elkaar door middel van magnetische inductie. De rotorinductor wekt een stroom op in de statorinductor 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_{lr} , 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 inductiemotor in de normale praktijk. Het kan in talrijke praktijkvoorbeelden worden gebruikt om de condities in de motor te beschrijven.

2.3.5 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 sleepkringmotoren);
- de frequentie f van de motorvoedingsspanning (voor de motor).

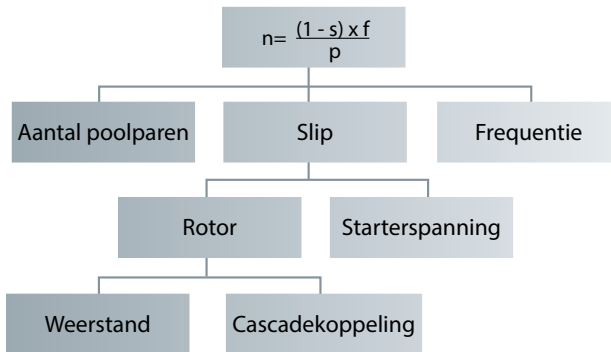


Fig. 2.16 Diverse opties voor het wijzigen van het motortoerental

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.

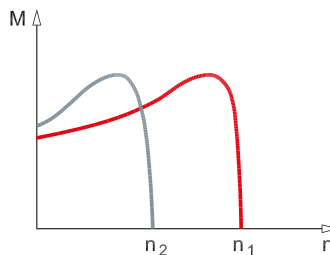


Fig. 2.17 Koppelkarakteristieken bij wijziging van het pooltal

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 modifieren. 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 gelijkrichter circuits. Het rotorcircuit wordt vervolgens via sleepingen verbonden met DC-machines of met gestuurde gelijkrichter circuits 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. 2.18 Koppelkarakteristieken met spanning-frequentieregeling. Bij een constante verhouding tussen motorvoedingsspanning en frequentie is ook de magnetisering binnen het nominale werkbereik van de motor constant.

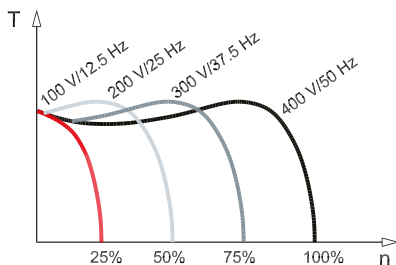


Fig. 2.18 Koppelkarakteristieken met spanning-frequentieregeling

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

2.3.6 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.

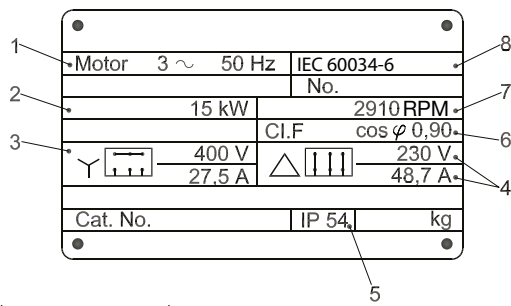


Fig. 2.19 Motortypeplaatje met essentiële gegevens

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 statorwikkelingen 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 statorwikkelingen 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.

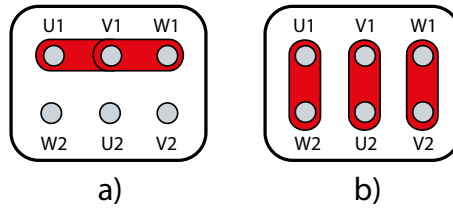


Fig. 2.20 Motoren aangesloten in ster (a) of driehoek (b) via jumpers op het klemmenblok

Bij een driehoekaansluiting wordt de volledige voedingsspanning (fase-naar-fasespanning, U_{pp}) geschakeld op elke motorfase, maar wordt de fasestroom (I_p) verlaagd met factor $\sqrt{3}$. Bij een steraansluiting wordt de stroom gehandhaafd en wordt de fasespanning (U_p) verlaagd. Het vermogen is daarom gelijk ongeacht de aansluiting, omdat de toevoerspanningen verschillend zijn.

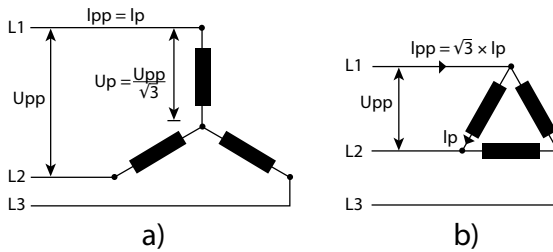


Fig. 2.21 Stroom- en spanningsverdeling bij aansluiting in ster (a) en driehoek (b)

In driehoekaansluiting $U_{pp} = U_p$, waardoor de motor het voedingsnet moet volgen. 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. Zogenaamde ster-driehoekstarters benutten dit gedrag om de startstroom van een motor te beperken. Bij het opstarten zal de motor in een ster worden aangesloten, waarbij stroom, vermogen en koppel tot een derde zijn 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 spanningen zijn fase-naar-fasespanningen. De lagere spanning verwijst daarom 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.

2.4 Synchronmotoren

De synchronmotor 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 inductiemotoren, 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, die worden veroorzaakt door harmonischen in de luchtspleetflux als gevolg van de constructie.



Fig. 2.22 Gedistribueerde wikkelingen

Het koppel dat door een synchronmotor wordt geproduceerd, heeft twee verschillende bronnen. Eén is de interactie tussen de rotorflux en het permanentmagneetkoppel en de andere is de asymmetrie/anisotropie van het ontwerp van de motor (reluctantiekoppel). Een overzicht van de motortypes kan worden verkregen door twee indicatoren in aanmerking te nemen:

Reluctantie, het effect van de asymmetrie in de motor (anisotropie) op de inductanties, dat wordt gedefinieerd door de verhouding tussen de hoogste en laagste inductantie. T_{pm}/T_{totaal} , wat de bijdrage van het permanentmagneetkoppel aan het totale koppel uitdrukt.

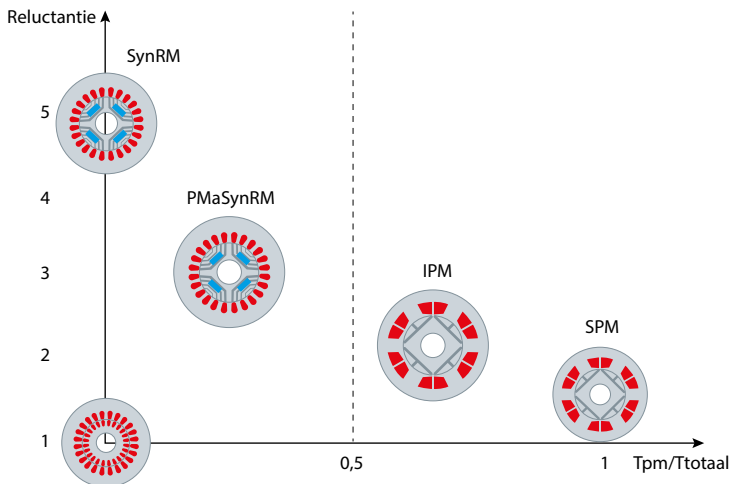


Fig. 2.23 In de IM is geen permanentmagneet aanwezig, zodat $T_{pm}/T_{totaal} = 0$. De geometrie van IM voorziet niet in anisotropie, waardoor $reluctantie = 1$

De belangrijkste types synchroommotoren (rotor-oppervlak gemonteerde magneten (SPM), rotor-intern gemonteerde magneten (IPM), synchrone reluctantiemotor (SynRM) en permanentmagneet-ondersteunde synchrone reluctantiemotor (PMaSynRM)) zijn generiek geplaatst wat betreft de bijdrage van de reluctantie en permanentmagneet aan het totale koppel (T_{pm}/T_{totaal}), zoals geïllustreerd:

- In SPM is de hoeveelheid magneet groot en wordt de volledige koppelpductie veroorzaakt door de permanentmagneetflux van de rotor, waardoor $T_{pm}/T_{totaal} \approx 1$. De anisotropie is beperkt, waardoor reluctantie ≈ 1 .
- In SynRM heeft de rotor geen magneet, waardoor $T_{pm}/T_{totaal} = 0$ en de volledige koppelpductie wordt veroorzaakt door het reluctantie-koppel. De anisotropie is hoog, net zoals de reluctantie.
- Tussen SPM en SynRM is theoretisch elke combinatie mogelijk. De IPM worden over het algemeen ontworpen zoals geïllustreerd en $T_{pm}/T_{totaal} > 0,5$ (pm-koppel domineert). De PMaSynRM worden over het algemeen ontworpen zoals geïllustreerd en $T_{pm}/T_{totaal} < 0,5$ (reluctantie-koppel domineert). Voor de regeling is het echter niet belangrijk om een onderscheid te maken tussen IPM en PMaSynRM.

2.4.1 Permanentmagneetmotoren (PM-motoren)

De eenvoudigste manier om een permanentmagneetmotor (PM-motor) te bouwen, is om het kooianker van een inductiemotor te vervangen door een rotor die is uitgerust met permanentmagnetten. 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 synchroom 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-framegroottes. Standaard frequentieregelaars 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. Zie bijvoorbeeld hoofdstuk 3.7.6 Integrated Motion Controller. Als de regelaar niet geschikt is voor een sensorloze regeling, of in uiterst dynamische servotoepassingen, worden externe positieterugkoppelingssystemen 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 2.4.1.1 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.

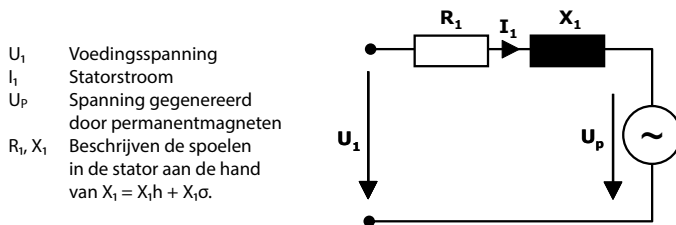


Fig. 2.24 Vereenvoudigd equivalentiediagram van een PM-motor

Over het algemeen kunnen PM-motoren worden onderverdeeld in motoren waarbij de magneten op het rotor-oppervlak zijn gemonteerd (SPM-motor) of in het binnenwerk van de rotor (IPM-motor). 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 .

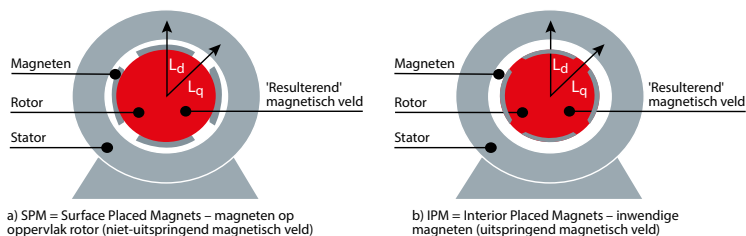


Fig. 2.25 Locatie magneet a) SPM en b) IPM

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 (zie hoofdstuk 4.1.1).

2.4.1.1 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 geluid en koppelrimpels. PM-motoren hebben meestal een sinusvormige tegen-EMK en worden aangestuurd door middel van sinusvormige commutatie.

Het feit dat de motor actief spanning genereert moet in aanmerking worden genomen, niet slechts wanneer deze in bedrijf is, maar ook wanneer de voedende frequentieregelaar niet is aangesloten op het net (vermogensverlies, uitval, uitgeschakeld). De motor kan eventueel voldoende energie opwekken om het apparaat in te schakelen terwijl de as draait (bijvoorbeeld bij vrijlopen). De spanning die nodig is om de regelaar in te schakelen, hangt af van de netspanning waarvoor de regelaar is ontworpen.

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

$$n_{\text{ingeschakeld}} = \frac{U_{\text{DC aan}}}{U_{\text{tegen-EMK@1000tpm}}} \times 1000 \text{ tpm} = \frac{320V}{200V} \times 1000 \text{ tpm} = 1134 \text{ tpm}$$

Als de door de motor opgewekte spanning te hoog is, kan de regelaar onherstelbaar worden beschadigd. In de praktijk kan dit gebeuren wanneer de aandrijvende regelaar wordt uitgeschakeld terwijl de motor op zeer hoge toeren draait. Tijdens bedrijf beperkt de regelaar 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 regelaar is ontworpen.

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

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

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.

$$U_{\text{EMK}} = k_e \times \frac{1000}{60} \times 2\pi$$

Soms wordt de waarde van factor k_e gegeven in radialen en moet deze worden geconverteerd naar tpm. 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.

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

2.4.1.2 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 frequentieregelaar 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 veldverzwakkingsgebied. Werking in het veldverzwakkingsgebied is alleen mogelijk met hiervoor geschikte frequentieregelaars. Motormechanica en -isolatie moeten het hogere toerental ondersteunen en bestand zijn tegen de hogere spanning.

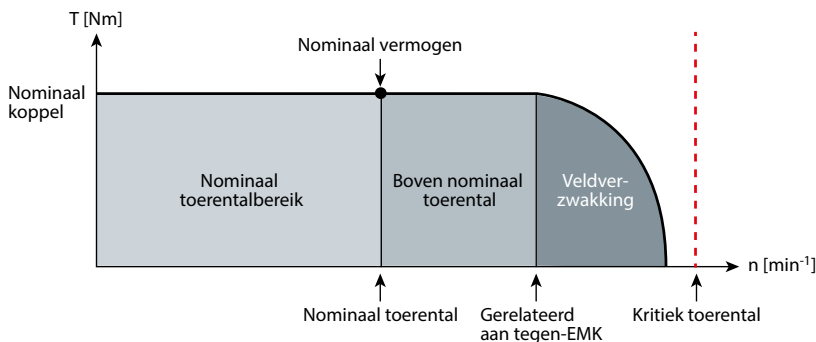


Fig. 2.26 Werking in veldverzwakkinggebied

Het grootste risico van werking in veldverzwakkinggebieden is uitschakeling van de motor bij een te hoog toerental, aangezien de hoge tegen-EMK de frequentieregelaar onherstelbaar kan beschadigen (zie sectie 2.4.1.1 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 inductiemotoren resulteert een driehoekaansluiting in een hogere spanning op de wikkelingen, omdat de spanning niet wordt verlaagd met een factor $1,73\sqrt{3}$, zoals bij een sterconfiguratie.

2.4.2. Borstelloze DC-motoren (BLDC) 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 zijn Hall-sensoren gebruikt. Nadelen van het concept waren grotere koppelrimpels en ijzerverliezen.

In de praktijk zijn er veel verschillende typen EC-motoren, zoals kleine servomotoren van enkele watts, maar ook uitvoeringen voor gebouwwautomatisering 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 gebouwwautomatisering 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 de Danfoss EC+-oplossing, die het mogelijk maakt om PM-motoren met een hoog rendement te gebruiken met Danfoss VLT®-regelaars, kan het verschil in totaal systeemrendement 5-7% bedragen.

2.4.3 Netstart-PM-motor (LSPM-motor)

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



Fig. 2.27 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 inductiemotor tot een bijna synchroon 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 synchroon gaat draaien.

Na de synchronisatie blijft de motor op het synchrone toerental lopen. Omdat er geen verschil is tussen de toerentallen 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 frequentieregelaar, 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 blokkeerkoppel, werkt hij niet langer synchroon en werkt hij verder als een inductiemotor 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 synchroon 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 inductieblokkeerkoppel.

Een nadeel van het concept is de invloed van de magneten bij het starten van de motor. Tijdens het opstarten treden koppeloscillaties en koppelpieken op, in combinatie met geluid. Bovendien is het startkoppel lager in vergelijking met een inductiemotor, aangezien de magneten een negatieve koppelcomponent^{*)} creëren.

^{*)} Bron – 2014. J Sorgdrage, A.J Grobler en R-J Wang, *Design procedure of a line-start permanent magnet synchronous machine.*

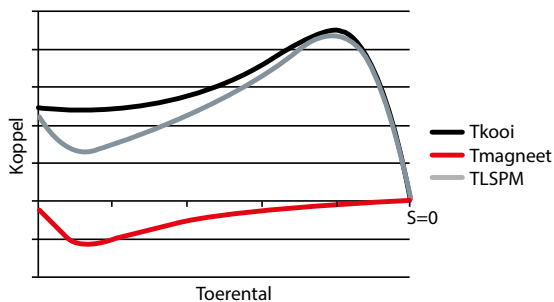


Fig. 2.28 Startkoppel van LSPM wordt verlaagd in vergelijking met een zuiver kooiankerkoppel

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.

2.4.4 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 inductiemotoren 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 $\cos \varphi$. Zoals in Fig. 2.29 Maximale arbeidsfactor vs. saliency ratio wordt getoond, hangt de maximale arbeidsfactor af van de L_d/L_q -verhouding. Hoe hoger de verhouding, hoe beter de $\cos \varphi$. Moderne rotorontwerpen hebben een verhouding in het bereik van 4 tot 10.

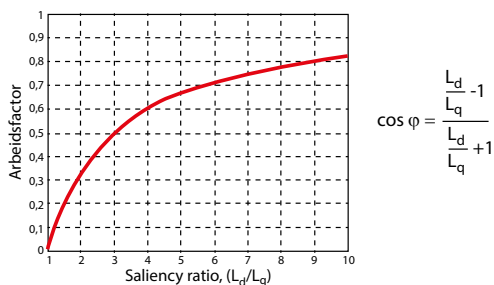


Fig. 2.29 Maximale arbeidsfactor vs. saliency ratio

Het bereiken van arbeidsfactoren die even hoog zijn als die van inductiemotoren is moeilijk voor reluctantiemotoren (vereist een zeer hoge saliency ratio), maar het energierendement is 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.

2.4.5 Synchrone reluctantiemotor met kooianker

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

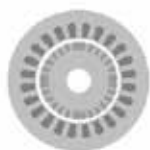


Fig. 2.30 Rotor met poolopeningen op de omtrek in de stator geplaatst

Net als bij een LSPM-motorontwerp (zie sectie 2.4.3 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.

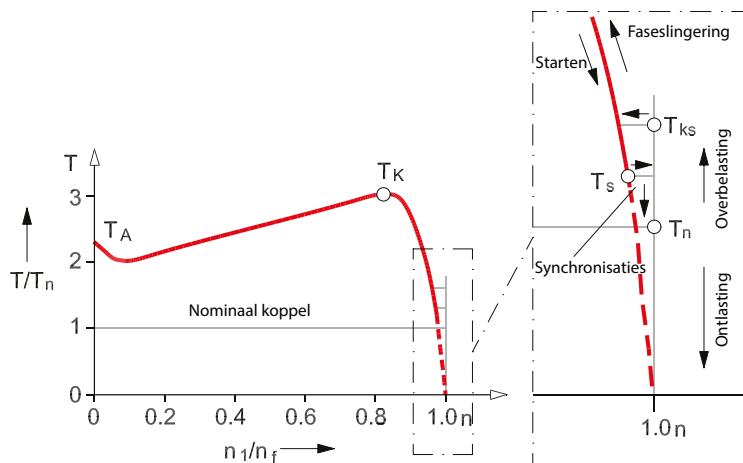


Fig. 2.31 Koppelkarakteristiek van een reluctantiemotor

Bij belasting loopt de rotor met uitspringende polen achter op het draaiveld van de stator met de belastingshoek. 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 inductiemotor 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 frequentieregelaars, aangezien de rotorwikkelingen als extra demper werken.

2.4.6 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. 2.32 Speciaal ontwerp rotorblikpakket leidt tot hoog rendement met lage koppelrimpels

De statorconstructie en de wikkelingen zijn vergelijkbaar met die van een inductiemotor. 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 inductiemotor (zie sectie 2.4.4 Reluctantiemotoren). Als de regelaar 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 frequentieregelaar de rotorhoek kennen. Afhankelijk van de hoek zal de regelaar 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 regelaar tijdens bedrijf ook het gedrag van L_d en L_q regelen.

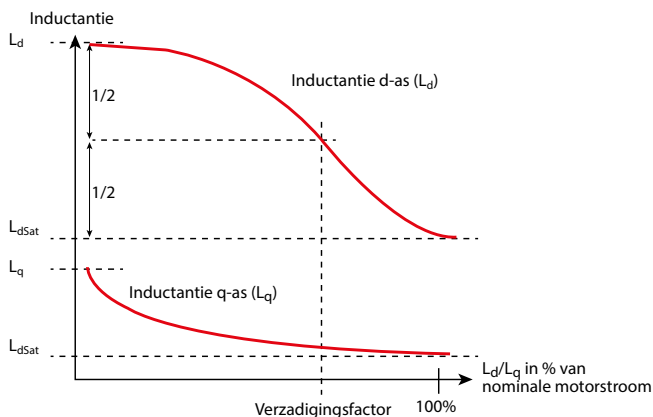


Fig. 2.33 Voorbeeld van relatie tussen L_d/L_q en I_d/I_q

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 $L_q(I_d, I_q)$). De inductanties worden automatisch bepaald door de frequentieregelaar bij de inbedrijfstelling. 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.

2.4.7 Permanentmagneet-ondersteunde synchrone reluctantiemotor (PMSynRM)

De PMSynRM wordt gebouwd als variatie van de SynRM, door zwakke magneten toe te voegen aan de geometrie van de rotor. Hoewel de plaatsing van de magneten per ontwerp kan verschillen, is het doel ervan te zorgen voor saturatie van de rotorribben en zodoende de koppelproductie te verhogen en de arbeidsfactor te verbeteren.

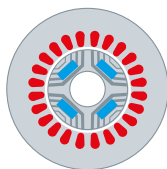


Fig. 2.34 De PM-ondersteunde SynRM-motor heeft kleine magneten die in het blikpakket worden ingevoegd

In tegenstelling tot de SynRM, waar het volledige elektromagnetische koppel wordt geproduceerd door de verschillen in de reluctantie rond de rotor (reluctantiekoppel), wordt het elektromagnetische koppel in de PMSynRM geproduceerd door reluctantiekoppel en de interactie van de permanentmagneetflux met de magnetiserende statorstroom (pm-koppel). Wat de regeling betreft, kan de PMSynRM worden vergeleken met een IPM. Het verschil tussen een IPM en een PMSynRM bestaat erin dat in een IPM het koppel dat wordt geproduceerd door de permanentmagneet hoger is dan het reluctantiekoppel, terwijl in een PMSynRM het reluctantiekoppel dominant is.

In de praktijk zijn er ook motoren die IPM worden genoemd, maar in werkelijkheid kenmerken hebben die vergelijkbaar zijn met een PMSynRM.

De door de regeling vereiste motorparameters zijn hetzelfde als voor de IPM: de lijn-tot-lijn-tegen-EMK bij 1000 tpm en de variatie van de L_d - en L_q -inductanties met de stroom als beschreven in Fig. 2.33.

2.4.8 Geschakelde reluctantiemotor (SRM)

De constructie van de stator lijkt veel op die van DC-motoren 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 massastraagheid, 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 wordt ook toegepast bij andere motortypen, maar is overduidelijk bij geschakelde reluctantiemotoren.

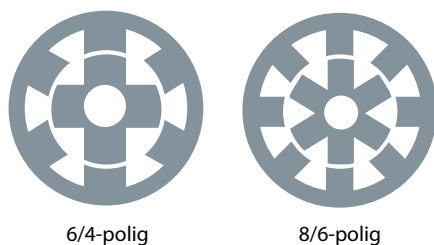


Fig. 2.35 Configuratievoorbeelden geschakelde reluctantiemotor

Om de motor te laten werken, is een geschikte regelaar nodig die de statorinductoren op geavanceerde wijze bekrachtigt. De fasen worden een voor een bekrachtigd. Wanneer de inductoren 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.

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

Er moet ook worden opgemerkt dat dit soort motoren niet op frequentieregelaars werkt.

2.5 Medium Voltage motoren

Wanneer een toepassing een hoog uitgangsvermogen vereist, kan het voordelig zijn om de spanning te verhogen om de stroom lager te houden. Dit betekent dat dunnere voedingskabels kunnen worden gebruikt, waardoor de kosten van de kabels dalen. Het verlagen van de stroom beperkt ook de vermogensverliezen in de voedingskabels, waar de omvang van het verlies I^2R is.

Middenspanning inductiemotoren (MV) zijn iets minder efficiënt en duurder dan laagspanningsmotoren (LV). Deze negatieve factoren worden echter gecompenseerd door de voordelen van dunnere ingangskabels, compactere schakelkasten en een betere stroomomzetting van de voedingsbron. Vanwege de grotere omvang en kosten van kabels en uitrusting die nodig zijn om grote LV-motoren te voeden, zal het gebruik van MV-motoren op een bepaald moment praktischer en kostenefficiënter worden.

Belangrijkste redenen voor het gebruik van MV-motoren:

- Dunnere voedingskabels
- Schakelkasten voor kleinere stromen
- Minder spanningsval van de voeding tot de motor
- Meer vermogen met minder stroom

De IEC 60038-norm definieert medium-voltage (middenspanning) als het spanningsbereik tussen 1000 V en 35 kV.

De beslissing om LV- of MV-motoren te gebruiken, verschilt sterk afhankelijk van het land, de sector en de specifieke toepassing. De overstap van LV naar MV wordt normaal gesproken overwogen tussen 150-400 kW (200-500 pk), hoewel ook MV-motoren met een lager vermogen en LV-motoren met een hoger vermogen beschikbaar zijn. Middenspanning kan met name relevant zijn voor toepassingen die een motor vereisen met een vermogen van 400 kW of meer.

Vanuit mechanisch oogpunt verschillen medium voltage motoren niet veel van standaard asynchrone laagspanningsmotoren. Er zijn echter enkele belangrijke verschillen. De stator van een MV-motor heeft een verbeterde isolatie om te worden geclassificeerd voor middenspanning. Dit omvat een vacuümimpregneringssysteem, waarbij alle uitsparingen worden opgevuld met lak, gecombineerd met corona-beschermingsmaterialen om elektrische slijtage van het isolatiemateriaal te voorkomen. Daarnaast zijn er grotere kruipwegen en tussenruimten tussen de geleider en de aarde.

LV-motoren zijn normaal gesproken gewikkeld met ronde gecoate draad. Deze worden willekeurig gewikkelde inductoren genoemd. MV-motoren zijn gewikkeld met koperdraden met een rechthoekige dwarsdoorsnede met isolatie van lak of mica, afhankelijk van het spanningsniveau. Deze worden vormspoelen of vorm-inductoren genoemd. Omdat vormspoelen afzonderlijk moeten worden geïsoleerd en gevormd volgens precieze afmetingen, is de productie aanzienlijk duurder. Daarnaast zal een MV-motor vanwege de dikkere isolatie die vereist is vanwege de hogere spanningsniveaus normaal gesproken groter en duurder zijn dan een LV-motor van dezelfde klasse.



03

FREQUENTIEREGELAARS

3	Frequentieregelaars.....	47
3.1	Directe regelaars	47
3.2	Frequentieregelaars met tussenkring.....	48
3.3	Gelijkrichter	50
3.3.1	Ongestuurde gelijkrichters.....	50
3.3.2	Halfgestuurde gelijkrichters.....	51
3.3.3	Volledig gestuurde gelijkrichters.....	52
3.3.4	Active Front End/Active Infeed.....	53
3.4	Tussenkring	53
3.4.1	Variabele tussenkring.....	53
3.4.2	Constance tussenkring.....	55
3.4.3	Condensatorloze tussenkring	56
3.4.4	Common DC Bus.....	56
3.5	Inverter.....	57
3.6	Modulatieprincipes	60
3.6.1	Pulsamplitudemodulatie (PAM).....	60
3.6.2	Pulsbreedtemodulatie (PWM)	60
3.6.3	Asynchrone PWM.....	62
3.6.3.1	SFAVM.....	63
3.6.3.2	60° AVM.....	65
3.7	Stuurcircuit en -methoden.....	66
3.7.1	Eenvoudige regelmethode.....	69
3.7.2	Scalaire regeling met compensatie	70
3.7.3	Ruimtevector met en zonder terugkoppeling.....	71
3.7.3.1	Ruimtevector (zonder terugkoppeling).....	71
3.7.3.2	Ruimtevector (met terugkoppeling).....	72
3.7.4	Flux-vectorregeling met en zonder terugkoppeling	72
3.7.4.1	Flux-vector (zonder terugkoppeling).....	72
3.7.4.2	Flux-vector (met terugkoppeling)	73
3.7.5	Servo Drive Control.....	74
3.7.6	Integrated Motion Controller	74
3.7.7	Conclusies over regeling	75
3.8	Danfoss-besturingsprincipes.....	75
3.8.1	Besturingsprincipe Danfoss-VVC+.....	76
3.8.2	Danfoss-flux-vectorregelingsprincipe.....	80
3.9	Medium Voltage Drives.....	80
3.9.1	MV-halfgeleiders.....	81
3.9.2	MV-frequentieregelaartopologieën.....	81
3.10	Normen en wetgeving.....	84

3 Frequentieregelaars

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

Zoals in de inleiding is aangegeven, is de belangrijkste functie van een frequentieregelaar het genereren van een variabele voeding (bijvoorbeeld 0 tot 400 V/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 omvormers: directe regelaars en frequentieregelaars met tussenkring.

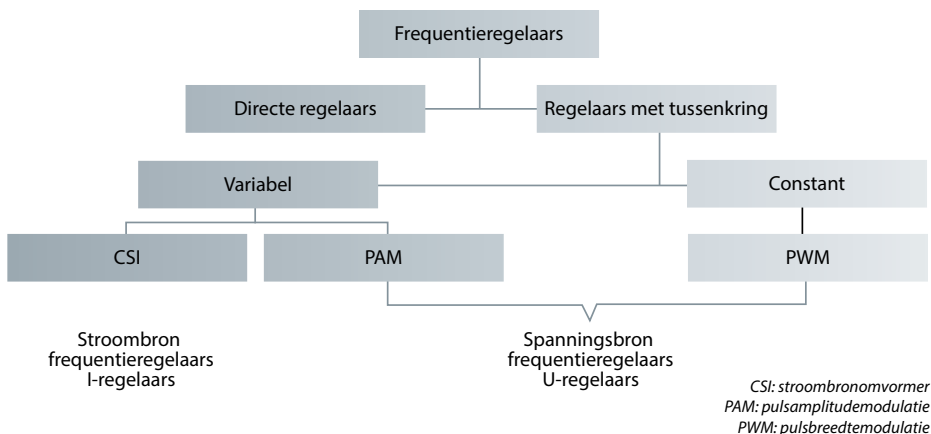


Fig. 3.1 Overzicht van frequentieregelaartypen

3.1 Directe regelaars

De directe regelaar voert de conversie uit zonder tussentijdse opslag.

Directe regelaars worden over het algemeen enkel gebruikt in hoogvermogen toepassingen (megawattbereik). Dit boek gaat niet uitgebreid in op dit type regelaar, maar er zijn wel diverse functies die het vermelden waard zijn.

Directe regelaars 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 strenge eisen ten aanzien van dynamische prestaties

3.2 Frequentieregelaars met tussenkring

In de meeste gevallen is de frequentieregelaar uitgerust met een tussenkring. Een andere term voor tussenkring is 'DC-bus' of 'DC-tussenkring'. Binnen de groep frequentieregelaars met tussenkring zijn er twee subtypen:

- constante tussenkring
- variabele tussenkring

Frequentieregelaars met een tussenkring kunnen worden opgesplitst in vier hoofdcomponenten, zoals aangegeven in Fig. 3.2 Blokschema van een frequentieregelaar met tussenkring.

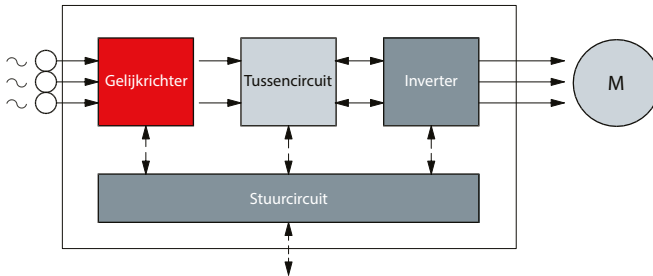


Fig. 3.2. Blokschema van een frequentieregelaar met tussenkring

Gelijkrichter

De gelijkrichter is aangesloten op een eenfase- of driefasenetvoeding en genereert een pulserende DC-spanning. Er zijn vier basistypen gelijkrichters, zoals aangegeven in Fig. 3.3 Topologie hoofdcomponenten:

- ongestuurd
- halfgestuurd
- volledig gestuurd
- active front-end

Tussenkring

De tussenkring kan op twee verschillende manieren werken, zoals aangegeven in Fig. 3.3 Topologieën hoofdcomponenten – tussenkring:

- Omzetten van de gelijkrichterspanning in een DC-spanning
- Stabilisatie of afvlakken van de pulserende DC-spanning om deze beschikbaar te maken voor de inverter

Inverter

De inverter zet de constante DC-spanning van de gelijkrichter om in een variabele AC-spanning en genereert de frequentie van de motorspanning. Zie Fig. 3.3 Topologie hoofdcomponenten – inverter.

Stuurscircuit

Het stuurscircuit zendt signalen naar – en ontvangt signalen van – de gelijkrichter, de tussenkring en de inverter. Het ontwerp van de specifieke frequentieregelaar bepaalt welke onderdelen worden aangestuurd.

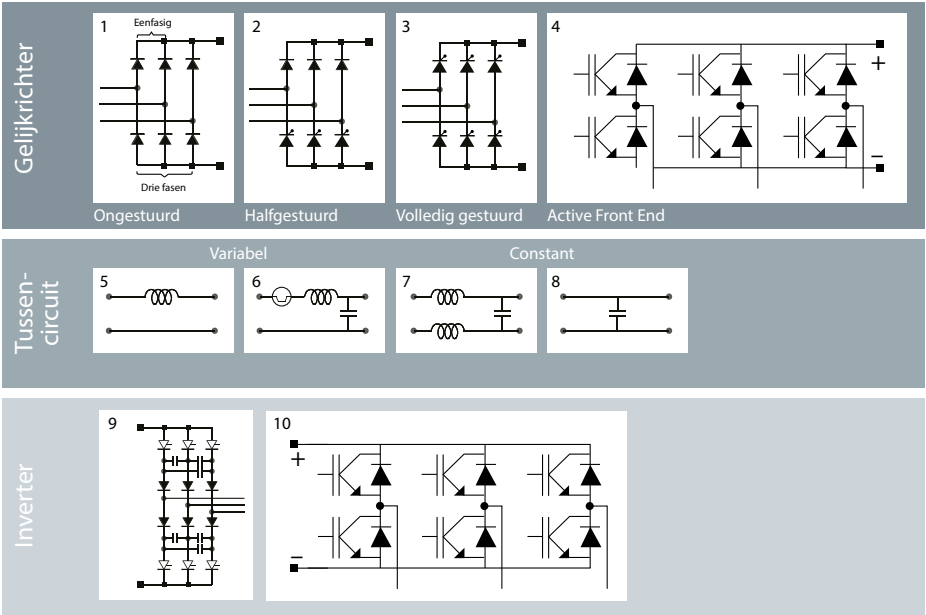


Fig. 3.3 Topologie hoofdcomponenten

Bij de configuratie van de frequentieregelaar moet een keuze worden gemaakt uit verschillende hoofdcomponenten. Zie tabel 3.1 Configuratievoorbeelden frequentieregelaar.

Configuratievoorbeeld	Afkorting	Configuratie: Verwijzing naar componenten in Fig. 3.3
Pulsamplitudegemoduleerde regelaar	PAM	1 of 2 of 3 en 6 en 9 of 10
Pulsbreedtegemoduleerde regelaar	PWM	1 of 2 of 3 of 4 en 7 of 8 en 9 of 10
Stroombronomvormer	CSI	3, 5 en 9

Tabel 3.1 Configuratievoorbeelden frequentieregelaar

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

3.3 Gelijkrichter

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

Bijvoorbeeld:

Driefasewisselspanning: $3 \times 400 \text{ V}/50 \text{ Hz}$

Eenfasewisselspanning: $1 \times 230 \text{ V}/50 \text{ Hz}$

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

Fig. 3.3 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 30 kW.

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

3.3.1 Ongestuurde gelijkrichters

Ongestuurde gelijkrichters bestaan uit diodes, zoals aangegeven in Fig. 3.4 Werking van diodes.

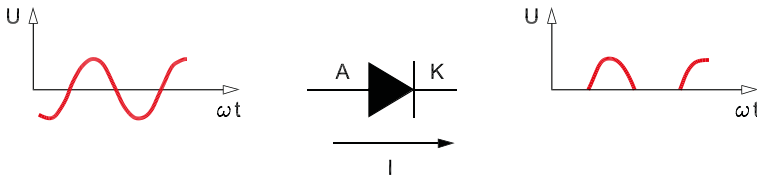


Fig. 3.4 Werking van diodes

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 bij bepaalde andere halfgeleiders wel het geval is. Een AC-spanning over een diode wordt omgezet in een pulserende DC-spanning. Als een driefasewisselspanning naar een ongestuurde driefasegelijkrichter wordt gevoerd, zal de DC-spanning continu pulseren.

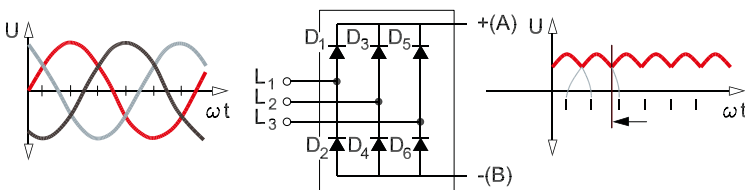


Fig. 3.5 Ongestuurde gelijkrichter (B6-diodebrug)

Fig. 3.5 Ongestuurde gelijkrichter (B6-diodebrug) toont een ongestuurde driefasegelijkrichter bestaande uit zes diodes, ook wel 6-pulsgelijkrichter genoemd. De diodes kunnen worden verdeeld in twee groepen. De ene groep bestaat uit de diodes D_1 , D_3 en D_5 . De andere groep bestaat uit diodes D_2 , D_4 en D_6 . 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 DC-spanning is ongeveer 1,31 tot 1,41 maal de netspanning met een driefasevoeding of ongeveer 0,9 tot 1,2 maal de AC-spanning in geval van een eenfasevoeding.

De stroomopname van de diodes is niet-sinusvormig. Daarom veroorzaken ongestuurde gelijkrichters netstoringen. Om dit tegen te gaan, worden steeds vaker frequentieregelaars met B12-gelijkrichters gebruikt. B12-gelijkrichters bevatten 12 diodes, ingedeeld in groepen van 6. Deze worden doorgaans 12-pulsgelijkrichters genoemd (zie hoofdstuk 8.3.1).

3.3.2 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. 3.5 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 frequentieregelaars met een vermogensklasse van 37 kW en hoger.

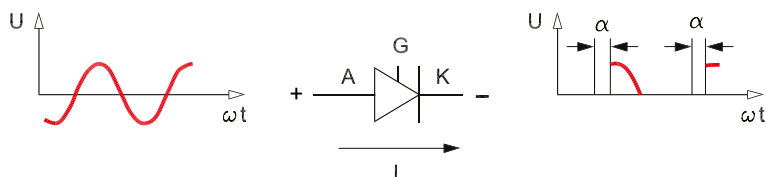


Fig. 3.6 Werking van thyristoren

In Fig. 3.6 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 inverter.

3.3.3 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.

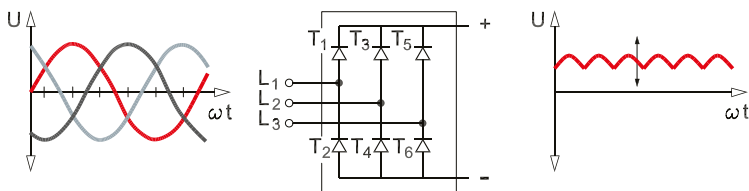


Fig. 3.7 Volledig gestuurde driefasegelijkrichter

Volledig gestuurde driefasegelijkrichters kunnen worden opgedeeld in twee groepen thyristoren: T_1 , T_3 en T_5 enerzijds en T_4 , T_6 en T_2 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 DC-spanning met een gemiddelde waarde U , waarbij

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

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. Volledig gestuurde gelijkrichters bieden echter het voordeel dat ze het mogelijk maken om regeneratief remvermogen in de tussenkring terug te voeren naar het voedingsnet.

3.3.4 Active Front End/Active Infeed

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

Dergelijke frequentieregelaars 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 niet aansluit op de sinusgolfvorm van het voedingsnet. Een manier om de geregenereerde energie te gebruiken is door de tussenkring van de regelaar te koppelen (zie hoofdstuk 5.9.1).

Een andere reden om een AFE te gebruiken, is dat deze ook harmonischen doeltreffend beperken (zie hoofdstuk 8).

3.4 Tussenkring

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

- Werken als energiebuffer, zodat de motor energie kan halen uit/terugvoeren naar het net via de inverter en als middel om intermitterende belastingspieken mogelijk te maken.
- De gelijkrichter ontkoppelen van de inverter.
- Netstoringen beperken.

De tussenkring is gebaseerd op een van vier verschillende basiscircuits die zijn aangegeven in Fig. 3.3 Topologie hoofdcomponenten. Welk type tussenkring er wordt gebruikt, hangt af van het type gelijkrichter en inverter waarmee de tussenkring moet worden gecombineerd.

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

3.4.1 Variabele tussenkring

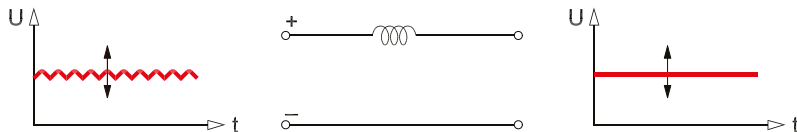


Fig. 3.8 Variabele DC-tussenkring

Dit type tussenkring bestaat uit een zeer grote inductor, ook wel reactor genoemd, en wordt gecombineerd met een volledig gestuurde gelijkrichter zoals aangegeven in Fig. 3.3 Topologie hoofdcomponenten – deel 5 en Fig. 3.8 Variabele DC-tussenkring.

De inductor zet de pulserende DC-spanning uit de volledig gestuurde gelijkrichter om in een constante DC-spanning. 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 inductor wordt gebruikt in stroomgestuurde frequentieregelaars (I-regelaars).

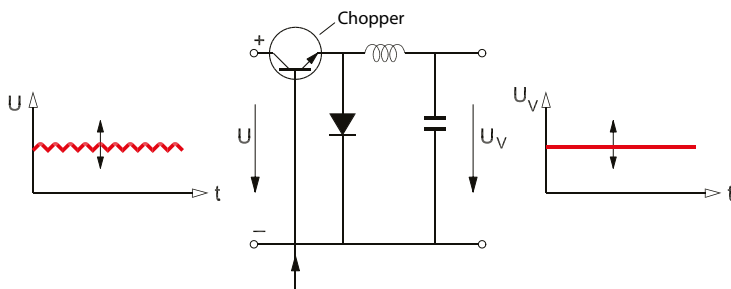


Fig. 3.9 Tussenkring met variabele DC-spanning

Tot slot kan er vóór een filter een chopper worden geplaatst, zoals aangegeven in Fig. 3.9 Tussenkring met variabele DC-spanning. De chopper bevat een transistor die werkt als een schakelaar voor het in- en uitschakelen van de gelijkgerichte spanning. Het stuurschakelaar 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 DC-spanning 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 filterinductor (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. 3.9 Tussenkring met variabele DC-spanning.

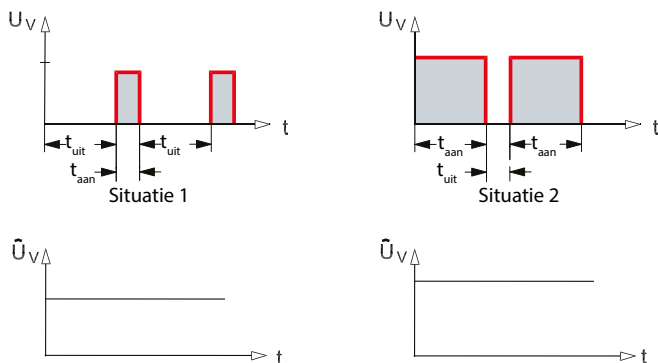


Fig. 3.10 Choppertransistor regelt de tussenkringspanning met de bijbehorende effectieve waarde

Het filter in de tussenkring vlt de blokgolfstroom 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 inverter.

3.4.2 Constante tussenkring

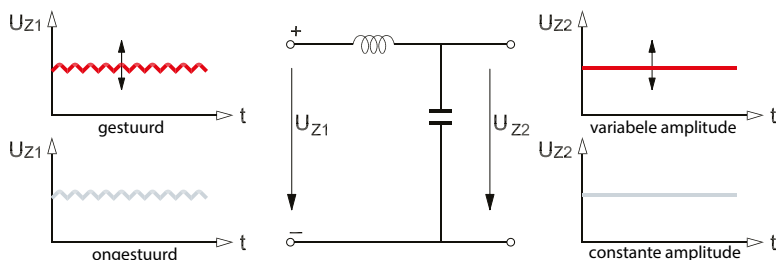


Fig. 3.11 Constante DC-tussenkring

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

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

DC-inductoren bieden de volgende voordelen:

- Afvlakking van stroomrimpels, wat leidt tot een langere levensduur van de componenten van de tussenkring, met name de condensatoren.
- Beperking van netstoringen (harmonischen) en het mogelijke gebruik van kleinere doorsneden van voedingsgeleiders. Deze functie kan ook worden geïmplementeerd met behulp van netinductoren in de voeding van de frequentieregelaar.

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 inverter wordt geleverd, een zuivere DC-spanning (U_{Z2}) met een variabele amplitude is.

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

3.4.3 Condensatorloze tussenkring

De afgelopen jaren hebben fabrikanten tussenkringen zonder condensatoren en inductoren (reactoren) 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 netstoringen kunnen worden beperkt tot waarden onder de 40% (vijfde harmonische). Dit levert de volgende kenmerken op:

- Lagere bouwkosten
- Geen laadcircuit vereist
- Compactere en lichtere constructie
- Gevoeligheid voor kortstondige spanningsdalingen in het netvoedingssysteem.
Dat wil zeggen dat de frequentieregelaar eerder wordt uitgeschakeld (trip) bij kortstondige spanningsdalingen, vanwege transiënten in het netvoedingssysteem
- Netstoringen kunnen optreden in het hoge frequentiespectrum
- De hoge rimpels van de tussenkring verlagen de uitgangsspanning met ongeveer 10% en resulteren in een hoger energieverbruik van de motor
- De herstarttijd voor bedrijf kan langer zijn, vanwege drie processen die optreden:
 - Herinitialisatie van de frequentieregelaar
 - Magnetisering van de motor
 - Aanlopen tot de vereiste referentie voor de toepassing

3.4.4 Common DC Bus

Tussenkringen van frequentieregelaars kunnen ook worden gekoppeld en de DC-spanning kan tussen verschillende inverters worden gedeeld. Bij toepassingen met verschillende parallelle motoren is het mogelijk om een zogenaamde Common DC Bus-regelaar te gebruiken, in plaats van afzonderlijke frequentieregelaars voor elke motor te installeren.

Een Common DC Bus-regelaarsysteem bestaat uit een of meer front end units (gelijkrichters) die de AC-netspanning omzetten in DC-spanning en stroom en de voeding leveren aan de Common DC Bus. De Common DC Bus levert de stroom aan de inverters en, afhankelijk van het type front end, in sommige gevallen terug aan het net. Een Common DC Bus-regelaarsysteem kan ook een remchoppereenheid omvatten, als kosteneffectieve oplossing voor het afvoeren van de remenergie in gevallen waarin regeneratie of de stroom naar het net niet haalbaar is.

De Common DC Bus-configuratie kan aanzienlijke energiebesparingen opleveren wanneer de remenergie kan worden hergebruikt. Dit is het geval wanneer er meer dan een regelaar is aangesloten op de DC-bus en ten minste een van de regelaars remt. Het remvermogen wordt direct aan de andere regelaars gevoed via de Common DC Bus.

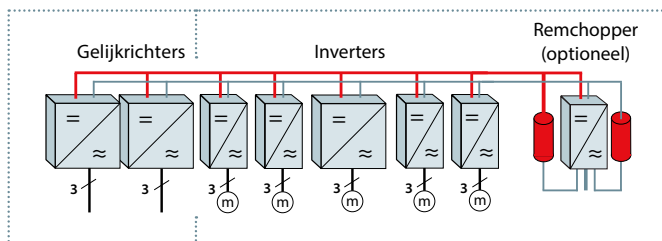


Fig. 3.12 Common DC Bus-regelaarsysteem

3.5 Inverter

De inverter is de laatste van de hoofdelementen waaruit de frequentieregelaar bestaat. De inverterprocessen vormen het laatste stadium als het gaat om het produceren van de uitgangsspanning en -frequentie. Wanneer de motor direct op het net is aangesloten, zijn de ideale bedrijfscondities aanwezig op het nominale werkpunt.

De frequentieregelaar 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 inverter een van de volgende zaken:

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

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

Hoewel inverters 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. 3.3 Topologie hoofdcomponenten.

In plaats van thyristoren worden in het inverterdeel van frequentieregelaars 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 halfgeleider technologie, 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 frequentieregelaar mogelijk maakt. Dit betekent dat een sinusvormige motorstroom haalbaar is, zoals aangegeven in Fig. 3.13 Effect van de schakelfrequentie op de motorstroom. Het stuurcircuit van de frequentieregelaar hoeft enkel de transistoren van de inverter in en uit te schakelen volgens een geschikt patroon.

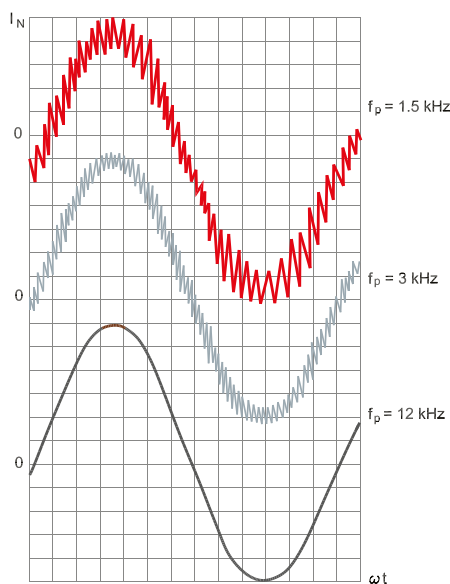


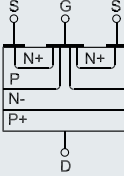
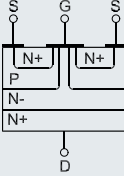
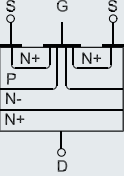
Fig. 3.13 Effect van de schakelfrequentie op de motorstroom

De keuze van de schakelfrequentie van de inverter is een compromis tussen verliezen in de motor (sinusvorm van motorstroom) en verliezen in de inverter. Als de schakelfrequentie toeneemt, nemen ook de verliezen in de inverter 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 3.2 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 3.2 Vergelijking van kenmerken vermogenstransistoren

IGBT-transistoren zijn een goede keuze voor frequentieregelaars 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 inverterregeling 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 gaan en beschermen de schakelcomponenten tegen opgelegde spanningen. Het blindvermogen dat de motor nodig heeft, wordt eveneens verwerkt door de vrijloopdiodes.

3.6 Modulatieprincipes

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

- Pulsamplitudemodulatie (PAM) en
- Pulsbreedtemodulatie (PWM)

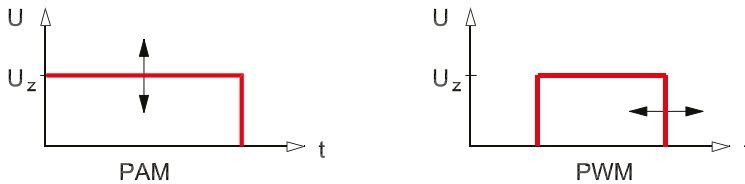


Fig. 3.14 Modulatie van amplitude en pulsbreedte

3.6.1. Pulsamplitudemodulatie (PAM)

PAM wordt gebruikt in frequentieregelaars met een variabele tussenkringspanning of -stroom. In regelaars met ongestuurde of halfgestuurde gelijkrichters wordt de amplitude van de uitgangsspanning gegenereerd door de chopper van de tussenkring, zoals aangegeven in Fig. 3.9 Tussenkring met variabele DC-spanning. 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 motorgeluid en zeer geringe rendementsvoordelen in speciale toepassingen zoals snelopende 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.

3.6.2 Pulsbreedtemodulatie (PWM)

PWM wordt gebruikt in frequentieregelaars met een constante tussenkringspanning. Dit is de meest toegepaste en best 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 frequentieregelaar op te delen in een reeks kleinere 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.

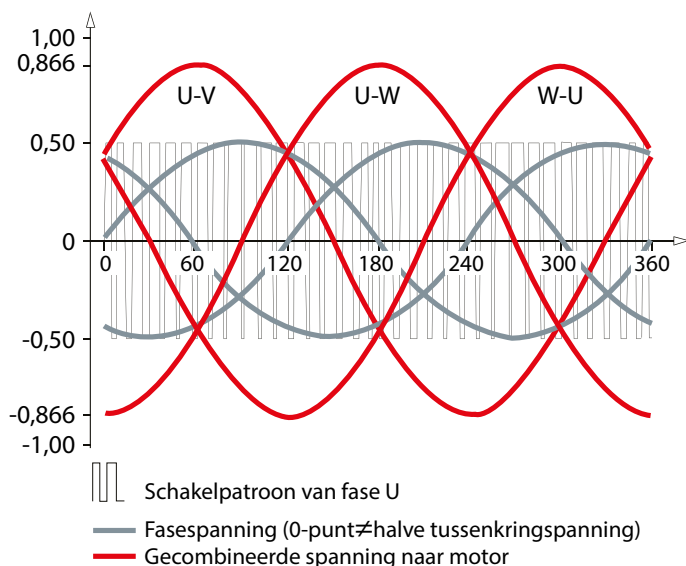


Fig. 3.15 Uitgangsspanning PWM

Een lage schakelfrequentie leidt tot verhoging van het akoestische motorgeluid. Om de geproduceerde hoeveelheid geluid te beperken, kan de schakelfrequentie worden verhoogd. Dit is mogelijk geworden dankzij ontwikkelingen op het gebied van halfgeleidertechnologie, die inhouden dat de opwekking van een ongeveer sinusvormige stroom nu haalbaar is. Een PWM-frequentieregelaar die uitsluitend werkt met sinusvormige referentiemodulatie, kan tot 86,6% van de nominale spanning leveren (zie Fig. 3.15 Uitgangsspanning PWM).

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

De uitgangsspanning van de frequentieregelaar 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 uitgang van de frequentieregelaar toe. Dit resulteert in grotere verliezen in de motor.

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 inverter een schakelpatroon gerealiseerd waarbij de uitgangsspanning van de frequentieregelaar toeneemt. Alle regelwaarden van de inverter 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 VVC- en VVC+-besturingsprincipes van Danfoss zijn gebaseerd op microprocessorberekeningen die de optimale schakeltijden voor de halfgeleiders van de inverter bepalen (zie hoofdstuk 2.8).

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

Als er strengere eisen worden gesteld aan het instelbare toerentalbereik en soepele werkingskarakteristieken van de frequentieregelaar, dan moeten de PWM-schakeltijden worden bepaald door een extra digitale IC en kan niet worden volstaan met de microprocessor. Zo kan bijvoorbeeld een DSP (Digital Signal Processor – digitale signaalprocessor) of een FPGA (Field Programmable Gate Array – veld-programmeerbaar gate-array) 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.

3.6.3 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 inverterspanning stapsgewijs te wijzigen.

3.6.3.1 SFAVM

Stator Flux Asynchrone Vectormodulatie (SFAVM) is een methode voor ruimtevectormodulatie die het mogelijk maakt om de inverterspanning willekeurig, maar stapsgewijs binnen de schakeltijd te wijzigen (met andere woorden, asynchroon). Het voornaamste doel van dit type modulatie is de statorflux op het optimale niveau te houden binnen het spanningsbereik van de stator en er zo voor te zorgen dat geen sprake is van koppelrimpel. Ten opzichte van de netvoeding zullen er bij een 'standaard' PWM-voeding afwijkingen optreden in de statorfluxvectoramplitude en de fluxhoek. Deze afwijkingen zullen het draaiveld (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-inverter heeft twee schakelstanden, AAN en UIT, zoals aangegeven in Fig. 3.16 Schakelstanden inverter. De drie schakelaars voorzien in acht mogelijke schakelcombinaties, en daarmee in acht afzonderlijke spanningsvectoren op de uitgang van de inverter 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.

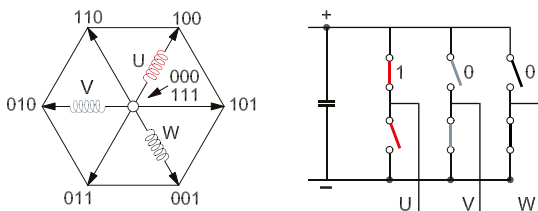


Fig. 3.16 Schakelstanden inverter

Bij de schakelcombinaties 000 en 111 krijgen alle drie uitgangsklemmen van de inverter dezelfde potentiaal. Dit is de positieve dan wel de negatieve potentiaal van de tussenkring, zoals aangegeven in Fig. 3.16 Schakelstanden inverter. Op de motor heeft dit hetzelfde effect als een kortsluiting op de klemmen en wordt er feitelijk een spanning van 0 V op de motorwindingen 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 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 SFAVM-methode van Danfoss 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

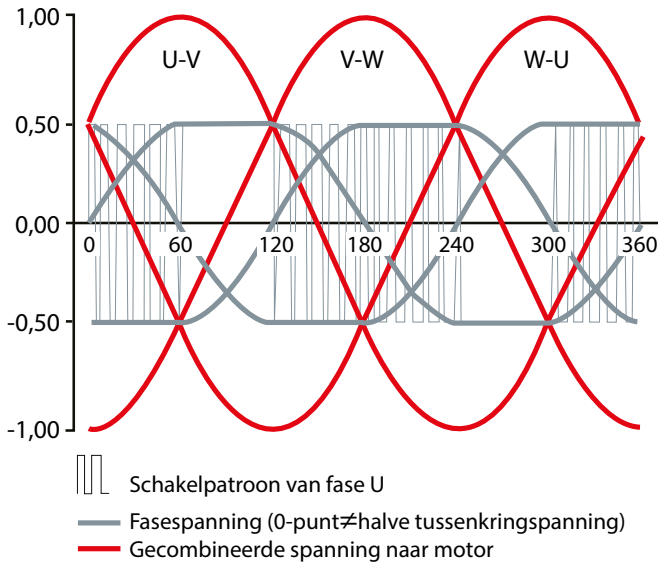


Fig. 3.17 Met het synchrone 60° PWM-principe wordt de volledige uitgangsspanning direct verkregen

SFAVM vormt een verbinding tussen het besturingssysteem en de vermogenskring van de inverter. 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 real-time rekentijd drastisch te verlagen, zijn de spanningswaarden voor verschillende hoeken in een tabel opgenomen. Fig. 3.18 Uitgangsspanning (motor) – (fase-fase) toont de motorspanning bij volle toeren.

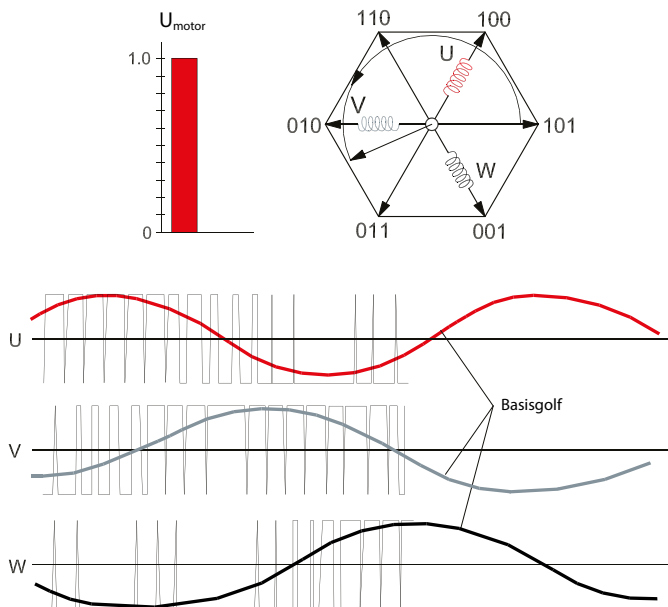


Fig. 3.18 Uitgangsspanning (motor) – (fase-fase)

Prestaties bij laag toerental

Het voortdurend pulseren van alle zes IGBT's van de inverter om de vereiste sinusuitgang te simuleren, is ideaal voor de werking bij laag toerental. Het zorgt voor een soepele werking van de motor en stelt de regelaar in staat te voldoen aan de hoge eisen van een start met een hoge wrijving of hoge massa-tragheidsbelastingen. Dit schakelpatroon is echter niet geschikt voor hoge toerentallen. Het voortdurend pulseren van alle zes IGBT's van de inverter leidt tot extra schakelverliezen bij de inverter, meer warmteopwekking en een verminderde efficiëntie van de regelaar. Wanneer een sjabloon voor pure sinus wordt gevolgd voor elke lijn-tot-neutrale spanning, wordt de maximale uitgangsspanning bovendien beperkt tot 87% van de ingangsspanning. Hierdoor kan geen nominaal motorvermogen worden gegenereerd zonder de nominale motorstroom te overschrijden. Om hogere spanningen bij vol toerental te verkrijgen, voegen sommige conventionele PWM-regelaars derde en negende harmonischen toe aan hun AC-referentie-golf. Zonder volledige spanning op de motor gebruiken conventionele PWM-golfvormen de servicefactor van de motor om nominaal vermogen van de motor te genereren. Zo wordt de levensduur van de motor beperkt.

3.6.3.2 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.
- Een fase van de inverter 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. 3.19 Schakelreeks van de 60° AVM- en SFAVM-methode voor een aantal 60°-intervallen en Fig. 3.20 Schakelreeks van de 60° AVM- en SFAVM-methode voor diverse perioden wordt de schakelreeks van de 60° AVM-methode vergeleken met die van de SFAVM-methode – voor een kort interval (Fig. 3.19) en voor diverse perioden (Fig. 3.20).

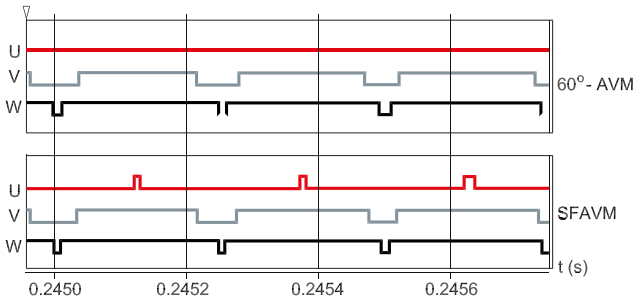


Fig. 3.19 Schakelreeks van de 60° AVM- en SFAVM-methode voor een aantal 60°-intervallen

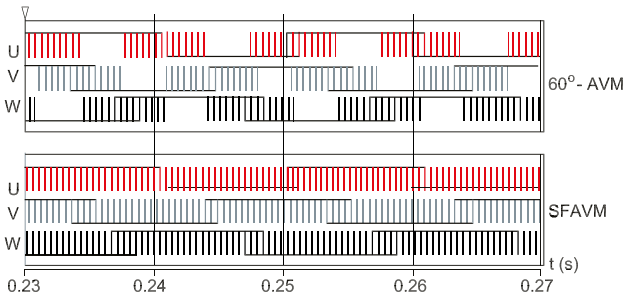


Fig. 3.20 Schakelreeks van de 60° AVM- en SFAVM-methode voor diverse perioden

Efficiëntie bij hoog toerental en volledig motorvermogen

Vanwege de beperkingen ten aanzien van een hoog toerental van SFAVM, wordt boven een vooraf bepaalde uitgangsfrequentie de voorkeur gegeven aan de 60° AVM. Boven dit toerental houdt de microprocessor elke IGBT 'aan' gedurende 60° van de volledige cyclus en 'uit' gedurende nog eens 60° van de volledige cyclus. Doordat er in iedere IGBT van de inverter gedurende 120° van elke uitgangscyclus niet wordt geschakeld, minimaliseert de regelaar schakelverliezen. Daarnaast kan de regelaar de motor dankzij dit unieke schakelpatroon voorzien van een volledige nominale spanning. Zo kan de motor een volledig nominaal koppel genereren bij volledig toerental, zonder overmatig te verhitten.

3.7 Stuurcircuit en methoden

Het stuurcircuit, of de stuurkaart, is de vierde hoofdcomponent van de frequentieregelaar. De drie hardwarecomponenten die tot nu toe zijn besproken (gelijkrichter, tussenkring en inverter) 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 frequentieregelaar al zijn verworven kennis concentreert.

In principe heeft het stuurcircuit vier hoofdtaken:

- Het sturen van de halfgeleiders van de frequentieregelaar; de halfgeleiders bepalen de verwachte dynamische kenmerken of nauwkeurigheid
- Het uitwisselen van gegevens tussen de frequentieregelaar en randapparatuur (PLC's, encoders)
- Het meten, detecteren en weergeven van fouten, condities en waarschuwingen
- Het uitvoeren van beveiligingsfuncties voor de frequentieregelaar 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 frequentieregelaar geïntegreerd en altijd in staat om het optimale pulspatroon voor elke bedrijfsfase te bepalen. Er zijn diverse regelmethode 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 frequentieregelaar 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-frequentieregelaars 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. 3.21 Besturingsklassen op basis van prestaties toerenregeling en Fig. 3.22 Besturingsklassen op basis van koppelprestaties. Hier verwijst de reactietijd naar de tijd die de frequentieregelaar 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 eeningangssignaal op de ingang van de frequentieregelaar wordt geschakeld.

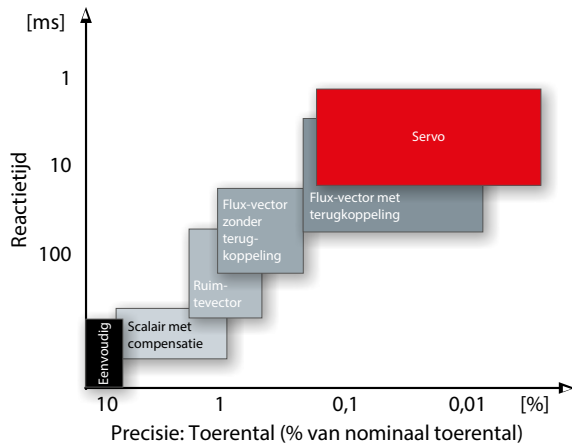


Fig. 3.21 Besturingsklassen op basis van prestaties toerenregeling

De nominale motorfrequentie wordt gebruikt als de basis om de nauwkeurigheid van het toerental te bepalen. De nominale motorfrequentie bedraagt 50 Hz in de meeste landen en 60 Hz in de VS. Frequentieregelaars kunnen worden ingedeeld op basis van de prijs-prestatieverhouding. Dat wil zeggen dat een frequentieregelaar die gebruikmaakt van een eenvoudige besturingsmethode voor het uitvoeren van zeer eenvoudige taken een betere keuze is dan een frequentieregelaar met een veldgeoriënteerde besturing.

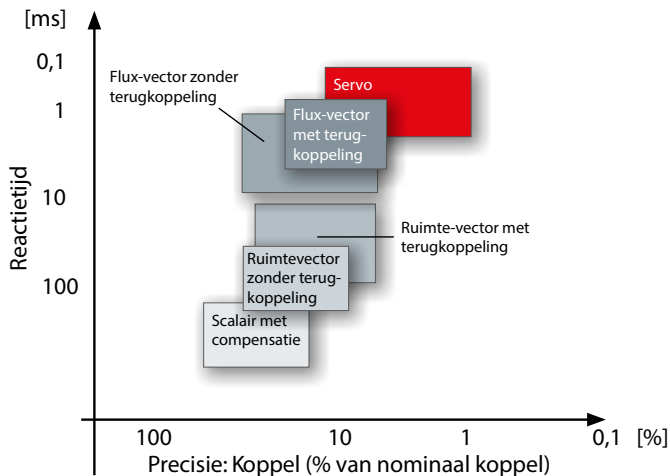


Fig. 3.22 Besturingsklassen op basis van koppelprestaties

De toerentalbereiken voor de diverse typen frequentieregelaars 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

Wees u ervan bewust dat frequentieregelaars die werken op basis van een eenvoudige besturingsmethode niet kunnen worden gebruikt voor een motorkoppelregeling met of zonder terugkoppeling.

3.7.1 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.

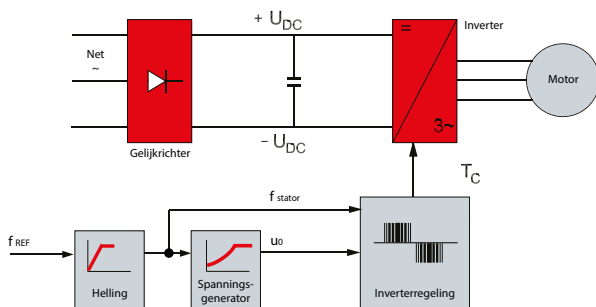


Fig. 3.23 Structuur van een frequentieregelaar met eenvoudige besturingsmethode

3.7.2 Scalaire sturing met compensatie

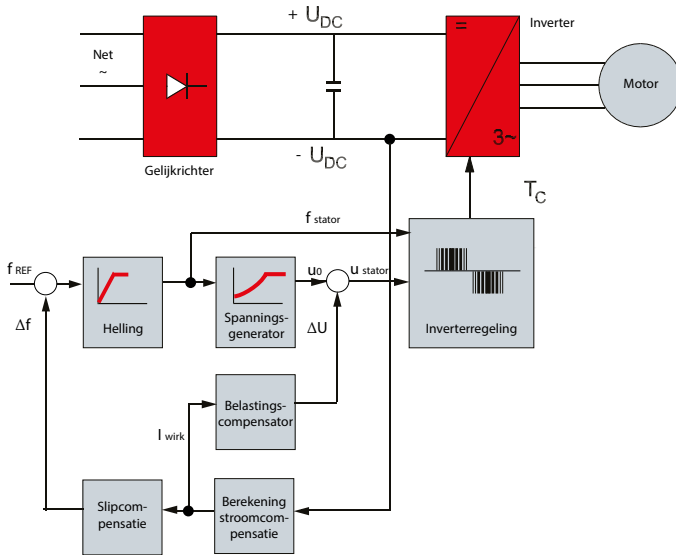


Fig. 3.24 Structuur scalair type frequentieregelaar met compensatie

Ten opzichte van een eenvoudige sturing voegt een frequentieregelaar met compensatie drie nieuwe besturingsfunctieblokken toe, zoals te zien is in Fig. 3.24 Structuur scalair type frequentieregelaar 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

3.7.3 Ruimtevector met en zonder terugkoppeling

De ruimtevectorbesturingsmethode is beschikbaar met of zonder externe terugkoppeling van het motortoerental. Er wordt aan de sturing 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

3.7.3.1 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 77, Fig. 3.28 Basisprincipes van Danfoss-VVC+-regeling).

Basiskkenmerken:

- 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 |

3.7.3.2 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 | 1:1000-10000 |
| • 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 |

3.7.4 Flux-vectorregeling met en 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 koppelgenererende 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.

3.7.4.1 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 1:1000
- Nauwkeurigheid toerental (stabiele toestand) $\pm 0,5\%$ van nominale frequentie
- Versnellingskoppel 100-150% van nominaal koppel
- Responstijd toerentalwijziging 50-200 ms
- Responstijd koppelwijziging 0,5-5 ms

3.7.4.2 Flux-vector (met terugkoppeling)

Voor de flux-vectorbesturingsmethode met terugkoppeling is er 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. 3.25 Structuur flux-vectorregeling met terugkoppeling.

Typisch asvermogen:

- Instelbaar toerentalbereik 1:1000-10000
- Nauwkeurigheid toerental (stabiele 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

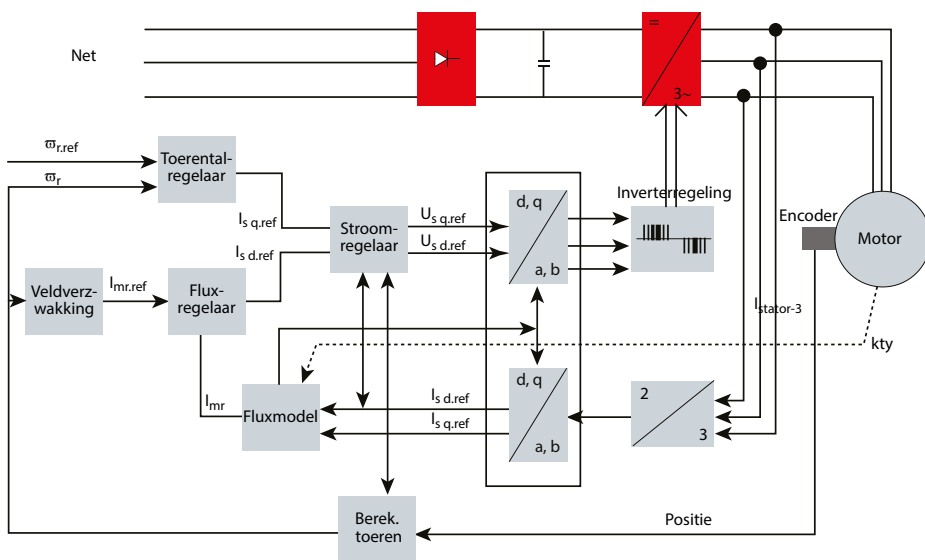


Fig. 3.25 Structuur flux-vectorregeling met terugkoppeling

3.7.5 Servo Drive Control

De servo-omvormerregelmethode wordt hier niet uitgebreid besproken. Een 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 frequentieregelaar om de beschikbaarheid van stroom en koppeling te waarborgen.

3.7.6. Integrated Motion Controller

Positionering en synchronisatie werden in het verleden meestal uitgevoerd met behulp van een servo-drive of motion controller. Voor veel van deze toepassingen zijn de dynamische prestaties van een servo-drive eigenlijk overbodig.

Uiterst nauwkeurige positionering en synchronisatie kunnen ook met behulp van een frequentieregelaar worden gerealiseerd. Om tijd en geld te besparen, heeft Danfoss de Integrated Motion Controller- (IMC-)functie ontwikkeld, die complexere positionerings- en synchronisatieregelaars kan vervangen bij positionerings- en synchronisatietoepassingen op een enkele as.

De IMC kan worden ingesteld in de modus Positionering, Synchronisatie of Terugkeer naar startpositie.

Positionering

In de positioneringsmodus regelt de regelaar de beweging over een specifieke afstand (relatieve positionering) of tot een specifiek doel (absolute positionering). Hij berekent het bewegingsprofiel op basis van de positie van het doel, de toerentalreferentie en de aanloopinstellingen. Er zijn 3 positioneringstypen die verschillende referentiewaarden gebruiken voor het bepalen van de doelpositie:

- Absolute positionering: doelpositie is relatief ten opzichte van het ingestelde nulpunt van de machine
- Relatieve positionering: doelpositie is relatief ten opzichte van de werkelijke positie van de machine
- Positionering op basis van een naderingssensor: doelpositie is relatief ten opzichte van een signaal via een digitale ingang

Synchronisatie

In de synchronisatiemodus volgt de regelaar de positie van een master. Meerdere regelaars kunnen dezelfde master volgen. Het mastersignaal kan een extern signaal zijn, bijv. van een encoder, een virtueel mastersignaal vanaf een regelaar of het kunnen masterposities zijn die vanaf een veldbus zijn verzonden. Tandwielverhouding en positieoffset kunnen via parameters worden gewijzigd.

Terugkeer naar startpositie

Met een sensorloze regeling en een regeling met terugkoppeling met een incrementele encoder moet door terugkeer naar de startpositie een referentie worden gecreëerd voor de fysieke positie van de machine bij inschakeling. Er kan worden gekozen uit diverse startpositiefuncties met of zonder sensor. De functie Synchronisatie startpositie kan worden gebruikt om de startpositie tijdens bedrijf voortdurend aan te passen als er sprake is van slip in het systeem. Bijvoorbeeld bij een sensorloze regeling met een inductiemotor of bij slip in de mechanische transmissie.

3.7.7. 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 frequentieregelaar geldt een soortgelijk principe. Voor de inbedrijfstelling van een eenvoudige frequentieregelaar is niet veel programmering vereist. In de meeste gevallen hoeft u enkel de motorgegevens in te voeren. Voor toepassingen die een flux-vectorregeling vereisen of voor kritieke toepassingen zoals hijswerktuigen is meteen 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/f-, 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.

3.8 Danfoss-besturingsprincipes

Een algemeen overzicht van de huidige standaard besturingsprincipes voor Danfoss-frequentieregelaars is te zien in Fig. 3.26 Basisprincipes van huidige standaard frequentieregelaars van Danfoss.

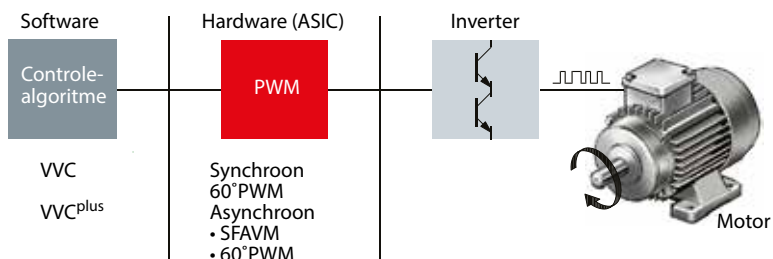


Fig. 3.26 Basisprincipes van huidige standaard frequentieregelaars van Danfoss

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

- Speciale motoren
- Parallel aangesloten motoren.

Bij de hierboven genoemde toepassingen is geen compensatie van de motor vereist. Met het VVC+-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 zonder terugkoppeling
- Nauwkeurigheid toerental: $\pm 0,5\%$ van nominaal toerental zonder terugkoppeling
- Actieve resonantiedemping
- Koppelregeling
- Werking op de motorstroombegrens

3.8.1 Besturingsprincipe Danfoss-VVC+

Het VVC+-besturingsprincipe van Danfoss gebruikt een vectormodulatiemethode voor PWM-inverters 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 pomptoeffing 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 inverter wordt berekend met behulp van het SFAVM-principe of het 60° AVM-principe, om koppelpulsaties in de luchtspleet 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. 3.27a 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).

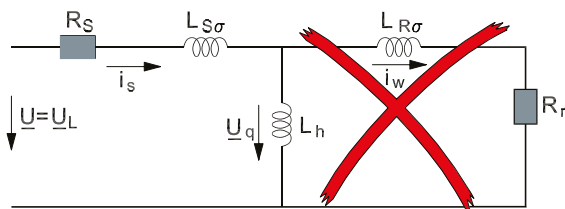


Fig. 3.27a Motorequivalentiediagram bij 'nullast'

- Belast bedrijf

De motoras wordt belast, wat impliceert dat er producten worden getransporteerd, zoals aangegeven in Fig. 3.27b 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.

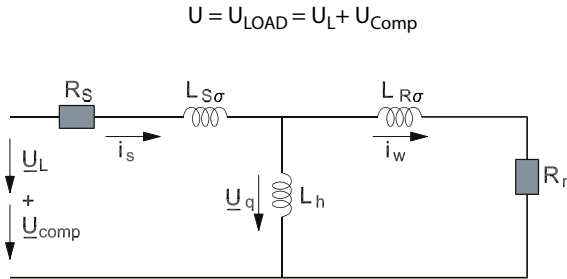


Fig. 3.27b Motorequivalentiediagram bij 'belasting'

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

Het besturingsprincipe wordt in het onderstaande blokschema geïllustreerd.

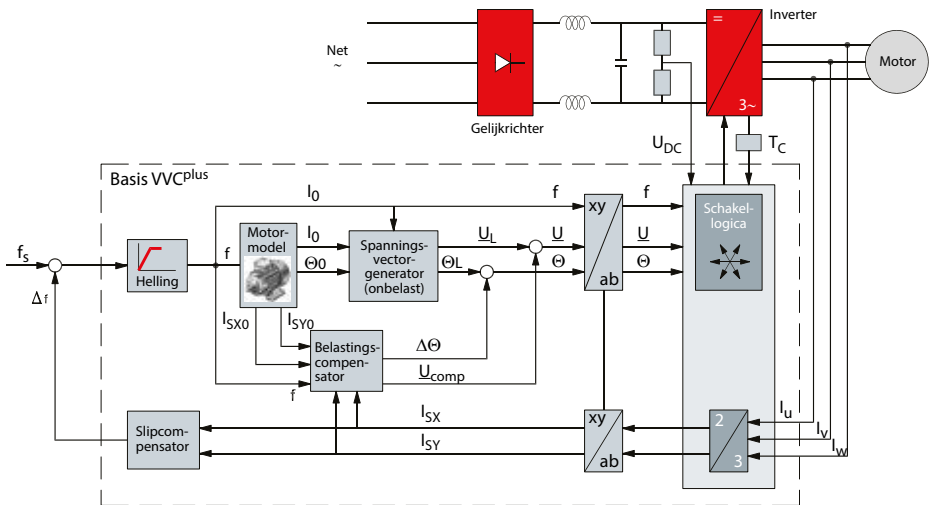


Fig. 3.28 Basisprincipes van Danfoss-WVC+-regeling

Zoals in Fig. 3.28 Basisprincipes van Danfoss-VVC+-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.

Een spanningsvectorregeling is met name nuttig bij lage toerentallen, waarbij de dynamische prestaties van de regelaar 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_Y, 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}	Statorlekinductantie
L_{Rs}	Rotorlekinductantie

Tabel 3.3 Verklaring van de gebruikte symbolen in:

Fig. 3.24 Structuur van een eenvoudige besturingsmethode

Fig. 3.25 Structuur flux-vectorregeling met terugkoppeling

Fig. 3.26 Basisprincipes van huidige standaard frequentieregelaars van Danfoss

Fig. 3.27a Motorequivalentiediagram bij 'nullast'

Fig. 3.27b Motorequivalentiediagram bij 'belasting'

Fig. 3.28 Basisprincipes van Danfoss-VVC+-regeling

3.8.2 Danfoss-flux-vectorregelsprincipe

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 VVC+-regeling.

Met slechts één parameter kan tijdens de inbedrijfstelling het besturingsalgoritme van VVC+-regeling worden overgeschakeld naar flux-vectorregeling. In dat geval moeten er meer gegevens in de frequentieregelaar worden ingevoerd voor een soepele werking van de motor. Niet alle parameters worden hier toegelicht, want ze worden uitgebreid besproken in de bedieningshandleidingen.

Een korte beschrijving van de besturingsstrategie is te zien in Fig. 3.29 Basisprincipes van Danfoss-flux-vectorregeling. In de frequentieregelaar is een fluxdatabase opgeslagen. De stromen die in alle 3 fasen worden gemeten, worden omgezet in polaire coördinaten (x , y).

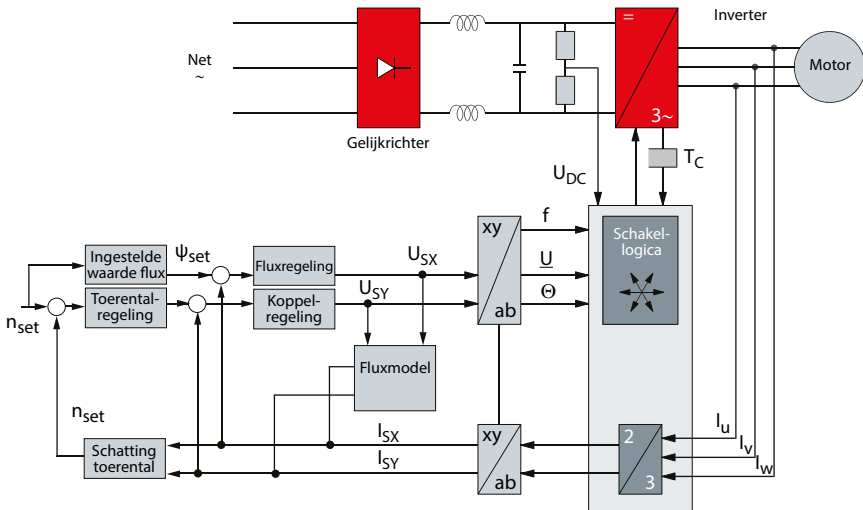


Fig. 3.29 Basisprincipes van Danfoss-flux-vectorregeling

3.9 Medium Voltage Drives

Over de hele wereld worden infrastructuur ontwikkeld en wordt de zware industrie steeds belangrijker, waardoor de vraag naar een hoger vermogen toeneemt. In veel sectoren en een breed scala aan aangedreven apparatuur worden motoren steeds groter. Medium Voltage frequentieregelaars zijn nodig om te voorzien in de behoeften van klanten en gebruikers aan frequentieregelaars in de bereiken gemiddeld en hoog vermogen. Wanneer het vereiste vermogen toeneemt, komt er een moment waarop het nuttig is over te stappen van een laagspanningsfrequentieregelaar (LV-frequentieregelaar) op een middenspanningsfrequentieregelaar (MV-frequentieregelaar). Het is noch praktisch, noch voordelig om LV-frequentieregelaars te gebruiken voor hogere vermogensbereiken. Boven een bepaald vermogensvereiste kunnen alleen MV-frequentieregelaars worden gebruikt. De hogere spanning maakt een lagere stroom, minder verliezen en beperkte systeemkosten mogelijk.

Dankzij technologische ontwikkelingen op het gebied van halfgeleiders zoals IGBT's, worden moderne MV-frequentieregelaars steeds vaker gebruikt in sectoren zoals de petrochemische, mijnbouw-, staal- en metaal- en transportsector voor het besparen van elektrische energie, het verhogen van de productiviteit en het verbeteren van de productkwaliteit. De ontwikkeling van MV-regelaars wordt ook bevorderd door de verbetering van het rendement, gewicht en volume van de motor en de lagere installatiekosten in verband met transformatoren, kabeldiameters, kabelgoten enz.

MV-regelaars beslaan een vermogensbereik van 0,2 MW tot bijna 40 MW op het MW-niveau van 2,3-13,8 kV. De meeste MV-frequentieregelaars die in een industriële omgeving zijn geïnstalleerd, bevinden zich echter in het bereik van 1–4 MW, met een nominale spanning van 3,3–6,6 kV.

3.9.1 MV-halfgeleiders

Er zijn verschillende typen halfgeleiders die in MV-regelaars worden gebruikt. Deze omvatten de IGBT, de geïntegreerde poort-gecommuteerde thyristor (integrated gate-commutated thyristor – IGCT) en de injectieverbeterde poorttransistor (injection enhanced gate transistor – IEGT). Het meest gebruikte apparaat voor halfgeleiding is de vermogensdiode, die ruimschoots wordt toegepast voor ongestuurde gelijkrichters en als vrijlooptiode in antiparallelle verbindingen met vermogensschakelaars.

De IGBT is de dominante technologie voor toepassingen met laag vermogen en lage spanning. Er zijn echter regelaartopologieën die kunnen zorgen dat IGBT's een MV-bedrijf bereiken. Recente ontwikkelingen hebben geleid tot IGBT's die een hogere spanning kunnen sperren, vergelijkbaar met de IGCT, die ook wel MV-IGBT, HV-IGBT en IEGT worden genoemd. Momenteel zijn de IGBT en de IGCT de meest gebruikte halfgeleiders op de markt.

3.9.2 MV-regelaartopologieën

In het afgelopen decennium vond veel onderzoek en ontwikkeling op het gebied van MV-regelaars plaats. Er werden verschillende nieuwe commerciële MV-regelaartopologieën geïntroduceerd. De belangrijkste reden voor de ontwikkeling was een toename van de industriële processen die een hoger vermogen, MV-werking en variabel toerental vereisen. Als gevolg hiervan werden verschillende regelaartopologieën ontwikkeld om te voldoen aan de vereisten van verschillende toepassingen.

De belangrijkste componenten van MV-regelaars zijn vergelijkbaar met de componenten die worden gebruikt in LV-regelaars: gelijkrichter, DC-tussenkring, inverter en optionele filters aan de kant van het net en de motor. De gelijkrichter kan gestuurd of ongestuurd, regeneratief of niet-regeneratief zijn. Daarnaast kunnen MV-regelaars worden onderverdeeld in regelaars met twee of meerdere niveaus, afhankelijk van het aantal spanningsniveaus dat bij de uitgang wordt gegenereerd.

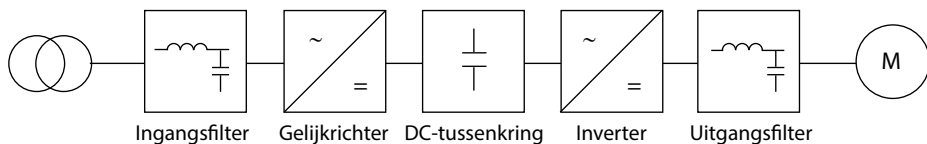


Fig. 3.30 Blokschema van een typische MV-regelaar

Enkele van de meest gebruikte MV-regelaartopologieën zijn hieronder vermeld.

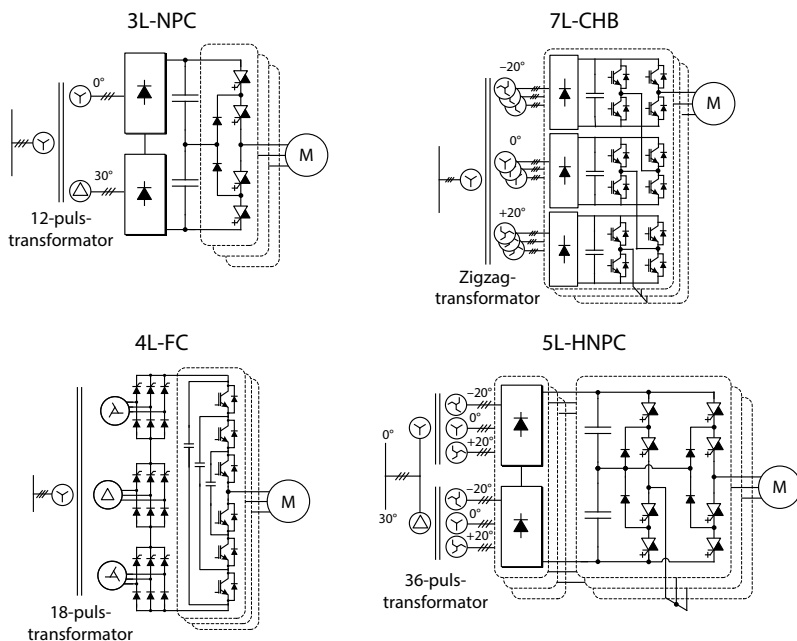


Fig. 3.31 Verschillende MV-regelaartopologieën

Three-Level Neutral-Point-Clamped Converter (3L-NPC)

De 3L-NPC gebruikt een regeling van vier vermogensschakelaars per zijde die zijn vastgeklemd met diodes aan een middenpunt van de DC-tussenkring. Elke schakelaar scheidt de helft van de totale DC-tussenkringspanning, waardoor een MV-bedrijf met IGCT- en HV-IGBT-apparaten mogelijk wordt gemaakt. De regelaar klemt de fase-uitgang op het neutrale punt en genereert een extra spanningsniveau ten opzichte van regelaars met twee niveaus.

De 3L-NPC is een eenvoudige en bewezen topologie. De belangrijkste voordelen zijn onder meer een beperkte du/dt en THD in de AC-uitgangsspanning ervan. Wat nog belangrijker is, is dat de inverter kan worden gebruikt in de MV-regelaar om een bepaald spanningsniveau te bereiken zonder schakelapparaten in serie. Een nadeel van deze topologie is dat deze spanningsbalancing vereist van de condensatorspanningen van de DC-tussenkring.

Cascaded H-Bridge Converter (CHB)

De CHB-meerlagige inverter is een van de populairste regelaartopologieën die in MV-regelaars worden gebruikt. De regelaar bestaat uit meerdere eenheden van eenfase, H-brug-vermogenscellen met drie niveaus. De H-brug-cellen zijn normaal gesproken in cascade aangesloten aan hun AC-zijde om de regelaarspanning te verhogen en een MV-bedrijf te realiseren. Het aantal uitgangsspanningsniveaus is $2k+1$, waarbij k het aantal cellen is.

Vanwege het hoge aantal uitgangsspanningsniveaus, vereist deze regelaar voor de meeste toepassingen geen uitgangsfiler. Het belangrijkste nadeel van deze topologie is de behoefte aan geïsoleerde DC-bronnen om elke H-brug te voeden, wat een gecompliceerde faseverschuivingstransformator vereist. Deze transformator vormt samen met diodegelykrichters echter een multipulsconfiguratie met een zeer beperkte verstoring van de ingangsstroom en zorgt ervoor dat het niet nodig is om condensatorspanningen in evenwicht te brengen. Vanwege het gecompliceerde front end wordt deze regelaar niet veel gebruikt voor zeer regeneratieve toepassingen en heeft het merendeel ervan ingangsbruggen met diodes.

In de praktijk wordt het aantal vermogenscellen in een CHB-inverter voornamelijk bepaald door de bedrijfsspanning en productiekosten. Het gebruik van identieke vermogenscellen leidt tot een modulaire structuur, wat een effectief middel is om de kosten te beperken. Daarom hebben commerciële CHB's tot 17 niveaus en 13,8 kV met IGBT-technologie voor lage spanning. De meest voorkomende configuraties zijn de CHB met zeven niveaus bij 3,3 kV en de CHB met 13 niveaus bij 6,6 kV.

Four-Level Flying Capacitor Converter (4L-FLC)

Deze topologie is ontwikkeld op basis van de inverter met twee niveaus, door DC-condensatoren toe te voegen aan de cascadeschakelaars. Er zijn drie aanvullende schakelparen in elk van de inverters. Elk paar schakelaars met één vliegende condensator vormt een vermogenscel. Er kunnen aanvullende cellen worden aangesloten, waarmee het aantal spanningsniveaus van de regelaar wordt verhoogd, waardoor de topologie wordt beschouwd als modulaire structuur. De FLC kan een inverterfasespanning met vier spanningsniveaus produceren, terwijl de spanningsstress op de vermogensschakelaars wordt beperkt.

Het praktische gebruik van de FLC-inverter is echter beperkt vanwege het gebruik van veel condensatoren en een complexe besturingsregeling.

Five-Level H-Bridge NPC Converter (5L-HNPC)

De 5L-HNPC-bruginverter is ontwikkeld op basis van de 3-L NPC- en CHB-topologieën. De regelaar bestaat uit twee 3L-NPC-zijden die per fase een H-brug vormen. Hierdoor wordt een spanningsuitgang-golfvorm op vijf niveaus gegenereerd terwijl de capaciteit van de regelaar aanzienlijk wordt verhoogd. De inverter beschikt niet over schakelapparaten in serie, zodat het apparaat geen problemen heeft met het delen van de dynamische en statische spanning. Net zoals de CHB vereist deze topologie een geïsoleerde DC-voeding voor elke H-brug, waardoor de complexiteit en kosten van het DC-voedingssysteem toenemen. Dit leidt echter, net zoals bij de CHB, tot een aanzienlijke verbetering van de stromen aan de netzijde en tot een lagere dU/dt - en totale harmonische vervorming (THD).

Alle verschillende regelaartopologieën hebben voor- en nadelen. Hoewel elke topologie enkele kenmerken heeft die beter zijn dan bij andere topologieën, is geen van deze ten aanzien van elke technische vereiste beter dan de andere. Elke topologie voorziet in de behoeften van verschillende toepassingen.

3.10 Normen en wetgeving

Net als voor alle andere producten zijn er wereldwijd wetten en technische normen beschikbaar om de veilige werking van frequentieregelaars 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 gemeenschappelijke technische grondslag te creëren voor samenwerking tussen marktpelers. Gewoonlijk worden IEC-normen in de meeste landen geaccepteerd en worden lokale normen (EN, 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. 3.32 CE-markering en UL-listing

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 frequentieregelaars betrekking hebben, en enkele relevante wettelijke maatregelen (zie bijvoorbeeld hoofdstuk 5.5).



04

MOTORAANDRIJVING MET VARIABEL TOERENTAL

4	Motoraandrijving met variabel toerental	87
4.1	Basisprincipes.....	87
4.1.1	U/f-bedrijf en veldverzwakking.....	87
4.1.2	Ster- en driehoekconfiguratie bij veldverzwakking.....	88
4.1.3	Draaien binnen de stroombegrenzing.....	90
4.2	Compensaties.....	90
4.2.1	Belastingonafhankelijke startcompensaties.....	90
4.2.2	Belastingafhankelijke startcompensaties.....	91
4.2.3	Belastingcompensaties.....	92
4.2.4	Slipcompensaties.....	92
4.2.5	PM-motor- en SynRM-compensaties.....	92
4.3	Automatische aanpassing motorgegevens (AMA) van Danfoss.....	93
4.4	Werking.....	94
4.4.1	Regeling motortoerental.....	94
4.4.2	Omkeren.....	95
4.4.3	Acceleratie- en deceleratiehelling (aanloop en uitloop).....	96
4.4.4	Motorkoppelregeling.....	98
4.4.5	Watchdog.....	98
4.4.6	Energie-efficiënte motorstart.....	99
4.4.7	Energie-efficiënte motorregeling.....	101
4.5	Werking dynamische rem.....	103
4.5.1	Verlenging deceleratiehelling.....	104
4.5.2	Motor als remweerstand.....	104
4.5.3	Remchoppercircuit (remmodule) en weerstand.....	104
4.5.4	Gebruik van een regeneratieve remeenheid.....	105
4.6	Werking statische rem.....	106
4.6.1	Vrijlopen tot stilstand.....	106
4.6.2	DC-rem.....	106
4.6.3	DC-houd.....	106
4.6.4	Elektromechanische rem.....	107
4.7	Motoropwarming en thermische bewaking.....	107
4.8	Functionele veiligheid.....	109

4 Motoraandrijving met variabel toerental

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

4.1 Basisprincipes

4.1.1 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:

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

Dit resulteert in de principerelatie:

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

De relatie wordt benut in spanninggestuurde frequentieregelaars 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 frequentieregelaar wordt regeling van de U/f-karakteristiek genoemd.

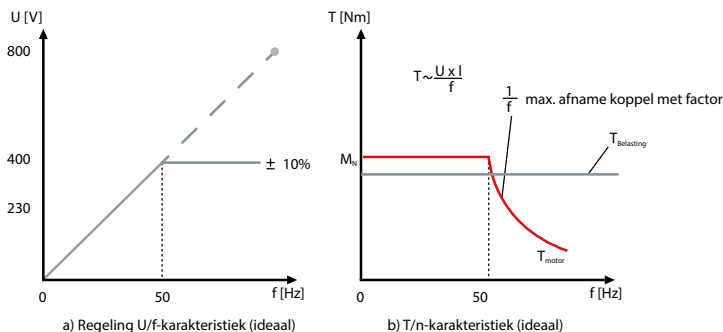


Fig. 4.1 Principe U/f-karakteristiek en koppel

De ideale curve van de U/f-karakteristiek voor een in ster aangesloten 50 Hz-motor is te zien in Fig. 4.1 Principes U/f-karakteristiek a) geschakelde motorspanning b) resulterend koppel. Tot 50 Hz schakelt de frequentieregelaar een constante U/f-verhouding op 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. 4.1 a Principe U/f-karakteristiek en koppel). Omdat deze hoge spanning kritiek is voor de motorisolatie, wordt deze strategie niet toegepast. Gewoonlijk begrenst de frequentieregelaar de uitgangsspanning op de waarde van de ingang (bijvoorbeeld $400\text{ V} \pm 10\%$).

Dit betekent dat de frequentieregelaar 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 veldverzwakingsgebied (Fig. 4.1 Principe U/f-karakteristiek en koppel). Het kleinere magnetische veld leidt tot een lager maximaal motorkoppel. Wanneer het nominale koppel met $1/f$ wordt verlaagd, neemt het blokkeerkoppel af met $1/f^2$.

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

4.1.2 Ster- en driehoekconfiguratie bij veldverzwakking

Door frequentieregelaars aangedreven inductiemotoren worden meestal aangesloten op de nominale spanning van het net. Dit betekent dat een 400 V/230 V-motor in ster wordt aangesloten als deze wordt aangedreven door een 400 V-frequentieregelaar. Zoals in de vorige sectie is aangegeven, komt een 50 Hz-motor in het veldverzwakingsgebied 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.

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

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

In Fig. 4.2 87 Hz-karakteristiek is te zien hoe de motor bij een driehoekaansluiting, in tegenstelling tot bij de steraansluiting, tot 230 V loopt met een constante U/f-verhouding. Als de frequentieregelaar wordt gevoed via een 400 V-voeding, is het zelfs mogelijk om de constante U/f-verhouding vast te houden tot 400 V, evenals de hoge stroom:

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

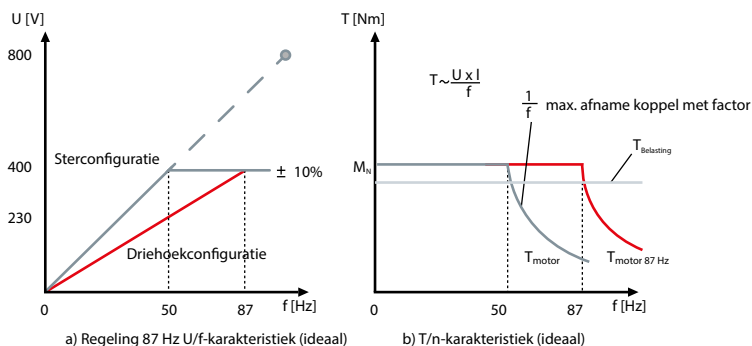


Fig. 4.2 87 Hz-karakteristiek

Dit betekent dat we de nominale fluxdichtheid (Φ) hebben tot 400 V, ook al is de motor geconfigureerd 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 frequentieregelaar moet goed in staat zijn om de hogere driehoekstroom (48,70 A) te verwerken.
- De motor moet zodanig zijn gewikkeld dat deze bestand is tegen de vereiste bedrijfsspanning (typisch hoger in sterconfiguratie) die door de frequentieregelaar wordt geleverd (d.w.z. met een 690 V-voedingsspanning en een 690 V-regelaar is deze toepassing enkel 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 veldverzwakkingsgebied terecht. Bij een aansluiting in driehoek gebeurt dit pas bij ongeveer 90 Hz. Als de tolerantie van $\pm 10\%$ van de frequentieregelaar wordt toegepast, begint het veldverzwakkingsgebied bij respectievelijk 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 frequentieregelaar 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

Het gebruik van deze verhoogde motorcapaciteit heeft de volgende nadelen:

- Het hogere toerental beperkt de levensduur van de lagers of vereist dat de lagers vaker worden gesmeerd
- Een motor met een lagere vermogensklasse betekent dat de lagers kleiner zijn en dat een lagere mechanische belasting is toegestaan

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

4.1.3 Draaien binnen stroomgrens

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 van essentieel belang dat de frequentieregelaar 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 frequentieregelaar te ontwerpen voor werking in stroombegrenzingssituaties. De meestgebruikte strategie is gebaseerd op een afname van het benodigd koppel wanneer het toerental daalt. Zoals we later echter zullen zien, kunnen er toepassingen zijn waarbij deze strategie niet kan worden toegepast en zelfs nog grotere problemen kan veroorzaken.

4.2 Compensaties

Het was vroeger lastig om een frequentieregelaar 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 inductiemotor 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 het nominale toerental van de motor

In de jongste generatie frequentieregelaars stelt het apparaat automatisch de benodigde compensatieparameters in nadat de nominale motorgegevens in de frequentieregelaar 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.

4.2.1 Belastingonafhankelijke startcompensaties

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

Voorbeeld

Een motor die veel kleiner is dan de aanbevolen motorframegrootte van een frequentieregelaar 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 frequentieregelaar 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.

4.2.2 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 het stator- en rotormateriaal. 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. 4.3 Werkelijke U/f - en T/n -karakteristiek.

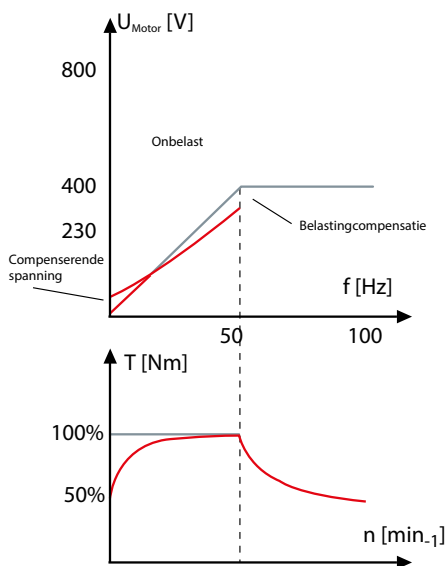


Fig. 4.3 Werkelijke U/f - en T/n -karakteristiek

In Fig. 4.3 is te zien hoe bij lage toerentallen extra spanning aan de motor wordt geleverd ten behoeve van compensatie.

4.2.3 Belastingcompensaties

De motorspanning wordt verhoogd bij 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 te hoge verhoging van de uitgangsspanning ten opzichte van de U/f-karakteristiek leidt tot overmagnetisering van de motor. Dit verhoogt de thermische belasting van de motor zodanig dat een verlaging van het koppel te verwachten is. De motorspanning wordt verlaagd bij nullastbedrijf.

4.2.4. Slipcompensatie

De slip van een inductiemotor is afhankelijk van de belasting en bedraagt doorgaans zo'n 5% van het nominale toerental (minder dan 1% voor grotere motoren). Voor een tweepolige motor betekent dit dat de slip ongeveer 150 tpm bedraagt.

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

Als de frequentieregelaar 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 regelaar kan deze slip volledig compenseren door de arbeidsstroom naar de motor effectief te meten.

De frequentieregelaar compenseert in dat geval de slip door de frequentie te verhogen op basis van de feitelijk gemeten stroom. Dit wordt actieve slipcompensatie genoemd.

De frequentieregelaar 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 frequentieregelaar 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 Hz - 1,5 Hz = 50 Hz.

4.2.5 PM-motor- en SynRM-compensaties

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

Het magnetiseringsprofiel verschilt uiteraard van dat van de inductiemotor, maar andere belangrijke gegevens en compensaties zijn:

- Nominale motortoerental en nominale frequentie
- Tegen-EMK
- Max. toerental voordat tegen-EMK de frequentieregelaar 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 en
- Verzadigingspunt

4.3 Automatische aanpassing motorgegevens (AMA) van Danfoss

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 eerder is aangegeven, zijn er ook diverse compensaties die moeten worden ingesteld. Voor moderne frequentieregelaars 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 aanpassing van de motorgegevens (AMA) van Danfoss. Deze functies meten bijvoorbeeld de statorweerstand en -inductantie. Er wordt tevens rekening gehouden met de invloed van de kabellengte tussen frequentieregelaar 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 frequentieregelaars de motoridentificatiefunctie ondersteunen voor alle motortypen.

In principe worden twee strategieën gebruikt om de relevante motorparameters te meten:

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 'identificatie-run'.

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.

4.4 Werking

4.4.1 Regeling motortoerental

De uitgangsfrequentie van de frequentieregelaar, 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. 4.4 Relatie tussen referentiesignaal en motorkoppel).

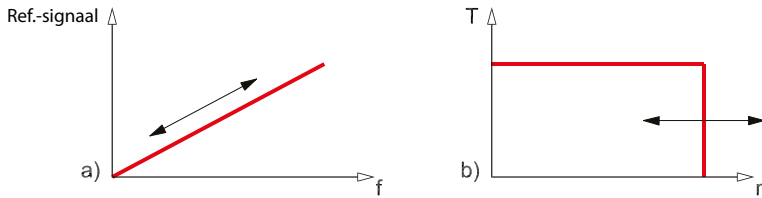


Fig. 4.4 Relatie tussen referentiesignaal en motorkoppel

Als het belastingskoppel lager is dan het motorkoppel, zal het toerental de vereiste waarde bereiken. Zoals te zien is in Fig. 4.5 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 frequentieregelaar staat kortstondige doorschot voorbij de stroomgrens toe zonder uit te schakelen (bij punt C), maar de duur van de doorschot moet worden beperkt.

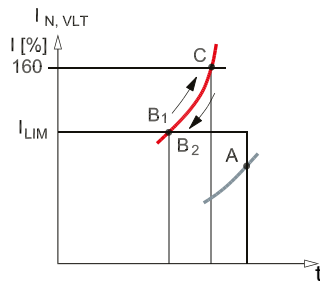


Fig. 4.5 Relatie tussen stroomgrens en overstroomgrens

4.4.2 Omkeren

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

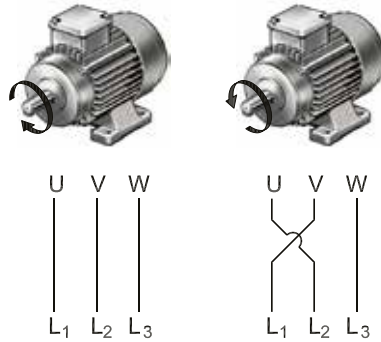


Fig. 4.6 De draairichting van de motor wordt omgekeerd wanneer de fasevolgorde wordt gewijzigd

Een frequentieregelaar kan de draairichting van de motor omkeren door de fasevolgorde elektronisch 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 om de standaard fabrieksinstellingen van de frequentieregelaar te kennen. In sommige gevallen kan omkeren de motor zelfs beschadigen. Daarom is omkeren normaal gesproken standaard uitgeschakeld.

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

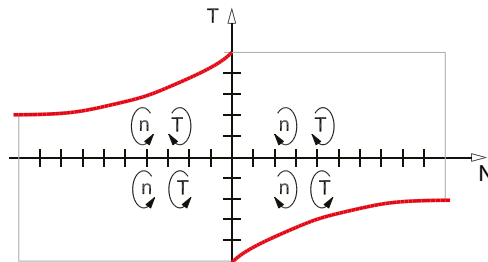


Fig. 4.7 Remkoppel van de frequentieregelaar tijdens omkeren

4.4.3. Acceleratie- en deceleratiehelling (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 frequentieregelaars beschikken over hellingsfuncties om dit mogelijk te maken. Deze hellingen zijn instelbaar en zorgen ervoor dat de toerentalreferentie alleen met een vooraf ingestelde snelheid kan worden verhoogd of verlaagd.

De acceleratiehelling (aanloop) geeft aan hoe snel het toerental wordt verhoogd. Deze wordt uitgedrukt als een versnellingsstijd t_{acc} en geeft aan hoe snel de motor het nieuwe toerental moet bereiken. Deze hellingen zijn voornamelijk gebaseerd op de nominale motorfrequentie. Een acceleratiehelling van bijvoorbeeld 5 seconden betekent dat de frequentieregelaar 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.

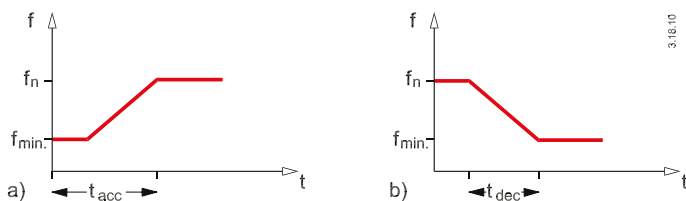


Fig. 4.8 Versnellings- en vertragingstijden

De deceleratiehelling (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 inverter volgt.

Aan- en uitlooptijden 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 frequentieregelaar stopzet.

Als het traagheidsmoment van de motoras en het hieraan gerelateerde traagheidsmoment van de belasting bekend zijn, kunnen de optimale versnellings- (t_{acc}) en vertragingstijd (t_{dec}) worden berekend.

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

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

J	is het traagheidsmoment van de motoras en de belasting [kgm^2].
T_{fric}	is het wrijvingskoppel van het systeem [Nm].
T_{acc}	is het overkoppel dat wordt gebruikt om te versnellen [Nm].
T_{dec}	is het remkoppel dat optreedt wanneer de toerentalreferentie wordt verlaagd [Nm].
n_1 en n_2	zijn de toerentallen bij de frequenties f_1 en f_2 [min^{-1}].

Als de frequentieregelaar 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 gewoonlijk identiek.

Voorbeeld

Een machine heeft de volgende specificaties:

$$\begin{aligned} J &= 0,42 \text{ kgm}^2 \\ n_1 &= 500 \text{ min}^{-1} \\ n_2 &= 1000 \text{ min}^{-1} \\ T_{\text{fric}} &= 0,05 \times T_N \\ T_N &= 27 \text{ Nm} \end{aligned}$$

De theoretische versnellingstijd kan als volgt worden berekend:

$$t_{\text{acc}} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(T_{\text{acc}} - T_{\text{fric}}) \times 9,55} = \frac{0,42 \times (1000 - 500)}{[27,0 - (0,05 \times 27,0)] \times 9,55} \approx 0,5 \text{ s}$$

De hellingfuncties zorgen ervoor dat er geen abrupte toerentalwijzigingen optreden, op voorwaarde dat de frequentieregelaar is ingesteld op de berekende versnelling.

Dit is essentieel voor veel toepassingen, zoals:

- Zorgen dat flessen niet omvallen op flessentransportbanden
- Voorkomen van waterslag in pompsystemen
- Comfort op roltrappen of in liften

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

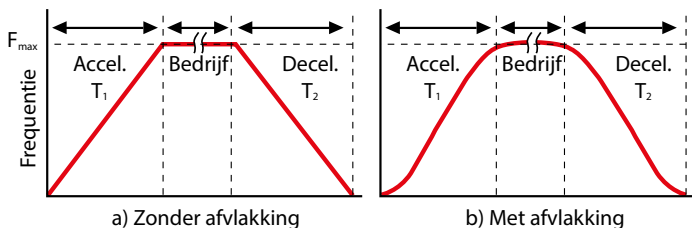


Fig. 4.9 Lineaire helling (a) en S-helling (b)

4.4.4 Motorkoppelregeling

Motorkoppel is een andere parameter die belangrijk is voor de toepassing, zoals te zien is in Fig. 4.5. 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:

- Het beperken van het koppel om schade aan de machine te vermijden enz.
- Het regelen van het koppel om meer motoren de belasting te laten delen.

Als een toepassing plotseling overbelast wordt en de frequentieregelaar 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 frequentieregelaars worden geprogrammeerd om bij overbelasting een waarschuwing te genereren, maar ze kunnen ook onder specifieke omstandigheden het koppel begrenzen.

Zoals beschreven in sectie 4.1 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 frequentieregelaar werkt op basis van een ruimtevector- of fluxregeling (zie hoofdstuk 3 Frequentieregelaars), wordt de stroom in vectoren gemeten in alle drie de motorfasen en is de verdeling van de stroomcomponenten eenvoudig. Met deze informatie kan de frequentieregelaar 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 essentieel 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 frequentieregelaars wordt de droopfunctie genoemd. De droopfunctie houdt in dat één motor het toerental regelt en dat aanvullende regelaars hetzelfde toerental aanhouden en de belasting automatisch verdelen.

Voorbeeld

Een 100 meter lange transportband heeft talrijke aandrijfstations die verspreid opgesteld zijn langs de band. 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 kan raken
- De band wordt beschadigd vanwege het gedeeltelijk hogere koppel
- Riemschijven en aandrijftrommels kunnen slippen met buitensporige slijtage als gevolg

In dergelijke situaties zijn koppel en koppelverdeling belangrijk.

4.4.5 Watchdog

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

De machines worden bewaakt aan de hand van:

- Uitgangsfrequentie
- Uitgangsstroom
- 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 hoogste toegestane motorstroom (stroomgrens) of het hoogste toegestane motorkoppel (koppelbegrenzing) zijn. De frequentieregelaar 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.

Regelaars kunnen worden bewaakt om mogelijke problemen te voorspellen voordat deze zich voordoen en dienovereenkomstig preventief onderhoud te plannen. Dit verbetert de beschikbaarheid van de regelaar, beperkt het risico op uitval en zorgt voor lagere kosten.

Voorbeeld

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

De frequentieregelaar kan bij slippen of breken van de V-riem de plotselinge afname van het motorkoppel detecteren en kan worden geprogrammeerd om een waarschuwing te genereren of de motor te stoppen.

4.4.6 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 rechtstreeks aan te sluiten ('Direct-on-Line', DOL), 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.

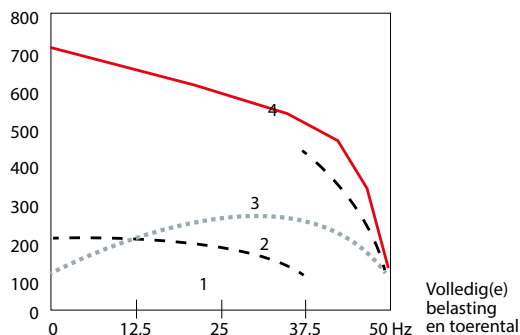


Fig. 4.10 Typische motorstroomcurves bij starten via (1): frequentieregelaar bij VT-belasting (2): ster-driehoekschakeling (3): softstarter (4): netbedrijf (direct on line, DOL)

Het is mogelijk om softstarters te gebruiken. Deze passen de motorspanning net zo aan als ster-driehoekschakelingen, maar dan lineair. 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 het apparaat de spanning verder. Dit herhaalt zich totdat het netspanningsniveau op de motor wordt geschakeld.

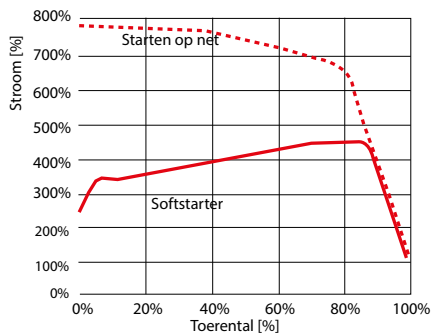
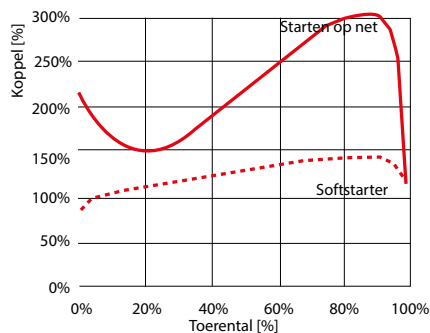


Fig. 4.11 Vergelijking tussen motorstart in netbedrijf en motor gestart door een softstarter (400% stroomgrens)

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 frequentieregelaars 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.

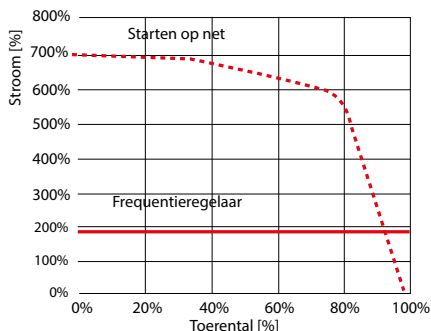
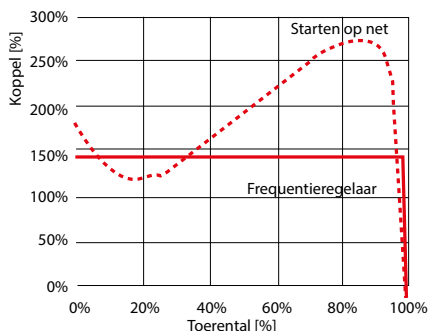


Fig. 4.12 Vergelijking tussen motorstart in netbedrijf en een motor die door een frequentieregelaar wordt gestart bij 160% overbelasting

Principecurves voor koppel en stroom voor het starten van een motor met constante belasting in netbedrijf, door een softstarter en door een frequentieregelaar, zijn te zien in Fig. 4.11 Vergelijking tussen motorstart in netbedrijf en motor gestart door een softstarter en Fig. 4.12 Vergelijking tussen motorstart in netbedrijf en een motor die wordt gestart door een frequentieregelaar bij 160% overbelasting. De curves zullen er anders uitzien bij andere belastingen.

4.4.7 Energie-efficiënte motorbesturing

Alle motoren werken door het schakelen van de juiste spanning bij een bepaalde frequentie. Een draaiende as betekent echter niet dat de motor ook efficiënt werkt. Om een motor te regelen, zijn een besturingsalgoritme (U/f, spanningsvector, flux-vector ...) en een besturingsstrategie nodig. Dat beide componenten moeten zijn afgestemd op een motortype is heel goed te zien bij motoren met permanentmagneten. Voor een energieoptimale werking moet de regelbaar 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.

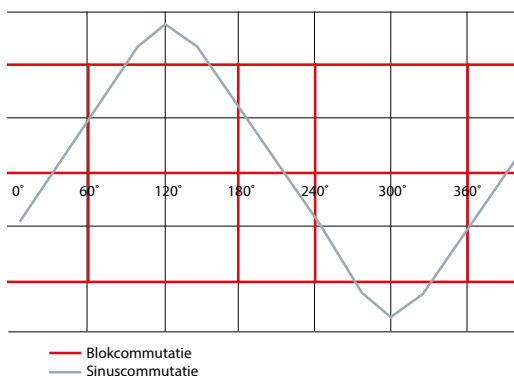


Fig. 4.13 Blok- versus sinuscommutatie

Blokcommutatatie staat bekend om bepaalde nadelen zoals koppelrimpel en overmatig geluid. 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 reluctantiekoppels. 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 inverter kan worden verlaagd.

Daarnaast bieden frequentieregelaars extra functionaliteit voor verlaging van de kracht van het magnetische veld bij een verlaagde belasting. Dit kan worden gedaan via speciale U/f-karakteristieken of functies voor automatische energieoptimalisatie (AEO).

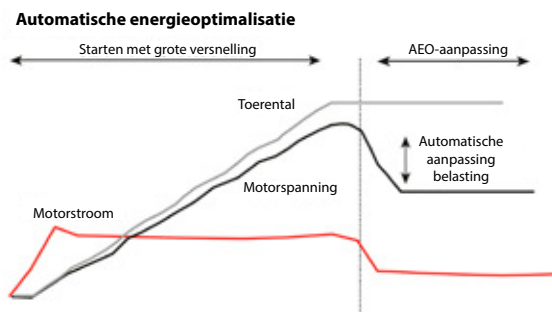


Fig. 4.14 Automatische energieoptimalisatie

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. 4.14 Automatische energieoptimalisatie.

Het gemiddelde energiebesparingspotentieel voor kleine tot middelgrote regelaars 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.

4.5 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 positie wordt gehouden.
- 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 frequentieregelaar stelt de motor in staat om te werken als generator en mechanische energie om te zetten in elektrische energie.

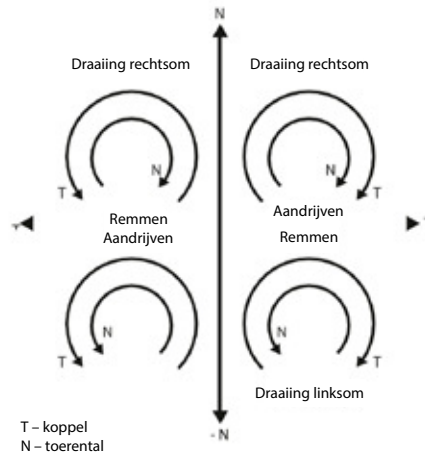


Fig. 4.15 Vierkwadrantenbedrijf: rechtsom (CW) en linksom (CCW)

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

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

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

Gewoonlijk worden de volgende maatregelen genomen:

- Verleng de deceleratiehellingstijd.
- Voer energie af in de motor. Dit houdt in dat de motor wordt gebruikt als remweerstand.
- De frequentieregelaar is uitgerust met een elektronisch 'remchopper'-circuit en passende remweerstand.

- Gebruik van een regeneratieve remeenheid om energie terug te voeren naar het net.
- Gebruik van frequentieregelaars met een actieve gelijkrichter om energie terug te voeren naar het net.
- De energie wordt naar andere frequentieregelaars gevoerd via een Common DC Bus.
- De energie wordt naar een energieopslagmedium gevoerd (bijv. een accu).

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.

4.5.1 Verlenging van de deceleratiehelling

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

Een andere mogelijkheid is om gebruik te maken van de regelfuncties van moderne frequentieregelaars, zoals een overspanningsregeling (OVC). Deze moeten worden ingeschakeld om uitschakeling van de frequentieregelaar te voorkomen of om de hellingen automatisch te verlengen. Vervolgens bepaalt de frequentieregelaar zelf de juiste hellingstijd. Dit type hellingsverlenging houdt automatisch rekening met wisselende belastingstraagheden. 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 hellingstijd ook leidt tot een grotere verplaatsingsafstand.

4.5.2 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.

4.5.3 Remchoppercircuit (remmodule) en weerstand

Frequentieregelaars kunnen worden uitgerust met een remchopper en een remweerstand. Het circuit bestaat in principe uit een transistor (bijvoorbeeld een IGBT) die de overtollige spanning elimineert door deze 'af te knippen' en naar de aangesloten weerstand te sturen. Bij de inbedrijfstelling moet het stuurschakelcircuit de juiste informatie krijgen dat er een remweerstand is aangesloten. Het stuurschakelcircuit kan ook controleren of de weerstand nog steeds goed

functioneert. Gewoonlijk moet bij het bestellen worden gespecificeerd of de frequentieregelaar wel of niet moet worden uitgerust met een remchopper. Boven een bepaald vermogen veroorzaakt het gebruik van een remmodule en weerstand problemen in verband met warmte, ruimte en gewicht.

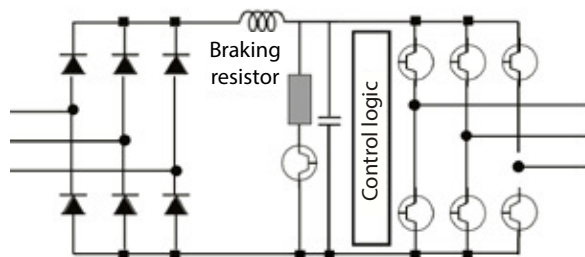


Fig. 4.16 Remchopper en weerstand

4.5.4 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 DC-spanning in het circuit via een inverter teruggevoerd naar het net, synchroon wat betreft amplitude en fase.

Dit terugvoeren van energie kan worden uitgevoerd door:

- Frequentieregelaars met een actieve gelijkrichter. Bij dit regelaartype kan de gelijkrichter energie overbrengen van de DC-tussenkring naar de voeding.
- Externe regeneratieve remeenheden die integraal zijn verbonden met de tussenkring van een of meer frequentieregelaars bewaken de tussenkringspanning.

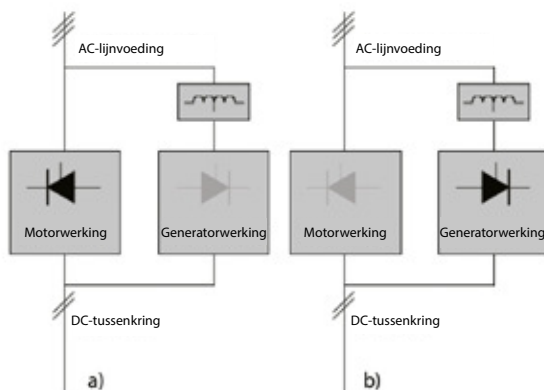


Fig. 4.17 Regeneratieve remeenheid toont een vereenvoudigde versie van het werkingsprincipe.

Raadpleeg hoofdstuk 5 Energiebesparing met frequentieregelaars om te evalueren wanneer het economisch rendabel is om dit type apparaten te gebruiken.

4.6 Werking statische rem

De frequentieregelaar 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 vaak verkeerd begrepen. Het is belangrijk om 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 is omgekeerd.

4.6.1 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 massastraagheid van de belasting kan dit enkele seconden tot uren in beslag nemen (bijvoorbeeld bij zeer grote afscheiders).

4.6.2 DC-remmen

Een DC-spanning over twee van de drie motorfasen wordt gebruikt om een stilstaand 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 uitgangsfrequentie waarbij 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 motoras 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.

4.6.3 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.

4.6.4 Elektromechanische rem

De elektromechanische rem is een hulpmiddel om de motoras tot stilstand te brengen. Dit kan vanuit de frequentieregelaar 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 motoras moet worden vastgehouden.

Enkele aandachtspunten zijn:

- Voormagnetisering van de motor, wat betekent dat een minimumhoeveelheid stroom nodig is
- De frequentie waarbij activering of deactivering plaatsvindt
- Reactietijden (vertragingstijden) van de relaisinductoren

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, gewoonlijk de magnetiseringsstroom, lopen om te garanderen dat de motor de last niet kan laten vallen. Zie hoofdstuk 4.10 voor meer informatie.

4.7 Motoropwarming en thermische bewaking

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

- Zelfventilatie
- Geforceerde luchtkoeling
- Vloeistofkoeling

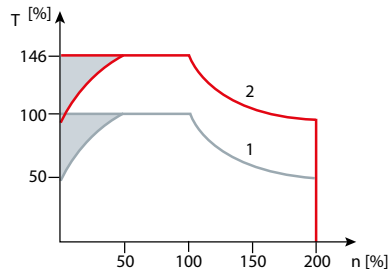
Om de levensduur van de motor te optimaliseren, moet de motor binnen het gespecificeerde temperatuurbereik werken. De meest gangbare koelmethode is zelfventilatie, waarbij de motor wordt gekoeld door een ventilator die op de as is gemonteerd.

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 er in de motor meer warmte geproduceerd.

Bij lage toerentallen is de motorventilator niet in staat om 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 tijdens continue belasting.

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. 4.18 T/n-karakteristieken met en zonder externe koeling.



Grafiek 1: Motor met nominaal vermogen, bijv. 15 kW
Grafiek 2: Overgedimensioneerde motor, bijv. 22 kW

Fig. 4.18 *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 frequentieregelaar 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. 4.19 Relatie tussen maximaal continu koppel en vorm van de stroom. De grootte van de harmonische stromen bepaalt in hoeverre de warmte toeneemt. Er wordt daarom aanbevolen de temperatuurstijgingsklasse van de motor te controleren alvorens deze continu met een belasting van 100% te laten werken wanneer de stroom niet-sinusvormig is.

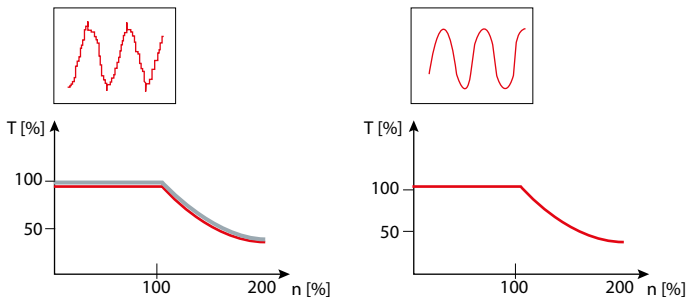


Fig. 4.19 *Relatie tussen maximaal continu koppel en vorm van de stroom*

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 frequentieregelaar.

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

In de frequentieregelaar 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 frequentieregelaar worden aangesloten om de temperatuur te bewaken.

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

4.8 Functionele veiligheid

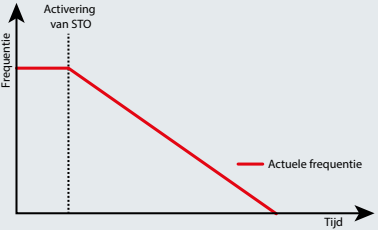
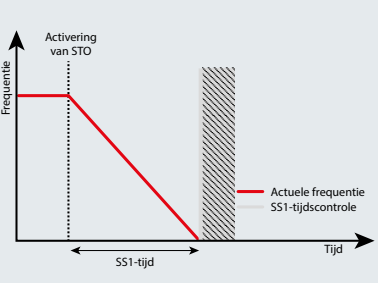
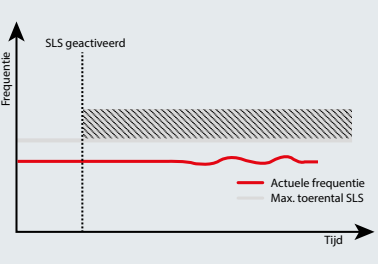
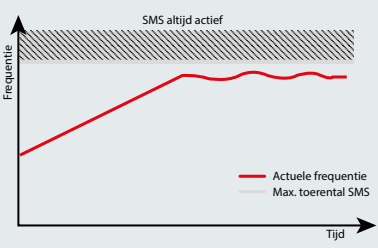
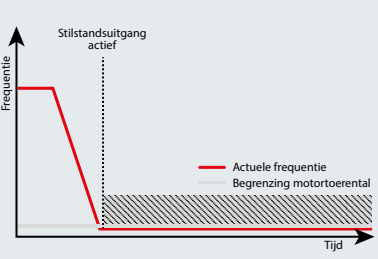
Machines moeten veilig kunnen werken. Het is de verantwoordelijkheid van de machinebouwer om te proberen alle risico's weg te nemen door middel van een zorgvuldig en efficiënt ontwerp. Volledig risicovrije machines bestaan echter niet. Onder functionele veiligheid verstaat men bescherming tegen gevaren die worden veroorzaakt door een onjuiste werking van componenten of systemen. Een frequentieregelaar is geen veiligheidssysteem als zodanig, maar kan worden gebruikt als onderdeel van een veiligheidssysteem. De rol van een regelaar in een veiligheidssysteem is die van actuator. Deze omvat functies die kunnen worden gecertificeerd voor gebruik in veiligheidsgerelateerde systemen of toepassingen. 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 aan de hand van een risicobeoordeling. Bij de risicobeoordeling wordt vastgesteld hoe ernstige ongelukken zich kunnen voordoen, hoe waarschijnlijk het is dat deze zich voordoen en hoe vaak de risicosituaties optreden. 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

Tabel 4.1

Naast het vereiste veiligheidsniveau moet het type risico en daarmee de vereiste veiligheidsfunctie worden erkend. Om deze te kunnen vaststellen, moet worden begrepen hoe de machine zich gedraagt, voor welk soort proces zij wordt gebruikt en wat de veiligste manier is om bijvoorbeeld de machine te stoppen wanneer zich een risico voordoet.

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
Safe Torque Off STO	De motor krijgt geen energie om koppel/rotatie te produceren. Deze functie voldoet aan stopcategorie 0 overeenkomstig IEC 60204-1.	
Veilige stop 1 SS1	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.	
Safe Limited Speed SLS	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.	
Safe Maximum Speed SMS	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.	
Safe Speed Monitor SSM	SSM bewaakt op nultoerental en zet een uitgangssignaal op 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.	

Tabel 4.2 Algemene veiligheidsfuncties van de frequentieregelaar en hun functie

In de productnorm EN/IEC 61800-5-2 worden verschillende aanvullende functies voor functionele veiligheid voor frequentieregelaars gedefinieerd:

- SOS Safe Operating Stop – veilige bedrijfsstop
- SS2 Safe Stop 2 – veilige stop 2
- SDI Safe Direction – veilige draairichting
- SBC Safe Brake Control – veilige rembesturing
- SMA Safely-Monitored Acceleration – veilig bewaakte versnelling
- SLP Safely-Limited Position – veilig begrensde positie
- SCA Safe Cam – veilige nokkenregeling
- SLI Safely-Limited Increment – veilig begrensde stijging
- SSR Safe Speed Range – veilig toerentalbereik
- SBT Safe Break Test – veilige remtest
- SQS Safe Quick Stop – veilige snelle stop
- SLA Safely-Limited Acceleration – veilig begrensde versnelling
- SAR Safe Acceleration Range – bereik veilige versnelling
- SLT Safely-Limited Torque – veilig begrensde koppel
- STR Safe Torque Range – bereik veilig koppel
- SMT Safe Motor Temperature – veilige motortemperatuur

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.

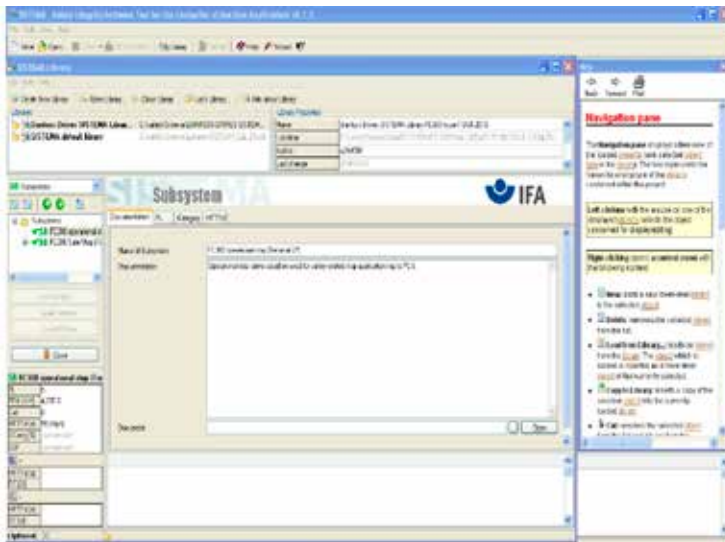


Fig. 4.20 Schermafbeelding van de SISTEMA-startpagina

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 detailleringsniveaus, waaronder die van het behaalde prestatieniveau (PL – performance level).

Relevante parameters worden stapsgewijs ingevoerd via invoerschermen, 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.



05

ENERGIE BESPAREN MET FREQUENTIETREGLAARS

5	Energie besparen met frequentieregelaars	115
5.1	Potentieel.....	115
5.2	Rendement van motor + frequentieregelaar.....	115
5.3	Classificatie van energie-efficiënte componenten	117
5.4	Belasting over tijd.....	121
5.4.1	Toepassingen met variabel koppel.....	121
5.4.2	Toepassingen met constant koppel.....	123
5.5	Levenscycluskosten.....	124
5.6	Systeembesparingen.....	124
5.7	Het gebruik van geregenereerd vermogen	126
5.8	Hybridisatie.....	128
5.8.1	Netconverter.....	130
5.8.2	DC/DC-converter	130

5. Energie besparen met frequentieregelaars

5.1 Potentieel

Elektromotoren zijn verantwoordelijk voor circa 50% van het elektriciteitsverbruik wereldwijd *). In industriële toepassingen ligt dit percentage zelfs nog hoger. Afhankelijk van de regio en het industriegebied wordt 65-75% van elektrische energie in de industrie gebruikt voor elektromotoren. Daarom biedt elektrische-regelaartechnologie veel potentieel voor het terugdringen van het energieverbruik wereldwijd.

Frequentieregelaars maken de ontwikkeling en verbetering van energie-efficiëntere motortechnologieën mogelijk. Een nog belangrijker pluspunt is de hoofdreden waarom frequentieregelaars 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.

Een hoger rendement

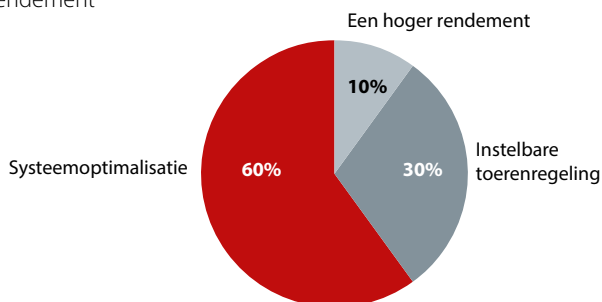


Fig. 5.1 Potentiële energiebesparing

Als rekening wordt gehouden met enkele essentiële punten, kunnen frequentieregelaars hoge energiebesparingen opleveren 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.

*) Bron: 2016 – Internationaal energieagentschap

5.2 Rendement van motor + frequentieregelaar

Het rendement van een systeem bestaande uit een motor die wordt geregeld door een frequentieregelaar kan worden berekend door de afzonderlijke rendementen te vermenigvuldigen.

$$\eta_{\text{Systeem}} = \eta_{\text{Motor}} \times \eta_{\text{Frequentieregelaar}}$$

Typische frequentieregelaar-rendementscurves bij twee verschillende belastingen zijn te zien in Fig. 5.2 Rendementsvoorbeeld van frequentieregelaars (A = 100% belasting/B = 25% belasting). Het rendement van de frequentieregelaar is hoog over het volledige regelbereik, bij zowel hoge als lage belastingsniveaus.

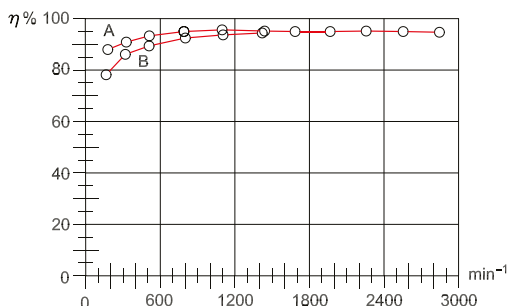


Fig. 5.2 Rendementsvoorbeeld van frequentieregelaars

Naast het economische aspect dat het hoge rendement van frequentieregelaars leidt tot een lager energieverbruik, wordt ook het uit de installatie te verwijderen gedissipeerde vermogen verlaagd. Dit is belangrijk als de frequentieregelaar in een kast wordt geïntegreerd. Als de verliezen te hoog zijn, zijn aparte koelapparaten nodig die eveneens energie verbruiken.

Motorrendementen bij normale en deelbelastingen worden vergeleken met die van de frequentieregelaar, zoals te zien is in Fig. 5.3 Rendementsvoorbeeld van een 2-polige motor (A = 100% belasting/B = 25% belasting).

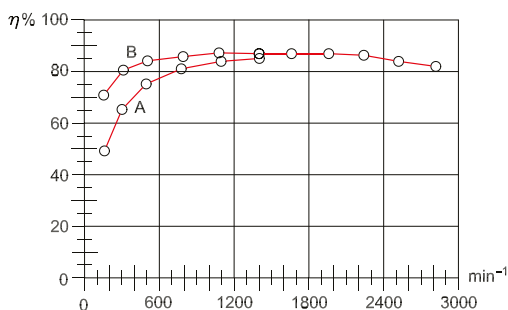


Fig. 5.3 Rendementsvoorbeeld van een 2-polige motor

Als gevolg hiervan heeft de motor een belangrijke invloed op het systeemrendement (Fig. 5.4 Rendementsvoorbeeld van een combinatie van frequentieregelaar en motor (A = 100% belasting/B = 25% belasting)).

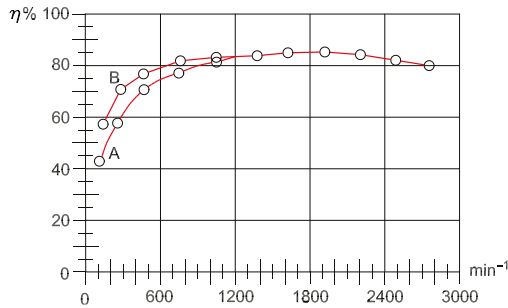


Fig. 5.4 Rendementsvoorbeeld van een combinatie van frequentieregelaar en motor

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

5.3 Classificatie van energie-efficiënte componenten

Frequentieregelaar

De norm IEC61800-9-2 definieert rendementsklassen voor frequentieregelaars. Omdat vermogenselektronica diverse configuraties kent, zijn de klassen IE0-IE2 gedefinieerd voor complete aandrijfmodules (CDM's), bestaande uit gelijkrichter, tussenkring en inverter (zie Fig. 5.5 Definitie van CDM en PDS). CDM's met de mogelijkheid om energie terug te voeren (bijv. remenergie naar het net) worden genoemd, maar niet behandeld, omdat zij normaal gesproken hogere verliezen hebben en hun geschiktheid voor een bepaalde toepassing kan worden geëvalueerd aan de hand van een berekening op systeemniveau, rekening houdend met de specifieke belastingscyclus.

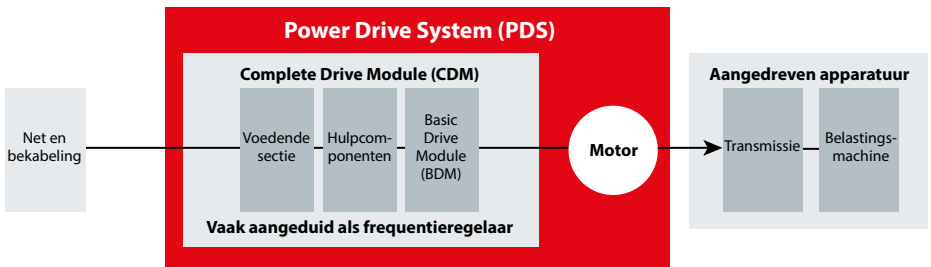


Fig. 5.5 Definitie van CDM en PDS

De IE-classes zijn gedefinieerd ten opzichte van een referentie-CDM (RCDM). Door dezelfde schaal aan te houden voor alle vermogensklassen, worden de classes 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. 5.5 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 90% en een relatieve koppel-producerende stroom van 100%. 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 5.1 Typische transmissierendementen



Fig. 5.6 De VLT® OneGearDrive® is een zeer efficiënte synchrone draaistroommotor met permanentmagneet en een geoptimaliseerde kegeltandwielkast

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 verschillende limieten voor voedende frequenties (50/60 Hz) en het aantal motorpolen (2, 4 of 6 polen). Klassen voor motoren die door frequentieregelaars worden geregeld, zijn gedefinieerd in IEC/ EN 60034-30-2.

Combinatie frequentieregelaar + motor

Rendementsklassen voor combinaties van frequentieregelaar en motor zijn in de norm IEC 61800-9-2 gedefinieerd op basis van een IES-classificatie. Net als bij de CDM zijn de klassen voor het zogenaamde Power Drive System (PDS), bestaande uit de combinatie van motor + frequentieregelaar (zie Fig. 5.8b Energierendementsklassen voor motoren, frequentieregelaars en Power Drive Systems (PDS)) gerelateerd aan een referentiesysteem (zie Fig. 5.8b Energierendementsklassen voor motoren, frequentieregelaars en Power Drive Systems (PDS)). PDS'en met 20% hogere verliezen dan de referentie zijn ingedeeld in klasse IES0, terwijl systemen met 20% lagere verliezen zijn opgenomen in klasse IES2.

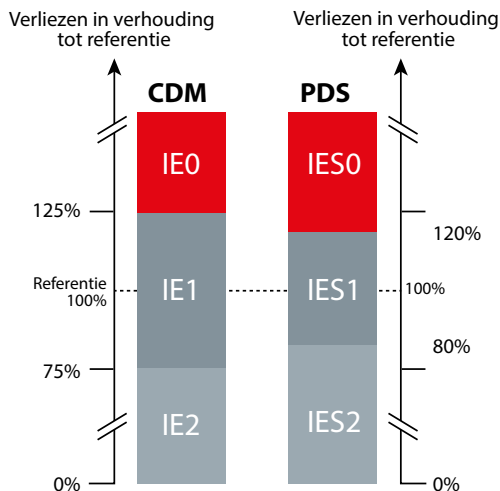


Fig. 5.7 Definitie van rendementsklassen voor CDM en PDS

De classificatie is gebaseerd op 100% relatief toerental en 100% relatief koppel. Wanneer de frequentieregelaar 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-classes met elkaar te vergelijken, omdat ze hoogstwaarschijnlijk een verschillende grondslag hebben.

De IES-klasse voor combinaties van frequentieregelaar en motor 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.

Instrumenten voor de berekening van het energierendement

Om gebruikers te helpen ten aanzien van aan energierendement gerelateerde aspecten, heeft Danfoss het MyDrive® ecoSmart™-instrument ontwikkeld. Dit kan worden gebruikt om de rendementsklasse en het rendement bij gedeeltelijke belasting van een frequentieregelaar van Danfoss te berekenen, als afzonderlijk product (CDM) of in combinatie met een motor (PDS).

Dit instrument maakt het eenvoudig om een regelaar van Danfoss met alle motoren te combineren, omdat het hieruit voortvloeiende systeemrendement door het instrument wordt berekend, op basis van de motoregegevens en de gekozen regelaar. MyDrive® ecoSmart™ is beschikbaar als webtoepassing (zie ecoSmart.danfoss.com) en als iOS- of Android-app.



Fig. 5.8a Voorbeeld van een resultatenpagina van het webgebaseerde ecoSmart-instrument

Motoren, frequentieregelaars en Power Drive Systems (PDS) worden ingedeeld op basis van hun energierendement. De voor de classificatie gebruikte normen zijn verschillend, evenals het aantal rendementsklassen.

Soort apparatuur	Norm waarin de classificatie is vastgelegd
Motoren voor sinusvormige voeding	Internationale norm IEC 60034-30-1, in Europa geharmoniseerd als EN 60034-30-1
Motoren die worden gevoed via een regelaar	IE-technische specificatie: IEC TS 60034-30-2
Regelaars en Power Drive Systems	IEC EN 61800-9-2, gebaseerd op en ter vervanging van EN 50598-2

Tabel 5.2

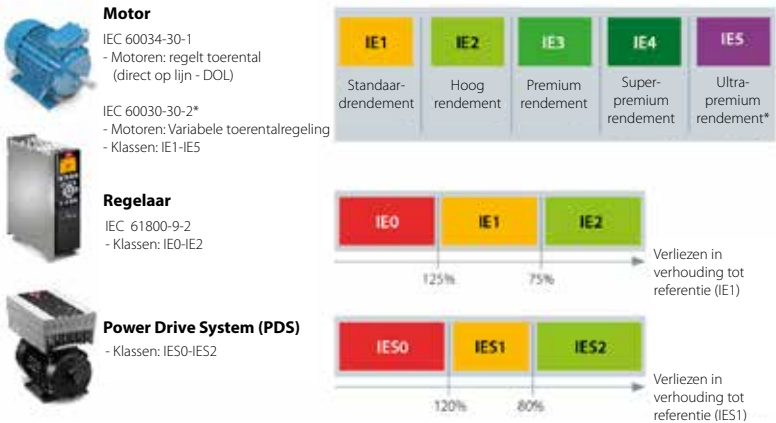


Fig. 5.8b Energierendementsklassen voor motoren, frequentieregelaars en Power Drive Systems (PDS)

5.4 Belasting over tijd

Elke component in een systeem heeft enige verliezen. Vandaar dat het toevoegen van componenten aan een systeem waar mogelijk moet worden vermeden. Dit geldt ook voor frequentieregelaars. Het toevoegen van een eenheid aan een motor die de hele dag door bij volledige belasting en volledig toerental moet werken, zal enkel leiden tot extra verliezen. Zodra het verlagen van het toerental en het koppel echter zinvol is voor de toepassing, zal het gebruik van een frequentieregelaar het energieverbruik verlagen. De haalbare besparingen hangen af van het belastingsprofiel over tijd, de koppelkarakteristieken en het rendement van de motor en het aandrijfsysteem bij de specifieke deellastpunten.

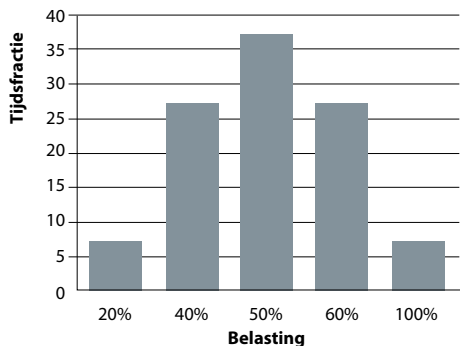


Fig. 5.9 Belasting-over-tijdsfractiegrafiek geeft aan hoe lang een last wordt aangedreven bij deelbelasting

Deelbelasting 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 frequentieregelaar, verwijst deelbelasting naar het koppel bij een bepaald toerental waarbij de koppelkarakteristiek door de toepassing wordt bepaald. In feite werken de meeste toepassingen op basis van deelbelasting. Dit geldt ook voor motoren die direct op het net werken, aangezien deze gewoonlijk overgedimensioneerd zijn.

5.4.1 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 kwadratische koppelkarakteristiek hebben, hebben excentrische, vacuüm- of verdringerpompen een constant koppelkarakteristiek.

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

$$\frac{Q_1}{Q_2} \sim \frac{n_1}{n_2} \quad \text{Debiet is evenredig aan toerental}$$

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

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

Het debiet 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%.

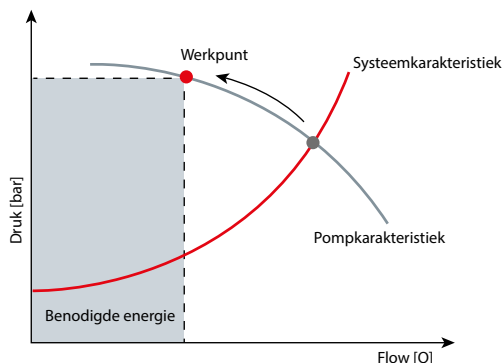


Fig. 5.10 Vereiste energie in een pomptoepassing met variabel koppel voor smookklepregeling

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.

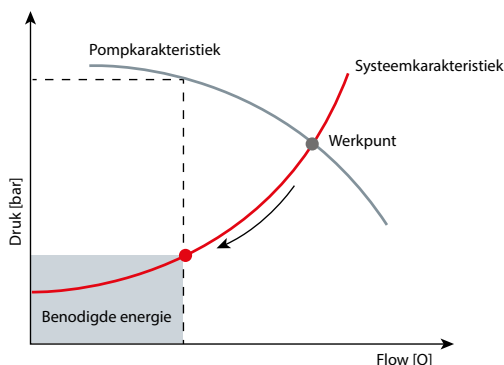


Fig. 5.11 Benodigde energie in een pomptoepassing met variabel koppel voor toerenregeling

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 pomptoeepassingen 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 frequentieregelaar een voor een meer pompen inschakelen. De pompen werken hierdoor waar mogelijk met maximaal rendement. 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.

5.4.2 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 gelijk.

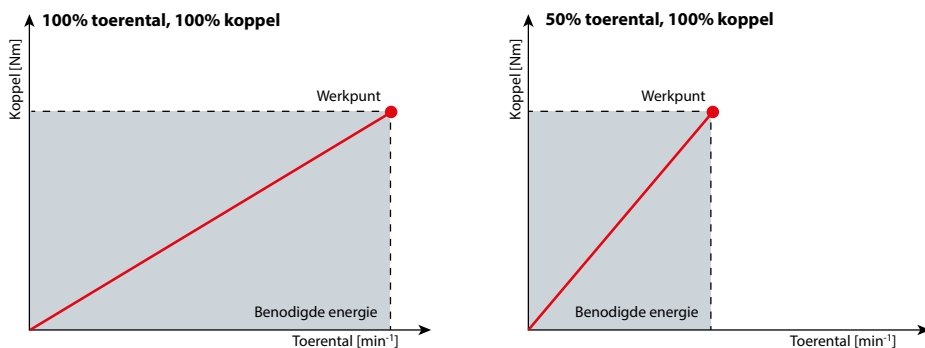


Fig. 5.12 Benodigde energie bij verschillende toerentallen en belastingen

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 met een constante belasting, zoals bij koelcycli, leidt dit onder meer direct tot energiebesparing. Bij andere toepassingen met een constante belasting 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 koppel steeds verder toe, vanwege de voordelen voor het proces zelf.

5.5 Levenscycluskosten

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

De levenscycluskosten van een toepassing kunnen grof worden onderverdeeld in vier delen: de initiële investeringskosten, de kosten van het bedrijf en onderhoud van de toepassing, de kosten van de benodigde energie voor de toepassing en de afvoerkosten aan het einde van de levenscyclus van de toepassing. De verschillende componenten worden getoond in Fig. 5.13.

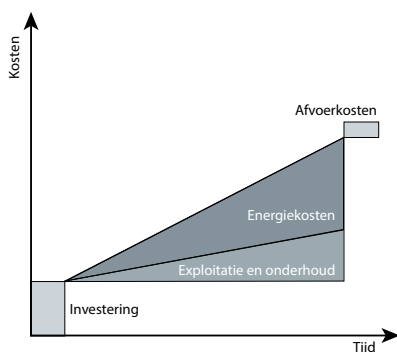


Fig. 5.13 Voorbeeld van de levenscycluskosten van een toepassing

De initiële investeringskosten zijn normaal gesproken slechts ongeveer 10% van de totale levenscycluskosten, terwijl de energiekosten het grootste deel van de totale levenscycluskosten kunnen uitmaken, met name bij toepassingen met een hoog energieverbruik. De hogere initiële kosten van een energiebesparend apparaat worden daarom vaak binnen de kortste tijd terugverdiend.

5.6 Systeembesparingen

Een succesvolle implementatie van het regelaarsysteem is gebaseerd op een grondige planning en nauwkeurige dimensionering van het regelaarsysteem. De daadwerkelijke besparingen worden tijdens de jaren van gebruik gerealiseerd – wanneer de dimensionering en configuratie van het regelaarsysteem optimaal zijn voor het beoogde gebruik. Elke klant heeft een uniek proces, wat betekent dat elk regelaarsysteem even uniek is en moet worden ontworpen in overeenstemming met de vereisten van het proces van de klant.

Ongeacht of het energierendement van een nieuw(e) of een bestaand(e) proces/machine zal worden verbeterd, er moet altijd worden gekeken naar het volledige systeem. 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. 5.14 toont een regelaarsysteem dat een transportband regelt en toont de meeste componenten die in een regelaarsysteem kunnen worden gevonden. Enkele van de componenten zijn optioneel.

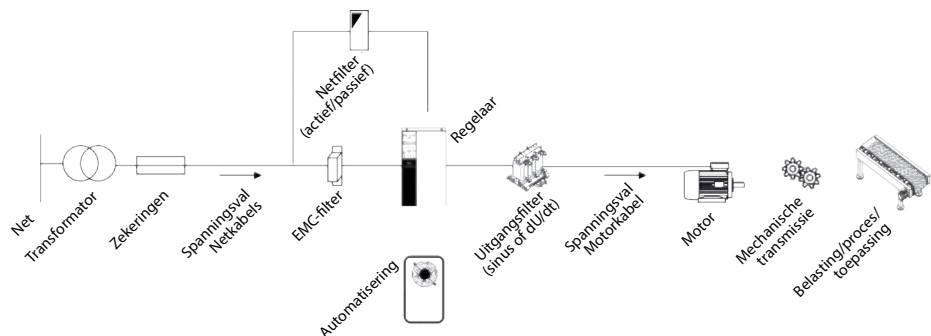


Fig. 5.14 Overzicht van een motorregelaarsysteem met diverse accessoires

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.

Voorbeeld:

Ventilator 1 in Fig. 5.15 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. Omdat de motor als de naaf in de EC-ventilator wordt geplaatst, wordt de luchtstroom echter verstoord en neemt het systeemrendement af. In dit geval leidt het ontwerp van de ventilator tot een lager systeemrendement.

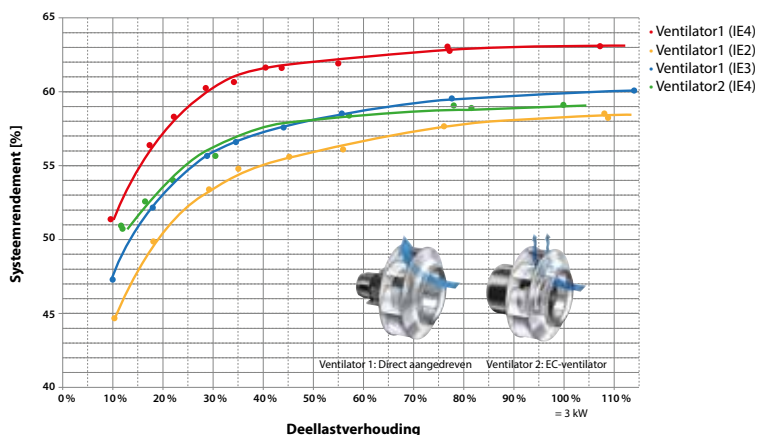


Fig. 5.15 Meting van verschillende ventilatorsystemen met 3 kW overeenkomstig DIN-EN-ISO 5801 in één ventilatie-eenheid

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_o = bedrijfskosten

C_m = onderhoudskosten

C_s = kosten wegens stilstandtijd en verloren productie

C_{env} = milieukosten

C_d = kosten voor uitbedrijfname en afvoer

Een van de belangrijkste factoren in de berekening van de levenscycluskosten wordt gevormd door de energiekosten. Hogere investeringen die het energieverbruik terugdringen, zullen in veel toepassingen een grote impact hebben op de energiekosten op de lange termijn.

5.7 Het gebruik van geregenereerd vermogen

Elektromotoren kunnen in generatormodus werken, wanneer het koppel in de tegenovergestelde richting loopt van het toerental (II- en IV-kwadrantenbedrijf – zie hoofdstuk 4.5).

Dit kan gebeuren wanneer de motor wordt teruggeregeld naar een lager toerental.

In een dergelijke situatie stroomt de energie van de motor naar de frequentieregelaar.

Deze energie moet worden afgevoerd. In de praktijk kan dit op drie manieren worden gedaan:

- de energie terug in het elektriciteitsnet injecteren (regenereren)
- de energie in andere frequentieregelaars gebruiken die samen zijn aangesloten op het DC-circuit (delen van de belasting)
- de energie verbranden in een remweerstand

De keuze voor de juiste oplossing hangt af van diverse factoren. De goedkoopste oplossing is het delen van de belasting, maar of dit kan worden gedaan is afhankelijk van de toepassing en de vraag of meerdere frequentieregelaars voor de toepassing worden gebruikt waarvan sommige aandrijven en sommige genereren. Het gebruik van remweerstand is iets duurder en de energie wordt verspild. In veel situaties, met name bij lager vermogen, is dit acceptabel. Regeneratieve frequentieregelaars (ook wel bekend als Active Front End – AFE, Active Infeed Converters – AIC of vierkwadrantenregelaars) zijn duurder.

Of het gebruik van regeneratieve regelaars rendabel is, hangt af van 3 factoren:

1. Beschikbare energie

De meeste toepassingen produceren tijdens vertragsingsprocessen energie. Deze energie neemt tijdens de toerentalverandering steeds verder af. In theorie staat de geregenereerde energie gelijk aan 100% van het verschil tussen de in het systeem aanwezige energie bij het starten en stoppen 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 – en in het algemeen bij een bedrijf met verticale beweging. 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 door de toepassing vereiste vermogen.

2. Verliezen

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

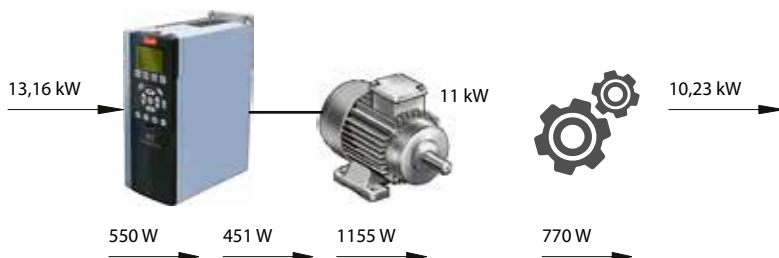


Fig. 5.16 Systeemverliezen bij motorwerking

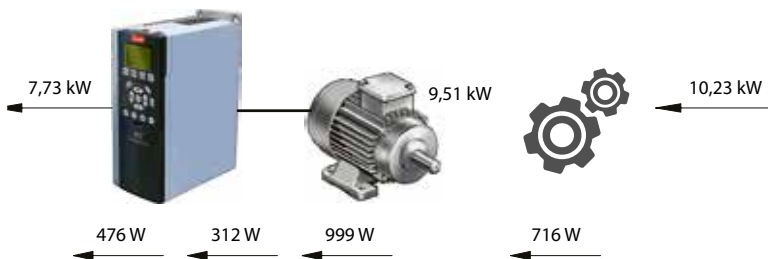


Fig. 5.17 Systeemverliezen bij generatorwerking

De verliezen die door de AFE zelf worden veroorzaakt, zijn hoger dan voor een standaard frequentieregelaar, vanwege de actieve gelijkrichter waarvan de verliezen twee keer zo hoog kunnen zijn, zowel tijdens bedrijf als in stand-by. Om hogere verliezen in het net als gevolg van schakelruis te voorkomen, vereist een AFE bovendien een filter aan de ingangszijde.

3. Praktijksituatie

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 energie gedurende een bepaalde tijd.

5.8 Hybridisatie

Hybridisatie houdt in dat meerdere energiebronnen worden gecombineerd en gebruikt om vermogen te leveren, terwijl het rendement wordt gemaximaliseerd. De achterliggende gedachte ervan is problemen met de vraag naar vermogen op de meest kosteneffectieve en geschikte wijze op te lossen. Dit wordt gedaan door een middel voor energieopslag te introduceren in het systeem, zoals accu's, supercondensatoren, vliegwielen, waterkrachtaccumulatie of perslucht.

Van deze mogelijkheden worden accu's op basis van lithium, zoals lithium-ionaccu's of lithium-polymeeraccu's, het meest gebruikt. Opslag in accu's wordt vaak gekozen voor toepassingen zoals reservecapaciteit, vanwege de mogelijkheid om een lading gedurende een vrij lange periode op te slaan en te gebruiken. De prijzen voor accu's dalen snel, vanwege de groei van de sectoren voor hybride en volledig elektrische auto's, op de voet gevolgd door de markt voor hernieuwbare energie. Dit betekent dat accu's in relatief korte tijd rendabeler en kosteneffectiever zullen worden voor klanten die willen overstappen op hybride systemen voor hun toepassingen.

Energieopslag wordt vaak gezien als randvoorwaarde om hernieuwbare energie te kunnen integreren in de energieopwekking. Door machines en processen uit te rusten met systemen voor energieopslag is het echter ook mogelijk de energiekwaliteit aanzienlijk te verbeteren, en de prestaties en het algehele rendement naar een hoger niveau te brengen. De opslag van energie verbetert de stabiliteit van energieproductiesystemen door pieken in de geproduceerde energie op te vangen, de productie en het verbruik van energie los te koppelen en te zorgen voor reservecapaciteit in noodgevallen.

Ontkoppelen van energieproductie en -verbruik

Wanneer de energieproductie en het energieverbruik op verschillende tijdstippen plaatsvinden, wordt de energie opgeslagen wanneer de prijs van energie op het elektriciteitsnet laag is en wordt de opgeslagen energie geleverd wanneer de prijs op het elektriciteitsnet hoog is.

Peak shaving

Om pieken in de vraag op te vangen wordt de energiestroom tussen de aangevoerde energie en de lokale opslag geoptimaliseerd. Dit wordt ook wel 'peak shaving' of 'piekscheren' genoemd. De overvloedige energie kan worden opgeslagen wanneer de vraag en de prijzen laag zijn.

Reservecapaciteit

Door energie op te slaan kan een reserve worden opgebouwd voor wanneer de stroom uitvalt, zodat de bedrijfsvoering niet wordt onderbroken.

Typische toepassingen waar oplossingen voor hybridisatie worden gebruikt:

- Zonne- en windenergie
- Energieproductie
- Net en onderstations
- Sector maritiem en offshore
- Havens
- Verwerkende industrie
- Utiliteitsgebouwen
- Vervoer
- Civiele techniek & mijnbouw



Fig. 5.18

AC/DC-netconverters en DC/DC-converters worden gebruikt om de energieopslag te verbinden met AC- of DC-netten. Bij een gecentraliseerde energieopslag wordt de energieopslag verbonden met het AC-net met gebruik van een netconverter. De energieopslag kan dan worden gebruikt door alle belastingen die op het AC-net zijn aangesloten. De netconverter wordt gebruikt om de DC-spanning van de energieopslag om te zetten zodat deze aansluit op de spanning en frequentie van het AC-net.

Bij een geïntegreerde energieopslag wordt de energieopslag dichterbij de belasting gebracht en gebruikt om een enkele toepassing te voeden. De energieopslag kan direct worden aangesloten op de DC-tussenkring of de Common DC Bus door middel van een DC/DC-converter. De DC/DC-converter is nodig om de DC-spanning van de energieopslag om te zetten in de DC-spanning van de DC-tussenkring.

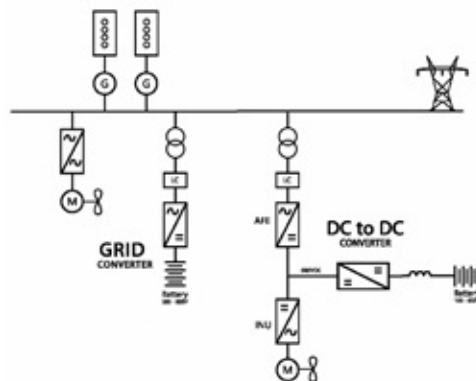


Fig. 5.19 Energieopslag verbonden met het AC-net door middel van een netconverter en met de DC-tussenkring door middel van een DC/DC-converter

5.8.1 Netconverter

De netconverter maakt een bidirectionele omzetting tussen DC-spanning en AC-spanning mogelijk. De converter kan stroom leveren aan het AC-net vanuit de accu of de accu opladen vanuit het AC-net.

De belangrijkste componenten van de netconverter zijn een inverteereenheid, een LC-filter en een transformator. De filter en transformator zijn vereist op het AC-net om de kwaliteit van de AC-spanning te waarborgen bij het leveren van stroom aan het AC-net en om te zorgen voor een optimale spanning om de accu op te laden. De transformator is ook nodig om ervoor te zorgen dat er geen common-modespanning wordt geleverd aan de accu.

De netconverter heeft een zwevende DC-spanning aan de accuzijde. De spanning wordt bepaald door de laadtoestand en belasting van de accu. De accuspanning kan variëren, maar moet zich tussen de minimale en maximale DC-spanning bevinden die de DC-tussenkring van de regelaar aankan.

5.8.2 DC/DC-converter

De DC/DC-converter werkt als bidirectionele spanningsregelaar tussen de accu en de DC-tussenkring of Common DC Bus. Stroom kan worden geleverd van de accu aan de DC-tussenkring of de accu kan worden opgeladen vanuit de DC-tussenkring.

De spanning van de gebruikte accu hoeft niet overeen te komen met de DC-tussenkringspanning. De spanning kan sterk uiteenlopen naargelang de lading en belasting van de accu, maar de maximale spanning van de accu moet iets lager zijn dan de DC-tussenkringspanning.

De DC/DC-converter omvat een inverteereenheid en afzonderlijke reactoren voor elke fase aan de accuzijde. De reactoren beperken de rimpels op de DC-stroom die van de regelaar aan de accu wordt geleverd. De reactoren worden ook gebruikt om het mogelijk te maken stroom van de lagere accuspanning te leveren aan de hogere DC-tussenkringspanning (door middel van verhoging van de DC-spanning).



06

ELEKTROMAGNETISCHE COMPATIBILITEIT

6	Elektromagnetische compatibiliteit	133
6.1	EMI en EMC	133
6.2	EMC en frequentieregelaars	134
6.3	Aarding en afscherming	136
6.4	Installaties met frequentieregelaars	140
6.5	Uitgangsfilters	141
6.1.1	dU/dt-filters	141
6.1.2	Sinusfilter	143
6.1.3	Common-modefilter	144
6.6	Elektrische lagerbelasting	145
6.7	Europese EMC-richtlijn en EMC-normen	149

6 Elektromagnetische compatibiliteit

6.1 EMI en EMC

Elektromagnetische interferentie (EMI) is de aantasting van de prestaties van apparatuur als gevolg van elektromagnetische verstoringen. Een voorbeeld van EMI is de storing op een microfoon wanneer er een telefoon in de buurt is die verbinding maakt met een zendmast om een oproep te verwerken. In dit voorbeeld is de telefoon de interferentiebron en de microfoon het slachtofferapparaat.

Elektromagnetische verstoring kan zich verspreiden 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 frequentieregelaar 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 naar behoren kan 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.

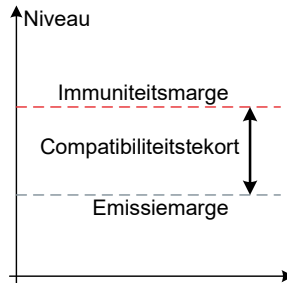


Fig. 6.1 Toelichting op compatibiliteitskloof

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 frequentieregelaars.

Common-mode en differentiële modus

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

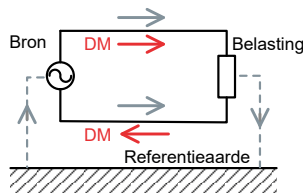


Fig. 6.2 Common-mode en differentiële modus

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

6.2 EMC en frequentieregelaars

Emissie

Frequentieregelaars 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 frequentieregelaars een mogelijke bron van EMI en moet de EMC-correcte installatie nauwlettend worden gevolgd.

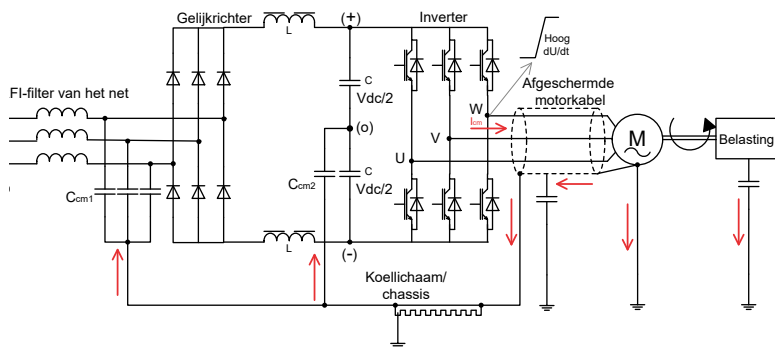


Fig. 6.3 Verspreiding van interferentie in een frequentieregelaar

De bron van de interferentie is de spanningsbroninverter die een pulsformige 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 de motor, wat 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 frequentieregelaar bevinden zich common-modecondensatoren – dat wil zeggen, condensatoren tussen het circuit van de frequentieregelaar 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 uiteinde van de frequentieregelaar is aangesloten op het chassis van de regelaar, 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 motorkabels vloeit slechts een deel van de common-modestroom terug via het chassis van de frequentieregelaar en common-modecondensatoren, waardoor meer interferentie op het net wordt veroorzaakt.

Immunititeit

In een frequentieregelaar-toepassing moet rekening worden gehouden met zowel immunititeit als emissie van verstoringen. De op een frequentieregelaar aangesloten stuursignalen kunnen erg gevoelig zijn voor verstoringen. 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 verstoringen.

6.3 Aarding en afscherming

Aarding

Aarding is het aansluiten van elektrische apparatuur op een referentiemassa. De twee hoofdredenen om dit te doen zijn:

- Elektrische veiligheid: veiligheidsaarding zorgt ervoor dat er in geval van aantasting van de elektrische isolatie geen spanning staat op spanningvoerende delen die kunnen worden aangeraakt door personen, zodat het risico op elektrische schokken wordt vermeden.
- Beperkte interferentie: signaalaarding vermindert spanningsverschillen die emissie van storende signalen of gevoeligheidsproblemen kunnen veroorzaken.

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

Er zijn diverse typen aarding gangbaar.

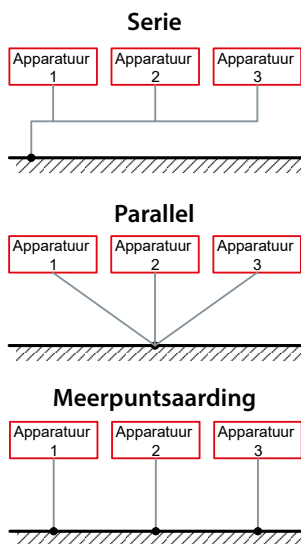


Fig. 6.4 Eenpuntsaarding, in serie of parallel, of meerpuntsaarding is mogelijk

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 frequentieregelaar-toepassingen worden afgeschermd kabels gebruikt voor zowel vermogen (motorkabel en remweerstandkabel) als signalen (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:

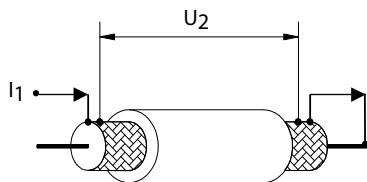


Fig. 6.5 Illustratie van overdrachtsimpedantie

$$Z_T = \frac{U_2}{I_1 \times L}, \text{ waarbij } L \text{ de kabellengte is}$$

Hoe lager de overdrachtsimpedantiewaarde, hoe beter de afschermingsprestaties. Onderstaand figuur 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.

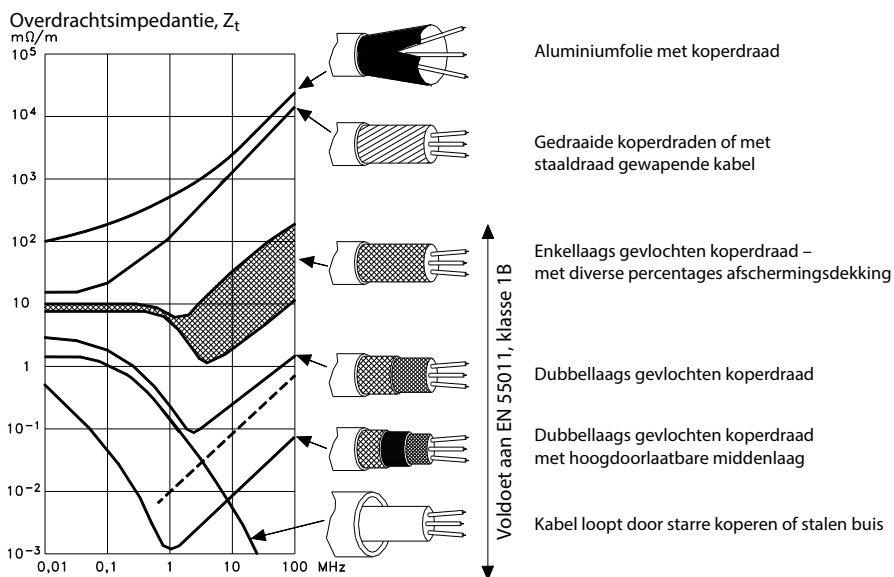


Fig. 6.6 Afschermingsprestaties van verschillenden typen kabels

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.

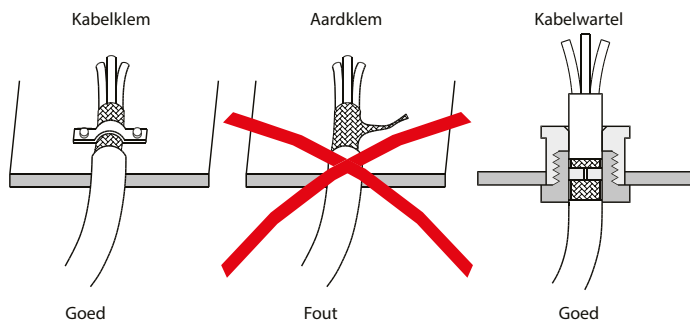
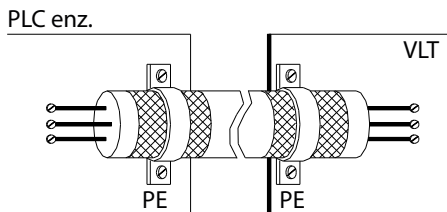


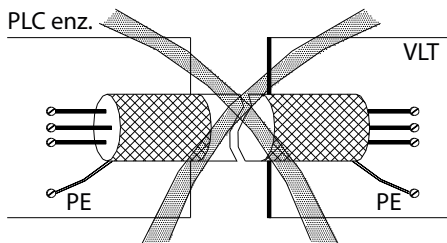
Fig. 6.7 Installatie van kabelafscherming

Vaak wordt de vraag gesteld of de afscherming van 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 de afscherming slechts aan één uiteinde wordt aangesloten. Het is zeer belangrijk om beide uiteinden van de motorkabel correct aan te sluiten, omdat er anders interferentieproblemen kunnen optreden.

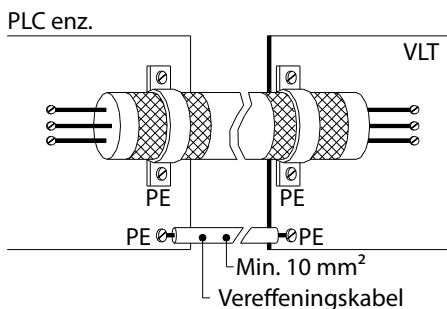
De reden dat in sommige situaties de afscherming slechts aan één uiteinde wordt aangesloten, heeft te maken met aardlussen in signaalkabels. Dit betekent dat er een verschil in spanningspotentiaal bestaat tussen de chassis van twee apparaten die met elkaar zijn verbonden (zoals frequentieregelaar en 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 de afscherming aan een 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.



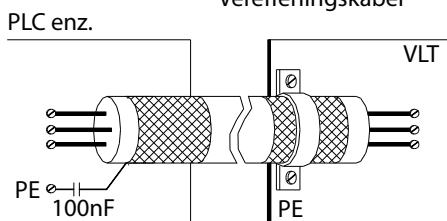
Stuurkabels en kabels voor seriële communicatie moeten gewoonlijk aan beide uiteinden worden geaard.



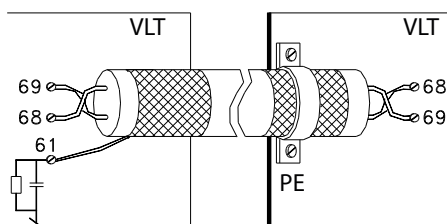
Sluit de afscherming nooit aan via pigtails.



Aardpotentiaal tussen PLC en regelaar:
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 regelaars:
=> Sluit één uiteinde van de afscherming aan op de speciale afschermingsaansluitklem met RC-ontkoppeling. Let op de 'correcte' pigtailinstallatie!

Fig. 6.8 Aarding van kabelafscherming

6.4 Installaties met frequentieregelaars

Het is belangrijk om bij het installeren van frequentieregelaars goede technische werkpraktijken 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 bronnen van verstoringen en potentieel gevoelige apparatuur
- Classificeer de kabels waarmee de apparatuur wordt aangesloten (potentieel veroorzaker van verstoringen of potentieel gevoelig)
- Bepaal de vereisten en selecteer de apparatuur
- Scheid potentiële bronnen van verstoring van potentieel gevoelige apparatuur
- Regel de interfaces bronnen van verstoring en gevoelige apparatuur
- Leg kabels aan overeenkomstig de classificatie

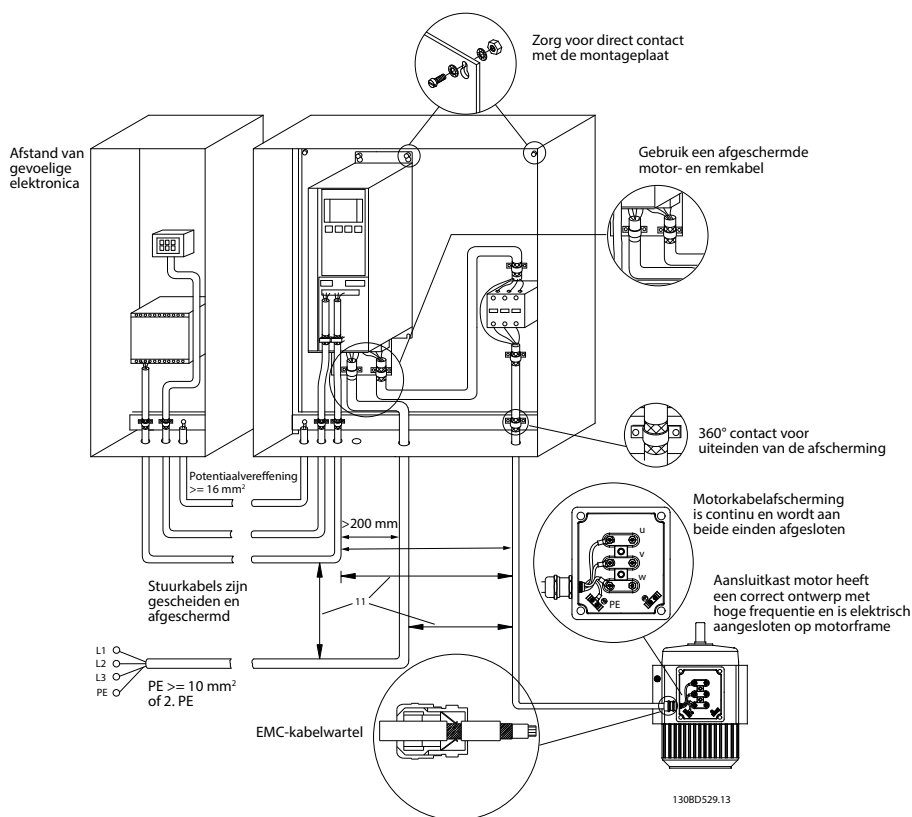


Fig. 6.9 Typische maatregelen in de praktijk in een eenvoudige frequentieregelaarinstallatie

6.5 Uitgangsfilters

Regelaars met variabel toerental veroorzaken vanwege hun werkingsprincipe een reeks ongewenste neveneffecten, zoals: isolatiespanning bij de motorwikkelingen, lagerbelasting, akoestisch geluid in de motor en elektromagnetische interferentie. In de meeste toepassingen hebben deze effecten een aanvaardbaar niveau – maar in sommige gevallen moeten deze effecten worden beperkt. Om deze effecten te beperken, worden filters geïnstalleerd bij de uitgang van de regelaars. De bekendste filters zijn dU/dt -filters, sinusfilters en common-modefilters.

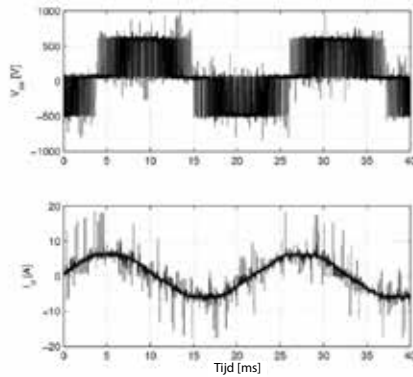


Fig. 6.10 Motorklemspanning en stroom zonder uitgangsfilters

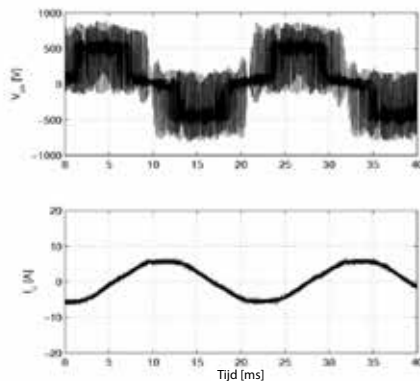


Fig. 6.11 Motorklemspanning en stroom met dU/dt -filters

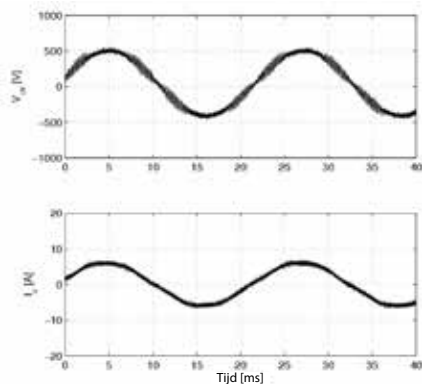


Fig. 6.12 Motorklemspanning en stroom met sinusfilters

6.1.1 dU/dt-filters

dU/dt-filters kunnen diverse circuitconfiguraties hebben, maar zijn doorgaans LC-filters (soms met dempingsweerstand), met een afkapfrequentie die hoger is dan de schakelfrequentie van de regelaar.

Zoals hun naam doet vermoeden, beperken dU/dt-filters de flanksteilheid van de spanningspulsen bij de uitgang van de regelaar tot niveaus die normaal gesproken lager zijn dan 500 V/ μ s. Dit beperkt de spanning van de isolatie van de motorwikkeling. De spanningvorm blijft pulsbreedtegemoduleerd.

In verschillende normen zijn grenzen vastgesteld voor de stijgtijd en piekspanningswaarden bij de motorklemmen. De definitie van stijgtijd verschilt enigszins tussen de internationale IEC-normen en de Amerikaanse NEMA-aanbeveling, zoals getoond in de onderstaande afbeelding.

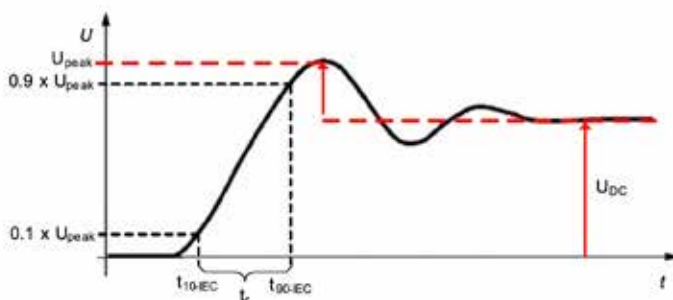


Fig. 6.13 Internationale IEC-definitie van stijgtijd en piekspanning

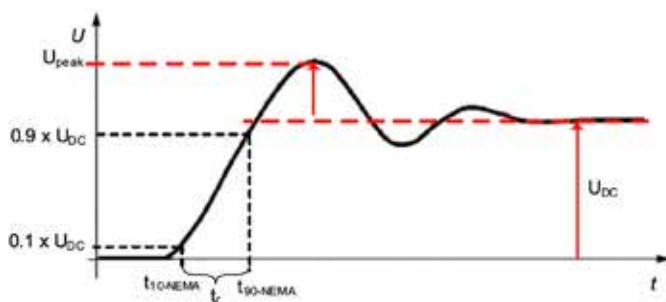


Fig. 6.14 NEMA-definitie van stijgtijd en piekspanning

De dU/dt-filters vergroten de stijgtijd en helpen voldoen aan de desbetreffende norm. In de onderstaande grafiek is een voorbeeld te zien:

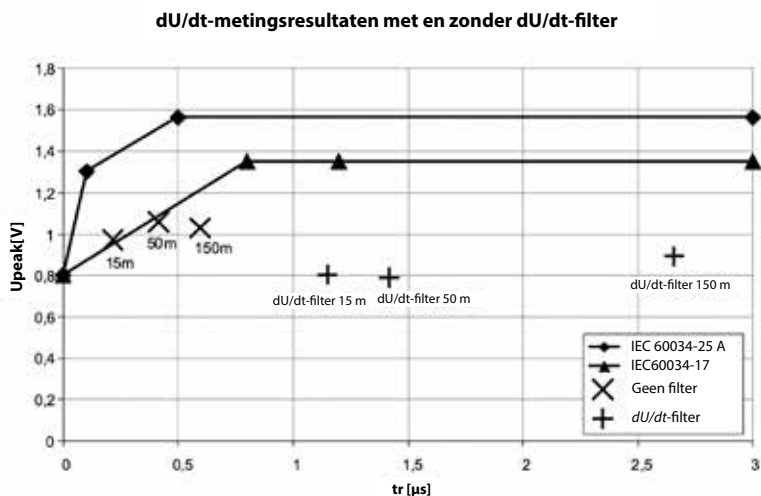


Fig. 6.15

dU/dt-filters worden aanbevolen voor toepassingen met oude motoren met een slechte isolatie of voor toepassingen waarbij de voedingsspanning 690 V bedraagt. In toepassingen met korte motorkabels kunnen dU/dt-filters worden gebruikt om de dU/dt te beperken. In toepassingen met lange motorkabels zijn dU/dt-filters echter niet langer nuttig, omdat de kabel zelf als filter werkt en het dU/dt-niveau bij de motorklemmen beperkt.

6.1.2 Sinusfilter

Een sinusfilter is een LC-laagdoorlaatfilter waarvan de afkapfrequentie, in tegenstelling tot die van een dU/dt-filter, alle hoogfrequente componenten van de uitgangsspanning van de frequentieregelaar moet elimineren. Het produceert een bijna perfect sinusvormige spanningsvorm.

Met een sinusfilter komt de spanningsbelasting op de motor overeen met de spanningsbelasting die bestaat bij een normaal netbedrijf (DOL) met een voedingsbron met dezelfde spanning. Een sinusfilter is met name geschikt voor oude motoren die niet zijn ontworpen om te worden gebruikt met frequentieregelaars.

Een sinusfilter elimineert lagerstromen en spanningsreflecties en beperkt bovendien de geluidsniveaus van een motor. Als een uitgangstransformator wordt gebruikt, elimineert het sinusfilter de hoogfrequentiecomponenten die de transformator kunnen belasten. Het sinusfilter maakt ook het gebruik van veel langere motorkabels mogelijk. Sinusfilters zijn veel duurder dan dU/dt -filters. Dit is het geval omdat de gewenste frequentiekenmerken het gebruik van meer inductantie en capaciteit vereisen. Het sinusfilter veroorzaakt normaal gesproken een spanningsdaling van 7-10%. Daardoor kan het nodig zijn om de uitgangsspanning van de frequentieregelaar te verhogen. Wanneer het wordt gebruikt in het veldverzwakkingsbereik, daalt het kippoppel bovendien sneller (dan zonder sinusfilter).

6.1.3 Common-modefilter

Common-modefilters worden gebruikt om de lager- en aardstromen te beperken, maar voorzien niet in een wezenlijke dU/dt -filtering.

Hoogfrequente-common-modefiltering kan tot stand worden gebracht met gebruik van toroïde kernen van nanokristallijn materiaal om te zorgen voor een hogere inductantie. Een kabel die een stroom voert, wordt omringd door een magnetisch veld. Het effect van het ferriet is dat dit veld wordt geconcentreerd en daarmee de inductantie van de kabel enkele honderden keren wordt verhoogd.

Als een ferriet op een kabel wordt geplaatst die alle drie fasen omvat, heeft het geen effect op de differentiële-modusstroom, maar zal het de impedantie van de common-modestromen verhogen. Dit gebeurt omdat de differentiële stromen per definitie samen nul zijn en er daarom geen netto magnetisch veld is. De common-modestromen produceren een netto magnetische flux en deze flux is geconcentreerd in de massa van het ferriet, wat resulteert in een verhoogde impedantie voor uitsluitend common-modestromen.

Dit is ook waarom alleen fasegeleiders door de ringen worden geschoven. De PE-geleider moet worden gescheiden. Alle ferrieten zijn geleidend. Het is daarom belangrijk dat kabels die door deze ferrieten lopen voldoende zijn geïsoleerd. Het common-modefilter mag bovendien alleen direct na de uitgang van de regelaar worden geïnstalleerd, voor eventuele andere uitgangsfilters.

6.6 Elektrische lagerbelasting

Wanneer de motor met normaal toerental draait, isoleren de lagers de stator van de rotor. Dit gebeurt omdat een dunne laag smeermiddel tussen de loopvlakken van de lagers en de kogels van de lagers komt. De dikte van de isolerende laag smeermiddel bevindt zich in het bereik van 0,5 μm , waardoor een spanning van slechts 10 V ertoe kan leiden dat de isolatie niet meer werkt en een elektrische ontlading plaatsvindt. Wanneer een ontlading plaatsvindt, smelt het metaal van de loopvlakken en kogels van de lagers, waardoor een microscopisch putje ontstaat. Het ontstaan van steeds meer putten na verloop van tijd wordt vonkerosie genoemd en dit proces van aantasting van het metaal van de lagers wordt vonkerosie of vonkverspanen genoemd (electrical discharge machining – EDM).

Hoewel EDM al bijna een eeuw bekend is (reeds eind jaren 20 werd dit fenomeen besproken in wetenschappelijke publicaties), lijkt het zich steeds meer voor te doen als gevolg van een toegenomen gebruik van regelaars met variabel toerental. Hoewel enkele oorzaken verband houden met mechanische factoren (motor niet ontworpen voor werking met variabel toerental, ontoereikende koeling bij lagere toerentallen, verlengde werking bij laag toerental enz.), is de belangrijkste oorzaak van EDM de hogere motorasspanning bij gebruik van een regelaar met variabel toerental.

De onderliggende oorzaak van asspanning is de hoge schakelsnelheid van de uitgangsspanning van de regelaar (ook wel bekend als dU/dt), in combinatie met de inherente common-mode-spanning die door de eindtrap van de regelaar (inverter) wordt geproduceerd. Andere factoren die leiden tot asspanning zijn onafhankelijk van het gebruik van regelaars, zoals asymmetrieën in de motor, het gebruik van asymmetrische motorkabels – met name in hoogvermogen toepassingen waarbij de motorstroom hoger is dan 100-200 A.

Er zijn verschillende mechanismen die de spanning naar de motoras koppelen:

- Capacitieve koppeling – veroorzaakt door de capacitieve koppeling van de common-mode-spanning en de hoge dU/dt tussen statorwikkeling en rotor
- Inductieve koppeling – veroorzaakt door de magnetische koppeling van circulerende stromen tussen circulerende stromen van de stator en circulerende stromen van de rotor.

Wat te doen bij lagerschade?

Wanneer lagerschade optreedt, duidt het verschijnen van een golfpatroon op het lager vaak op de aanwezigheid van elektrische lagerbelasting. Als het lager wordt geanalyseerd met een elektronenmicroscop worden de putten zichtbaar die zijn veroorzaakt door elektrische ontlading.

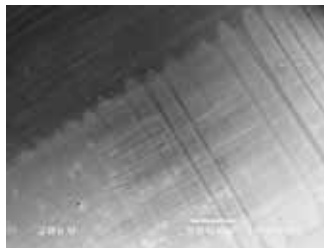


Fig. 6.16 Golfpatroon op het loopvlak van het lager duidt vaak op de aanwezigheid van elektrische lagerbelasting

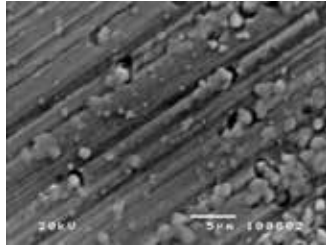


Fig. 6.17 Foto van een elektronenmicroscop van de putten op de lager

Voordat corrigerende maatregelen worden genomen, moet de onderliggende oorzaak van de lagerschade worden vastgesteld. De analyse van het lager bestaat uit een visuele inspectie, het maken van foto's met een elektronenmicroscop en een chemische analyse van het smeermiddel.

Lagerschade kan mechanische en elektrische onderliggende oorzaken hebben. Mechanische onderliggende oorzaken komen het vaakst voor, maar worden vaak onjuist aangepakt doordat zij als elektrische fouten worden beschouwd. Wanneer de onderliggende oorzaak mechanisch is, zullen elektrische ontladingen de slijtage versnellen. In dergelijke gevallen zal het beperken van de elektrische belasting de levensduur verlengen, maar de onderliggende oorzaak niet wegnemen. Mechanische onderliggende oorzaken moeten eerst mechanisch worden beperkt.

De volgende foto's (die zijn gemaakt met een elektronenmicroscop) tonen voorbeelden van lagers die schade hebben opgelopen. Op de eerste foto is een lager te zien dat elektrisch is belast – in dit geval is een elektrische maatregel nodig. Op de tweede foto is een lager te zien dat mechanisch is belast als gevolg van een onjuiste axiale belasting. De parallelle sleuven in het metaal zijn veroorzaakt door de onjuiste belasting. Bij de sleuven zijn echter putten te zien – een teken dat de schade in eerste instantie mechanisch was, maar werd verergerd door elektrische belasting.

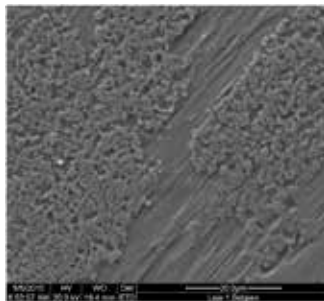


Fig. 6.18 Lager dat elektrisch is belast

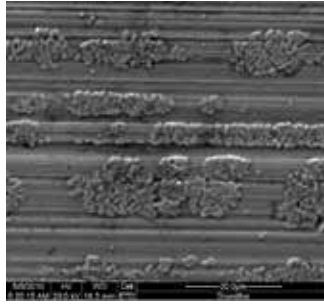


Fig. 6.19 Lager dat mechanisch is belast door middel van axiale belasting en daaropvolgende elektrische belasting

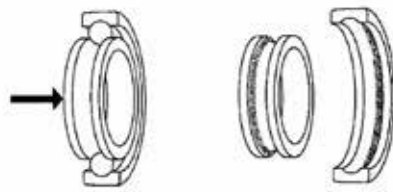


Fig. 6.20 Axiale belasting van een lager

Mechanische mitigatiemaatregelen

- Zorg dat de motor en de belasting correct zijn uitgelijnd
- Zorg dat de mechanische belasting van het lager (radiaal en axiaal) zich binnen de specificaties bevindt
- Controleer het trillingsniveau
- Controleer de smering van het lager en zorg dat het lager correct is gesmeerd voor de bedrijfsomstandigheden

Elektrische mitigatiemaatregelen

- Voorzie in een retourpad met lage impedantie voor de stromen met hoge frequentie
- Volg de EMC-installatieregels strikt op, bijvoorbeeld door een afgeschermd kabel te gebruiken tussen de regelaar en de motor en de afscherming aan beide zijden aan te sluiten met een passende aansluiting voor hoge frequentie.
- Zorg dat de motor correct is geaard en dat de aarding een lage impedantie heeft voor stromen met hoge frequentie
- Voorzie in een goede hogefrequentie-aarding tussen het motorchassis en de lading
- Het is mogelijk om asaardingsborstels te gebruiken om de asspanning te elimineren
- Gebruik symmetrische motorkabels, met name voor hoogvermogenstoepassingen waarbij de motorstroom hoger is dan 100-200 A
- Gebruik common-modefilters voor het beperken van de stromen met hoge frequentie tussen de frequentieregelaar en de motoren

Common-modefilters voor hoge frequentie zijn een goede oplossing voor het beperken van elektrische lagerbelasting, maar het gebruik van dergelijke filters maakt een EMC-correcte installatie niet overbodig.

Common-modefilters voor hoge frequentie bestaan uit magnetische kernen die zijn gebouwd met gebruik van zeer permeabel magnetisch materiaal (nanokristallijne kern). De drie motorfasen lopen door de kernen – het is absoluut noodzakelijk om de juiste montage-instructies op te volgen. Wanneer niet alle motorfasen door de kernen lopen, leidt dit tot verzadiging van de kernen en wanneer de fasen ook door de afscherming van de kabel lopen, worden de kernen ineffectief.

De common-mode filters kunnen bij de klemmen van de regelaar of in de klemmenkast van de motor worden geïnstalleerd. Wanneer zij worden geïnstalleerd bij de klemmen van de regelaar, beperken de kernen ook de hoogfrequente verstoring in de motorkabel. Het nadeel van een installatie bij de klemmen van de regelaar is dat de capacatieve stromen door de lange motorkabel de kernen kunnen verzadigen. De montage van de kernen in het klemmenkast van de motor neemt het risico op kernverzadiging weg. In dit geval wordt de elektromagnetische verstoring van de motorkabel echter niet beperkt.



Fig. 6.21 Common-mode-kernen geïnstalleerd bij de klemmen van de regelaar



Fig. 6.22 Common-mode-kernen geïnstalleerd in de klemmenkast van de motor

6.7 Europese EMC-richtlijn en EMC-normen

Europese EMC-richtlijn

De meest recente EMC-richtlijn is 2014/30/EU, die op 20 april 2016 in werking trad en die de vorige richtlijn, 2004/108/EG, vervangt. 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. Op frequentieregelaars is de norm EN-IEC 61800-3 van toepassing

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

Omgeving	EN/IEC 61800-3	EN 55011	EN 61000
	Productnorm	Milieunorm	Algemene norm
1. Omgeving Woonhuizen, handel en lichte industrie	Cat. C1	Klasse B	EN 61000-6-3
	of cat. C2 (beperkt gebruik)	-	-
2. Milieu Industrieel	Cat. C2	Klasse A, groep 1	EN 61000-6-4
	Cat. C3	- (<20 kVA)	-
	Cat. C3 (I > 100 A)	Klasse A, groep 1, elektronische apparatuur met hoog vermogen met 20-75 kVA	-
	Cat. C3 (I > 100 A)	Klasse A, groep 1, elektronische apparatuur met hoog vermogen met >75 kVA	-
	Cat. C4 Geen emissiegrenzen (stel een EMC-plan op)	-	-

Tabel 6.1 EMC-emissienormen voor regelaars



07

BEVEILIGING TEGEN ELEKTRISCHE SCHOKKEN EN ENERGIEGEVAREN

7	Beveiliging tegen elektrische schokken en energiegevaren.....	153
7.1	Algemeen.....	153
7.2	Netvoedingssysteem.....	154
7.3	DC-voedingssystemen.....	157
7.4	Aardfoutbeveiliging.....	158
7.5	Zekeringen en circuitbreakers.....	160
7.6	DC-beveiliging voor Common DC Bus-systemen.....	162

7 Beveiliging tegen elektrische schokken en energiegevaaren

7.1 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 te nemen, in combinatie met foutanalyse en een schatting van het resterende risico.

Aandachtspunten voor het waarborgen van de veiligheid van frequentieregelaars bij installatie, normale bedrijfscondities en onderhoud moeten worden meegenomen bij het ontwerpen en bouwen van de frequentieregelaar. Er moet ook aandacht worden besteed aan het minimaliseren van gevaren die voortvloeien uit een redelijkerwijs te voorzien verkeerd gebruik van de frequentieregelaar 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 frequentieregelaars 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 frequentieregelaars. Dit moet ervoor zorgen dat er geen gevaarlijke spanning (bijv. netspanning, DC-spanning en motorspanning) op de stuuraansluitingen kan komen te staan. Dit zou de aanraking van de stuuraansluitingen potentieel dodelijk maken en bovendien leiden tot een risico op schade aan de apparatuur.

De internationale/Europese norm IEC/EN61800-5-1 gaat uitgebreid in op de vereiste voor beveiliging tegen elektrische schokken en voor beveiliging tegen andere gevaren die gelden voor frequentieregelaars.

De behuizing van de frequentieregelaar biedt bescherming tegen letsel of schade door aanraking. Een beschermingsklasse 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 brandgevaaren

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

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

Noodstop

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

7.2 Netvoedingssystemen

Er zijn verschillende manieren om de netvoedingssystemen te aarden, elk met zijn eigen voor- en nadelen. De keuze kan gevolgen hebben voor de veiligheid en de elektromagnetische compatibiliteit van de installatie. IEC 60364 onderscheidt drie hoofdaardingssystemen:

TN, TT en IT

De eerste letter geeft de verbinding tussen de voedingsapparatuur en aarde weer:

- T – Terra (lat.) = directe verbinding met aarde
- I – Isolated (geïsoleerd) = geen verbinding met aarde/zwevend

De tweede letter geeft de verbinding tussen het geleverde apparaat en de aarde/het netwerk weer:

- T – Terra (lat.) = directe verbinding met aarde
- N – Nulgeleider = rechtstreeks verbonden met de nulgeleider/PE

TN-S-systeem

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-geleider geen effecten op de spanningspotentiaal van de PE-geleider. Dit is het voorkeurssysteem voor frequentieregelaartoepassingen.

Het voordeel van TN-systemen is dat de lage impedantie van de aardeverbinding een gemakkelijke automatische loskoppeling mogelijk maakt in het geval van een kortsluiting van lijn naar PE, omdat dezelfde onderbreker of zekering werkt voor L-N of L-PE-fouten en geen RCD nodig is om aardfouten te detecteren.

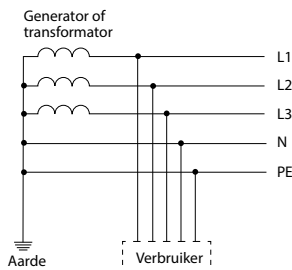


Fig. 7.1 TN-S-systeem: afzonderlijke nul- en PE-geleiders

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 spanningspotentiaal 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 frequentieregelaars, kunnen de optredende hoogfrequente stromen storingen veroorzaken. Hoewel frequentieregelaars 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.

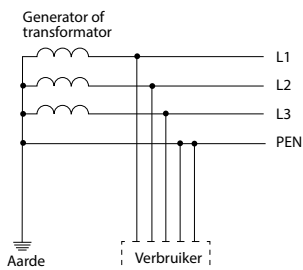


Fig. 7.2 TN-C-systeem: in het gehele systeem zijn de nulgeleider en de PE-geleider gecombineerd in de PEN-geleider

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.

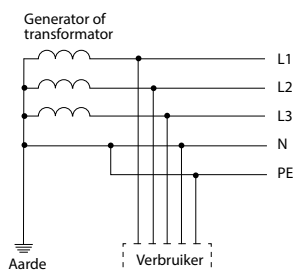


Fig. 7.3 TN-C-S-systeem: van de transformator tot het verdeelpunt van het gebouw zijn PE en N gemeenschappelijk (PEN), in het gebouw zijn PE en N van elkaar gescheiden

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 en dat het aardingssysteem vrij is van hoog- en laagfrequente verstoringen. Vanuit EMC-oogpunt is dit het ideale systeem. Daarom wordt altijd de voorkeur gegeven aan TT voor speciale toepassingen zoals telecommunicatielocaties die profiteren van een aarding zonder interferentie. Het TT-systeem brengt bovendien geen risico op een gebroken nulgeleider met zich mee.

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 stroomverbruiker 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).

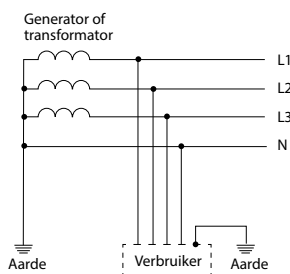


Fig. 7.4 TT-systeem: Gearde nulgeleider en afzonderlijke aarding van apparatuur/installatie

IT-systeem

Het IT-netwerk is een specifiek type netwerk dat in de industrie en speciale omgevingen zoals schepen en ziekenhuizen wordt gebruikt. 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 onderhoud worden uitgevoerd.

Het nadeel van dit systeem is gelegen in de slechte EMC-prestaties. Elke verstoring in het aardingssysteem zal namelijk in het gehele systeem merkbaar zijn, wat mogelijk tot storingen in elektronische apparatuur zal leiden. Wanneer frequentieregelaars 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 om aardstromen te voorkomen die de systemen voor de bewaking van aardfouten van het netwerk zouden verstoren. Als gevolg hiervan worden geleide emissies niet gefilterd en treedt er op het IT-net veel hoogfrequente verstoring op.

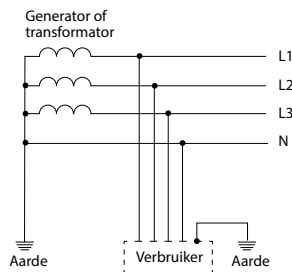


Fig. 7.5 IT-systeem: geïsoleerd net; de nulgeleider kan geaard zijn via een impedantie of ongeaard zijn

Hoekgeaard netwerk

Een hoekgeaard netwerk is een systeem waarbij één hoek van het in driehoek aangesloten secundaire deel van de transformator geaard is. Het gebruik van dit netwerk is afgenomen en het wordt zelden gebruikt in moderne installaties. Een van de redenen voor de afname is de populariteit van driehoek-stertransformatoren in plaats van driehoek-driehoektransformatoren in vermogenstransmissiesystemen.

Het aarden van één fase stabiliseert de spanning van de andere fasen ten opzichte van de aarde. De fase-naar-fasespanning in het systeem is gelijk aan de fase-naar-aardespanning van de ongeaarde fasen.

Bij het werken met een hoekgeaard systeem moet altijd worden gewaarborgd dat de regelaar geschikt is voor het gebruik in het specifieke netwerk, omdat hoekgeaarde netwerken verschillende spanningsniveaus hebben.

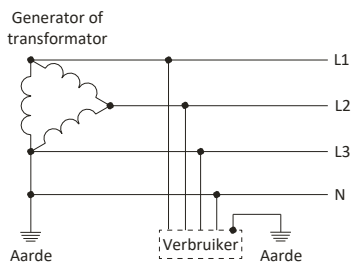


Fig. 7.6 Hoekgeaard systeem

7.3 DC-voedingssystemen

De norm IEC 60364-1 definieert de DC-distributiesystemen op soortgelijke wijze als de AC-distributiesystemen:

TN-S-systeem

De polariteit of het middelpunt van de voeding wordt direct geaard. De blootgestelde geleidende delen zijn verbonden met hetzelfde geaarde punt. In het gehele systeem wordt een afzonderlijke beschermende geleider gebruikt. De geaarde lijngeleider of geaarde middendraadgeleider worden gescheiden van de beschermende geleider.

TN-C-systeem

De polariteit of het middelpunt van de voeding wordt direct geaard. De blootgestelde geleidende delen zijn verbonden met hetzelfde geaarde punt. De functies van de geaarde lijngeleider (of de geaarde middendraadgeleider) en beschermende geleider worden in het gehele systeem gecombineerd in één enkele PEN-geleider.

TN-C-S-systeem

De polariteit of het middelpunt van de voeding wordt direct geaard. De blootgestelde geleidende delen zijn verbonden met hetzelfde geaarde punt. De functies van de geaarde lijngeleider (of de geaarde middendraadgeleider) en beschermende geleider worden in delen van het systeem gecombineerd in één enkele PEN-geleider.

TT-systeem

Een polariteit van het systeem en de blootgestelde geleidende delen worden verbonden met twee elektrisch gescheiden geaarde opstellingen. Indien nodig kan het middelpunt van de voeding worden verbonden met aarde.

IT-systeem

De voedingsbron is niet geaard. De blootgestelde geleidende delen zijn verbonden met hetzelfde aardingspunt.

7.4 Aardfoutbeveiliging

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 relaisinductor aan te sluiten tussen de aardklem van de frequentieregelaar en het aardingspunt van het systeem. Bij een foutspanning valt het relais af en wordt de netvoeding naar de frequentieregelaar 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 frequentieregelaar lopen door deze transformator. De somstroomtransformator detecteert de som van de stromen door deze geleiders.

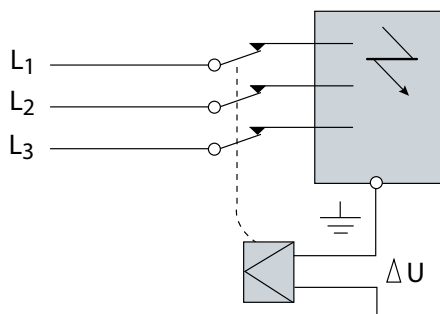


Fig. 7.7 Foutspanningsrelais

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 frequentieregelaar. Conventionele RCCB's maken gebruik van inductieve detectie en zijn daarom alleen geschikt voor het detecteren van AC-stromen.

Bij frequentieregelaars met B6-ingangsbruggelijkrichters kan er bij een fout een zuivere DC-stroom in de voedingskabel gaan lopen. Het wordt aanbevolen om te controleren of er op de ingang van de frequentieregelaar een DC-stroom 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.

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 lekstroom echter oplopen tot het uitschakelniveau van de RCD.

De componenten voor onderdrukking van interferentie die in combinatie met frequentieregelaars 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 DC-stromen (halve golf pos. en neg.)
	Aangesneden sinus Hellingshoek $\frac{90^\circ \text{ el.}}{135^\circ \text{ el.}}$
	Halve periode bij overlapping van een vlakke foutgelijkstroom van 6 mA
	Vlakke DC-stroomfouten

Fig. 7.8 Golfvormen en aanduidingen van reststromen

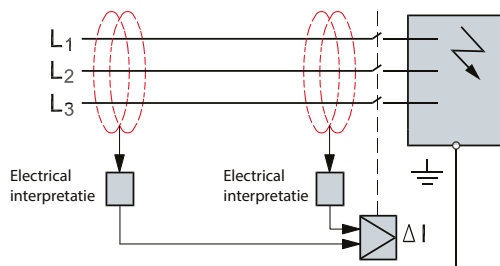


Fig. 7.9 Universele aardlekschakelaar

7.5 Zekeringen en circuitbreakers

Om frequentieregelaars 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.

Zekeringen

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. 7.10 Tijd-stroomkarakteristieken van zekeringen:

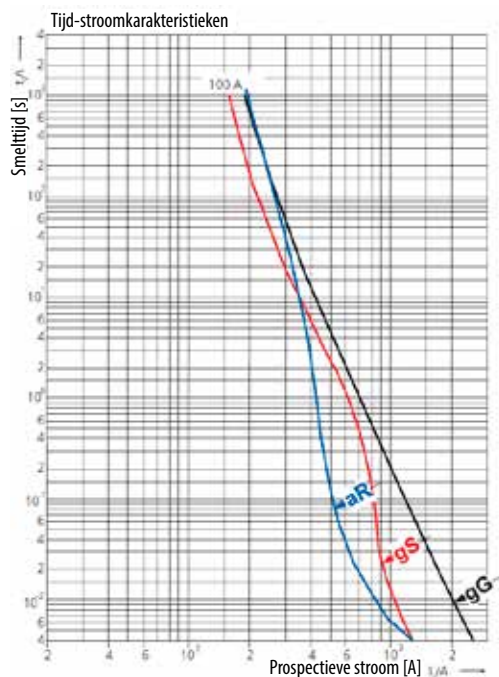


Fig. 7.10 Tijd-stroomkarakteristieken van zekeringen

Er zijn verschillende gestandaardiseerde tijd-stroomkarakteristieken afhankelijk van de beoogde toepassing. Voor de beveiliging van frequentieregelaars 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 frequentieregelaar te raadplegen en de vermelde aanbevelingen strikt op te volgen, aangezien de aanbevolen zekeringen samen met de frequentieregelaar 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 frequentieregelaars zijn zodanig ontworpen dat ze kunnen worden beveiligd met circuitbreakers. Tijdens de ontwerpfase van frequentieregelaars worden speciale afwegingen gemaakt om de schade bij uitval van een interne component van de frequentieregelaar te beperken. Dergelijke maatregelen zijn bijvoorbeeld speciale interne mechanische voorzieningen in de behuizing, het gebruik van afschermingen, het gebruik van deflectiefolies en dergelijke, om de gevolgen van interne storingen te beperken.

In het hoofdstroomcircuit en het hulpcircuit van een frequentieregelaar kunnen verschillende typen circuitbreakers worden gebruikt:

- Luchtvaartcircuitbreakers (ACB - air circuit breakers) kunnen hoge spanningen en stromen onderbreken (doorgaans tot 6 kA). Een typische toepassing voor een luchtvaartcircuitbreaker is als belangrijkste breaker van een schakelkast, omdat deze bij kortsluiting een hoge stroom kan afschakelen. De dimensionering is gebaseerd op de capaciteit van de busbars en daarmee het vermogen van de volledige schakelkast. Wanneer een ACB wordt gebruikt met een frequentieregelaar moet het regelaarsysteem een apparaat omvatten dat het vermogen van elke regelaar snel onderbreekt in het geval van kortsluiting. Normaal gesproken wordt hiervoor een ultrasnelle zekering gebruikt, omdat een ACB niet snel genoeg is.
- Circuitbreakers met gegoten behuizing (MCCB's - molded-case circuit breakers) kunnen alleen lagere spanningen en stromen onderbreken (doorgaans tot 1 kA) en worden gebruikt in kleinere toepassingen. De kortsluitingscapaciteit kan ook een beperkende factor zijn wanneer de MCCB wordt gebruikt als de hoofdschakelaar van schakelkasten. Typische toepassingen zijn onder meer als beveiliging tegen overbelasting en kortsluiting van frequentieregelaars of als hoofdschakelaar van compacte schakelkasten. Sommige MCCB's werken snel en vereisen daarom geen ultrasnelle zekeringen wanneer slechts één regelaar wordt gevoed door de MCCB.
- Minicircuitbreakers (MCB) kunnen worden gebruikt om elektrische circuits met laag vermogen (nominale stroom tot 100 A) te beschermen. Over het algemeen kunnen de breakers worden gebruikt als beveiliging tegen overbelasting en kortsluiting, voornamelijk in hoofdcircuits met laag vermogen en hulp- en stuurcircuits. Het uitschakelniveau (trip) van een MCB kan normaal gesproken niet worden aangepast, maar is vast ingesteld voor elke breaker. De afschakelbare kortsluitstroom bedraagt doorgaans tot 6 kA.

Het is essentieel om de aanbevelingen in de documentatie van de specifieke frequentieregelaar 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 frequentieregelaar zijn getest.

7.6 DC-beveiliging voor Common DC Bus-systemen

De belangrijkste uitdaging in Common DC Bus-systemen, waarbij verschillende inverters zijn aangesloten op dezelfde DC-bus, is selectiviteit. In het geval van een kortsluiting in de DC-bus moeten zekeringen naar de fout doorbranden, maar vaak branden ook zekeringen door die andere essentiële apparatuur in hetzelfde systeem voeden, ondanks het feit dat deze zekeringen niet direct zijn verbonden met de kortsluiting (hier het dichtst bij zijn).

Tijdens de eerste 100-200 μ s nadat de kortsluiting zich voordoet, leveren de condensatoren in elke inverter stroom aan de fout. Omdat condensatoren zeer snel stroom kunnen leveren, is het lastig om te zorgen voor selectiviteit wanneer uitsluitend zekeringen worden gebruikt. Een manier om de totale selectiviteit in een Common DC Bus-systeem te verbeteren, is het scheiden van het systeem in twee afzonderlijke DC-bussen door middel van het gebruik van een snelstroomonderbreker/DC-buskoppelapparaat.

Danfoss Drives heeft de VACON® DCGuard ontwikkeld, die kan worden gebruikt om twee verschillende DC-bussen te verbinden wanneer deze op hetzelfde DC-spanningsniveau kunnen werken. Het vermogen kan worden overgebracht tussen de twee DC-bussen. Bij kortsluiting koppelt de DC Guard de onbeschadigde zijde los van de zijde met de fout voordat de kortsluiting gevolgen heeft voor de onbeschadigde zijde. Zo wordt ervoor gezorgd dat de onbeschadigde zijde ook na de kortsluiting normaal kan blijven werken.

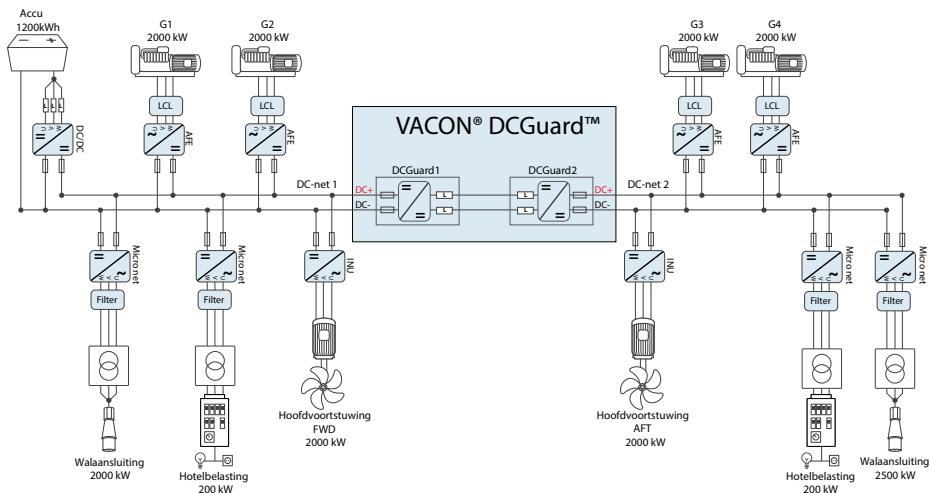


Fig. 7.11 Voorbeeld van een hybride systeem waarin VACON® DCGuard de vereiste selectiviteit van het systeem waarborgt



08

NETSTORINGEN

8	Harmonischen.....	165
8.1	Wat zijn harmonischen?	165
8.1.1	Lineaire belastingen	165
8.1.2	Niet-lineaire belastingen	166
8.1.3	Het effect van harmonischen in een energieverdeelsysteem	168
8.1.4	Het effect van harmonischen op motoren	170
8.2	Normen en voorschriften voor het beperken van harmonischen	170
8.3	Methoden voor beperking van harmonischen in frequentieregelaars	171
8.3.1	Passieve beperking van harmonischen	173
8.3.2	Actieve beperking van harmonischen	174
8.4	Tools voor analyse van harmonischen	175
8.4.1	VLT® Motion Control Tool MCT 31	176
8.4.2	Harmonic Calculation Software (HCS)	176

8 Harmonischen

8.1 Wat zijn harmonischen?

8.1.1 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 hij achter op de spanning, waardoor een naijlende werkelijke arbeidsfactor ontstaat met een waarde kleiner dan 1. Bij capacitieve belastingen loopt de stroom voor op de spanning, wat leidt tot een voorijlende werkelijke arbeidsfactor met een waarde kleiner dan 1.

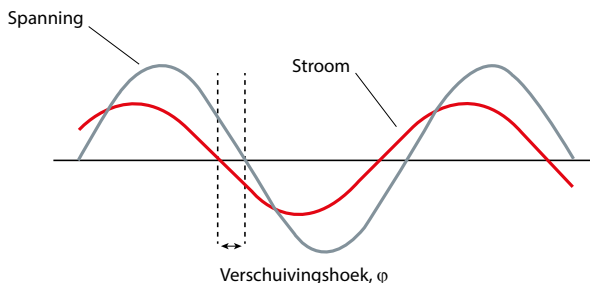


Fig. 8.1 Lineaire belasting

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.

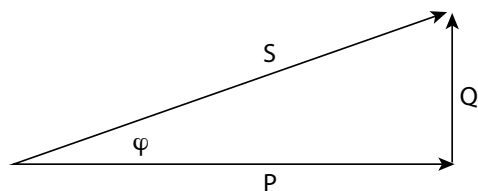


Fig. 8.2 Componenten van AC-vermogen: werkelijk vermogen (P), blindvermogen (Q) en schijnbaar vermogen (S)

De verschuivingshoek tussen stroom en spanning is φ .

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

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

8.1.2 Niet-lineaire belastingen

Niet-lineaire belastingen (zoals diodegelijkrichters) nemen een niet-sinusvormige stroom op. Fig. 8.3 toont de stroom die wordt opgenomen door een 6-pulsgelijkrichter op een driefasevoeding.

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

$$f(t) = \sum_{h=1}^{\infty} A_h \sin h\omega t$$

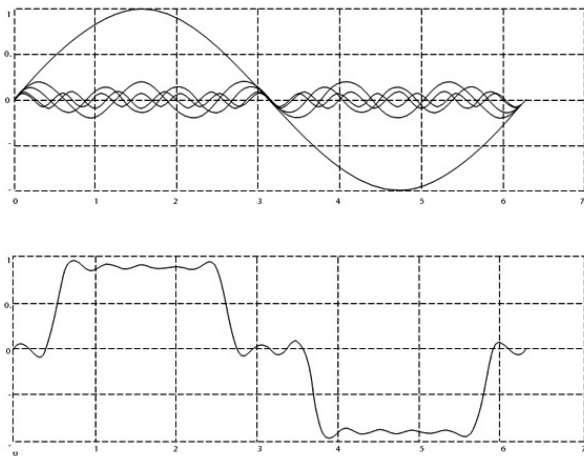


Fig. 8.3 Niet-lineaire belasting: Stroom die wordt opgenomen door een 6-pulsgelijkrichter op een driefasevoeding

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:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\text{max}}} I_h^2}$$

Voor normale gelijkrichters geldt dat de amplitude van de harmonische afneemt wanneer de frequentie toeneemt. In theorie is de amplitude van de harmonische h (voor een blok golf):

$$I_h = \frac{I_1}{h}$$

waarbij I_1 de grondstroom is en h het nummer van de harmonische.

Vermogenselektronica genereren slechts oneven harmonischen. Even harmonischen zijn uitgesloten zolang de positieve en negatieve helften van de stroomcyclus identiek zijn.

In driefasensystemen bestaan slechts harmonischen met de volgorde $v = k \times p \pm 1$.
Bij een 6-pulssysteem zijn deze de vijfde, zevende, elfde, dertiende enz.

h = veelvoud van de basisfrequentie

$k = 1, 2, 3, \dots$

p = pulsnummer van de gelijkrichterbrug (6, 12, 18 enz.)

In eenfasesystemen kunnen alle oneven harmonischen bestaan.

De hoeveelheid 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:

$$PF = DPF = \cos(\varphi)$$

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

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

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.

Let op dat zolang de spanning niet aanzienlijk wordt vervormd, alleen de grondfrequentie vermogen overbrengt. Bij andere frequenties is slechts sprake van stromen die technisch gezien een soort reactieve stroom vormen. Voor gelijkrichters is de grondarbeidsfactor ongeveer 0,95 of hoger.

In de context van vermogenskwaliteit komt men vaak de term Total Demand Distortion (TDD) tegen. De TDD karakteriseert niet de belasting maar is een systeempara-meter.

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

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

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.

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

8.1.3 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 zijn aangesloten, is PCC2. Elke belasting is aangesloten via kabels met respectievelijk de impedantie Z_1, Z_2, Z_3 .

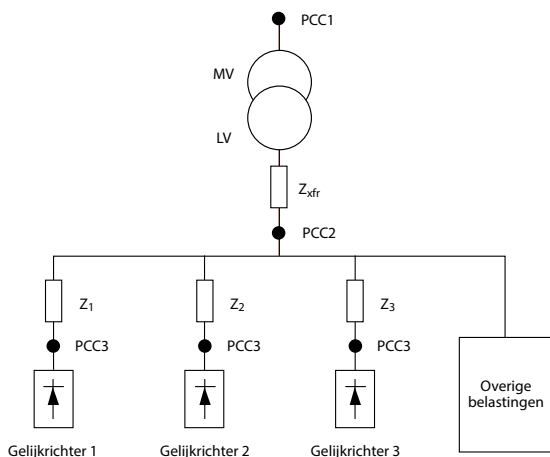


Fig. 8.4 Voorbeeld van een verdeelsysteem

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}).

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

waarbij $S_{sc} = U_2 / Z_{voeding}$ 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.

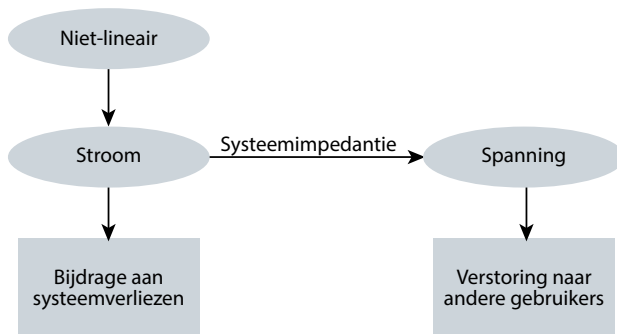


Fig 8.5 Negatieve effecten van harmonischen: systeemverliezen en verstoring

8.1.4 Het effect van harmonischen op motoren

Harmonischen die worden gegenereerd door niet-lineaire belastingen hebben negatieve gevolgen voor generatoren en motoren. Typische gevolgen zijn:

- Verhoogde opwarming vanwege ijzer- en koperverliezen op de harmonische frequenties
- Hogere hoorbare geluidsemissies
- Harmonische stromen in de rotor

Harmonische stromen in de rotor worden veroorzaakt door harmonischen in de statorwikkeling. De vijfde en zevende statorharmonische produceren bijvoorbeeld 6e-orderotorharmonischen, terwijl de elfde en dertiende statorharmonischen 12e-orderotorharmonischen produceren. Deze harmonische stromen in de rotor leiden tot meer opwarming van de rotor en een pulserend of verlaagd koppel.

Er moet worden opgemerkt dat onbalansen in het systeem (staande onbalans of aardfouten), uitgedrukt als negatieve-sequentiestromen, ook in de rotor kunnen worden weerspiegeld als harmonische stromen, die de bovengenoemde stromen aanvullen.

8.2 Normen en voorschriften voor het beperken van harmonischen

De vereisten voor het beperken van harmonischen kunnen voortvloeien uit:

- Toepassingsspecifieke vereisten
- Vereisten voor de 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 frequentieregelaar B. Er is een behoefte om frequentieregelaar A te installeren zodat motor A wordt gevoed via een eigen frequentieregelaar, 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 frequentieregelaars A en B worden beperkt door middel van harmonischenfilters.

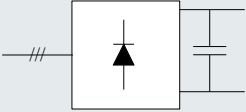
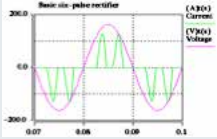
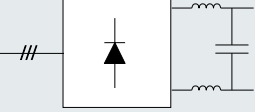
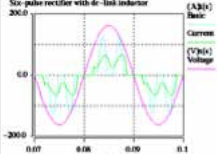
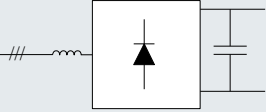
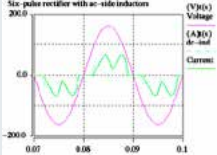
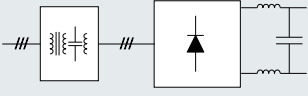
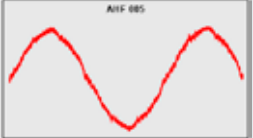
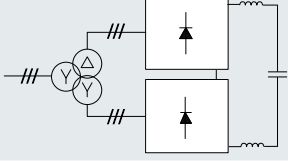
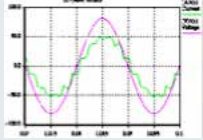
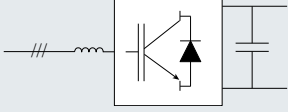
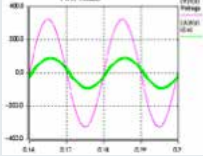
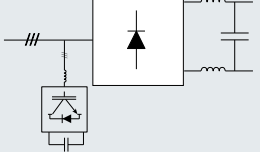
Er bestaan diverse normen, voorschriften en aanbevelingen voor het beperken van de harmonischen. Voor de diverse industrieën en geografische regio's gelden verschillende normen. De meest gangbare zijn:

- IEC/EN 61000-3-2, Limietwaarden voor de emissie van harmonische stromen (≤ 16 A per fase)
- IEC/EN 61000-3-12, Limietwaarden voor harmonische stromen (> 16 A en ≤ 75 A)
- IEC/EN 61000-3-4, Limietwaarden voor de emissie van harmonische stromen (> 16 A)
- IEC/EN 61000-2-2 en IEC/EN 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

8.3 Methoden voor beperking van harmonischen in frequentieregelaars

De netstroom van niet-aangepaste diodegelijkrichters heeft een totale harmonische vervorming (THDi) van minimaal 80%. Deze hoge vervormingswaarde is onacceptabel in de meeste toepassingen met frequentieregelaars. Daarom is het nodig om de harmonischen te beperken. Zoals eerder is toegelicht, 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 harmonischen wordt gegeven in Tabel 8.1 Methoden voor beperking van harmonischen.

Beperkingsmethode	Circuitschema	Typische stroomvorm
Geen beperking THD > 80%		
DC-inductoren THDi < 45%		
AC-inductoren THDi < 45%		
Passief harmonischenfilter THD < 10%		
Multipulsgelijkrichter (12/18) THD < 10%		
Active Front End THD < 5%		
Actief filter THD < 5%		Golfvorm vergelijkbaar met AFE

Tabel 8.1 Methoden voor beperking van harmonischen

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

8.3.1 Passieve beperking van harmonischen

DC-inductoren

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

AC-inductoren

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

DC- versus AC-inductoren

Omdat DC- en AC-inductoren 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 THD-waarde vergelijkbaar. DC-inductoren verlagen vooral de laagfrequente componenten (5e, 7e, 11e harmonische), terwijl AC-inductoren betere prestaties bieden voor de hoogfrequente harmonischen.

Over inductoren treedt een AC-spanningsval op. Bij AC-inductoren zal een spanningsval optreden, meestal circa 4%. Bij DC-inductoren veroorzaakt de DC-stroom geen spanningsval. De enige spanningsval over DC-inductoren is het gevolg van de stroomrimpel van de gelijkrichter. Daarom zal het gebruik van DC-inductoren 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-inductoren. Het belangrijkste voordeel van AC-inductoren is dat ze de gelijkrichter beschermen tegen pieken 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 inductoren (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 frequentieregelaar (met/zonder DC-inductoren, waarde van capaciteit) en er kan een prestatieniveau worden bepaald voor een specifieke configuratie.

Het nadeel van passieve filters is dat deze vrij groot zijn (de grootte is vergelijkbaar met die van de frequentieregelaar). 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 zijn de fasen van de secundaire transformatorwikkelingen bijvoorbeeld 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 voornaamste harmonischen (qua grootte) de 11e en 13e. Voor multipuls-harmonischenbeperking zijn grote transformatoren nodig – groter dan de frequentieregelaar. De prestaties worden bovendien verlaagd in suboptimale condities, zoals bij onbalans van de spanning.

8.3.2 Actieve beperking van harmonischen

Active Front End (AFE)

De diodegelijkrichter kan worden vervangen door een inverter met actieve schakelaars (gewoonlijk IGBT-transistoren), vergelijkbaar met de inverter aan de motorzijde. De inverter 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 inductoren en condensatoren tussen de inductoren).

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 inverter 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 het AF de harmonische stromen van een diodegelijkrichter opheft.

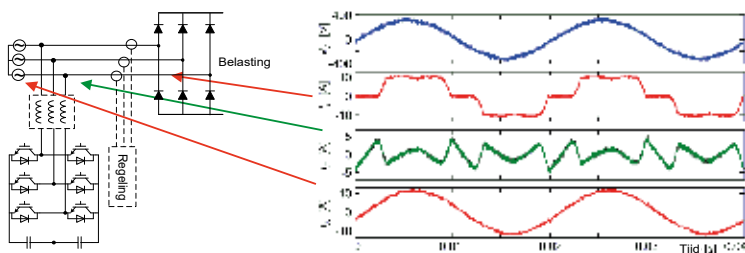


Fig. 8.6 Werkingsprincipe van een actief filter

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 + frequentieregelaar genaamd 'Low Harmonic Drive (LHD)'.
- Groepscompensatie: harmonischen van een groep diverse belastingen (bijvoorbeeld frequentieregelaars) worden gecompenseerd door één filter.
- Centrale compensatie: harmonischen worden direct gecompenseerd bij het gemeenschappelijke koppelpunt van de hoofdtransformator.

De maat van het filter kan worden afgestemd op alleen de harmonischen, aangezien het parallel met de belasting is aangesloten en niet de vollaststroom hoeft te verwerken.

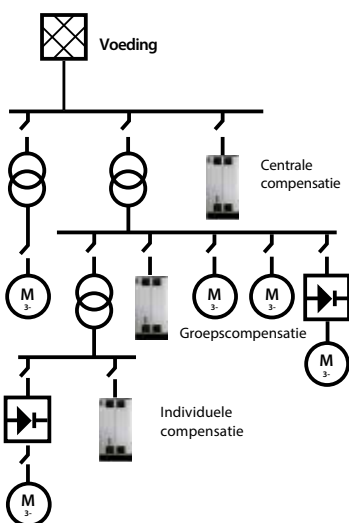


Fig. 8.7 Harmonischencompensatie kan plaatsvinden in verschillende gebieden van het netwerk

8.4 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.

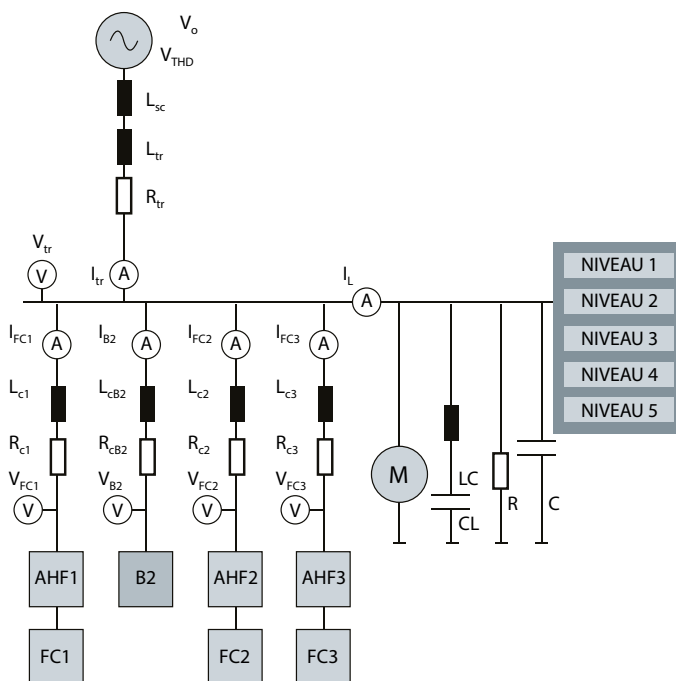


Fig. 8.8 Rekenmodel met stroom- en spanningsmeetpunten

Danfoss biedt twee softwaretools:

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

8.4.1 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 volledige 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 frequentieregelaars van andere fabrikanten kunnen ook worden gesimuleerd. MCT 31 kan harmonischenrapporten genereren.

8.4.2 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 frequentieregelaars, AHF passieve filters en AAF actieve filters van Danfoss zijn opgenomen.

De simulator creëert grafieken in het tijdsdomein en het frequentiedomein van de spanningen en stromen in een systeem en vergelijkt de harmonischen met verschillende normgrenzen.

HCS kan ook rapporten genereren in html- of pdf-formaat.



09

INTERFACES

9	Interfaces	179
9.1	Mens-machine-interface (MMI)	179
9.2	Werkingsprincipes van seriële interfaces.....	181
9.3	Standaard seriële interfaces in frequentieregelaars.....	183
9.4	Veldbusinterfaces in frequentieregelaars	184
9.5	Veldbusstandaardisering.....	185
9.6	Industrieel ethernet en Internet of Things.....	187

9 Interfaces

9.1 Mens-machine-interface (MMI)

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

Moderne frequentieregelaars zijn tegenwoordig vaak uitgerust met dergelijke MMI-interfaces:

Led



Fig. 9.1 Ledindicatie

Ledindicaties branden wanneer:

- de frequentieregelaar stroom ontvangt
- een waarschuwing actief is op de frequentieregelaar
- een alarm actief is op de frequentieregelaar

Bedieningspaneel



Fig. 9.2 Numerieke en alfanumerieke bedieningspanelen

Een bedieningspaneel biedt eenvoudige mogelijkheden om de frequentieregelaar te besturen, de actuele status daarvan te bewaken en de toepassing op eenvoudige wijze in bedrijf te stellen. Bedieningspanelen lopen uiteen van panelen met een eenvoudige numerieke display tot panelen met meer grafische alfanumerieke displays.

Het nieuwe VLT® Wireless Communication Panel LCP 103 heeft een Wi-Fi-verbinding en communiceert met de MyDrive® Connect-toepassing. De app kan worden gedownload op een slim toestel, dat vervolgens kan worden gebruikt voor eenvoudige inbedrijfstelling, bediening en onderhoud van de regelaar.



Fig. 9.3 VLT® Wireless Communication Panel LCP 103 verbindt de frequentieregelaar en het mobiele apparaat

In- en uitgangsklemmen



Fig. 9.4 In- en uitgangsklemmen

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

Ingangsstuursignalen zoals start/stop, vrijloop of omkeren zorgen ervoor dat de gebruiker beschikt over functies waarmee hij de frequentieregelaar 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 toegepast. Voor terugkoppelingssignalen van de frequentieregelaar 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 frequentieregelaar kunnen worden geconfigureerd, bijvoorbeeld om de actuele belastingscondities te bewaken.

Softwaretools



Fig. 9.5 Softwaretools

Integratie van de frequentieregelaar 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 moderne pc-softwaretool kan als volgt worden gebruikt:

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

Veldbus

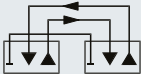
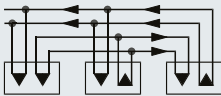
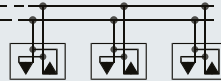
Gebruik een gestandaardiseerde veldbusinterface tussen de PLC en de frequentieregelaar voor het in bedrijf stellen, regelen en bewaken van de toepassing.



Fig. 9.6 Veldbusaansluiting

9.2 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 (codering). Als de bits worden verzonden via een spanningssignaal, ligt de focus minder op het spanningsniveau dan op de referentiepotentiaal van het niveau.

Principe	Standaard (toepassing)	Apparaten aangesloten per hoofdcircuit	Max. afstand in mm	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 9.1 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 in verband met pc's een seriële interface werd genoemd, werd de RS232 bedoeld. RS232 werd ontwikkeld voor de communicatie tussen twee apparaten (punt-naar-punt-verbinding) 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 transceïvermodules (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 aderen). 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 normaal gesproken op 100 Mbps, over STP-kabels (shielded twisted pair – afgeschermd gedraaide paren), 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 kantoornetwerk 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.

9.3 Standaard seriële interfaces in frequentieregelaars

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

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

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

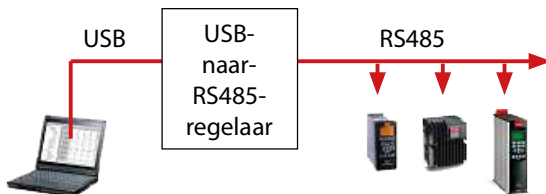


Fig. 9.7 USB-naar-RS485-communicatie

Frequentieregelaars 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.

9.4 Veldbusinterfaces in frequentieregelaars

Het gebruik van moderne frequentieregelaars zonder interface voor seriële communicatie is tegenwoordig bijna ondenkbaar. In het eenvoudigste geval bestaat de interface uit twee datalijnen waarmee de frequentieregelaar 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 frequentieregelaar-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. Geen veldbus.

In dit type netwerk is voor de communicatie tussen regelaar 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 regelaar nieuwe bekabeling, PLC-programmering en vaak meer I/O-hardware nodig is. Voor eigenaren betekent dit hogere kapitaalkosten en beperkte flexibiliteit. Daar komt nog bij dat de kans op fouten groot is, aangezien de kans op een foutieve aansluiting op de PLC toeneemt met het aantal kabels.



Fig. 9.8 Traditionele bedrading. Geen veldbus

Veldbusbedrading

Een typisch veldbussysteem gebruikt alleen kabels met gedraaide paren om de regelaar 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 regelaars 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. 9.9 Veldbusbedrading

Veldbus over ethernet

De ethernetinterface maakt het mogelijk om vanaf locaties buiten de productiefaciliteit toegang te krijgen tot regelaarparameters en andere gegevens. Deze methode omzeilt de traditionele besturingshiërarchie, aangezien communicatie met de regelaars 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.

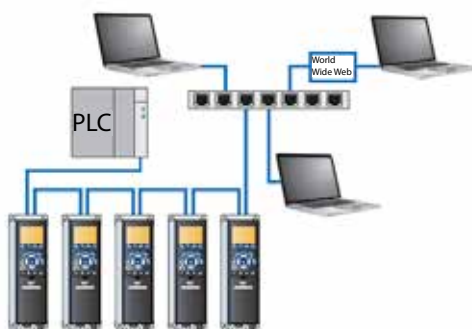


Fig. 9.10 Veldbus over ethernet

9.5 Veldbusstandaardisering

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 mogelijkheid 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 klimaatregelingssystemen.

Voor een betere classificatie kunnen communicatiesystemen worden beoordeeld op basis van datavolume, overdrachtstijd en transmissiefrequentie. Onderstaand schema toont de basisverdeling in drie verschillende niveaus.

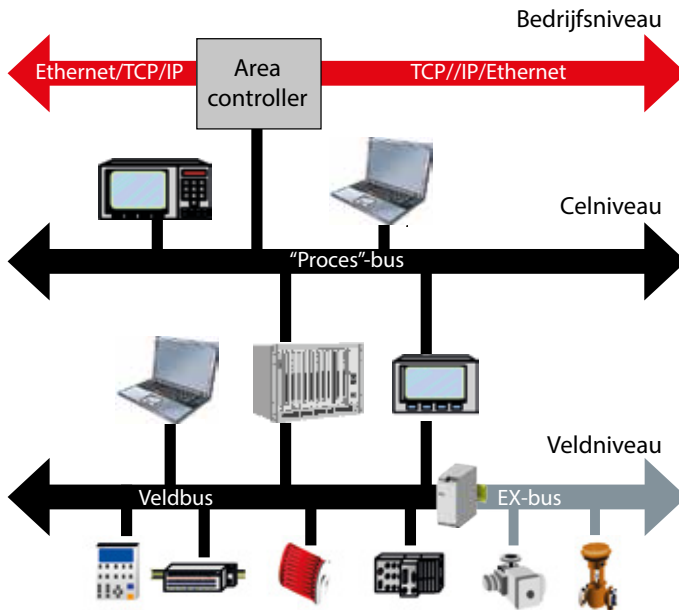


Fig. 9.11 Productiepiramide

- 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. 9.12 Typische veldbussen

Het belang van diverse bussystemen is afhankelijk van de regio en de toepassing. Als het gaat om regelaartechnologie 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.

9.6 Industrieel ethernet en Internet of Things

Een frequentieregelaar is ook een apparaat dat met het internet kan worden verbonden, maar dit kan vanwege de vele gegevens die beschikbaar zijn en mogelijk gevoelige gegevens niet worden gedaan zonder de cyberveiligheid in verband met de gegevensoverdracht in aanmerking te nemen. Sommige protocollen, zoals MQTT, zijn weliswaar populair, maar niet noodzakelijkerwijze geschikt voor het leveren van gegevens van een frequentieregelaar. Bij MQTT is er altijd een tussenpersoon bij de gegevensoverdracht en het is moeilijk om de gegevensoverdracht te beveiligen wanneer bij elk bericht een tussenpersoon betrokken is. Het is belangrijk om de veiligheid van de gegevensoverdracht in aanmerking te nemen bij het plannen van de architectuur van de gegevenssnelweg van de frequentieregelaar naar de eindgebruiker – vandaag de dag naar de cloud van de eindgebruiker. Diensten zoals de real-time bewaking op afstand (bijv. DrivePro® Remote Monitoring) van frequentieregelaar vanaf elke mogelijke locatie kunnen een grote meerwaarde vormen voor de eindgebruiker. Het combineren van informatie van twee of meer frequentieregelaars in één overzicht kan de basis vormen voor analyses en zeer waardevolle informatie voor het oplossen van problemen.

Met gebruik van Gateway kan een deel van de uitdagingen in verband met de veiligheid beter worden aangepakt. Het verbinden van een frequentieregelaar met het internet via uitsluitend een ethernetverbinding is vanuit veiligheidsoogpunt geen goed idee, omdat deze dan sterk wordt blootgesteld aan allerlei soorten aanvallen. Het gebruik van Gateway, waarop ook meerdere regelaars kunnen worden aangesloten, zorgt voor een barrière, die het subnet achter Gateway beschermt.

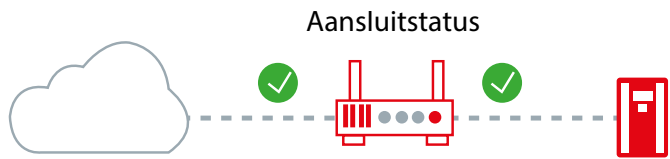


Fig. 9.13

Wanneer gegevensbronnen een grote hoeveelheid gegevens leveren, is het erg belangrijk om te bekijken over een behoorlijk gegevensbeheer. Het is essentieel dat ergens in het systeem de functie apparatenbeheer is opgenomen. Dit is een van de belangrijkste componenten, wat ook betekent dat het apparatenbeheer moet worden aangepast aan de apparaten die worden beheerd.

Technologie:	Gegevens & analyse:	Systeem & proces:
• Apparatenbeheer • Gatewaybeheer • Gebruikersbeheer • Gegevensbeveiliging • Gateway • Connectiviteit • Naar regelaars • Naar internet • UI-Data, dashboards • Cloud-naar-cloud-gegevens	• Analyseert • Trends (historische gegevens) • Dataloggers • Foutengeschiedenis • Parameters • Info regelaar • Realtime overzicht • Evaluaties tijdens de levensduur	• Gegevens voor daadwerkelijk proces • Verificatie van set-up bij inbedrijfstelling vs. beste set-up van referentieregelaars

Het combineren van analytische capaciteiten met een IoT-oplossing zorgt voor aanvullende voordelen. Het is belangrijk te begrijpen welk soort analyse nodig is en wat de bijbehorende beperkingen zijn. Analyses die in de regelaar worden uitgevoerd – EDGE Analytics – vereisen dat enkele capaciteiten in de frequentieregelaar beschikbaar zijn. Soms is dit eenvoudigweg niet mogelijk, wanneer de vereisten en verwachtingen ten aanzien van analyses niet overeenkomen met de beschikbare capaciteiten. Wanneer gegevens beschikbaar zijn in een omgeving waarin de capaciteiten niet beperkt zijn, bestaat er veel vrijheid voor de omgang met gegevens. Zelfs in een dergelijk geval zijn analyses altijd een kwestie van afstemming op feiten die moeten worden gevonden. Op lagere niveaus van analyses, kan de identificatie van duidelijke fouten en zeer buitengewone afwijkingen van de norm – anomalieën – worden uitgevoerd in EDGE of de cloud. Bij meer geavanceerde methoden zoals het gebruik van machine-learning is het uitvoeren van de benodigde algoritmen misschien niet mogelijk, waardoor dit in de cloud moet worden gedaan.

VLT FC302



Open Metrics

Live Metrics - drive



Drive Status History



VACON 100



Open Metrics

Open Metrics

Live Metrics



Drive Status History





10

DIMENSIONERING EN SELECTIE VAN FREQUENTIETREGLAARS

10 Dimensionering en selectie van frequentiereglars	191
10.1 De juiste vermogensklasse van de frequentiereglars	191
10.2 Classificatie van de frequentiereglars op basis van de motorspecificaties.....	191
10.3 Overbelastingscapaciteit	193
10.3.1 Afwegingen ten aanzien van energierendement.....	194
10.4 Regelbereik.....	195
10.5 Warmteverliezen en koelen van de frequentiereglars	196
10.5.1 Luchtgekoelde frequentiereglars.....	197
10.5.2 Vloeistofgekoelde frequentiereglars	199
10.6 Reduceren van een frequentiereglars	200
10.7 Regeneratieve energie	201
10.8 Motorkabels	201
10.9 Omgeving	202
10.10 Centrale versus decentrale installatie	204
10.11 Voorbeelden.....	206

10 Dimensionering en selectie van frequentieregelaars

10.1 De juiste vermogensklasse van de regelaar

Het selecteren van de juiste frequentieregelaar 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 frequentieregelaars is kennis over de volgende basisparameters voldoende.

- Frequentieregelaar-classificatie op basis van motorspecificaties
- Stroomverdeling in de frequentieregelaar ($\cos \phi$ van de motor)
- Overbelastbaarheid
- Regelbereik en veldverzwakking
- Reduceren van een frequentieregelaar
- Regeneratieve energie
- Lengte motorkabel
- Omgevingsfactoren (temperatuur, hoogte enz.)
- 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 er een geschikte frequentieregelaar kan worden geselecteerd, moet de te gebruiken motor worden bepaald. In gebouwenbeheersystemen wordt de uiteindelijke keuze bijvoorbeeld vaak pas gemaakt vlak voordat het gebouw voltooid is.

Op dat moment zijn de meeste te gebruiken componenten pas 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 frequentieregelaars kosten kunnen besparen door de technische functies te beperken, is het in elk specifieke geval nodig om na te gaan of de voor de regelaar vereiste functies ook daadwerkelijk beschikbaar zijn. De belangrijkste factor bij het bepalen van een systeemconfiguratie van een regelaar is het proces waarin het regelaarsysteem zal worden gebruikt. Het vinden van het optimale type en de optimale configuratie van het regelaarsysteem vereist in elk geval kennis van de procesvereisten: koppel, toerental en belastingscyclus.

10.2 Frequentieregelaar-classificatie op basis van motorspecificaties

Een veelgebruikte methode voor het selecteren van frequentieregelaars is simpelweg gebaseerd op het nominale vermogen van de te gebruiken motor. Hoewel fabrikanten de vermogensklasse van hun regelaars 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 regelaarvermogen. Fig. 10.1 Nominale stroom voor 1,5 kW-motoren met verschillende pooltallen en van diverse fabrikanten toont voorbeelden van de nominale stromen van diverse 1,5 kW-motoren.

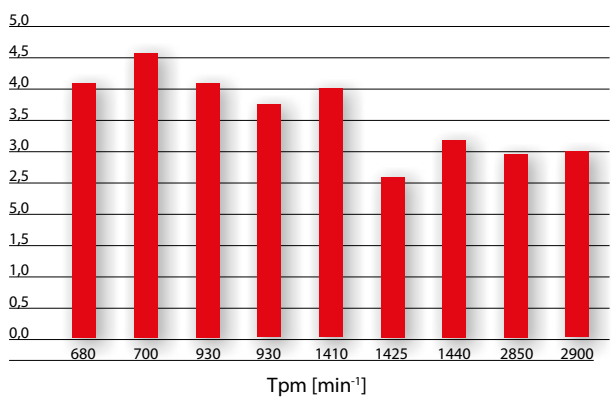


Fig. 10.1 Nominale stroom voor 1,5 kW-motoren met verschillende pooltallen en van diverse fabrikanten

Bovendien geldt dat de door een motor opgenomen stroom ervan afhangt of hij in ster of in driehoek is aangesloten. Daarom moeten frequentieregelaars 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 frequentieregelaars kunnen werken over een breed netspanningsbereik (bijv. 3 x 380-500 V) en bieden hiermee een breed uitgangsspanningsbereik. Denk eraan dat een regelaar die met gereduceerde spanning werkt de gespecificeerde kVA niet zal kunnen leveren, aangezien de beperking van de spanning niet wordt gecompenseerd door een toename van de stroom.



Fig. 10.2 Identificatiegegevens van een Danfoss-frequentieregelaar

Het typeplaatje in Fig. 10.2 Identificatiegegevens van een Danfoss-frequentieregelaar is afkomstig van een regelaar van 0,75 kW. De gespecificeerde stroomwaarden gelden voor twee verschillende spanningsbereiken. De frequentieregelaar 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 slechts 2,1 A leveren. Het schijnbare vermogen dat bij beide spanningsbereiken beschikbaar is, is 1,70 kVA.

10.3 Overbelastingscapaciteit

Bij het selecteren van een frequentieregelaar moet in de eerste plaats altijd rekening worden gehouden met de belastingscondities van de toepassing. Er wordt een fundamenteel onderscheid gemaakt tussen kwadratische en constante belastingskarakteristieken. Deze karakteristieken komen in de praktijk het vaakst voor.

Wanneer een frequentieregelaar een motor regelt, kunnen er voor die motor koppelbegrenzungen worden ingesteld. Het selecteren van een frequentieregelaar 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 benodigd koppel 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 10.1 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 frequentieregelaar 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 belastingskarakteristiek met variabel koppel komt gewoonlijk voor in toepassingen waarbij een toenemend toerental leidt tot een kwadratisch toenemend belastingskoppel. Ventilatoren en centrifugaalpomp behoren tot het soort apparatuur dat dit type gedrag vertoont. Bovendien vereisen de meeste toepassingen met een kwadratische koppelkarakteristiek, zoals centrifugaalpomp of ventilatoren, geen snelle versnellingsfasen. Daarom worden voor kwadratische koppels meestal overbelastingsreserves van 10% gekozen.

Toepassing	Overbelasting
Ventilator	110%
Bronpomp	110%
Boosterpomp/centrifugaalpomp	110%
Filtertoevoerpomp	110%
Grondwaterpomp	110%
Heetwaterpomp	110%
Verstoppingsvrije pomp (vaste materialen)	110%
Centrifugaalpomp/-ventilator	110%
Primaire en secundaire verwarmingspomp	110%
Primaire en secundaire koelwaterpomp	110%
Evacuatiepomp voor regenwaterbassins	110%
Slibrecirculatiepomp	110%
Spiraalpomp (dun slib)	110%
Dompelpomp	110%
Spuislibpomp	110%

Tabel 10.2 *Typische overbelastingen in toepassingen met variabel koppel*

Zelfs bij belasting met variabel koppel en een overbelastingscapaciteit van 10% kunnen moderne frequentieregelaars 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.

10.3.1 Afwegingen ten aanzien van energierendement

In hoofdstuk 5 Energiebesparing met frequentieregelaars 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 frequentieregelaar 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 merken frequentieregelaars hebben een ingebouwde softwarefunctie die het optimale motorvermogen bepaalt op basis van het ingangsvermogen van de regelaar.

10.4 Regelbereik

Het voordeel van een frequentieregelaar 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 frequentieregelaar, zijn aanpassingsbereiken van 1:1.000 tot 1:10.000 te realiseren. Zie hoofdstuk 3.7 voor meer informatie over de verschillende regelmethoden.

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 de beperking van het beschikbare koppel met $1/f$ en van het kippkoppel met $1/f^2$. Het veldverzwakkingsbereik begint wanneer de frequentieregelaar de U/f-verhouding niet langer constant kan houden. In Europa ligt dit punt gewoonlijk bij 400 V/50 Hz en in Noord-Amerika bij 460 V/60 Hz. Zie hoofdstuk 4.1.1 voor meer informatie.

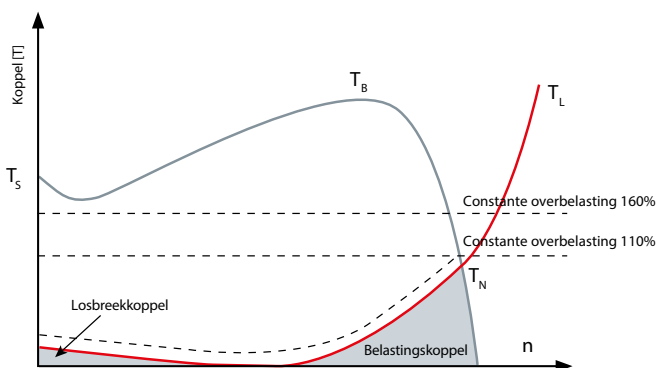


Fig. 10.3 Frequentieregelaar met een geoptimaliseerde karakteristiek voor kwadratische belastingen en een overbelasting van 110%. Om een hoger losbrekkoppel te realiseren, wordt de regelaar soms gestart met een constant koppel voordat de kwadratische karakteristiek wordt gebruikt.

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. 10.4 Bepaling van het optimale toerental.

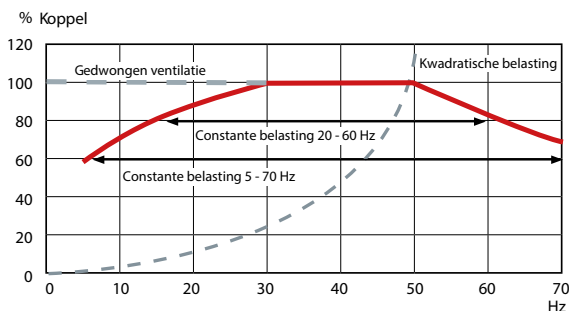


Fig. 10.4 Bepaling van het optimale toerental

10.5 Warmteverliezen en koelen van de frequentieregelaar

Frequentieregelaars zijn zeer efficiënt, maar er is nog steeds sprake van doorlaat- en schakelverliezen, die leiden tot de opwarming van de regelaar. Deze warmte moet worden afgevoerd om een verdere opwarming en mogelijke beschadiging van de componenten van de regelaar te voorkomen. Herhaaldelijke oververhitting zal het bedrijf in gevaar brengen en de levensduur van de regelaar verkorten. De noodzaak om de regelaar te koelen hangt sterk af van de belasting en uitgangsfrequentie van de regelaar, evenals van de gebruikte schakelfrequentie.

Een van de belangrijkste componenten die moeten worden gekoeld, zijn de halfgeleidermodules. Het warmtedissipatievermogen van de modules zelf is ontoereikend om de temperatuur ervan te beperken. Daarom zijn de modules gemonteerd op een metalen koellichaam die de warmte wegleidt van de modules. Aluminium koellichamen worden vaak gebruikt vanwege hun beperkte gewicht, lage kosten en goede thermische geleiding.

De warmte wordt van het koellichaam overgebracht naar lucht of een koelvloeistof, door middel van convectie. De basisverhouding voor de warmteoverdracht door middel van convectie is:

$$Q' = h \times A \times (T_a - T_b)$$

waarbij Q de warmte is die per eenheid tijd wordt overgedragen, A het oppervlak van het object, h de warmteoverdrachtscoëfficiënt, T_a de oppervlaktetemperatuur van het object en T_b de vloeistoftemperatuur.

Zoals te zien is in de bovenstaande formule, houdt de overgebrachte warmte rechtstreeks verband met het oppervlak (A) van het object, in dit geval het koellichaam. Koellichamen worden dus ontworpen om te zorgen voor een zo groot mogelijk oppervlak dat in contact komt met het koelmiddel dat dit omringt. Het oppervlak wordt gemaximaliseerd door vinnen aan het koellichaam toe te voegen. De vinnen kunnen ook worden gebruikt om de stroming van de koelvloeistof te beïnvloeden om het koeleffect te maximaliseren.

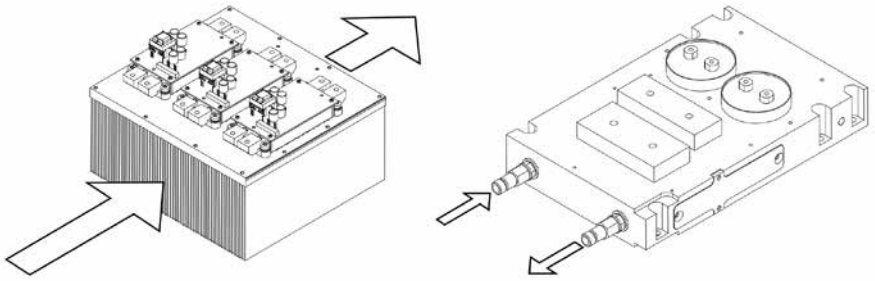


Fig. 10.5 Voorbeelden van een luchtgekoeld koellichaam en een vloeistofgekoeld koellichaam

De koelvloeistof heeft een aanzienlijk effect op de warmteoverdracht. De coëfficiënt van de convectiewarmteoverdracht (h) is afhankelijk van het type vloeistof, de stromingskarakteristieken en de temperatuurkarakteristieken. De warmteoverdrachtscoëfficiënten voor lucht en water zijn bijvoorbeeld:

- Lucht: $h = 10$ tot $100 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Water: $h = 500$ tot $10.000 \text{ W/m}^2\text{K}$

Uit de bovenstaande warmteoverdrachtscoëfficiënten blijkt dat koeling met vloeistof veel efficiënter is dan koeling met lucht. Oplossingen voor luchtkoeling zijn eenvoudiger en veel goedkoper. Daarom wordt luchtkoeling meer gebruikt en wordt vloeistofkoeling voornamelijk gebruikt in meer veeleisende toepassingen, zoals hoogvermogenstoepassingen met ruimtebeperkingen.

10.5.1 Luchtgekoelde frequentieregelaars

Luchtgekoelde frequentieregelaars gebruiken een ventilator om de lucht in de behuizing van de regelaar te circuleren en de door de regelaar geproduceerde warmte te verwijderen. Regelaars hebben normaal gesproken een hoofdventilator die het koellichaam afkoelt, maar soms ook kleinere ventilatoren om de warmte te verwijderen die wordt gegenereerd door de andere componenten in de behuizing.

Ventilatie en luchtstromen zijn belangrijk zowel in als buiten de behuizing van de regelaar. Er moet worden gezorgd voor voldoende vrije ruimte rond de regelaar, zodat deze beschikt over een toereikende bron van koellucht en de uitgaande warme lucht niet met de inkomende koellucht wordt gemengd. Dit is met name belangrijk wanneer meerdere regelaars vlak bij elkaar worden geïnstalleerd. Buizen of luchtbarrières kunnen worden gebruikt om de luchtstroom te sturen.

Wanneer een frequentieregelaar in een kast is geïnstalleerd, moeten ventilatie en koeling van de regelaar zorgvuldig in aanmerking worden genomen. De regelaar en de hulpcomponenten verwarmen de ruimte waarin zij zijn geïnstalleerd. In de delen van de kast die frequentieregelaarmodules bevatten, zorgt de eigen ventilator van de module meestal voor voldoende koelluchtstromen in dat deel van de kast wanneer de openingen voor de luchtinlaat en -uitlaat zijn ontworpen in overeenstemming met de vereisten. In delen die geen frequentieregelaarmodule bevatten, maar bijvoorbeeld een inductor of een uitgangsfILTER, is normaal gesproken een deurventilator of ander afzonderlijk ventilatorsysteem nodig.

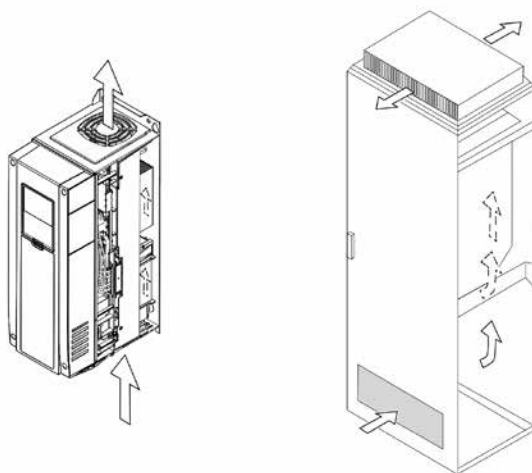


Fig. 10.6 Luchtkoeling in een wandgemonteerde frequentieregelaar en een frequentieregelaar in een behuizing

De belasting van het airconditioningsysteem van de controlekamer als gevolg van warmteverliezen van frequentieregelaars resulteert normaal gesproken in een relatief hoog stroomverbruik van het airconditioningsysteem. De elektronica in de regelaar zijn ook vrij gevoelig voor stof en andere vervuiling in de lucht. Wanneer het stroomverbruik van de airconditioning of de slechte kwaliteit van de koellucht een probleem zijn, is het mogelijk om vloeistofkoeling te gebruiken, wat wordt behandeld in sectie 10.5.2. Een andere mogelijkheid is het gebruik van de unieke backchannelkoeling die door Danfoss is ontwikkeld.

Het intelligente warmtebeheer van de backchannelkoeling verwijderd tot 90% van de warmteverliezen van de regelaar. Lucht van buiten de controlekamer wordt in een luchtopening aan de onderkant van de regelaar gezogen. De lucht stijgt door een kanaal aan de achterkant van de kast naar de bovenkant, waar deze de warmte absorbeert van het koellichaam met vinnen, en de hete lucht wordt afgevoerd door een luchtopening aan de bovenkant van de regelaar. Het backchannel wordt door middel van een IP 54-afdichting gescheiden van de elektronica, zodat zo min mogelijk lucht door de elektronicaomgeving stroomt. Dankzij deze koelmethode wordt vervuiling van de regelelektronica aanzienlijk beperkt, waardoor de levensduur en betrouwbaarheid worden verhoogd.



Fig. 10.7 Regelaars met backchannelkoeling

10.5.2 Vloeistofgekoelde frequentieregelaars

In vloeistofgekoelde frequentieregelaars worden de halfgeleidermodules en de condensatoren van de DC-tussenkring geïnstalleerd op een vast koellichaam. Het koellichaam wordt gekoeld door een koelvloeistof die in de leidingen in het koellichaam circuleert. De vloeistof is meestal water of een mengsel van water en glycol. Inductoren of microkanalen worden gebruikt in de leidingen om een turbulente stroom te creëren, wat de efficiëntie van de koeling met maximaal 20% kan verhogen. Deze methode verhoogt echter het risico op blokkades in de leidingen wanneer zich vuildeeltjes in de koelvloeistof bevinden.

De vloeistofkoelingssystemen voor frequentieregelaars hebben allemaal een gesloten koelcircuit (hoofdcircuit), dat gebruikmaakt van de stromende vloeistof om de warmte van de frequentieregelaars over te brengen naar een warmtewisselaar. De warmtewisselaar voert de warmte vervolgens af uit het hoofdcircuit. Er zijn drie typen warmtewisselaars die worden gebruikt om frequentieregelaars te koelen:

- Vloeistof-naar-vloeistof-warmtewisselaars zijn verbonden met een secundair koelcircuit. De vloeistof in het secundaire circuit brengt de warmte van de warmtewisselaar over naar een externe condenser.
- Vloeistof-naar-lucht-warmtewisselaars hebben een radiator, die lucht gebruikt om de koelvloeistof in het hoofdcircuit te koelen.
- Een koeler gebruikt een koeleenheid om de koelvloeistof in het hoofdcircuit te koelen.

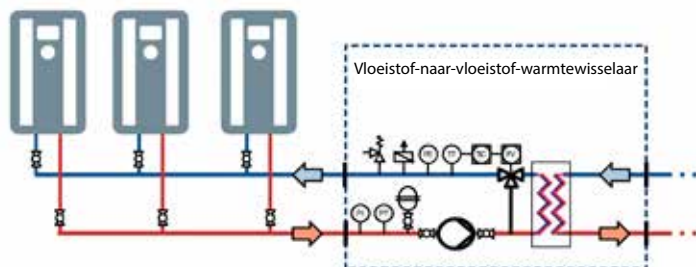


Fig. 10.8 Voorbeeld van een koelsysteem van een frequentieregelaar met een vloeistof-naar-vloeistof-warmtewisselaar

In vloeistofgekoelde regelaars wordt het grootste deel van de overtollige warmte gekoeld door het vloeistofkoelingssysteem. Er zijn echter ook altijd enkele warmteverliezen aan de lucht in de regelaar. De warmteverliezen worden veroorzaakt door de busbars, filters, inductoren en andere hulpcomponenten. Een aanvullende ventilator of ander afzonderlijk ventilatiesysteem kan nodig zijn om de temperatuur van de regelaar binnen de grenzen te houden. Een volledig luchtdichte behuizing is ook mogelijk wanneer een radiator (vloeistof-naar-lucht-warmtewisselaar) in de behuizing van de regelaar wordt geïnstalleerd.

Met een vloeistofgekoeld regelaarsysteem moet ervoor worden gezorgd dat in de behuizing van de regelaar geen condensatie plaatsvindt. Omdat de leidingen zich in de behuizing van de regelaar bevinden, is het essentieel dat de temperatuur van de koelvloeistof boven het dauwpunt blijft. De veiligste manier om condensatie te voorkomen is ervoor te zorgen dat de temperatuur van de koelvloeistof hoger blijft dan de omgevingstemperatuur in de behuizing van de regelaar.

10.6 Reduceren van een frequentieregelaar

Net als voor alle elektronische eenheden zijn ook voor frequentieregelaars maximale omgevingstemperaturen gedefinieerd. Als de maximale omgevingstemperatuur wordt overschreden, kan dit leiden tot uitval van de regelaar. Bovendien verkort het de levensduur van de elektronica. Volgens de vergelijking van Arrhenius wordt de levensduur van een elektronische component met 50% verkort bij elke $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ dat deze boven de voor de component gespecificeerde temperatuur werkt. Als frequentieregelaars continu moeten werken in de buurt van de maximale nominale bedrijfstemperatuur en de gespecificeerde levensduur van de regelaar toch moet worden gehandhaafd, is het een optie om het vermogen te reduceren. De coëfficiënt voor het reduceren voor de nominale stroom van een regelaar is doorgaans $1,5\%/^{\circ}\text{C}$.

Hogere schakelfrequenties leiden tot minder irritante motorgeluidsniveaus. De vermogensdissipatie in de inverter 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 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, kan deze continu 100% van de nominale uitgangsstroom leveren bij een schakelfrequentie van 4 kHz. Als de omgevingstemperatuur toeneemt tot $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, is een stroom van slechts zo'n 75% bij continu bedrijf mogelijk zonder verkorting van de levensduur. Als de verkorting van de levensduur niet acceptabel is, moet een grotere frequentieregelaar met voldoende vermogensreserve worden gebruikt.

In Fig. 10.9 Vermogensreductieschema voor schakelfrequentie is de schakelfrequentie van de inverter uitgezet op de x-as. De uitgangsstroom (in %) van de eenheid is uitgezet op de y-as.

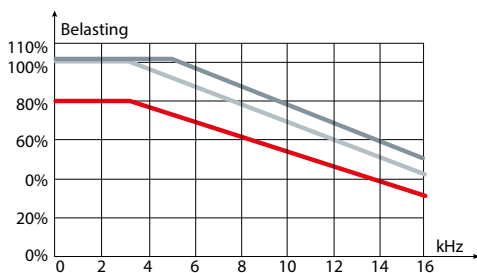


Fig. 10.9 Vermogensreductieschema voor schakelfrequentie

Vermogensreductiecurves moeten niet alleen worden toegepast bij verhoogde temperaturen, maar ook bij lagere luchtdruk, zoals bij frequentieregelaars die worden gebruikt bij hoogtes boven 1000 meter.

Op grotere hoogte is de lucht dunner. Dunne lucht heeft een slecht thermisch vermogen, d.w.z. de temperatuurstijging per geabsorbeerde eenheid energie bij een vast volume. Wanneer de installatiehoogte zich boven de 1000 meter bevindt, moet de maximale belastingsstroom voor elke 100 m met 1% worden verlaagd. Op een hoogte van 2500 m moet de belastingsstroom bijvoorbeeld worden beperkt tot 85% van de nominale uitgangsstroom. De installatiehoogte heeft geen gevolgen voor de thermische prestaties van vloeistofgekoelde frequentieregelaars.

10.7 Regeneratieve energie

Als een motor wordt aangedreven door een frequentieregelaar die tijdens het vertragen van de rotor sneller loopt dan het magnetisch draaiveld, gaat de motor werken als generator. Afhankelijk van de hoeveelheid energie die vanaf de motor wordt teruggevoerd en hoe vaak, moeten diverse maatregelen worden genomen. Als het vermogen groter is dan de totale vermogensverliezen van de motor en de frequentieregelaar, zal de tussenkringspanning toenemen totdat de regelaar, bij een gedefinieerde spanning, de uitgangstrap uitschakelt en als gevolg hiervan de controle over de motor verliest.

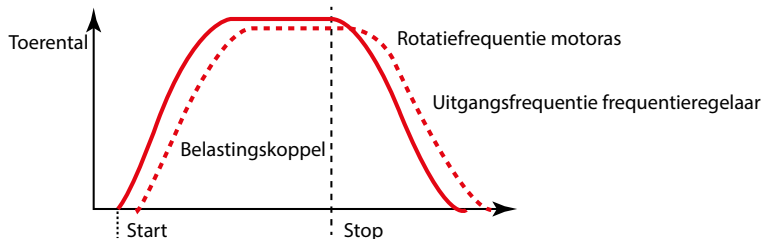


Fig. 10.10 Start/stop-illustraties voor het regeneratieve principe

Een eenvoudige manier om een dergelijke situatie van overspanning te voorkomen, is de overdimensionering van de frequentieregelaar. De hogere capaciteit van de DC-tussenkring zou dan in staat zijn om meer regeneratieve energie te absorberen en zo het risico op overspanning te beperken. Dit is echter vaak een duurder oplossing in vergelijking met dynamische remmethodes, die tevens de mogelijkheid bieden om de energie terug te voeren naar het voedingsnet. Zie voor meer informatie de relevante subsecties in hoofdstuk 4 Ster- en driehoekconfiguratie bij veldverzwakking.

10.8 Motorkabels

De vermogenscomponenten van frequentieregelaars zijn ontworpen voor motorkabels met een specifieke lengte. Als de gespecificeerde lengte van de motorkabels wordt overschreden, kunnen er storingen optreden en kan de frequentieregelaar uitschakelen (trip) en een fout-/alarmmelding genereren. De capaciteit van de gebruikte kabel is deels verantwoordelijk voor dit gedrag. Als de capaciteit aan de uitgang van de frequentieregelaar een gespecificeerde waarde overschrijdt, kunnen er op de kabels transiënten optreden die kunnen leiden tot een storing van de frequentieregelaar.

De meeste fabrikanten schrijven voor hun frequentieregelaars afgeschermd 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-afgeschermd kabels worden gebruikt. Omdat de niet-afgeschermd kabel een lagere capacitieve belasting op de frequentieregelaar 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-afgeschermd kabels is alleen aan te raden als er andere maatregelen worden getroffen. Zelfs als een installatie tijdens de acceptatietest correct werkt zonder afgeschermd 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-afgeschermd kabels.

Let bij de installatie van kabels goed op dat u geen extra inductantie veroorzaakt doordat u kabels in de vorm van een luchtkerninductor aanlegt. Voorkom ook extra capaciteit als gevolg van parallelle geleiders.

Als meerdere motoren parallel worden aangesloten op de uitgang van een frequentieregelaar, zijn de toegestane lengtes van de afzonderlijke motorkabels veel korter. Houd er rekening mee dat sommige fabrikanten de geometrische som van de afzonderlijke kabellengtes specificeren. In dergelijke gevallen is het aan te raden om de motorkabel door te lussen. (Fig. 10.11 Doorgeluste verbonden motoren). Bij een doorgeluste verbinding moeten de lengtes van de afzonderlijke motorkabels worden opgeteld om de lengte van de verbonden kabel te bepalen. Een stervormige configuratie kan aan de andere kant problemen veroorzaken vanwege de extra capaciteit tussen de afzonderlijke geleiders.

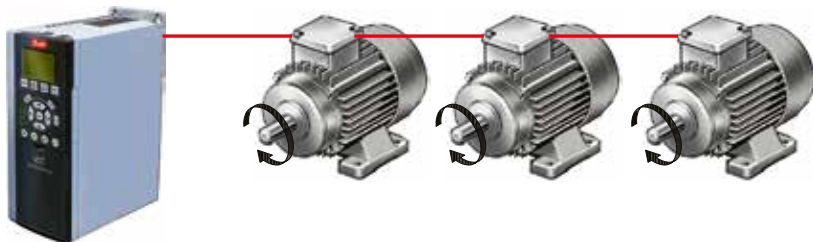


Fig. 10.11 Doorgeluste verbonden motoren

10.9 Omgeving

Voordat een frequentieregelaar wordt geïnstalleerd, moeten diverse afwegingen worden gemaakt ten aanzien van de omgeving. De volgende factoren moeten worden gecontroleerd:

- Omgevingstemperatuur
- Vochtigheid
- Luchtkwaliteit (stof, vervuiling)
- Hoogte
- EMC
- Harmonische vervorming
- Trilling

Voor alle frequentieregelaars 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 frequentieregelaar wordt geïnstalleerd in een omgeving waar de omgevingstemperatuur hoger is dan gespecificeerd, moet het vermogen worden gereduceerd. Zie hoofdstuk 10.6 Reduceren van een frequentieregelaar. Bij een lage luchtdruk vermindert de koelcapaciteit van lucht. Boven 1000 m moet reductie van frequentieregelaars worden overwogen.

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 om 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 frequentieregelaars dragen de volgende oplossingen aan om de effecten van de omgeving te minimaliseren:

- De frequentieregelaars monteren in een centrale kast met lange motorkabels.
Op deze manier worden de frequentieregelaars uit de kritieke omgeving gehouden
- Airconditioning in de schakelkast installeren om ervoor te zorgen dat de kritieke omgeving niet in aanraking komt met de frequentieregelaars en andere elektronica (Overdruk)
- Sommige frequentieregelaars worden uitgerust met een koude plaat. Met deze oplossing kan de frequentieregelaar in een kast worden geplaatst, waarbij de warmte via de koude plaat naar buiten wordt geleid. Zo wordt de elektronica van de frequentieregelaars gescheiden gehouden van de kritieke omgeving
- Backchannelkoeling is een gesloten en gecontroleerd koelsysteem dat de frequentieregelaar koelt in de kast, terwijl deze weg wordt gehouden van de kritieke omgeving
- Een frequentieregelaar gebruiken die is uitgerust met een afgedichte behuizing.
Fabrikanten van frequentieregelaars 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
- Frequentieregelaars met vormvolgende coating bestellen. Dit biedt een aanzienlijke verbetering van de bescherming tegen chloor, waterstofsulfide, ammoniak en andere agressieve omgevingen



Fig. 10.12 Printplaat met vormvolgende coating

In alle frequentieregelaar-installaties moet rekening worden gehouden met EMC en harmonische vervorming. De stuursignalen die zijn verbonden met een frequentieregelaar kunnen bijvoorbeeld vrij gevoelig zijn voor elektromagnetische interferentie en een regelaar kan tegelijkertijd een belangrijke bron van EMI en harmonische vervorming zijn.

De frequentieregelaar wordt door professionals gebruikt als een onderdeel van een complex(e), omvangrijker(e) uitrusting, systeem of installatie. Er moet worden opgemerkt dat de installateur verplicht is om de installatieinstructies van de fabrikant te volgen om de EMC-karakteristieken van de frequentieregelaar in stand te houden.

Zie hoofdstuk 6 Elektromagnetische compatibiliteit en hoofdstuk 8 Netstoring voor meer informatie over EMC en harmonischen.

10.10 Centrale versus decentrale installatie

De meest gangbare installatiewijze is zonder enige twijfel de centrale installatie van frequentieregelaars 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 foutanalyses.

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 fabrikant van de frequentieregelaar moeten boven en onder de eenheid en tussen de eenheid en aangrenzende componenten minimumafstanden worden aangehouden. Voor een betere warmteafvoer wordt directe montage op de achterwand van de schakelkast aanbevolen. Sommige fabrikanten specificeren ook minimumafstanden tussen de afzonderlijke eenheden. Het is echter beter om de eenheden waar mogelijk naast elkaar te installeren om het montageoppervlak effectief te gebruiken.

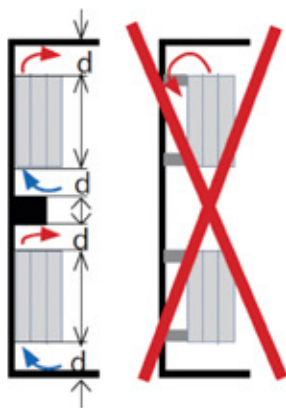


Fig. 10.13 Aanbevelingen voor installatie van regelaars (centrale oplossing)

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 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 frequentieregelaar dicht bij de motor gemonteerd. De frequentieregelaars kunnen op zichzelf staande kasten of wandgemonteerd zijn of direct op de motor worden 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. Bij decentrale configuraties wordt meestal een veldbus gebruikt om de regelaars te besturen.

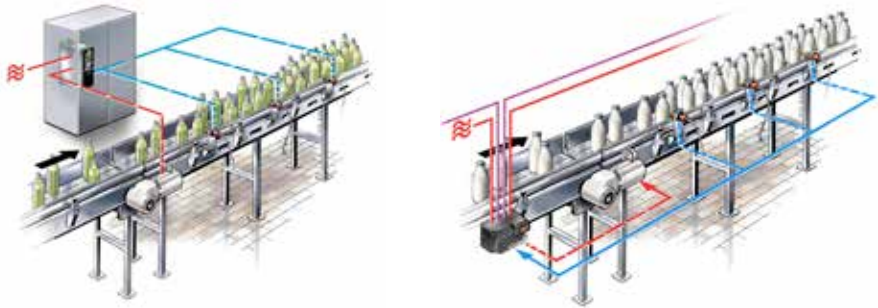


Fig. 10.14 Twee concepten – verschillende voordelen

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 zwaardere omgeving en soms ook nog van het flexibele type zijn. Daarnaast moet installatie van eenheden op ontoegankelijke locaties worden vermeden, om snelle toegang voor onderhoudswerkzaamheden mogelijk te maken.

Een ander belangrijk aandachtspunt is de onderverdeling van een decentraal netwerk. Om economische redenen is het gunstig om eenheden te combineren tot groepen. Een zorgvuldige afweging is nodig om te bepalen welke groepen voor hun werking afhankelijk zijn van andere groepen en welke groepen autonoom kunnen, moeten of mogen blijven werken. Als bijvoorbeeld bepaalde chemische processen niet kunnen worden onderbroken, mag uitval van een groep op lager niveau geen storing veroorzaken in belangrijker groepen.

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 ook beschikken over kennis over de structuur (wat gebeurt er met het totale systeem als een individuele eenheid uitvalt) en de omgevingscondities van een decentraal netwerk. Bovendien moet hij in staat zijn om 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 kabel lengtes en het gebruik van apparatuurmodules die al zijn gebouwd en getest door de fabrikant of leverancier van de machine.

10.11 Voorbeelden

De volgende voorbeelden illustreren de basisprocedure voor het selecteren van een frequentieregelaar tijdens het ontwerpproces. In deze voorbeelden wordt het hieronder getoonde datablad gebruikt bij het selectieproces. De VLT® AutomationDrive FC 302 is geselecteerd als een frequentieregelaar 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 (mm²)	[(AWG²)]	16 (6)				35 (2)			
Max. voorzekeringen	[A]	63				80			

Tabel 10.3 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 schroeftransportband 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 gebruiken.

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.

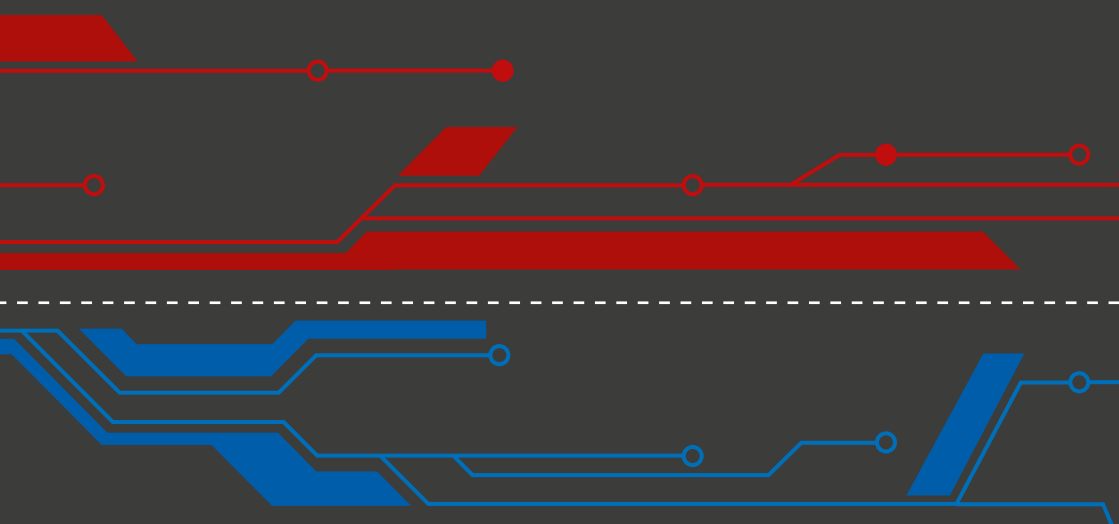
Aanbevolen oplossing 2

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 ook over specifieke functies voor extra energiebesparing.

The Danfoss logo is written in a white, elegant script font on a red rectangular background.

Danfoss

ENGINEERING
TOMORROW

An abstract graphic consisting of several horizontal lines in red and blue. Some lines are solid, while others have circular nodes. The lines are arranged in a way that suggests a circuit or a network, with some lines branching off. The background is dark grey.

Danfoss Drives, Vareseweg 105, 3047 AT Rotterdam, Nederland, Tel. +31 (0)10 808 2222, cs@danfoss.nl, danfoss.nl
Danfoss Drives, A. Gossetlaan 28, 1702 Groot-Bijgaarden, België, Tel. +32 (0) 2 808 27 00, drives.sales@danfoss.be, danfoss.com/nl-be/

A white silhouette of an industrial city skyline against a dark background. The skyline includes various buildings, factories with smokestacks, and bridges.

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