

## 1. Inleiding

Door de ontwikkeling van microprocessoren en vermogenstransistoren is vanaf medio jaren tachtig het toepassen van frequentieregelde aandrijvingen aanzienlijk toegenomen. De eigenschappen van een frequentieregelde draaistroomaandrijving doen momenteel nauwelijks meer onder voor die van een conventionele gelijkstroomaandrijving. Bepaalde eigenschappen zijn zelfs duidelijk in het voordeel van de frequentieregelde aandrijving, zoals bijvoorbeeld het onderhoud, de eenvoudiger te realiseren hogere beschermingsklasse, de explosie-beveiliging, het lagere motorgewicht, het kleinere massatraagheidsmoment en het daarmee verbonden kleinere benodigde vermogen om versnellingen te realiseren en de kortere cyclustijden aan het lastwerktuig.

Frequentieregelaars werken volledig digitaal. Daardoor kunnen deze apparaten in automatisch werkende installaties worden toegepast en door de communicatie via bussystemen door overkoepelende computers worden aangestuurd en gecontroleerd. Frequentieregelaars zijn bijzonder gebruikersvriendelijk door:

- Menugestuurde programmering en instelling van de parameters met een tekstdisplay en toetsen op het apparaat, of met de PC (keuze uit meerdere talen).
- Zelfdiagnose van het apparaat.
- Geïntegreerde meetfuncties (voor U, I, n, in- en uitgangssignalen, enz.).
- Zelfinstelling van een aantal specifieke parameters.

De voordelen van de frequentieregelaartechniek zijn alleen dan zonder beperkingen bruikbaar, als alle regels voor een juiste dimensionering in acht worden genomen en worden toegepast.

Daarbij is kennis van de eigenschappen van een draaistroomkortsluitrotormotor voor de juiste projectering van een aandrijving (= motor(reductor) + frequentieregelaar) van wezenlijk belang.

De frequentieregelaartechniek biedt alle voorwaarden om tot een bedrijfszeker en storingvrij bedrijf te komen, wanneer reeds in de projecteringsfase de mogelijke probleemgebieden onderkend worden. De volgende punten verdienen uit dit oogpunt extra aandacht:

- Elektromagnetische compatibiliteit (EMC-richtlijn).
- Veiligheidswetgeving (Machinerichtlijnen/Richtlijn ter voorkoming van ongevallen VBG 4).
- Arbeidsomstandigheden (emissiebegrenzing, bv. van geluid).

Deze technische handleiding informeert u over deze thema's als voorwaarde voor een succesvolle toepassing van frequentieregelde aandrijvingen.

## Inhoudsopgave

### **2. De draaistroommotor**

- 2.1. Eigenschappen van de draaistroomkortsluitrotormotor
  - 2.1.1. De draaistroomkortsluitrotormotor bij netbedrijf
  - 2.1.2. De draaistroomkortsluitrotormotor bij gebruik van een frequentieregelaar
    - 2.1.2.1. Veldverzwakkingsbedrijf vanaf  $f_{\text{kantel}} = 50$  Hz
    - 2.1.2.2. Vergroot bereik van het constant afneembaar koppel tot  $f_{\text{kantel}} = 87$  Hz
  - 2.1.3. Het generatieve bedrijf van de draaistroomkortsluitrotormotor
  - 2.1.4. De veldgeoriënteerde toerentalregeling
- 2.2. De keuze van een optimaal voor de toepassing geschikte draaistroomkortsluitrotormotor
- 2.3. Andere soorten draaistroommotoren
  - 2.3.1. De reluctantiemotor
  - 2.3.2. De schuifankermotor

## 2. De draaistroommotor

### 2.1. Eigenschappen van de draaistroomkortsluitrotormotor

#### 2.1.1. De draaistroomkortsluitrotormotor bij netbedrijf

De draaistroomkortsluitrotormotor is robuust, praktisch onderhoudsvrij en vergeleken met andere elektromotorsoorten de voordeligste oplossing. De bedrijfseigenschappen bij netbedrijf, afhankelijk van het nominale vermogen  $P_n$  (ontwerpvermogen) en het pooltal, zijn:

- hoge aanloopstroom  $I_a$  ( $3,5...7 \times I_{nom}$ );
- een hoog losbreekkoppel  $T_a$  ( $2...3 \times T_{nom}$ );
- een lastafhankelijk toerental  $n$  (slipwaarden:  $2...8\%$  resp.  $30...120$  r/min toerentalafname bij  $T_{nom}$ , gebaseerd op  $1500$  r/min);
- toelaatbare koppeloverbelastbaarheid tussen  $1,6...1,8 \times T_{nom}$ . Bij hogere belasting neemt het risico van kippen toe, d.w.z. het motortoerental daalt aanzienlijk en de motor zal binnen korte tijd ( $10...30$  s) zijn maximum toelaatbare grenstemperatuur bereiken;
- een begrensde schakelfrequentie (het vanuit thermische overwegingen toelaatbare aantal schakelingen per uur), afhankelijk van het massa draagheidsmoment.

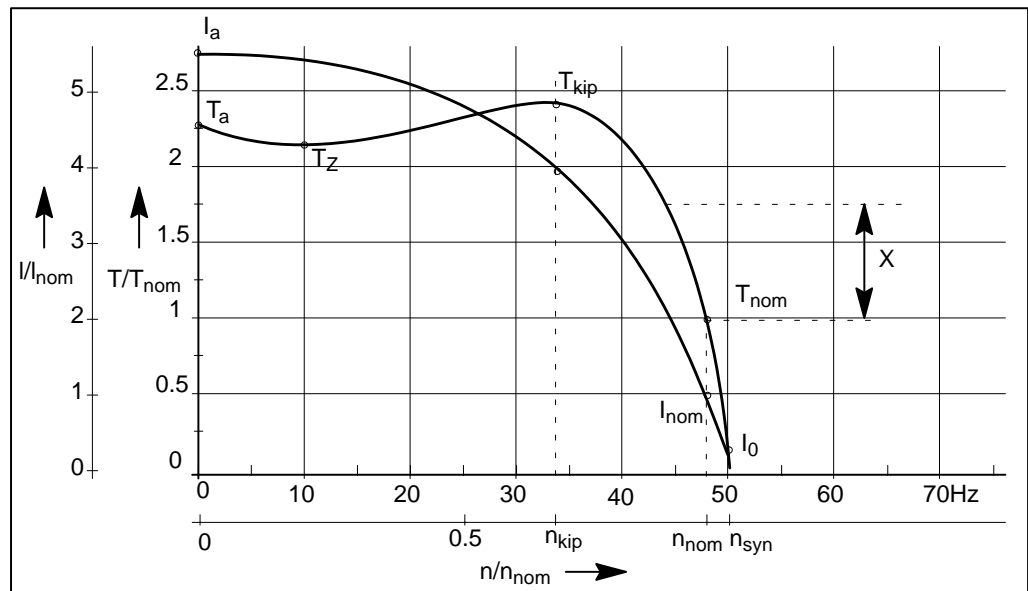


Fig. 1. - Bedrijfskarakteristieken van een draaistroomkortsluitrotormotor voor het koppel en de stroomsterkte aan het 50 Hz net (voorbeeld 5,5 kW/4-polig).

Bereik X: Praktisch toelaatbaar bereik van overbelasting zonder risico van overschrijding van het kippkoppel  $T_{kip}$

Lijst van gebruikte afkortingen

- $T_a$  = motorlosbreekkoppel
- $T_z$  = motorzadelkoppel
- $T_{kip}$  = motorkippkoppel
- $T_{nom}$  = nominaal motorkoppel (ontwerpkoppel)
- $I_{nom}$  = nominale stroomsterkte (ontwerpstroom)
- $I_0$  = nullaststroom
- $I_a$  = aanloopstroomsterkte

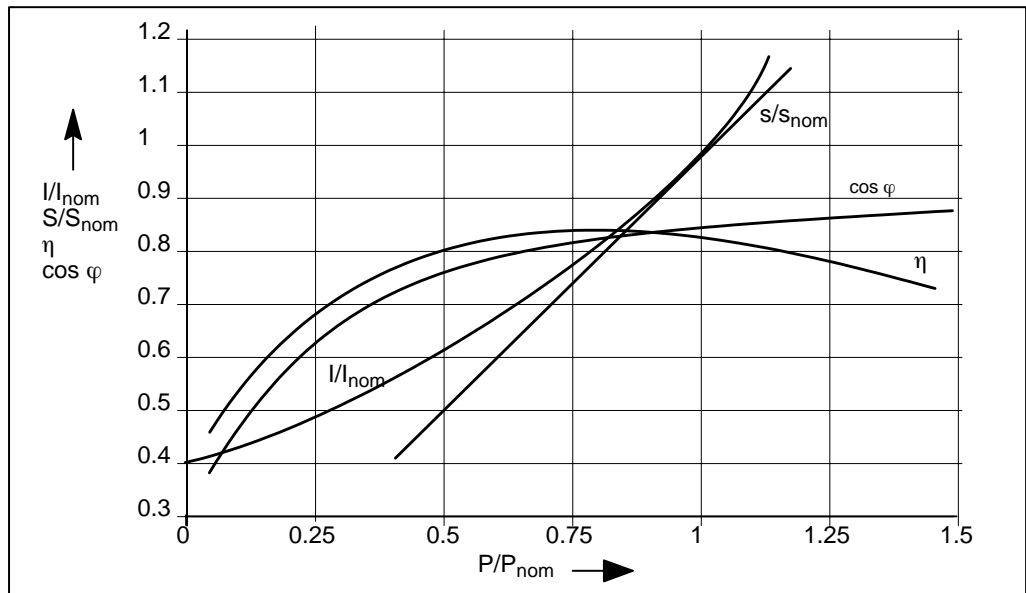


Fig. 2. - De kenmerkende waarden van: rendement, slipafhankelijkheid  $s/s_{nom}$ ,  $\cos \varphi$  en stroomafhankelijkheid  $I/I_{nom}$  van een draaistroomkortsluitrotormotor als afhankelijke van de belasting.

Lijst van gebruikte afkortingen

$I/I_{nom}$  = bedrijfsstroom in vergelijking met de nominale stroomsterkte

$s/s_{nom}$  = bedrijfsslip in vergelijking met de nominale slip

$\eta$  = rendement

$\cos \varphi$  = arbeidsfactor

## 2.1.2. De draaistroomkortsluitrotormotor bij gebruik van een frequentieregelaar

Door het gebruik van een frequentieregelaar krijgt de draaistroomkortsluitrotormotor verbeterde en deels aanvullende eigenschappen. De volgende kenmerkende waarden zijn gebaseerd op een qua vermogen op elkaar afgestemde motor-frequentieregelaar-combinatie en een optimaal werkende frequentieregelaar:

- aanloopstroombegrenzing typerend tot  $1,5 \times I_{nom}$  instelbaar;
- koppelbegrenzing instelbaar tussen  $1,2 \dots 1,5 \times T_{nom}$ ;
- toerentalafhankelijkheid  $1 \dots 3\%$  van  $n_{nom}$ , afhankelijk van de kwaliteit van de slipcompensatie en het instelbereik;
- overbelastbaarheid van de motor tot het niveau van de koppelbegrenzing. Het kippen van de motor wordt door de frequentieregelaar vermeden;
- de schakelfrequentieproblematiek is bij het gebruik van frequentieregelaars niet meer van belang, omdat de motor voortdurend in het proportionele deel van de belastingsgrafiek met maximaal  $1,5 \times I_{nom}$  wordt gebruikt;
- het toerentalinstelbereik is, afhankelijk van maximum toerental en motorvermogen, doorgaans ca.  $1 \dots 20$  (koelluchtventilatoropbrengsten beperken bij lagere toerentalen de inschakelduur en het af te nemen koppel);
- een mogelijk nadeel: de motor kan een verhoogd geluidsniveau ontwikkelen wanneer de maximum frequentie boven de 50 Hz ligt (dit wordt veroorzaakt door de koelluchtventilator) en wanneer de PWM-frequentie in het hoorbare bereik ligt ( $0,5 \dots 8$  kHz, echter vooral onder het niveau van 3 kHz).

Bij het projecteren van frequentieregelaars heeft men de keuze uit twee mogelijkheden om de motor boven de nominale frequentie (50 Hz) te gebruiken:

1. met gelijkblijvende nominale motorspanning, of
2. met een proportioneel met de frequentie toenemende spanning.

## 2.1.2.1. Veldverzwakkingsbedrijf vanaf $f_{\text{kantel}} = 50 \text{ Hz}$

Bij het eerste geval spreekt men van veldverzwakking. Beneden de nominale resp. de ontwerpfrequentie is het bereik waarin de motor een constant koppel ontwikkelt ( $U/f = \text{constant}$ ). Bij de ontwerpfrequentie wordt de ontwerpspanning bereikt. Dit punt wordt de kantelfrequentie genoemd. Vanaf dit punt werkt de motor in het gebied van veldverzwakking, hetgeen betekent dat naarmate het toerental toeneemt het nominaal overbrengbaar koppel daalt (constant vermogen).

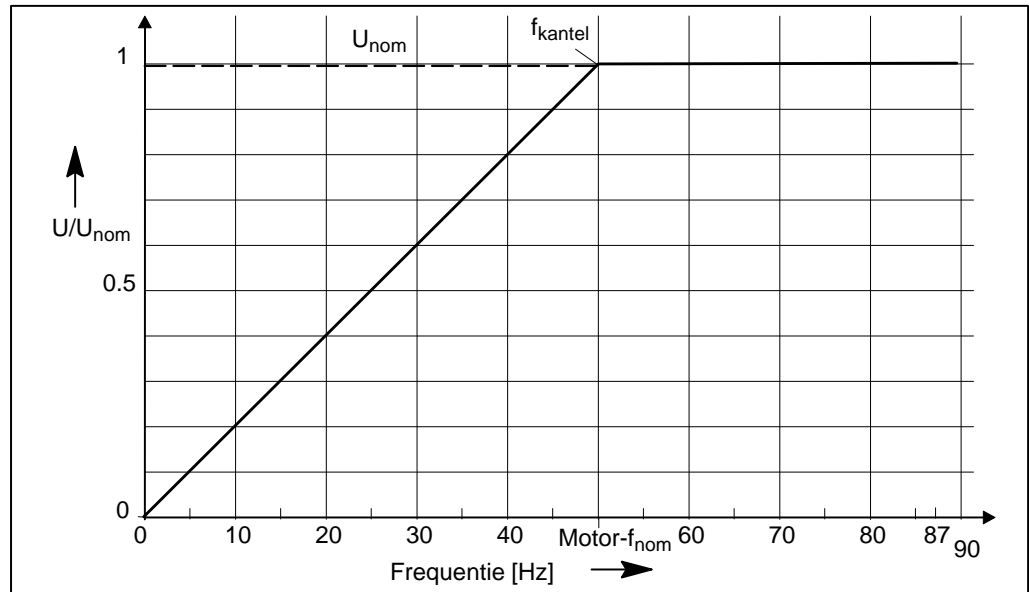


Fig. 3. -  $U/f$  karakteristiek van de frequentiegeregelde aandrijving met een kantelfrequentie van 50 Hz.

Lijst van gebruikte afkortingen:

$U_{\text{nom}}$  = nominale motorspanning, resp. ontwerpspanning = nominale netspanning  
 $f_{\text{kantel}}$  = kantelfrequentie (= nominale motorfrequentie resp. ontwerpfrequentie)

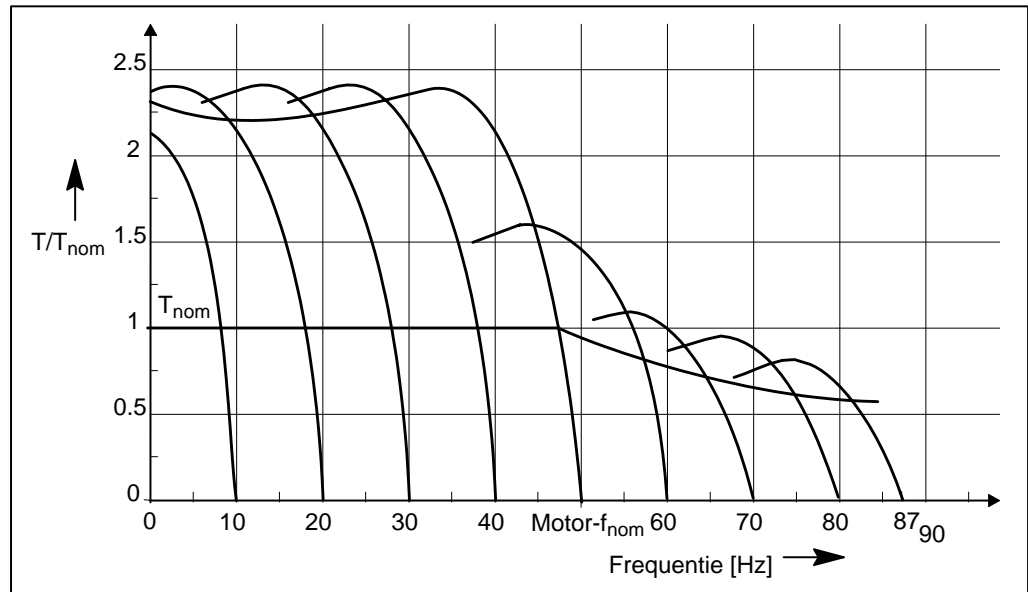


Fig. 4. - Bedrijfskarakteristiek  $T_{kip}/T_{nom} = f(n)$  van een draaistroomkortsluitrotormotor, die gevoed wordt door een frequentieregelaar met een  $U/f$  relatie (karakteristiek) volgens fig. 3.

Lijst van gebruikte afkortingen:  $T_{nom}$  = nominaal motorkoppel, resp. ontwerpkoppel

### 2.1.2.2. Vergroot bereik van het constant afneembaar koppel tot $f_{kantel} = 87 \text{ Hz}$

Bij het tweede geval wordt het bereik waarover  $U/f = \text{constant}$  tot bv.  $f_{kantel} = 87 \text{ Hz}$  ( $= 50 \text{ Hz} \times \sqrt{3}$ ) vergroot. Volgens deze karakteristiek krijgt de motor bij 50 Hz de frequentieregelaarspanning van  $400 \text{ V} : \sqrt{3} = 230 \text{ V}$ . Hieruit volgt dat de motor voor 230 V bij 50 Hz gewikkeld dient te zijn. Aan deze voorwaarde wordt voldaan wanneer de motor met de nominale, resp. ontwerpspanning van 230/400 V in driehoek aangesloten is. Het is belangrijk, dat gelijktijdig met de spanning ook de frequentie wordt verhoogd. De  $U/f$  verhouding blijft dus ook boven de 230 V dezelfde als onder zijn ontwerpspanning van 230 V.

**Opmerking:** Bij vermogens vanaf ca. 4 kW worden overwegend motoren met de nominale resp. ontwerpspanning van 400 V/690 V toegepast. Voor dergelijke wikkelingen is de bovengenoemde gebruikswijze met  $f_{kantel} = 87 \text{ Hz}$  niet mogelijk. Om die reden dient men erop te letten, dat deze motoren voor 230 V/400 V besteld worden.

De verbreding van het toerenbereik boven de 50 Hz tot 87 Hz heeft als resultaat, dat het bereik waarover de motor belast kan worden met een constant koppel tot 87 Hz wordt verbreed (zie pag. 15). Hieruit volgt dat het vermogen van de motor tot de frequentie van 87 Hz toeneemt met de  $\sqrt{3}$  maal hogere waarde van zijn nominale (ontwerp) vermogen. Bij optimaal hiertoe functionerende frequentieregelaars, dus **vooral** bij bedrijf met de **volle uitgangsspanning** en bij een sinusvormige stroom, is dit hogere vermogen zelfs daadwerkelijk **gedurende lage inschakelduurtoepassingen afneembaar**, indien de motor met isolatieklasse F wordt uitgevoerd. Tijdens ononderbroken bedrijf (S1) kan de motor een ca. 35% verhoogd vermogen leveren. Dit komt overeen met het eerstvolgende hogere nominale vermogen volgens de staffeling van motorvermogens volgens de normen. Voorbeeld: een 3 kW motor  $\Delta/230 \text{ V}$  levert bij 87 Hz:  $P = 4 \text{ kW}$  in S1 bedrijf.

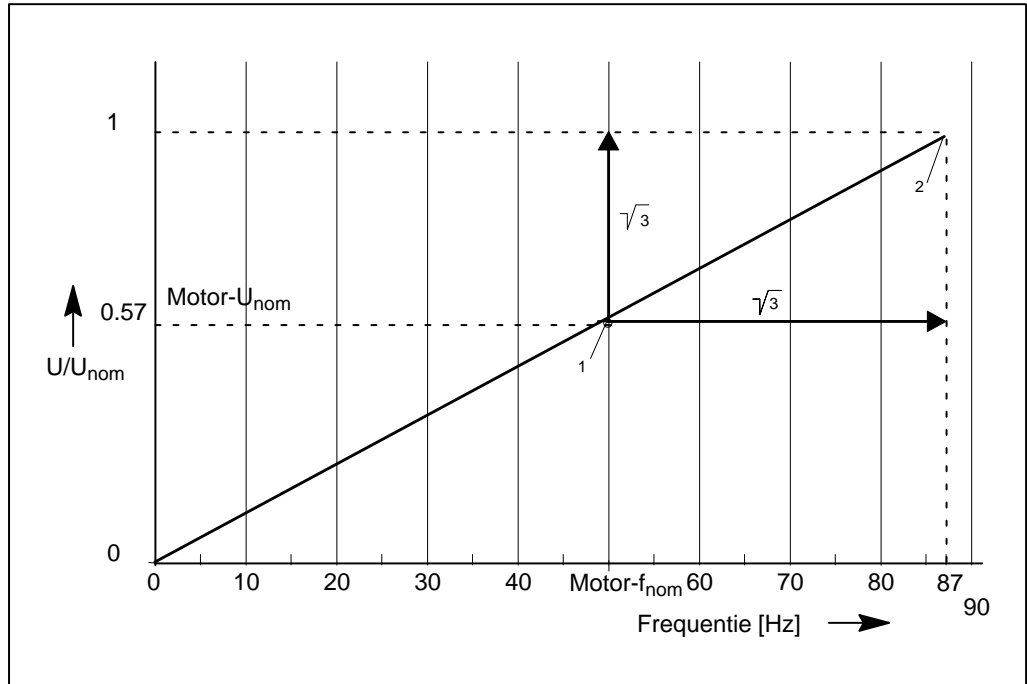


Fig. 5. - U/f karakteristiek van de frequentieregelaar met kantelfrequentie 87 Hz.

Verwijzingen: 1 = bedrijfspunt met motor  $P_{nom}$   
 2 = bedrijfspunt met  $P_{nom} * \sqrt{3}$

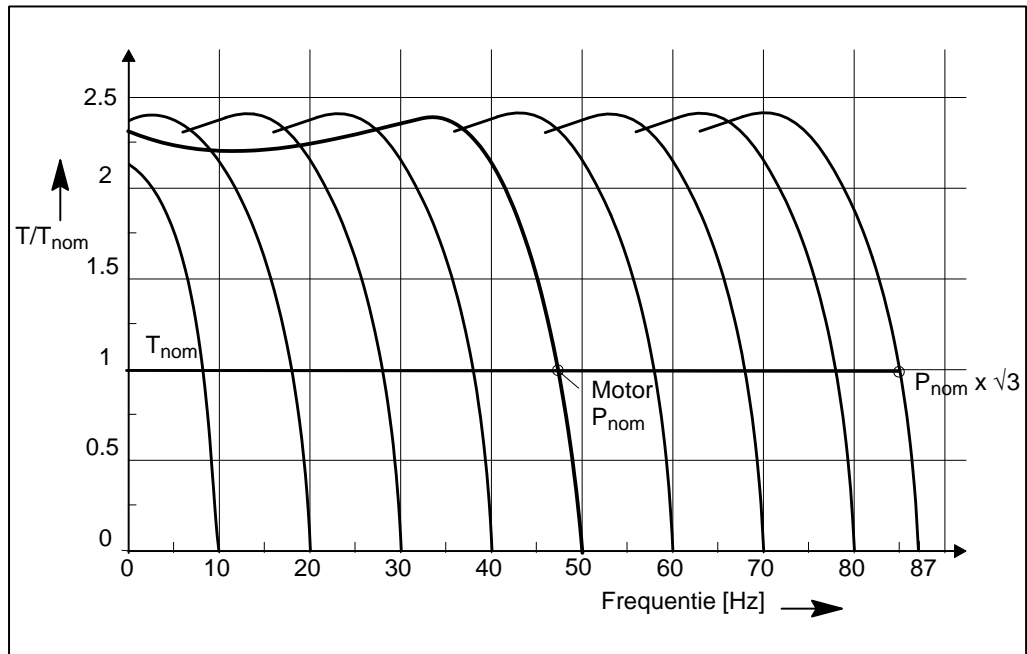


Fig. 6. - Koppel-toerenkromme  $T_{nom} = f(n)$  van een draaistroomkortsluitrotormotor, die gevoed wordt door een frequentieregelaar met een U/f karakteristiek volgens figuur 5.

### 2.1.3. Het generatieve bedrijf van de draaistroomkortsluitrotormotor

Generatief bedrijf treedt op als de voedingsfrequentie **onder** de rotatiefrequentie van de motor ligt (tijdens motorbedrijf ligt de voedingsfrequentie boven de rotatiefrequentie). Dit houdt in dat het teken van de slip bij generatief bedrijf omkeert.

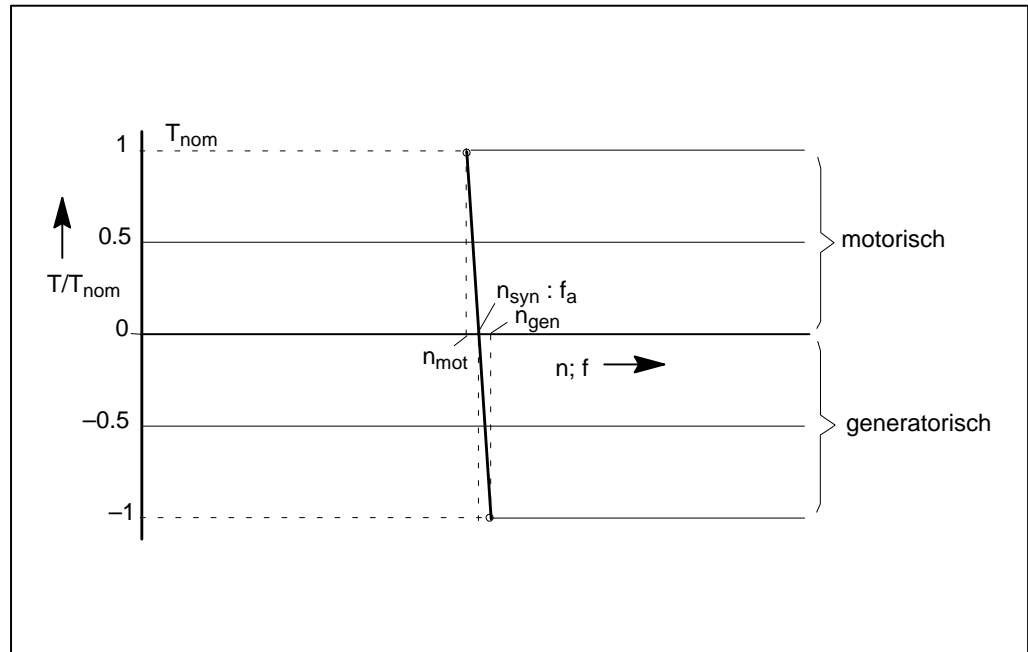


Fig. 7. - Weergave van de karakteristiek  $T = f(n)$  van een draaistroomkortsluitrotormotor bij het nominale resp. ontwerptoerental.

Het generatieve bedrijf wordt bij de volgende condities bereikt:

- De motor wordt door het lastwerktuig aangedreven. Hierdoor stijgt het toerental boven  $n_{syn}$  tot de oversynchrone waarde, waarbij de motor het benodigde generatieve tegenkoppel  $T_{gen}$  levert.  
Voorbeeld: een hijswerk met dalende last ( $v = \text{constant}$ ).
- De motor wordt gebruikt met een constant toerental en dient van hieruit generatief te vertragen. Door vermindering van de bedrijfsfrequentie met een waarde van 2 x de slipfrequentie wisselt de motor van  $T_{mot}$  naar  $T_{gen}$ . Door voortdurende vermindering van de bedrijfsfrequentie via de integratorsteilheid van de frequentieregelaar blijft de generatieve toestand tot in stilstand gehandhaafd. Dit betekent, dat de aandrijving met een constant blijvend koppel vertraagt.  
Voorbeeld: Een rijwerkaandrijving, die vanuit  $v_{max}$  vertraagd wordt.

### 2.1.4. De veldgeoriënteerde toerentalregeling

De eigenschappen van een frequentieregelde draaistroomkortsluitrotormotor kunnen door het gebruik van een veldgeoriënteerde toerentalregeling aanzienlijk verbeterd worden. De volgende componenten zijn hiervoor extra nodig:

- een aan de motor gebouwde pulsgever resp. encoder;
- een in de frequentieregelaar geïntegreerde regelaar met pulsverwerking en voeding voor de encoder.

De volgende eigenschappen kunnen door een veldgeoriënteerde toerentalregeling verbeterd worden (omdat er hier sprake is van een daadwerkelijke regeling met terugkoppeling zijn de tussen haakjes geplaatste begrippen van toepassing):

- het toerentalinstelbereik (regelbereik). Dit kan van 1:20 tot minimaal 1 : 100 bij 50 Hz worden vergroot; bij hogere  $f_{max}$  overeenkomstig meer;
- de belastingsafhankelijke afwijking van het toerental (statische regelnauwkeurigheid). Deze verbetert van 1..3% naar  $< 0,3\%$  bij  $n_{nom}$  en een belastingverandering  $\Delta T = 80\%$ ;
- de uitdemptijd bij belastingsvariatie (regeldynamiek). Bij een belastingverandering  $\Delta T = 80\%$  verbetert deze waarde van ca. 0,5 - 2 s naar 0,3 - 0,6 s;
- het koppel. Het koppel kan binnen de grenzen van het in te stellen toerentalbereik aanzienlijk worden verhoogd. Zie hiervoor ook figuur 10, met name de curven 4 en 5.

Naast de vergroting van het regelbereik, dat de eigenschappen van een geregelde gelijkstroommotor benadert, is de verhoging van het bereikbare koppel een interessant aspect. Bij een daartoe aangepaste frequentieregelaarconfiguratie kan de motor kortstondig zelfs hogere koppels leveren dan tijdens netbedrijf mogelijk is.

Het mechanisme voor de vorming van een kippkoppel (bij netbedrijf ca. 2 - 3 x  $T_{nom}$ , afhankelijk van het type) is de toenemende, sterk stijgende ohmse en inductieve spanningsval  $\Delta U_R$  en  $\Delta U_X$  in de stator door de hoge stroomopname bij het kippkoppel ( $I = 3 - 4,5 \times I_{nom}$ , zie figuur 1).

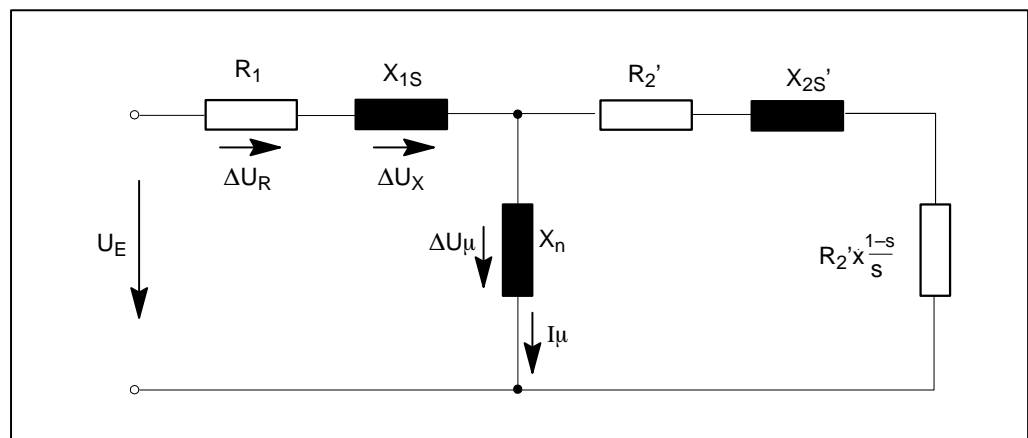


Fig. 8. - Vervangingscircuit (1-polig) van een draaistroomkortsluitrotormotor.

Het resultaat is een sterke afname van de magnetiseringsspanning  $U_\mu$  resp. de magnetiseringsstroom  $I_\mu$ . Daardoor neemt de magnetische veldsterkte af, die noodzakelijk is voor het motorkoppel. Wanneer men de motor een hogere ingangsspanning  $U_E$  aanbiedt, dan kunnen de toenemende interne spanningsvallen  $\Delta U_R$  en  $\Delta U_X$  langer gecompenseerd worden.

De motor ontwikkelt een hoger kippkoppel. De samenhang tussen de hogere ingangsspanning en het hogere kippkoppel is weergegeven in de volgende figuur.

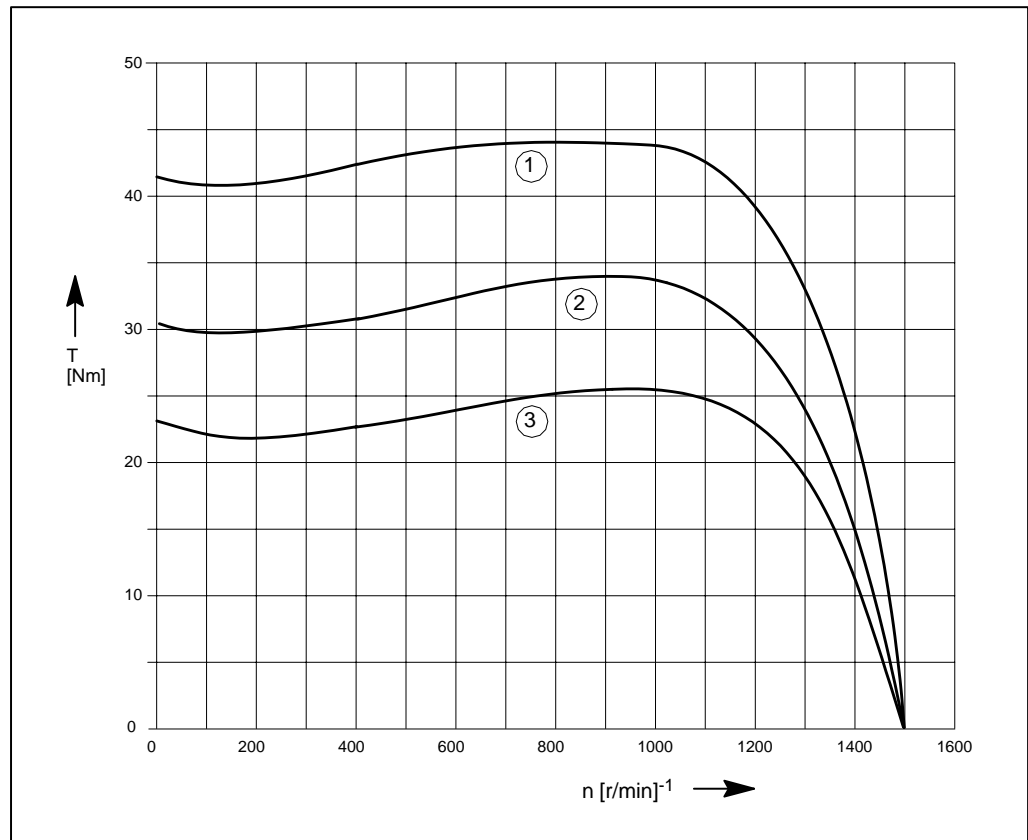


Fig. 9. - Koppel-toerenkrommen bij verschillende spanningen voor een 4-polige asynchroonmotor DT 90 L4.

$$P_{nom} = 1,5 \text{ kW}, U_{nom} = 3 \times 400 \text{ V} / 50 \text{ Hz}, T_{nom} = 10,1 \text{ Nm}.$$

Kromme 1 (boven)  $U_E = 480 \text{ V} = U_{nom} + 20\%$

Kromme 2 (midden)  $U_E = 440 \text{ V} = U_{nom} + 10\%$

Kromme 3 (onder)  $U_E = 400 \text{ V} = U_{nom}$

Het kippkoppel tijdens normaal bedrijf van 26 Nm (kromme 3) wordt door  $U_{nom} + 20\%$  verhoogd tot 44 Nm. Het is echter niet toegestaan om de motor al dan niet belast, continu te voeden met een hogere spanning dan de nominale resp. ontwerpspanning. Een te hoge stroom zou de motor ontoelaatbaar opwarmen. In het ideale geval dient de motor alleen gedurende de hogere belasting met een verhoogde spanning gevoed te worden. De frequentieregelaar met een geïntegreerde veldgeoriënteerde toerentalregeling maakt dit voor het gebied van een constant koppel mogelijk voor zo lang de maximum uitgangsspanning en/of de stroombegrenzing van het apparaat nog niet bereikt zijn.

## 2.2. De keuze van een optimaal voor de toepassing geschikte draaistroomkortsluitrotormotor

Het doel van een optimale projectering is om het verloop van het lastproces en de eigenschappen van de motor zo goed mogelijk op elkaar af te stemmen.

Vanuit de toepassing komen de volgende voorwaarden voor het procesverloop:

- laagste en hoogste bedrijfstoerental;
- het lastkoppel, afhankelijk van het bedrijfstoerental en eventueel losbreek- en versnellingskoppel;
- opgaven over de bedrijfssoort:
  - continubedrijf S1, of
  - onderbroken bedrijf S3, met opgave van de inschakelduur (%ID);
- cyclustijden bij S3, resp. de benodigde aanlooptijden.

Voor de motor zijn naast de normale catalogusgegevens voor netbedrijf gedetailleerde gegevens nodig over het koppelgedrag als afhankelijke van het toerental resp. de frequentie en de inschakelduur.

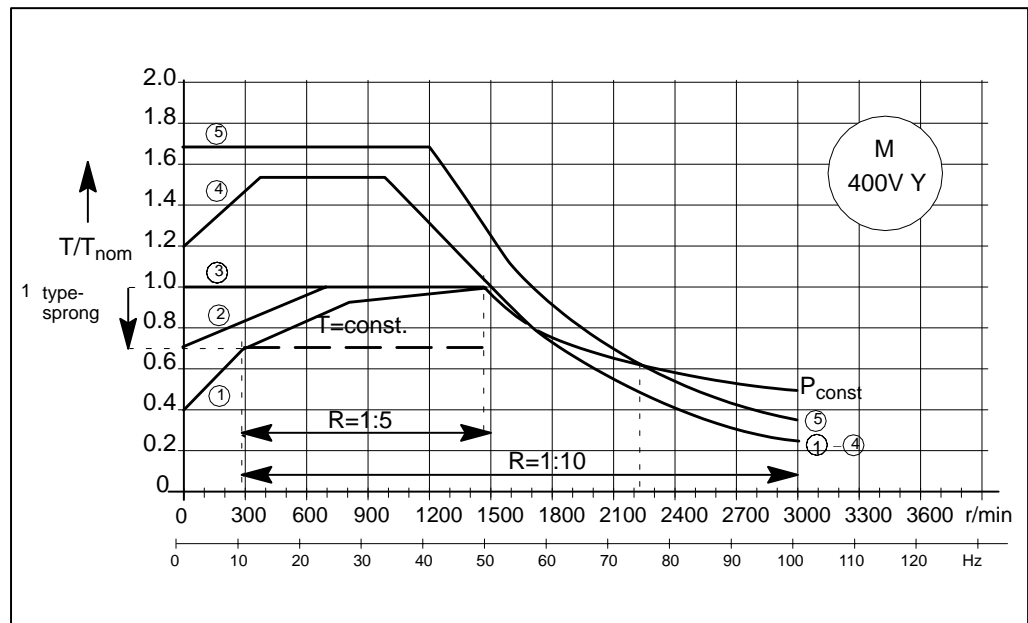


Fig. 10. - Koppelgrenskrommen voor 4-polige (rem)motoren van de typen DT resp. DV bij het gebruik van een frequentieregelaar met  $f_{kantel} = 50$  Hz (motor: 230 V/400 V sterschakeling, isolatieklasse F).

Afkortingenlijst:  $T_{nom}$  = nominaal koppel  
 $P_{nom}$  = nominaal vermogen

Kromme	Bedrijfssoort	Motorkoeling		frequentieregelaar-voorwaarden
		eigen	onafhankelijk aangedreven koelventilator	
1	S1 ID 100%	x		vermogen regeling conform motor $P_{nom}$ alsmede geoptimaliseerde instelling van de frequentieregelaar.
2	S3 ID 25%	x		
3	S1 ID 100%		x	
4	S3 ID 10% voor $t_a \leq 60s$	x		dynamische stroomgrens $I_{max} = 150\% I_{nom}$
5	S3 ID 10% voor $t_a \leq 60s$	x		$I_{max} = 150\%$ en n-regeling

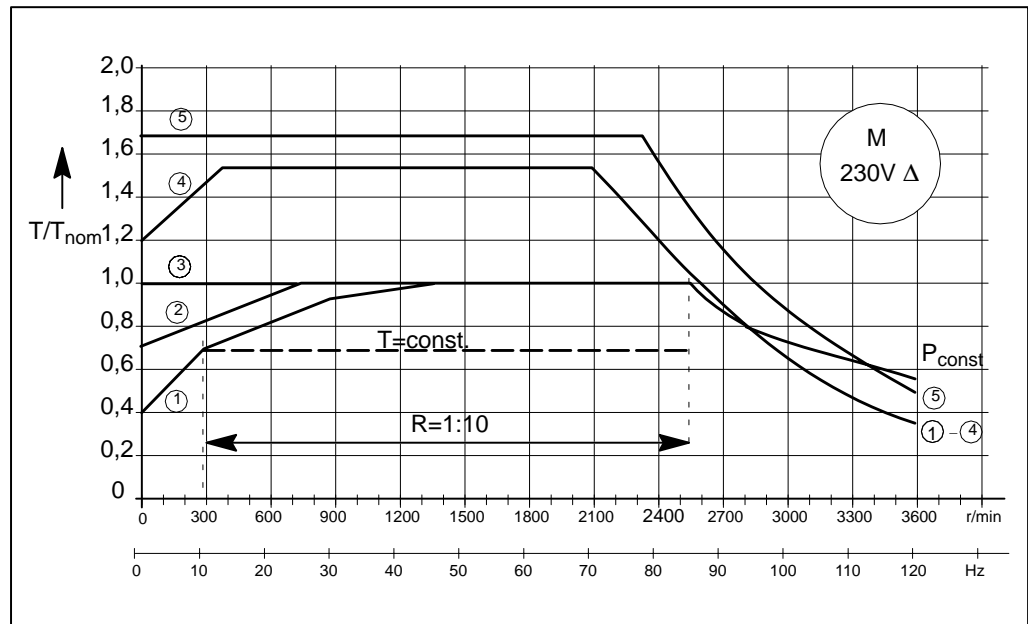


Fig. 11. - Koppelgrenskrommen voor 4-polige (rem)motoren van de typen DT resp. DV bij het gebruik van een frequentieregelaar met  $f_{kantel} = 87$  Hz (motor 230 V/400 V driehoekschakeling, isolatieklasse F).

Afkortingenlijst:  $T_{nom}$  = nominaal koppel  
 $P_{nom}$  = nominaal vermogen (zie typeplaatje)

Kromme	Bedrijfssoort	Motorkoeling		frequentieregelaar-voorwaarden
		eigen	onafhankelijk aangedreven koelventilator	
1	S1 ID 100%	x		vermogen regeling = $\sqrt{3} \times P_{nom}$ alsmede geoptimaliseerde instelling van de frequentieregelaar
2	S3 ID 25%	x		
3	S1 ID 100%		x	
4	S3 ID 10% voor $t_a \leq 60s$	x		dynamische stroomgrens $I_{max} = 150\% I_{nom}$
5	S3 ID 10% voor $t_a \leq 60s$	x		$I_{max} = 150\%$ en n-regeling

**Tabel:** Voorbeelden voor het gebruik van verschillende  $f_{\text{kantel}}$  en  $f_{\text{max}}$ :

$f_{\text{kantel}}$	$f_{\text{max}}$	Kenmerken	
50	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>- toerentalinstelbereik 1:5; met onafhankelijk aangedreven koelluchtventilator ook tot max. 1:20</li> <li>- motorvermogen bij instelbereik 1:5 met één typesprong verkleind <sup>1)</sup></li> <li>- koppelverloop: constant koppel</li> <li>- kortste versnellingstijden realiseerbaar</li> <li>- toerentalbereik met de minste geluidsvorming</li> <li>- de geringste tandwielkastverliezen (vooral van voordeel bij verticale bouwvormen vanwege de grote olievulling)</li> </ul>	} zie figuur 10
50	70	<ul style="list-style-type: none"> <li>- toerentalinstelbereik 1:7; met onafhankelijk aangedreven koelluchtventilator ook 1:20 en meer</li> <li>- motorvermogen bij instelbereik 1:15 met één typesprong verkleind <sup>1)</sup></li> <li>- koppelverloop: tot 50 Hz constant koppel boven 50 Hz dalend koppel</li> <li>- geschikt voor hijswerktoepassingen, wanneer het hijswerkvermogen overeenkomstig 70 Hz voor een 4-polige motor gedimensioneerd wordt op ca. 2000 r/min</li> <li>- voordeel: koppelreserve 70/50 = 1,4-voudig in het frequentiebereik tot 50 Hz</li> </ul>	
50	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>- toerentalinstelbereik 1:10; met onafhankelijk aangedreven koelluchtventilator ook meer</li> <li>- motorvermogen bij instelbereik 1:20 met één typesprong verkleind <sup>1)</sup></li> <li>- koppelverloop: tot 50 Hz constant koppel tot 60 Hz dalend koppel bij P= constant boven 60 Hz overproportioneel dalend koppel</li> <li>- voor toepassingen met een dalend koppelverloop, bv. wikkelttoepassingen, hijswerken met een variabele last en hijsnelheid (grote last bij kleine snelheid en omgekeerd)</li> <li>- nadeel: relatief lange versnellingstijden (zie opmerking 1)</li> <li>- niet geschikt voor 2-polige motorreductoren (vanwege te hoog ingaand toerental)</li> <li>- niet geschikt voor aandrijvingen met wensen naar een zo gering mogelijke geluidsvorming</li> </ul>	} zie figuur 10
87	≥ 87	<ul style="list-style-type: none"> <li>- toerentalinstelbereik 1:10; met onafhankelijk aangedreven koelluchtventilator ook tot ca. 1:30</li> <li>- motorvermogen bij instelbereik 1:10 met 1 typesprong verhoogd <sup>1)</sup></li> <li>- motorvermogen bij instelbereik 1:30 met factor <math>\sqrt{3}</math> verhoogd <sup>1)</sup> (in S3 bedrijf)</li> <li>- koppelverloop: tot 87 Hz constant koppel &gt; 87 Hz dalend koppel bij P= constant</li> <li>- voor toepassingen met een zo groot mogelijk instelbereik bij constant koppel</li> <li>- nadeel: relatief grote versnellingstijden (zie opmerking 1)</li> <li>- niet geschikt voor 2-polige motorreductoren (vanwege te hoog ingaand toerental)</li> <li>- niet geschikt voor aandrijvingen met wensen naar een zo gering mogelijke geluidsvorming</li> <li>- selectie frequentieregelaar: zie opmerking 2</li> </ul>	} zie figuur 11

1) Referentie: Ontwerp- resp. nominaalvermogen van de motor bij 50 Hz netbedrijf.

**Opmerking 1:** De keuze van de maximum frequentie heeft een belangrijke invloed op de versnellings- of aanlooptijd. Dit toont de formule voor de berekening voor de aanlooptijd  $t_A$ :

$$t_A = \frac{J \cdot n}{9,55 \cdot T}$$

Bij een gelijk geïnstalleerd vermogen is het product  $T \cdot n$  constant. Dit betekent, dat de aanlooptijd stijgt met het kwadraat van de toerentaltoename (bv. veroorzaakt door de keuze van een frequentie van  $f_{\text{max}} = 87$  Hz in plaats van 50 Hz).

**Opmerking 2:** Bij toepassingen met  $f_{k\text{antel}} = 87 \text{ Hz}$  dient het uitgangsvermogen van de frequentieregelaar groter te zijn dan het motorvermogen bij 50 Hz, omdat de motor in driehoekschakeling slechts 1/3 van de inwendige weerstandwaarde heeft ten opzichte van de stersschakeling. Om die reden is de motor voor een frequentieregelaar van gelijk vermogen veel te laagohmig. Toelaatbaar is een vermogensbemeting van de frequentieregelaar met één typesprong groter dan het typeplaatvermogen van de motor of hoger. De standaard frequentieregelaarselectie is volgens de volgende tabel.

Vermogen volgens het typeplaatje	SEW-motor-type	Wikkelingenweerstand (koud) tussen 2 uitlopers [ $\Omega$ ]		frequentieregelaar	
		400 V ster	230 V driehoek	$P_{\text{reg}}$ [kW]	richtwaarde voor $R_{\text{min}}$ [ $\Omega$ ] aan de regelaar
0,12	DFT 63 K4	139,6	46,5		
0,18	DFT 63 N4	111,6	37,2		
0,25	DFT 63 L4	78,2	26,1		
0,37	DT 71 D4	46,0	15,3	0,37	25
0,55	DT 80 K4	27,4	9,13		
0,75	DT 80 N4	19,4	6,48	0,75	9
1,1	DT 90 S4	13,9	4,63		
1,5	DT 90 L4	8,74	2,91	1,5	4,5
2,2	DT 100 LS4	6,28	2,09	2,2	2,5
3,0	DT 100 L4	4,06	1,35	3,0	2,0
4,0	DV 112 M4	2,62	0,87	4,0	1,2
5,5	DV 132 S4	1,65	0,55	5,5	0,8
7,5	DV 132 M4	1,07	0,36	7,5	0,5
9,2	DV 132 ML4	0,80	0,26		
11	DV 160 M4	0,68	0,22	11	0,3
15	DV 160 L4	0,40	0,13	15	0,2
18,5	DV 180 M4	0,28	0,094		
22	DV 180 L4	0,21	0,070	22	0,1
30	DV 200 L4	0,15	0,051	30	0,07
37	DV 225 S4	0,13	0,045		
45	DV 225 M4	0,08	0,026	45	0,04

De inwendige weerstandswaarden in ster- en driehoekschakeling (400 V en 230 V) voor 4-polige SEW draai-stroomkortsluitrotormotoren en richtwaarden voor de kleinste toelaatbare  $R_{\text{min}}$  tussen 2 fasen aan de uitgang van de frequentieregelaar.

## 2.3. Andere soorten draaistroommotoren

### 2.3.1. De reluctantiemotor

De reluctantiemotor heeft een samengesteld bedrijfsgedrag. Tijdens het aanlopen en bij overbelasting komt het gedrag overeen met dat van een asynchroommotor. In de statische bedrijfssituatie, d.w.z. na het aanlopen en bij een belasting van  $T < 1,2 T_{nom}$ , draait de motor met zijn synchroontoerental, dus zonder slip. Dit tweeslachtige gedrag is zichtbaar in het verloop van de koppel-toerenkromme.

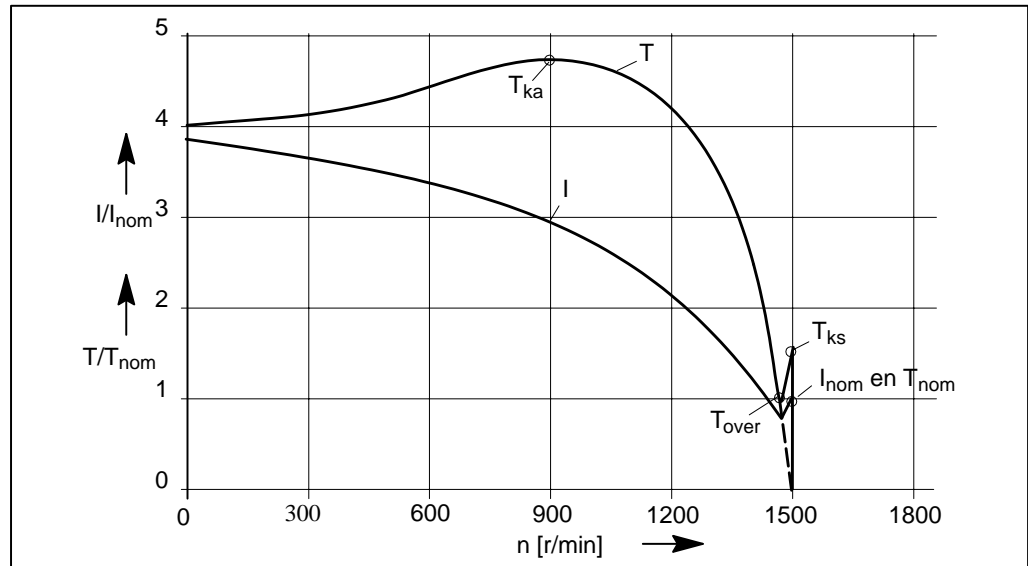


Fig. 12. -  $T = f(n)$  van een reluctantiemotor

Afkortingenlijst:

$T_{ka}$  = asynchroon kippkoppel

$T_{ks}$  = synchroon kippkoppel

$T_{over}$  = overgangskoppel

$T_{nom}$  = nominaal resp. ontwerpkoppel

$I_{nom}$  = nominaal resp. ontwerpkoppel

Qua stator is de reluctantiemotor opgebouwd als een asynchroommotor. De rotor is uitgevoerd met duidelijk uitkomende polen. De magnetische weerstand (reluctantie) varieert sterk over de omtrek. Het magneetveld concentreert zich sterk bij de rotorgroeven, die net als bij de draaistroomkortsluitrotormotor met de kortsluitwikkelingen in aluminiumspuitgietwerk zijn uitgevoerd. Deze opzet functioneert echter alleen in asynchroonbedrijf. Daardoor ontbreekt in de rotor tijdens synchroonbedrijf de bekrachtiging. De statorwikkeling dient het magnetisatie-blindvermogen van de rotor te leveren. Door het effect van de rotorluchtspleet is dit zeer hoog, hetgeen de waarden voor de  $\cos \phi$  en het rendement verslechtert.

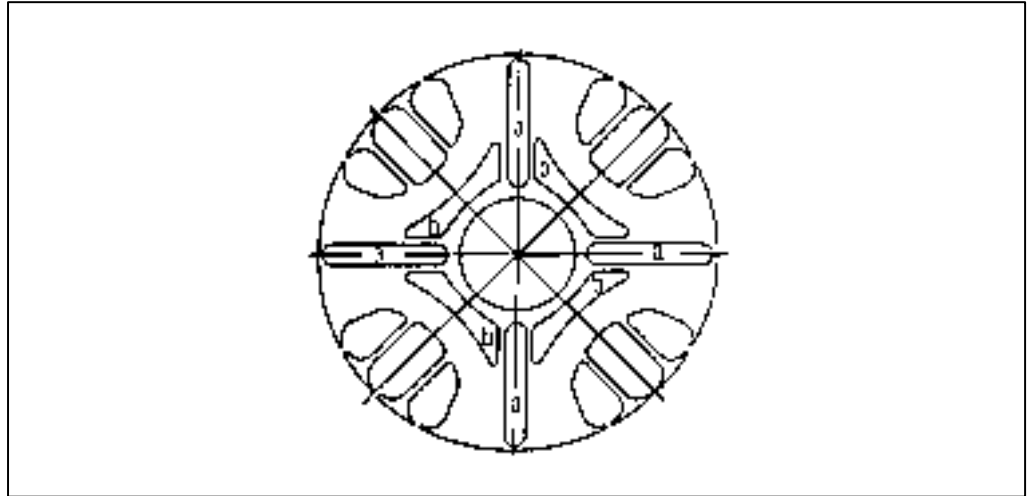


Fig. 13. - Rotorblikpakket van de 4-polige rotor van een reluctantiemotor. De radiaal gerichte sleuven (a) en de inwendig georiënteerde sleuven (b) dienen voor het richten van het door de stator ontwikkelde magnetische veld.

Het voordeel van de reluctantiemotor (synchronisatie) wordt benut bij groepsaandrijvingen, waarbij tegen lage investeringskosten een synchronloop gewenst is. Die motoren worden door een gemeenschappelijke frequentieregelaar gevoed. De reluctantiemotor heeft in de zin van de brede industriële toepassing geen doorbraak kunnen maken, omdat aan het concept een reeks van toepassingsbeperkingen en nadelen verbonden is:

- Het gevraagde blindvermogen is zeer hoog: afhankelijk van pooltal en vermogen bedragen de waarden voor de  $\cos \phi = 0,4 \dots 0,5$  en voor  $\eta = 0,55 \dots 0,8$ . Conclusie: De frequentieregelaar moet ten minste 60% groter gedimensioneerd worden dan bij vergelijkbare asynchrone motoren.
- De koppeloverbelastbaarheid van de reluctantiemotor is slechts ca.  $1,2 \times T_{\text{nom}}$ . Wanneer deze waarde overschreden wordt, dan kipt de motor via het synchrone kippkoppel  $T_{\text{ks}}$  in het asynchrone gebied (zie figuur 12) en slaagt er alleen door verlagings van het lastkoppel onder de waarde van het overgangskoppel weer in om in het synchronbedrijf te gaan werken (in de pas te vallen).
- Het toelaatbare externe massastraagheidsmoment is begrensd tot ca.  $3 \dots 6 \times J_{\text{motor}}$ . Dit betekent dat het toepassen beperkt is tot relatief massastraagheidsmomentarme toepassingen. De motor ontwikkelt met name tijdens het asynchrone bedrijf een koppel dat fluctueert met de frequentie van de slip. Wanneer de motor nu dient te synchroniseren, dus in de pas dient te vallen, dan dient hij binnen de laatste elektrische omwenteling een toegevoegd versnellingskoppel te leveren voor de versnelling van de motor en de lastmassastraagheidsmomenten.
- Aandrijftaakstellingen waarbij sprake is van pulserende lastkoppels (zoals die bijvoorbeeld veroorzaakt worden door krukaandrijvingen of door het polygooneffect van kettingen met kettingwielen van relatief kleine diameter ten opzichte van de kettingschalmlengte) dragen ertoe bij het aanstootgedrag voor toerentaloscillaties vooral in het lagere frequentiebereik tot ca. 25 Hz te versterken en daarmee een overschrijding van het synchrone kippkoppel. Dergelijke aandrijftaakstellingen zijn met reluctantiemotoren vrijwel niet oplosbaar.
- Het synchrone kippkoppel is sterker dan kwadratisch afhankelijk van de klemspanning dan het kippkoppel van asynchrone motoren (bij het toepassen van een frequentieregelaar afhankelijk van de  $U/f$  verhouding). Hierdoor is het gebruik van veldverzwakking niet toegestaan.

Aan de frequentieregelaar dient als eis gesteld te worden dat deze:

- niet alleen bij de nominale frequentie (ontwerpfrequentie) de volle spanning (ontwerpspanning) levert, maar ook
- bij lage frequenties de nominale bekrachtiging waarborgt (compensatie van de spanningsverliezen in de motorkabels en de wikkelingen). Bij de SEW frequentieregelaars is dit mogelijk.



#### Fundamentele instellingen voor de frequentieregelaar:

- $f_{\max} = f_{\text{kantel}}$  = nominale resp. ontwerpfrequentie van de motor.
- Slipcompensatie op nul instellen.
- Integratietijden onder 0,5 - 0,8 s vermijden (bij sprongen in de gewenste waarde het risico van uit de pas geraken).
- Een duidelijke spanningsverhoging in het bereik van de frequenties < 20 Hz (boost).

### 2.3.2. De schuifankermotor

De schuifankermotor is in zijn principiële functieopbouw een asynchroonmotor, waarvan de rotor en de statorboring geen cilindrische maar een conische vorm hebben. Door een axiaal werkende veer wordt de rotor in de rusttoestand in de richting van het wijde deel van de conus gedrukt, zodat de luchtspleet tussen stator en rotor groot is.

De rotor is verder uitgevoerd met een remschijf, die in deze positie contact heeft met een wrijvingsvlak van het huis. Dit betekent dat de rem ingevallen is. Wordt de motor nu ingeschakeld, dan trekt het zich opbouwende magnetische veld de rotor in de conus. De rem licht en de motor loopt tegelijkertijd aan.

Het hoofdkenmerk van een schuifankermotor is dus het activeren van de rem zonder remstuurcircuit. Afhankelijk van de toepassing kan dit voor- of nadelen bieden. Een voordeel is het vervallen van het externe remstuurcircuit en de gedwongen werking van de rem bij uitval van de motorklemspanning.

Het kan nadelig zijn dat de remreactie bij het lichten en invallen van de rem, met betrekking tot het ontwikkelde motorkoppel en toerental, niet doeltreffend te beïnvloeden is. Bovendien is een vrije klantzijdige keuze van ster- of driehoekschakeling niet mogelijk, omdat dit invloed heeft op de door de motorfabrikant aangebrachte terugstelveer. Dit betekent, dat dit niet zonder gevolgen is voor het remkoppel. Verticale motorinbouwopstellingen vragen vanwege de compensatie van het rotorgewicht weer om sterkere of zwakkere veren.

De bovengenoemde afhankelijkheden dienen bij een frequentieregelder aandrijving nauwlettend in de gaten gehouden te worden. Vooral bij hijswerktoepassingen dient gecontroleerd te worden of de voeding van een frequentieregelaar voor de veiligheid van het hijswerk contractueel (gegarandeerd) kan worden gerealiseerd.

Verder wordt er op gewezen, dat aan het effect van de bij het werkingsprincipe behorende axiale rotorverschuiving van stilstaande naar draaiende motor op de verdere aandrijfcomponenten (tandwielen, koppelingen) aandacht geschonken dient te worden. Deze bedraagt, afhankelijk van de motorgrootte en de slijtagetoestand van de rem, tussen de 1 en 4 mm.

#### Fundamentele aanbevelingen voor de instelling ten behoeve van schuifankermotoren zijn:

- Boost = voortdurend werkzame spanningsverhoging in het onderste frequentiebereik: aanzienlijk hoger in te stellen dan bij standaardmotoren, om een vroegtijdig lichten van de rem te bewerkstelligen.
- $f_{\min}$  = onderste bedrijfswaarde van de uitgangsfrequentie: in alle gevallen zijn waarden kleiner dan 5 Hz uitgesloten, omdat door een te geringe magnetisatie voortijdige werking van de mechanische rem optreedt.
- De slipwaarden liggen iets hoger dan bij standaard asynchroonmotoren.



---

## Inhoudsopgave

### **3. De frequentieregelaar**

- 3.1. Eigenschappen van de frequentieregelaar
  - 3.1.1. Ingangs- en tussenkring
  - 3.1.2. Wisselrichter
  - 3.1.3. Remchopper
  - 3.1.4. Stuurelektronica
  - 3.1.5. Communicatiepoorten (interfaces)
- 3.2. Nevenverschijnselen van frequentieregelaars
- 3.3. De keuze van een optimaal voor de toepassing geschikte frequentieregelaar
  - 3.3.1. Frequentieregelaar, één motor toepassing
  - 3.3.2. Meermotorenbedrijf aan één frequentieregelaar
  - 3.3.3. Hijswerkaandrijvingen met een frequentieregelaar

### 3. De frequentieregelaar

Frequentieregelaars behoren tegenwoordig tot de standaarduitrusting in de aandrijftechniek. Zij worden overal toegepast waar van de aandrijving de volgende eigenschappen gevraagd worden:

- a. Variabele toerentallen voor de aanpassing aan de productiesnelheid.
- b. Afstandsbesturing van het toerental en de draairichting (bv. via een masteraandrijving of een PLC).
- c. Een grotere positioneernauwkeurigheid is mogelijk dan bij pooltalomschakelbare motoren.
- d. Een hogere toelaatbare schakelfrequentie (uit thermisch oogpunt toelaatbaar aantal aanlopen/uur) dan bij netbedrijf mogelijk.
- e. Lastbegrenzing van de aandrijving.

De volgende hoofdstukken gelden met nadruk uitsluitend voor frequentieregelaars met een gelijkspanningstussenkring (spanningsregeling of pulsregelaars). Deze groep frequentieregelaars is de belangrijkste en dominant voor het vermogensbereik van 0,5 kW tot een paar honderd kW. De gelijkstroomtussenkringregelaars (stroomregeling) zijn economisch gezien pas toepasbaar boven ca. 20 kW en in de regel als stand-alone aandrijving toe te passen. Door deze omstandigheden heeft de spanningsregelaar in het lagere vermogensbereik het rijk voor zich alleen.

#### 3.1. Eigenschappen van de frequentieregelaar

Het vermogensdeel van de frequentieregelaar is in 3 blokken samen te vatten:

- a. Ongestuurde gelijkrichter, uitgebreid met een ingangsbeveiligingsschakeling tegen een eventueel te hoge spanning en een laadschakeling.
- b. Een gelijkspanningstussenkring, bestaande uit een condensator.
- c. Een 3-fasige transistorwisselrichter.

De stuelelektronica met zijn binaire en analoge in- en uitgangen vult het blokschema aan (voorbeeld van de SEW frequentieregelaar serie MOVITRAC® 31C, figuur 14).

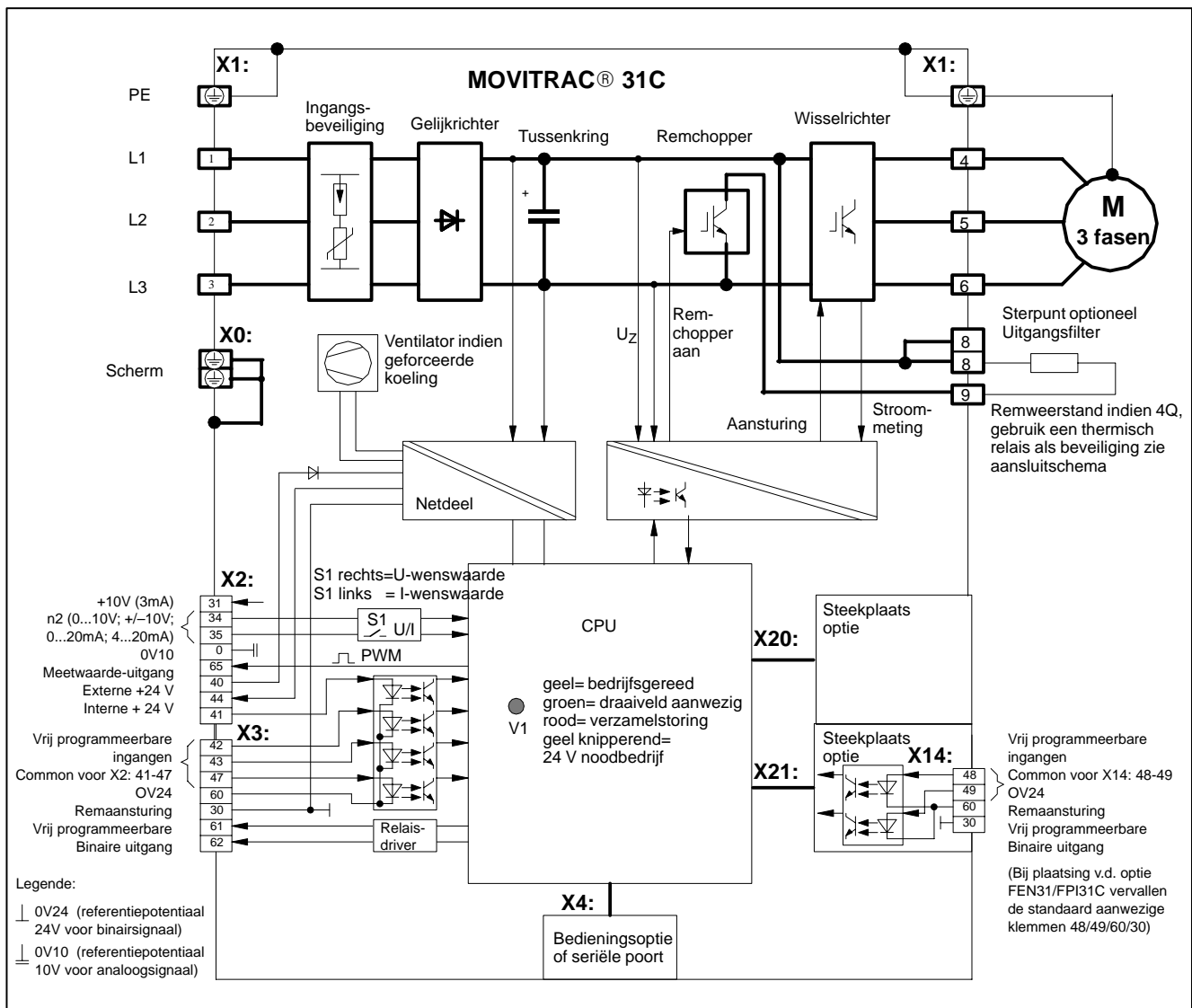


Fig. 14. - Blokschema SEW-frequentieregelaar MOVITRAC® 31C

### 3.1.1. Ingangs- en tussenkring

Bij het inschakelen van de netspanning wordt de tussenkring opgeladen. Het elektronica-netdeel wordt via de tussenkring gevoed. Dit biedt het voordeel van onafhankelijkheid van de netfrequentie en een grotere toelaatbare netspanningstolerantie (minimaal +10% / -10%). De frequentieregelaar is altijd na ca. 2-3 s bedrijfsgeerd. Deze tijd is nodig voor de initialisatie van de microcomputer.

Tijdens bedrijfsmatige start-stop-cycli dient de frequentieregelaar voortdurend met het net verbonden te blijven. De commando's voor starten en stoppen werken dus niet op de netmagneetschakelaar, maar op de elektronica-ingangen vrijgave/links-rechts. Alleen servicewerkzaamheden aan de schakelkast of aan de motor vragen om een scheiding van het net van het apparaat. Vanwege de capaciteit van de tussenkring staat deze na de netafschakeling nog minutenlang onder een gevaarlijke spanning.

Moderne frequentieregelaars hebben geen grote elektrolytcondensatorbatterijen meer in de tussenkring, maar volstaan met nog minder dan 1/20 van de tussenkringcapaciteit van de oorspronkelijke omvormer. Dit biedt het voordeel dat het net nauwelijks met het

blindvermogen van hogere harmonischen belast wordt. Dergelijke frequentieregelaars zijn herkenbaar aan het feit dat hun net-ingangsstroom kleiner is dan de uitgangsstroom. Het voor de motor noodzakelijke blindvermogen wordt door de frequentieregelaar via de vrijloopdiodes van de transistor-wisselrichter geleverd. Om die reden verschijnt in de technische gegevens een hogere uitgangsstroom dan ingangsstroom.

### 3.1.2. Wisselrichter

De hoofdtaakstelling van een frequentieregelaar is om een van het voedingsnet onafhankelijke variabele frequentie (driefasensysteem) en variabele spanning te verkrijgen. In standaardgevallen wordt aan het frequentiebereik  $0 - f_{nom}$  een proportioneel stijgende spanning  $0 - U_{nom}$  toegekend. Onder deze condities ontwikkelt de motor een constant koppel (zie hoofdstuk 2.1.2. figuur 3 en 4).

De kantelfrequentie is die frequentie, tot welke de spanning en de frequentie proportioneel stijgen. Gebruikelijke waarden zijn:  $f_{kantel} = 50/60/87/104$  Hz. Bij de kantelfrequentie wordt de nominale uitgangsspanning bereikt, boven  $f_{kantel}$  neemt de verhouding  $U/f$  af.

Het is belangrijk voor de spanningsvorm aan de uitgang, dat hier een sinusvormige motorstroom zonder hogere harmonischen gevormd wordt. Hogere harmonischen in de stroom bewerkstelligen hogere harmonischen in het koppel, extra opwarming en geluidsvorming in de motor. Verder is het belangrijk, dat de uitgangsspanning bij  $f_{kantel}$  de volle waarde van de ontwerpspanning bereikt, omdat anders de motor onderbekrachtigd zou worden en daardoor niet het volle vermogen zou kunnen leveren.

Omdat bij de meervoudige energie-omzetting (net-gelijkrichter, tussenopslag, wisselrichter) spanningsverliezen in de frequentieregelaar ontstaan en door de PWM puls-breedtemodulatie van de wisselrichter spannings-tijdvlakjes verloren gaan, wordt bij de SEW frequentieregelaars het sterpunt van het draaispanningssysteem met de 3e harmonische van de uitgangsfrequentie gemoduleerd (bv. bij  $f_{uitgang} = 45$  Hz met  $f_{mod} = 135$  Hz). Hierdoor wordt aan de uitgang de volle topwaarde van de ingangsspanning en daardoor de volledige effectieve waarde bereikt.

Een belangrijke functie van de frequentieregelaar is de eigenschap om een constante stroom als grenswaarde te stellen, die indirect als overbelastingsbeveiliging functioneert. Voor het geval de belasting overeenkomstig de ingestelde grensstroom is, vindt nog een toegevoegde grenstelling plaats naar hoogte en tijd (eigenbescherming). Gebruikelijk zijn de grenzen:  $I_{max} = 1,5 \times I_{nom}$  en  $t = 60$  s. Binnen dit bereik dient de stroom eventueel door vermindering van de spanning begrensd te worden.

Opdat de motor in deze situatie niet in veldverzwakking geraakt, dient gelijktijdig met de spanning ook de frequentie verminderd te worden, hetgeen tot toerentalvermindering bij overbelasting leidt.

In de omvormer is een interne  $I \times t$ -bewakingsfunctie ingebouwd, die afhankelijk van de PWM-frequentie, uitgangsstroom, koelertemperatuur en netspanning die maximale thermische belasting bepaalt.

### 3.1.3. Remchopper

Bij generatief bedrijf (bv. het dalen bij een hijswerk), geeft de draaistroomkortsluitrotormotor het daalremvermogen door oversynchroonbedrijf (zie hoofdstuk 2.1.3.) aan de frequentieregelaar terug. Hierdoor wordt de tussenkringspanning  $U_{zk}$  boven het normale niveau geladen (bv.  $U_{zk} = 400V \approx x \sqrt{2} = 565$  V-). De remchopper bewaakt de tussenkringspanning. In dit geval schakelt deze in bij ca. 845 V. De ingeschakelde remchopper leidt de energie van de tussenkring via de aangesloten remweerstand af en vermindert  $U_{zk}$ . Zodra  $U_{zk}$  het uitschakelniveau van de remchopper bereikt schakelt de remchopper weer uit. Bij voortdurend bedrijf schakelt deze periodiek in en uit (vandaar de naam "chopper").

### 3.1.4. Stuurelektronica

De functies van de frequentieregelaar worden door microprocessoren en geheugencomponenten aangestuurd. De bediening van de frequentieregelaar vindt plaats via:

- een programmeerapparaat met toetsen en display, of
- een PC via een seriële poort (interface).

In het bedieningsprogramma kunnen alle parameters opgeroepen worden. Een parameter is een programmapunt, waarin:

- een waarde of een eigenschap gewijzigd kan worden (bv.  $f_{\min}$ ,  $f_{\text{kantel}}$ ,  $f_{\max}$  en  $I_{\max}$ , of interne vaste gewenste waarden, of een functietoekenning van de programmeerbare binaire ingangen);
- een actuele waarde aangegeven wordt (bv. meetwaarden als  $U_{\text{net}}$ ,  $U_{\text{uit}}$  of de temperatuur van het koellichaam);
- een geheugen voor storingsmeldingen dat voor diagnose opgevraagd kan worden;
- een onveranderlijke informatie opgevraagd kan worden (bv. de in het apparaat operationele softwareversie, die bepaald wordt door het EPROM uitvoeringsnummer).

Toelichting op de gebruikelijke parameter-functies: zie hoofdstuk 7.1.1.

De functies van de frequentieregelaar kunnen op deze wijze individueel op de behoefte van de gebruiker afgestemd worden. Met het kiezen voor bepaalde programma's worden gelijktijdig meerdere afzonderlijke eigenschappen betrokken. Als voorbeeld heeft het activeren van het programmapunt "HIJSWERKFUNCTIE" = JA tot gevolg dat bepaalde bewakingsfuncties werkzaam worden en bepaalde voor het functioneren als hijswerk benodigde parameters in de verdere afloop van het programma ter instelling aangeboden worden.

Statusmeldingen (bv. "stilstand bereikt", "frequentie-referentiewaarde  $f_{\text{ref}}$  overschreden of onderschreden" of " $I_{\max}$  bereikt") kunnen door een binair signaal (24 V - PLC compatibel) of via een relaïsschakeling aan de externe sturing doorgegeven worden. Door dergelijke ingebouwde toegevoegde eigenschappen van de frequentieregelaar wordt de externe sturing vereenvoudigd, resp. de PLC qua te verwerken functies ontlast.

### 3.1.5. Communicatiepoorten (interfaces)

Naast de conventionele wijze via parallele elektronica-klemmen met binaire en analoge signalen worden frequentieregelaars ook via seriële poorten (interfaces) aangestuurd. Frequentieregelaar MOVITRAC® 31C bieden optioneel de volgende mogelijkheden:

- RS 232C voor de seriële verbinding met een host (PLC of industriële PC). Maximale lengte van de verbinding: ca 5 m.
- RS 485 voor de seriële netwerkverbinding van meerdere apparaten (max. 32 stuks) met een host (een solitair master bedrijf). Maximale lengte van de verbinding tussen twee apparaten: 200 m.
- Profibus-FMS/DP: De communicatiekaart FFP 31C ondersteunt als "slave" zowel Profibus-DP als Profibus-FMS. Daardoor kan de MOVITRAC® 31C door een PLC via Profibus-DP aangestuurd worden en gelijktijdig met een visualisatiesysteem via Profibus-FMS de momentele waarden van de MOVITRAC® 31C lezen en grafisch weergeven. Uiteraard is het sturen en het inbrengen van de parameters via uitsluitend Profibus-DP of uitsluitend via Profibus-FMS ook mogelijk.
- De communicatiekaart FFP31C maakt een verbinding aan overkoepelende automatiseringssystemen via de open en gestandaardiseerde sensor - actor - veldbus Interbus - S mogelijk:
  - een hoge gegevensverwerkingscapaciteit (real-time);

- grote afstandsoverbruggingscapaciteit door de verdeling van het overdrachtscircuit in een lokale bus (max. 10 m) en een tele-afstandsbus (max. 400 m per poort (aftakking) x max. 32 poorten (aftakkingen) = 12800 m);
- Sensoren en actoren van verschillende fabrikaten kunnen gemeenschappelijk gebruikt worden.

### 3.2. Nevenverschijnselen van frequentieregelaars

Uitvoerige informatie over EMC vindt u in "Aandrijftechniek in de praktijk, deel 9". De ongestuurde ingangsgelijkrichter van gelijkspanningstussenkring- of pulsomvormers staat de netstroomafname alleen toe op de momenten dat de momentele waarde van de sinusvormige netspanning hoger is dan die van de tussenkringspanning. Dit is het geval rond de topwaarde van de netspanning. Daaruit resulteert dat de netstroom niet voortdurend afgenomen wordt maar intermitterend, echter met een zeer hoge stroomwaarde. Een dergelijke stroomvorm bevat naast de basisfrequentiecomponent een min of meer hoog aandeel van hogere harmonischen (netharmonischen). Bij de omvormer met draai-stroomaansluiting bestaat deze vooral uit de 5e, de 7e, de 11e en de 13e harmonische samen. Deze stromen kunnen veroorzaken:

- Spanningsvervorming van het net. Dit betekent, dat de spanning niet meer sinusvormig blijft en de andere verbruikers van hetzelfde laagspanningsnet beïnvloedt;
- Met blindstroomcompensatie-installaties onder bepaalde kritieke voorwaarden opslingeringsverschijnselen, waaruit zeer energierijke overspanningen kunnen voortkomen. Kritische situaties ontstaan wanneer:
  - minstens 10-20 % van het geïnstalleerde vermogen uit gestuurde en ongestuurde stroomomvormers wordt gevormd **en**
  - de compensatie-installatie ongesmoord gebruikt wordt **of**
  - de kleinste compensatie-trap in combinatie met de net-transformator een kring vormt met een resonantiefrequentie nabij de 5e of de 7e hogere harmonische van 50 Hz., dit betekent ca. 250 Hz of 350 Hz **en**
  - in deze situatie verbruikers van een groot vermogen geschakeld worden.

Een dergelijke situatie toont de volgende figuur 15.

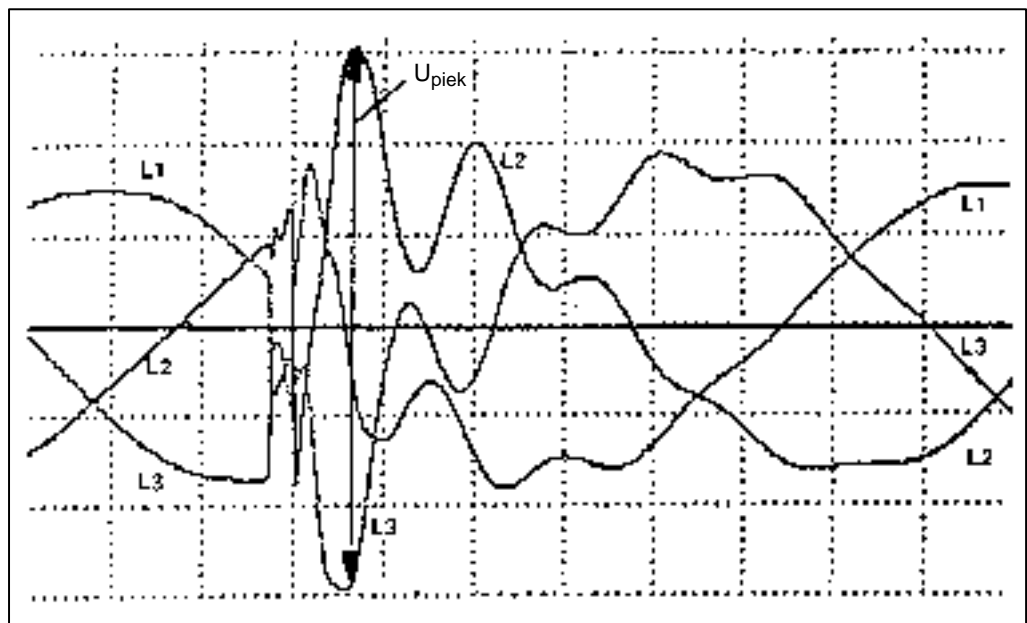


Fig. 15. - Drie-fasennet ( $3 \times 400 V_{\text{eff}}/50 \text{ Hz}$ ) met netoverspanningen die veroorzaakt worden door het schakelen van een compensatie-installatie.

Het eerst is een verstoring van de spanning in alle fasen te herkennen, die gevolgd wordt door een in ca. 10 ms (figuur is met 2 ms/div.) uitdempende trilling met een frequentie van ca. 380 Hz. Deze kan door de 7e harmonische = 350 Hz aangestoten zijn. Een probleem bij dergelijke situaties is de ontstane hoge overspanning fase-fase (in figuur 15 aan het 400 V net is  $U_{\text{piek}} = 1230 \text{ V}$ ), die de aan het net aangesloten apparatuur in gevaar brengt.

Een verder nevenverschijnsel ontstaat door het zeer snelle schakelen (hakken) van de wisselrichtertransistoren om de pulsbreedte gemoduleerde (PWM) uitgangsspanning te verkrijgen. Enerzijds is een snel schakelen noodzakelijk om de schakelverliezen in de transistoren te minimaliseren en een fijngetrapte PWM opdeling in de sinusmodulatie te verkrijgen. Anderzijds produceren de steile schakelflanken:

- een breed spectrum aan stoorspanningen, die via de motorkabels op de omgeving van invloed zijn (EMC-problematiek);
- een kenmerkend modulatiegeluid in het statorblikpakket van de motor. De voortdurende veranderingen van de inductiviteit, veroorzaakt door de PWM ontwikkelde spanningsvlakken, veroorzaken in het blik minimale lengtewijzigingen (magnetostrictie), die voor de geluidsvorming verantwoordelijk zijn.

De akoestische bijverschijnselen kunnen door een aangepaste PWM schakeling worden gereduceerd: bv. wordt ervoor gezorgd, dat er geen vorm van synchroniteit ontstaat tussen de PWM schakelfrequentie en de ontwikkelde uitgangsfrequentie (dus geen geheel veelvoud van  $f_{\text{uit}}$ ). Bovendien is de voortdurende wijziging van de PWM schakelfrequentie ook bij constante  $f_{\text{uit}}$  voordelig om niet via een monotone frequentie in een akoestische resonantiefrequentie te geraken.

De snelle schakelprocessen van de wisselrichtertransistoren ontwikkelen op de motorkabel een lopende golf. Bij een kritische combinatie van de inschakeltijd van de transistor (flanksteilheid van de PWM spanningspuls) en de lengte van de motorkabel ontstaan aan het einde van de motorkabel door terugkaatsing spanningsamplituden tot de dubbele waarde van de tussenkringspanning. Dit geldt voor een PWM schakelwijze in een uitgedempte toestand. Wanneer dit uitdempen niet afgewacht wordt maar binnen deze tijd een hernieuwde PWM puls-inschakeling plaatsvindt, dan kunnen golfversterkingen ontstaan met als gevolg nog hogere spanningsamplituden dan de tweevoudige waarde van de tussenkringspanning  $U_z$ .

Naarmate de PWM frequentie hoger is, ca. boven de 12 - 15 kHz, is de noodzakelijke minimale inschakeltijd moeilijker te realiseren.

SEW garandeert met de in haar frequentieregelaars gerealiseerde PWM modulatie dat aan de eis van de minimale inschakeltijd wordt voldaan.

Als tegenmaatregel tegen de bovengenoemde bijverschijnselen worden uitgangsfilters, EMC-modules of uitgangssmoorspoelen toegepast. Zie voor verdere gegevens hiervan hoofdstuk 4.3., 4.4. en 4.5.

### 3.3. De keuze van een optimaal voor de toepassing geschikte frequentieregelaar

#### 3.3.1. Frequentieregelaar, één motor toepassing

Voor de keuze van een geschikte frequentieregelaar dienen de volgende gegevens beschikbaar te zijn:

- de gegevens van de voor de toepassing geplande motor (zie hoofdstuk 2.2. voor draaistroomkortsluitrotormotoren, resp. hoofdstuk 2.3. voor andere soorten draaistroommotoren), vooral:  $U_{\text{nom}}/I_{\text{nom}}/f_{\text{nom}}/\cos \phi$ ;
- het van de aandrijving gevraagde, vooral
  - het toerentalinstelbereik;
  - de bedrijfssoort;
  - versnellings- en vertragingstijd;

- versnellings- en vertragingkoppel (=  $T_{gen}$ , d.w.z. 4-kwadrantapparatuur);
- losbreekkoppel;
- speciale eigenschappen zoals de bruikbaarheid voor hijswerktoepassingen.

Een frequentieregelaar is over het algemeen overbelastbaar met  $I_{max} = 150\% I_{nom}$  gedurende 60 s. Dit vermogen om gedurende korte tijd overmatige stromen te leveren is bruikbaar voor versnellings- en vertragingprocessen. Een ingebouwde  $I \times t$  bewakingsfunctie beschermt het apparaat tegen de mogelijke schade van een te lang bedrijf in het gebied met een overstroom.

Belangrijk is de keuze van het maximum haalbare koppel uit de koppel-toerenkrommen van hoofdstuk 2.2. Over het algemeen kan het systeem gekozen worden op basis van kromme 4. Een overdimensionering van de frequentieregelaar vanwege het hogere maximumkoppel is binnen bepaalde grenzen mogelijk, de piekbelasting dient echter duidelijk onder het kipkoppel van de motor te liggen. Dit geldt vooral voor kleine motoren ( $< 1,1$  kW) en voor de pooltallen 6 en 8.

Bij het gebruik van frequentieregelaars met een veldgeoriënteerde toerentalregeling zijn kortstondig hogere koppels afneembaar tot  $1,7 T_{nom}$  vanaf toerental  $n = 0$ , **zonder overdimensionering van de frequentieregelaar** (zie hoofdstuk 2.1.4. en de koppelgrenskromme nr. 5 van de figuur 10 en 11).

Hiertoe zijn extra benodigd:

- de optie "toerentalregeling" voor de MOVITRAC®31C frequentieregelaar, en
- een aan de motor gebouwde encoder ter bepaling van het toerental en de daarbij behorende afschermdre bekabeling naar het apparaat.

Een verder voordeel van de veldgeoriënteerde toerentalregeling ten opzichte van het overdimensioneren van de frequentieregelaar is, dat de aandrijving kipveilig blijft. De regelaar laat maximaal slechts 15 Hz slip toe ( $1,5 \times$  ingestelde waarde). Dit is daarmee minder dan de slip bij kippen.

De vraagstelling welke kantelfrequentie en maximale frequentie voor de desbetreffende toepassing het meest voordelig is, beïnvloedt niet de keuze van de frequentieregelaar, maar die van de motor (zie hiervoor hoofdstuk 2.2. - tabel) en die van de overbrengingsverhouding. Zodra tijdens bedrijf remkoppels optreden is een 4-kwadrantregelaar benodigd. Dit vereist de apparaat-optie "remchopper" evenals een remweerstand (zie voor meer gegevens hoofdstuk 4.6.).

### 3.3.2. Meermotorenbedrijf aan één frequentieregelaar

De volgende basisregels dienen bij het bedrijven van meerdere motoren op één frequentieregelaar in acht genomen te worden:

- De frequentieregelaar dient gedimensioneerd te worden voor de som van alle motorstromen.
- De lengte van de motorkabels wordt bepaald door de voor de frequentieregelaar opgegeven maximum kabellengte te delen door het kwadraat van het aantal parallel aangedreven motoren.
- Een uitgangsfiler wordt toegepast voor de totale motorengroep. Filters voor elke motor afzonderlijk zijn niet nodig. Een uitgangsfiler mag alleen dan voor een groep kleine motoren toegepast worden, als gewaarborgd is, dat het door het afschakelen van enkele motoren er niet toe leidt, dat een zeer kleine motor aan het grote uitgangsfiler hangt.
- De overlastingsbeveiliging kan de frequentieregelaar alleen voor de som van alle motoren realiseren (zowel voor de  $I_{max}$ -bewaking als voor de  $I \times t$ -functie). Om overbelasting van de afzonderlijke motoren uit te sluiten, dient elke afzonderlijke motor tegen overbelasting beveiligd te worden. Dit is bijvoorbeeld mogelijk door de inbouw in de schakelkast van thermische relais, die op de motorstroom + 10% ingesteld wor-

den. Temperatuurvoelers in de motorwikkelingen en een bewakingsapparaat zijn in een dergelijk geval ook afdoende.

- De parameterinstelling van de frequentieregelaar geldt altijd voor alle gemeenschappelijke motoren. Dit betekent, dat vooral de instelwaarden voor de Boost, I x R en slipcompensatie voor alle motoren in dezelfde mate geschikt dient te zijn. Aan deze eis voldoen alleen motoren van ongeveer gelijk vermogen.

De problematiek van de parameterinstelling is zichtbaar aan de hand van de volgende motorgegevens:

Motortype	motorgegevens (400V/50Hz)			instelwaarden	
	P <sub>nom</sub> [kW]	I <sub>nom</sub> [A ≈]	R <sub>W20</sub> [Ω]	I x R[%]	slip[Hz]
DT 80 K4	0,55	1,8	11,7	9,2	4,0
DT 80 N4	0,75	2,1	8,5	7,8	4,0
DT 90 S4	1,1	2,7	6,6	7,7	3,3
DT 90 L4	1,5	3,5	3,9	6	2,7
DT 100 LS4	2,2	5	2,9	3,3	3,3
DT 100 L4	3,0	6,6	1,9	5,5	3,3
DV 112 M4	4,0	8,7	1,2	4,5	2,7
DV 132 S4	5,5	11	0,75	3,5	2,3
DV 132 M4	7,5	15	0,52	3,4	1,7
DV 132 ML4	9,2	18	0,39	3,1	2,0
DV 160 M4	11	21	0,31	2,8	2,0
DV 160 L4	15	30	0,18	2,3	1,3

Afkortingenlijst:

R<sub>w</sub> = wikkelingenweerstand (bij 20°C) per fase

I x R = de lastafhankelijke spanningstoename in % van de nominale spanning

De instelling van de parameters volgt principieel naar de grootste motor. Daarmee zijn echter de kleinere gemeenschappelijk gevoede motoren niet optimaal ingesteld: zij krijgen wegens de hogere inwendige spanningsval te weinig compensatiespanning en zijn om die reden onderbekrachtigd.

Het gevolg is dat het koppel bij lage toerentallen snel afneemt, d.w.z. beperking van het instelbereik. Een beperking van het instelbereik wordt ook door onvoldoende slipcompensatie veroorzaakt.

Het af- en herinschakelen van de afzonderlijke motoren van de groep tijdens bedrijf is mogelijk onder de volgende voorwaarden:

- Bij herinschakeling dienen de motoren met elkaar een basislast te leveren van minimaal 1/3 van de nominale belasting van de frequentieregelaar (naarmate het massa-traagheidsmoment van de minimale basislast groter is wordt de situatie gunstiger).  
Toelichting: De basislastmotoren ondersteunen tijdens het inschakeltijdstip de uitgangsspanning van de frequentieregelaar en maakt het aanlopen van de ingeschakelde motoren daarmee gunstiger.
- De in te schakelen motor dient qua vermogen niet groter te zijn dan ca. 1/4 van het nominale vermogen van de frequentieregelaar.
- De frequentieregelaar dient op het tijdstip van bijschakelen niet op een hogere frequentie werkzaam te zijn dan de ingestelde kantelfrequentie, omdat anders de bijgeschakelde motor onder veldverzwakkingscondities, d.w.z. met een gereduceerd koppel aan zou dienen te lopen.

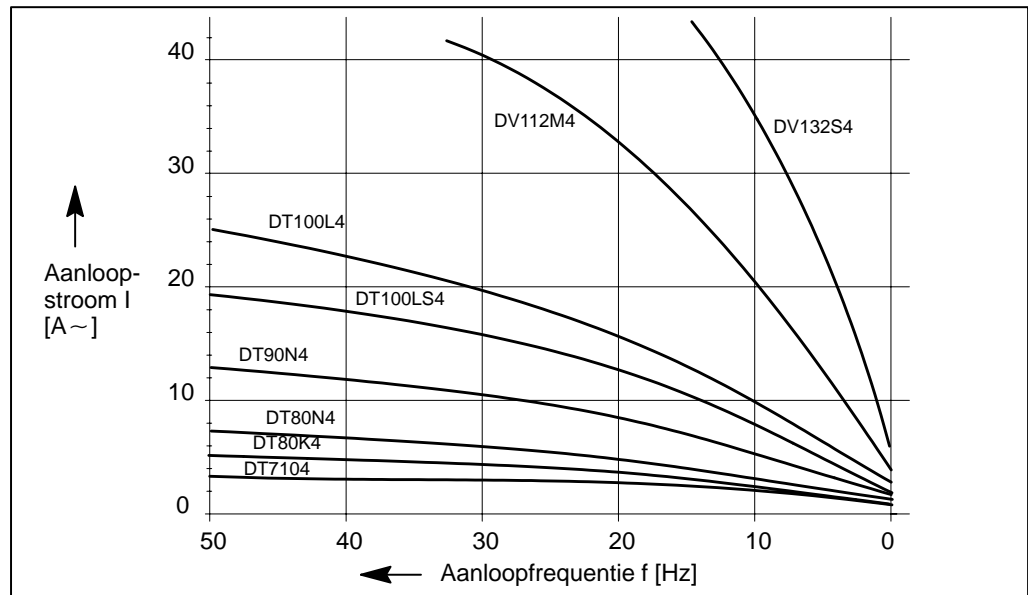


Fig. 16. - De aanloopstroom van SEW-asynchroonmotoren (4-polig) tijdens het bijschakelen op een gemeenschappelijke frequentieregelaar.

De bekabeling van de frequentieregelaar naar de afzonderlijke motoren dient met ongeveer gelijke motorkabellengten gerealiseerd te worden, omdat bij grote lengteverschillen ook verschillen in de spanningsval per motorkabel ontstaan. De motor met de langste motorkabel wordt daardoor het minst bekrachtigd. Het gevolg is verlies van koppel.

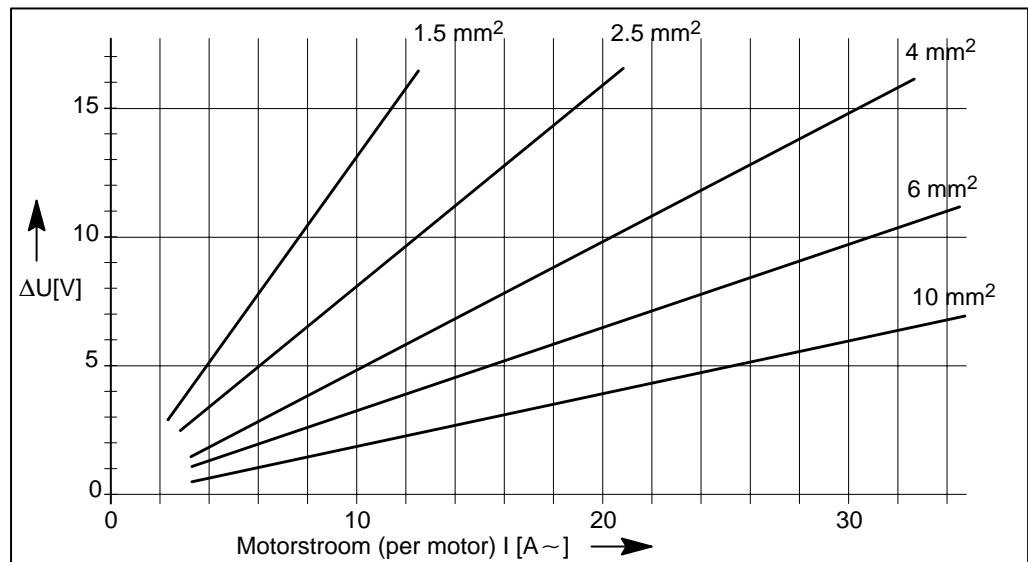


Fig. 17. - De spanningsval  $\Delta U$  bij 100 m kabellengte als afhankelijke van stroomsterkte en kabeldoorsnede.

### 3.3.3. Hijswerkaandrijvingen met een frequentieregelaar

#### - Motorreductor

De motorreductor dient principieel op een maximale frequentie van 70 Hz (80 Hz) gebaseerd te worden ( $f_{\text{kantel}} = 50$  Hz bij  $f_{\text{nom motor}} = 50$  Hz resp.  $f_{\text{kantel}} = 60$  Hz bij  $f_{\text{nom motor}} = 60$  Hz). Het ingaand toerental van de reductor wordt daarmee met een factor 1,4 verhoogd. Om het gewenste uitgaande toerental te verkrijgen dient om die reden

de reductieverhouding overeenkomstig groter gekozen te worden. Door deze maatregel verliest men in het gebied met veldverzwakking (50...70 Hz resp. 60... 80 Hz) geen koppel aan de langzaamdraaiende as, omdat het met toenemende frequentie afnemend koppel door de grotere reductieverhouding wordt gecompenseerd. Als extra verkrijgt met een 1,4 voudig hoger aanlooppkoppel in het bereik 0...50 Hz (0...60 Hz). Een verder voordeel is het grotere instelbereik in vergelijking tot  $f_{\max} = 50$  Hz (60 Hz) en de betere zelfkoeling van de motor.

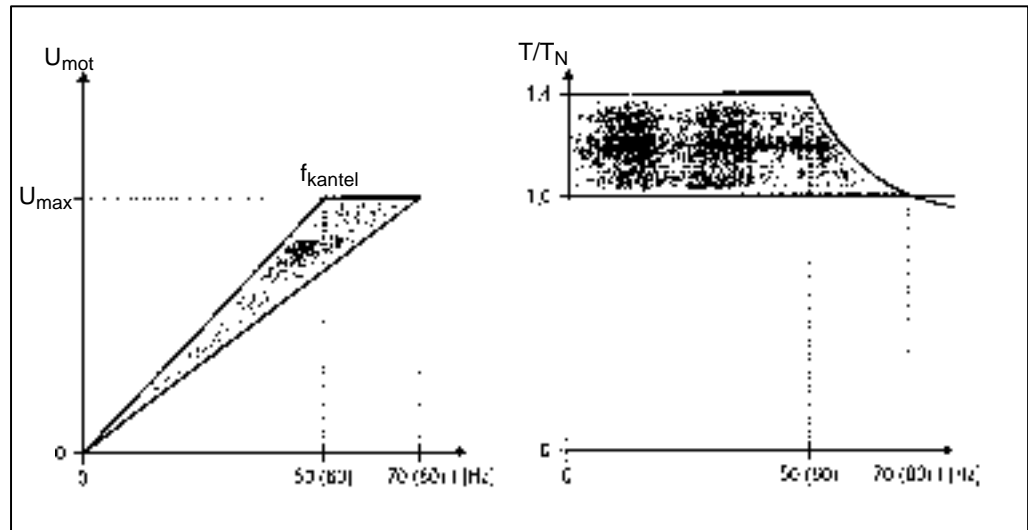


Fig. 18. - Door SEW aanbevolen spannings/frequentie curven en het daaruit voortvloeiende koppelverloop

Het vermogen van de motor dient één type grotere gekozen te worden dan dat van de frequentieregelaar (= benodigd lastvermogen van het hijswerk). Wanneer de motor bij verschillende toerentallen gebruikt wordt, dan dient afhankelijk van de belasting en de inschakelduur bovendien de opwarming van de motor gecontroleerd te worden.

#### - Frequentieregelaar

SEW frequentieregelaars zijn geschikt voor hijswerkaandrijvingen. Alle voor het gebruik in een hijswerktoepassing noodzakelijke functies worden door de zogenaamde hijswerkfunctie geactiveerd. Het benodigde lastvermogen voor het hijswerk bepaalt het vermogen van de frequentieregelaar.

Hijswerkaandrijvingen zijn 4Q toepassingen, dat wil zeggen dat de geschikte remweerstand met een voldoende grote inschakelduur gekozen dient te worden.

#### - De bekabeling naar de motor

Bij de keuze van de motorkabels dient de doorsnede zodanig gekozen te worden, dat de spanningsval zo gering mogelijk is. Volgens DIN EN 60204 Deel 1, Hoofdstuk 14.5 is een waarde van 5% van de ontwerpspanning toegestaan. In de praktijk is echter gebleken dat deze waarde bij het gebruik van een frequentieregelaar te hoog is. Een te grote spanningsval leidt tot een te grote veldverzwakking in de motor, zodat het beschikbare aandrijfkoppel verminderd wordt.

#### - Overige opties

Bij het nemen van maatregelen ter verbetering van de elektromagnetische verdraagzaamheid adviseren wij u om in plaats van uitgangsfilters EMC-modulen of uitgangsmoerspoelen te gebruiken.

## Inhoudsopgave

### **4. Toebehoren voor frequentieregelaars**

- 4.1. Netsmoorspoelen
- 4.2. Netfilters
- 4.3. Uitgangsfilters
  - 4.3.1. Motorgeluid door PWM-modulatie
  - 4.3.2. Capacitieve laadstromen
  - 4.3.3. Overspanning aan het eind van de motorkabel
  - 4.3.4. Radiostoring vanuit de motorkabel
- 4.4. EMC-Modules
- 4.5. Uitgangsmoorspoelen
- 4.6. Remweerstand voor 4-kwadrantbedrijf

## 4. Toebehoren voor frequentieregelaars

In hoofdstuk 3.2 werd ingegaan op de nevenverschijnselen van frequentieregelaars. De in de volgende hoofdstukken behandelde netsmoorspoelen, net- en uitgangsfilters hebben tot doel om de bijwerkingen tot een acceptabele waarde te begrenzen.

### 4.1. Netsmoorspoelen

Netsmoorspoelen zijn op de nominale ingangsstroom van de frequentieregelaar aangepast. Het hoofddoel van netsmoorspoelen is het reduceren van bovenharmonische stromen.

Bovendien zijn netsmoorspoelen in staat de overspanningsbeveiliging van de regelaar te verbeteren. De impedantie van de smoorspoel vormt met de impedantie van de overige delen een spanningsdeler voor de overspanning. Bij het stijgen van de overspanning wordt, door de stroomstijgingsbegrenzende eigenschap van de inductiviteit in nog onverzadigde toestand, de werking van de beveiligende elementen in de frequentieregelaar (varistoren, gasdrukbeveiliging/condensatoren) verhoogd.

Daarom is toepassing van netsmoorspoelen bij aansluiting aan sterke netten zinvol.

Er is sprake van een sterk net wanneer ofwel:

- de nettransformator groter is dan het 100-voudige van het vermogen van de frequentieregelaar (kVA); of
- de aansluitplaats van de frequentieregelaar minder dan 100 m verwijderd is van de nettransformator, die de 50-voudige capaciteit van de frequentieregelaar (kVA) heeft.

Net smoorspoelen dienen individueel op iedere frequentieregelaar afgestemd te worden om de frequentieregelaar ook te kunnen ontkoppelen. Vermeden dient dus te worden, dat één grote netsmoorspoel voor meerdere kleine frequentieregelaars wordt gebruikt.

### 4.2. Netfilters

Door de snel schakelende wisselrichtertransistoren ontstaan radio-storingen. Deze verspreiden zich over het aansluitnet (leidingsgebonden).

Netfilters dienen de storingen in het gebied van 0,15.....30 MHz te dempen. Volgens de norm EN 55011 dient met de volgende grenswaarden rekening gehouden te worden.

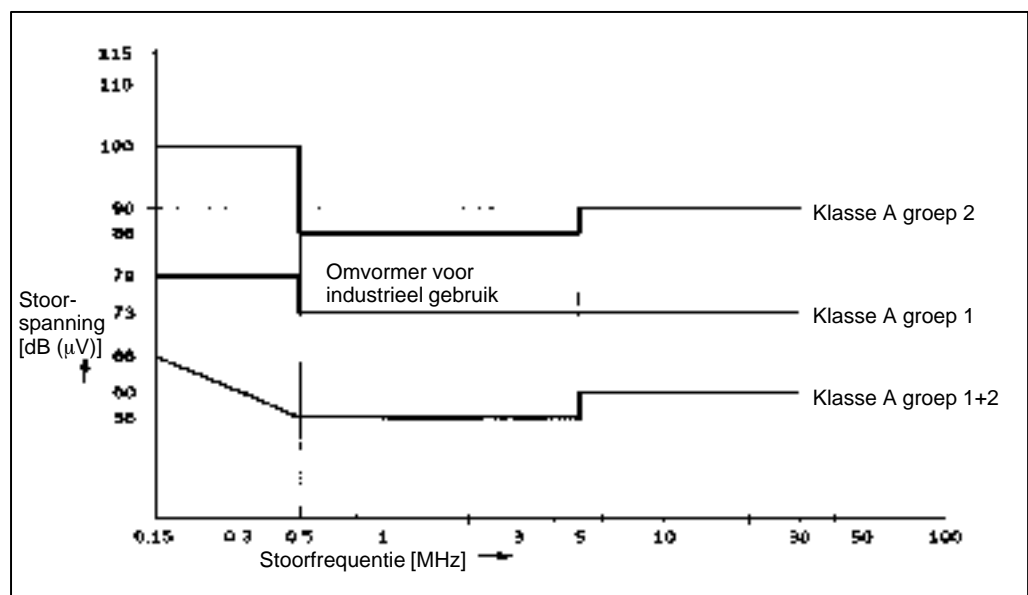


Fig. 19. - Grenswaarden (QP = QuasiPiekwaarden) van stoorspanningsniveau (pieken) volgens EN 55011.

- Klasse A: Apparatuur, bedoeld voor alle andere omgevingen dan de woonomgeving.
- Klasse B: Apparatuur, geschikt voor gebruik binnen de woonomgeving.
- Groep 1 : Apparatuur, die alleen vanuit een interne functie leidinggebonden hoogfrequente energie opwekt (bv. de pulsbreedtemodulatiepulsen bij frequentieregelaars).
- Groep 2: Apparatuur, die met opzet hoogfrequente energie produceert voor de behandeling van materiaal (bv. magnetrons, inductieve verwarming).

Verder verlangt de radiostoringswetgeving van 9-11-92 (radiostoringsrichtlijn 89/336/EEG) met een overgangstermijn t/m december 1995 van de producenten van elektronische apparatuur afdoende maatregelen te treffen tegen de emissie van radiostoringen evenals een kwantificeerbare ongevoeligheid voor elektromagnetische storingen. Aan deze eisen wordt door de netfilters van de SEW typereeks NF... voldaan.

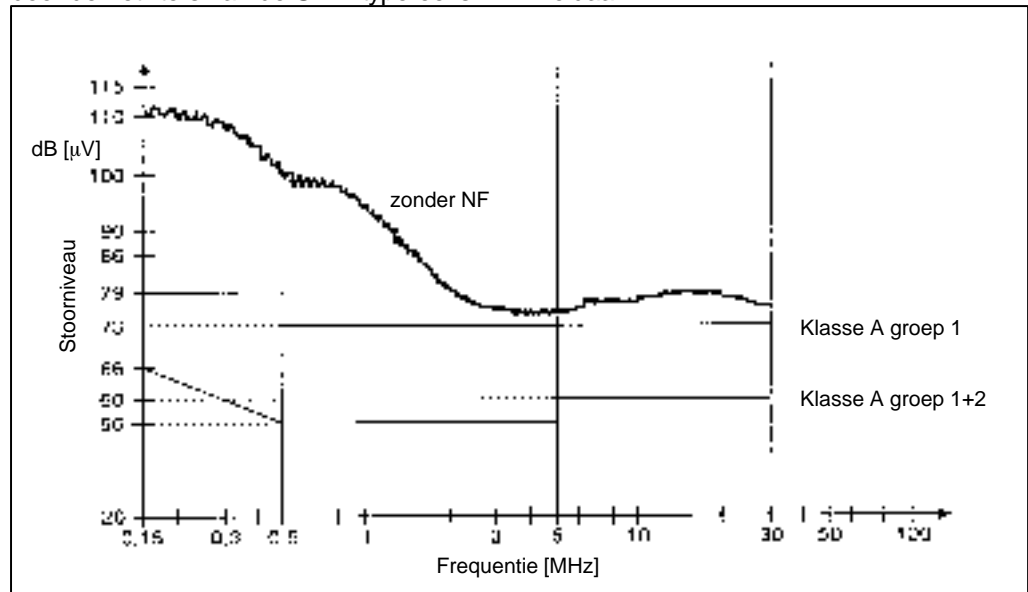


Fig. 20. - Het stoorspanningsniveau van een frequentieregelaar zonder netfilter, in dit voorbeeld een 5,5 kW regelaar.

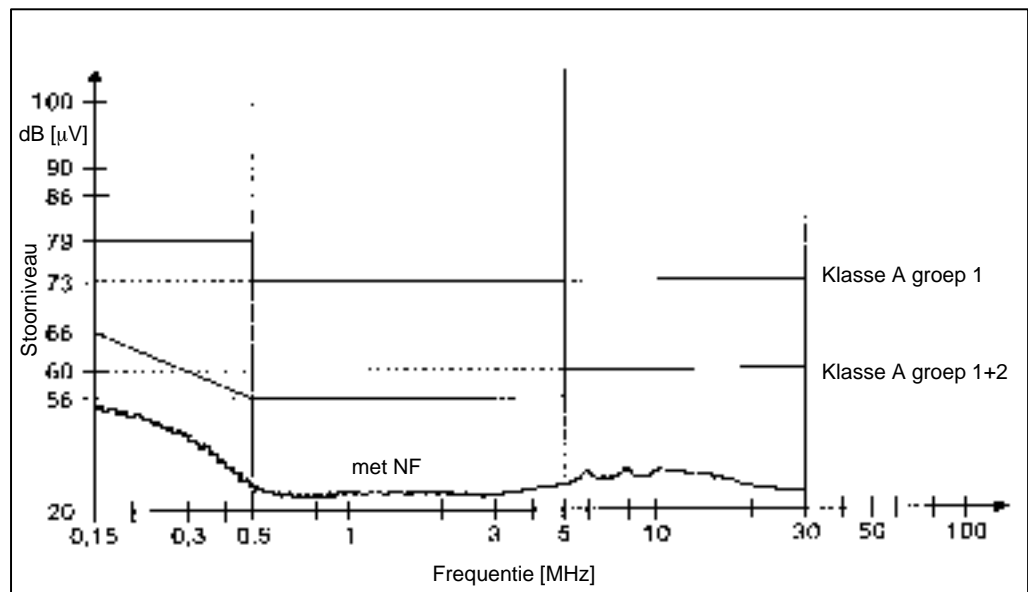


Fig. 21. - Het stoorspanningsniveau van een frequentieregelaar met netfilter, in dit voorbeeld een 5,5 kW regelaar.

Het meest optimale resultaat wordt alleen bij een vakkundige installatie bereikt. Dit geldt vooral voor het aarden en de afstand tussen het netfilter en de ingang van de omvormer:

- Het netfilter dient zodanig dicht bij de ingangsklemmen van de omvormer aangebracht te worden, dat de stroomkabel tussen de uitgang van het netfilter en de ingang van de omvormer (met inachtnaam van de minimaal benodigde vrije koelluchtruimte) zo kort mogelijk wordt gehouden.

De verbindingkabel dient afgeschermd en **aan weerszijden** geaard te worden. Het aarden van de kabelafscherming dient beslist op een goede vlakke ondergrond plaats te vinden. Bij voorkeur wordt de vrije kabelafscherming met een metallische kabelterminal direct met het blanke materiaal van de schakelkastbeplating verbonden.

- De vlakke ondergrond voor het aarden is noodzakelijk omdat de hoogfrequente stoorspanningen zich vanwege het skin-effect hoofdzakelijk aan het oppervlak en niet via de totale dwarsdoorsnede van een geleider verspreiden. Het aarden van een kabelafscherming door middel van een aangesoldeerde draad met een kabelschoen of het aarden van een behuizing alleen via een aangesloten aardleider (overeenkomstig DIN VDE 0113) is in de zin van ontstoring niet werkzaam.

De apparatuurbehuizing dient om die reden een vlakke metalen verbinding met de schakelkastopbouw te hebben. Zowel de omvormerbehuizing als ook de behuizing van het netfilter worden vanuit deze achtergrond met ongelakte metalen bevestigingshoeken op de blanke schakelkast-montageplaat bevestigd. Eventuele isolerende laklagen dienen voortijdig zorgvuldig verwijderd te worden.

Netfilters met daarin opgenomen condensatoren veroorzaken afleidstromen naar aarde. Afhankelijk van de toegepaste filtergrootte kunnen waarden tot 200 mA bereikt worden. Verdere afleidstromen worden vanuit de last door de frequentieregelaar ontwikkeld (hoofdzakelijk de motorkabels). Om die reden kunnen oorspronkelijke aardlekschakelaars als beveiligingsmaatregel niet toegepast worden.

Verdere aanwijzingen voor het ontstoren zijn opgenomen in hoofdstuk 4.3. "Uitgangsfilters" en in 5.3.1. "Kabelkeuze".

### 4.3. Uitgangsfilters

De PWM-modulatie van de uitgangsspanning om sinusvormige motorstromen en een harmonieus magnetisch veld (draaiveld) te ontwikkelen heeft ook ongewenste gevolgen:

- De ontwikkeling van extra motorgeluiden (zie de verklaring hiervoor in hoofdstuk 3.2. "Nevenverschijnselen van frequentieregelaars").
- Het ontstaan van capacatieve omlaadstromen in de motorkabels.
- Het ontstaan van spanningspieken bij de aansluitklemmen van de motor.
- Het ontstaan van velden van hoogfrequente stoorspanningen.

Deze nevenverschijnselen worden door het toepassen van uitgangsfilters sterk vermindert. In het volgende hoofdstuk wordt in detail op de bovengenoemde nevenverschijnselen ingegaan en worden keuze-aanwijzingen voor het gebruik van uitgangsfilters gegeven.

Er dient rekening gehouden te worden met het feit dat door het gebruik van uitgangsfilters, door de extra spanningsval, een veldverzwakking in de motor wordt veroorzaakt. Daardoor wordt het beschikbare aandrijfkoppel verminderd. Op basis hiervan is bij hijswerk-aandrijvingen het gebruik van uitgangsfilters niet toelaatbaar. In plaats daarvan kunnen EMC-modules of uitgangssmoorspoelen worden toegepast.

#### 4.3.1. Motorgeluid door PWM-modulatie

Het effect van het gebruik van een frequentieregelaar op het motorgeluid wordt als voorbeeld geïllustreerd in gemeten waarden van het geluidsdrukniveau  $L_{PA}$  (motor  $P = 7,5$  kW,  $n = 1450$  r/min, onbelast).

Gebruik bij	Geluidsdruk niveau $L_{PA}$ [dB(A)]
50 Hz net met ontwerpspanning	46
omvormer met $f_{PWM} = 5$ kHz zonder filter	69
omvormer met $f_{PWM} = 5$ kHz met filter	49
omvormer met $f_{PWM} = 9,5$ kHz zonder filter	49
omvormer met $f_{PWM} = 9,5$ kHz met filter	45 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> De geringere bekrachtiging van de motor bij het gebruik van een frequentieregelaar is de oorzaak van een lager geluidsdruk niveau ten opzichte van netbedrijf.

Uit de genoemde waarden blijkt, dat voor het beperken van het motorgeluid een uitgangsfILTER of het verhogen van de modulatiefrequentie of beiden in aanmerking komen.

- Wanneer de modulatiefrequentie verhoogd wordt, stijgen de verliezen in de regelaar door de grotere schakelverliezen. De vermogensafneembaarheid van de regelaar wordt kleiner:  $P_{10kHz} = \text{ca. } 0,7 \dots 0,8 * P_{5kHz}$ . Filteringseisen worden eenvoudiger.
- Wanneer de modulatiefrequentie verlaagd wordt dalen de verliezen in de regelaar. De vermogensafneembaarheid van de regelaar neemt toe. Gelijktijdig nemen de aan de filters te stellen eisen toe (bij  $f_{PWM} < 4$  kHz oneconomisch duur en volumineus).

### Opmerking bij het begrip geluidsterkte:

Onder geluidsterkte verstaat men de referentiewaarde geluidsdruk niveau  $L_{PA}$ . Met een geluidsdruk meter wordt op een afstand van 1 m gemeten (opgave in dB(A)). Het referentie geluidsdruk niveau is  $2 \times 10^{-5}$  N/m<sup>2</sup>.

In de norm DIN VDE 0530, deel 9 worden voor elektrische machines met oppervlaktekoeling de volgende geluidsdruck grenswaarden voor  $L_{PA}$  voor netbedrijf (dus sinusvormige spanning) gegeven:

$n_{nom}$	$L_{PA}$ [dB (A)] bij $P_N$				
	... 1,5 kW	2,2 ... 4 kW	5,5 ... 15 kW	18,5 ... 45 kW	55 ... 132 kW
3000 r/min	71	76	85	89	94
1500 r/min	68	72	78	85	90

Vaak vinden we ook opgaven als geluidsvermogen niveau.

Het omrekenen van het geluidsdruk niveau  $L_{PA}$  naar het geluidsvermogen niveau  $L_{WA}$  (eveneens in DIN VDE 0530 als grenswaarde) is voor motorvermogens tot 15 kW (2- en 4-polig) bij benadering mogelijk via:

$$L_{WA}[\text{dB(A)}] = L_{PA} + 10 \text{ dB(A)}$$

### 4.3.2. Capacitieve laadstromen

Het snelle schakelen (steilheid en frequentie) van de vermogenstransistoren in de wisselrichter wekt capacitieve ontladingstromen op in de motorkabels. Deze stroomcomponent belast zowel de frequentieregelaar als het voedende net. De grootte van deze stroom is afhankelijk van de modulatiefrequentie en de kabelcapaciteit (afhankelijk van kabeltype, soort mantelisolatie, afscherming, kabellengte en details van de plaatsingsomstandigheden). Bij groepsaandrijvingen is de totale lengte van alle motorkabels bepalend.

De volgende kabellengten kunnen door SEW frequentieregelaars tijdens normaal bedrijf (nominale regelaarstroom als motorstroom) nog beheerst worden:

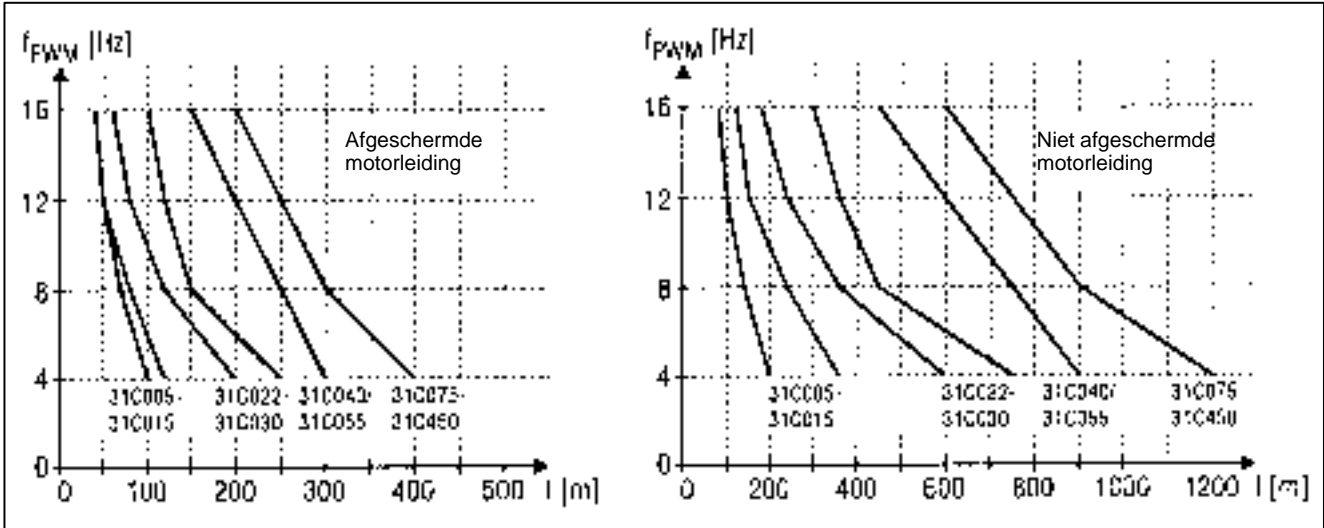
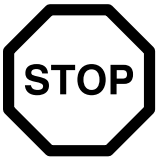


Fig. 22. - Toelaatbare kabellengten bij de MOVITRAC® 31C

### 4.3.3. Overspanning aan het eind van de motorkabel

De eigenschap van de puls-breedte-modulatie van SEW (begrenzing van de flankensteilheid) maakt het mogelijk dat bij de MOVITRAC® 31C een afgeschermdde motorkabel tot ca. 400 m (zie figuur 22) zonder risico voor de wikkelingen-isolatie van de motoren zonder uitgangsfILTER gebruikt kunnen worden.



**Opmerking:** Onafhankelijk van het bovengestelde dient er bij kabellengten vanaf ca. 50m op gelet te worden dat de spanningsval door ohmse weerstand < 1,2...2% blijft. Dit geldt vooral bij het dimensioneren van hijswerkaandrijvingen. Daarom mogen bij hijswerkaandrijvingen géén uitgangsfilters HF... worden toegepast. In plaats daarvan kunnen EMC-modules EF... of uitgangssmoorspoelen HD... worden toegepast.

### 4.3.4. Radiostoring vanuit de motorkabel

De puls-breedte gemoduleerde frequentie produceert hoogfrequente stoorspanningen, die via de niet afgeschermdde motorkabel leiden tot radiostoring.

Een hulpmiddel voor het onderdrukken van de stoorspanningen is allereerst het gebruik van afgeschermdde kabels. Wanneer gelijktijdig aan de eis naar langere motorkabels en/of vermindering van het motorgeluid tegemoet gekomen moet worden, dient een uitgangsfILTER toegepast te worden.

De radio-ontstoring werkt alleen optimaal wanneer de verbinding tussen de uitgang van de frequentieregelaar en het uitgangsfILTER zo kort mogelijk is. Het op een groot contactoppervlak aarden van het uitgangsfILTER via de ongelakte montagehoekstrippen van de filterbehuizing is een belangrijke voorwaarde voor het ontstoren. Tussen filter en motor is, met uitzondering van woongebieden, geen afgeschermdde kabel nodig, daar de spanning nu zonder schakelflanken sinusvormig verloopt.

Bij het parallel leggen van niet-afgeschermdde kabels van verschillende frequentieregelaars kan een wederzijdse apparatuurbeïnvloeding plaatsvinden.

Vorzorgsmaatregel en oplossing: Toepassing van uitgangsfilters of afgeschermdde kabels, of een andere kabelloop (minimum afstand 25 cm).

**Opmerking:** Radiostoring kan ook leidingsgebonden via de netaansluiting plaatsvinden (zie hiervoor hoofdstuk 4.2. "Netfilters").

#### 4.4. EMC-Modules

Een verdere mogelijkheid ter verbetering van de elektromagnetische verdraagzaamheid van frequentieregelaars is het gebruik van EMC-modules.

Deze zijn voor onderbouw geconstrueerd, zodat ze in de schakelkast geen extra ruimte in beslag nemen.

EMC-modules bevatten aan de ingangszijde een netfilter en aan de uitgangszijde smoorspoelen met een ferrietkern. Met EMC-modules wordt bij vakkundige installatie en bekabeling een radio-ontstoring overeenkomstig grenswaarde B bereikt.

Voor maximaal toelaatbare lengten van motorkabels dient de catalogus geraadpleegd te worden.

#### 4.5. Uitgangssmoorspoelen

Uitgangssmoorspoelen zijn als ferrietkern uitgevoerd, waarop door de afnemer 3 - 5 wikkelingen van de motorkabel gelegd dienen te worden. Zij onderdrukken de storende uitstraling van de onafgeschermd motorkabels. Uitgangssmoorspoelen veroorzaken geen extra spanningsval.

#### 4.6. Remweerstand voor 4-kwadrantbedrijf

Een frequentieregelaar met remchopper voor 4-kwadrantbedrijf heeft voor de opname van overtollige energie een remweerstand nodig. De remchopper is aangesloten op de tussenkringspanning en schakelt zich zelfstandig in bij een bepaald niveau van de tussenkringspanning  $U_z$ . De aan de remchopper aangesloten remweerstand neemt energie uit de tussenkring op tot de tussenkring het uitschakelniveau heeft bereikt. Bij een voortdurende remming schakelt de remchopper voortdurend in en weer uit, hij "chopt".

De weerstandswaarde ( $\Omega$ ) van de remweerstand volgt uit de maximum toelaatbare remstroom van de frequentieregelaar. Deze dient bij de gelijkspanningstussenkring bij het bijbehorende spanningsniveau in generatieve toestand (verschillend bij 400 V en 500 V apparaten) omgerekend te worden. Voor elk type frequentieregelaar wordt de kleinste toelaatbare weerstandswaarde in de technische gegevens vermeld.

De vermogensgrootte (100% ID waarde) van de remweerstand volgt uit het elektrische remvermogen dat na aftrek van de verliezen (terugwerkende rendementswaarde) in lastwerktuig, reductor en motor in de frequentieregelaar terugvloeit. Omdat het remvermogen doorgaans niet voortdurend, maar slechts beperkt in de tijd optreedt, dient met dit aspect bij het dimensioneren van de remweerstand eveneens rekening gehouden te worden. De volgende rendementswaarden kunnen voor reductoren en voor motoren aangegeven worden (richtwaarden; zie voor de concrete waarden de SEW catalogus "Getriebemotoren"):

- R-/F-/K-reductoren (per trap 2% verlies)  $\eta = 94...96\%$ ;
- S-reductoren (afhankelijk van  $i_{tot}$  en  $n_{ing}$ )  $\eta = 50...93\%$ .

	4-polige SEW motoren serie DT/DV									
<b>P<sub>nom</sub> [kW]</b>	0,75	1,5	3	5,5	7,5	11	15	22	30	45
<b><math>\eta</math> bij P=P<sub>nom</sub></b>	0,75	0,77	0,80	0,85	0,86	0,89	0,89	0,90	0,92	0,93

Omdat het rendement van de motoren geoptimaliseerd is voor een last van ca. 3/4, gelden bij een geheel belaste motor die een typesprong kleiner is gekozen vergelijkbare verhoudingen als boven aangegeven bij  $P = P_{nom}$  (vergelijk hoofdstuk 2.1.1. figuur 2).



Voorbeeld voor de keuze van een remweerstand:

Een gewenst kortstondig gemiddeld ID-remvermogen van 1 kW voor een inschakelduur van 10% vraagt om een remweerstand met een duurvermogensafname van 150 W.

In het vermogensbereik 0,1...2 (4) kW worden de weerstanden als draadgewikkelde buisweerstand, en vanaf ca. 4 kW als plaatweerstand uitgevoerd.

Wanneer in een cyclus vaker geremd wordt, dan dient het daaruit resulterende effectieve remvermogen op basis van rem- en pauzetijden via de volgende formule bepaald te worden:

$$(2) \quad P_{B \text{ eff}} = \frac{P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots} \text{ [kW]}$$

De som van de deeltijden  $t_1 + t_2 + \dots$  komt overeen met de totale remtijd, resp. inschakelduur.

### Remvermogen voor hijswerken:

Deze wordt bepaald vanuit 2 componenten,

- statisch remvermogen (daalbedrijf met  $v = \text{constant}$ ), en
- dynamisch remvermogen (vertraging van de massa traagheidsmomenten).

Het statische remvermogen is tijdens het dalen constant en bedraagt:

$$(3) \quad P_B = \frac{(m_L - m_{\text{contr}}) \cdot g \cdot v \cdot \eta}{1000} \text{ [kW]}$$

Lijst van gebruikte afkortingen:

- $m_{\text{contr}}$  = massa van het contragewicht [kg]
- $g$  = zwaartekrachtversnelling [9,81 m/s<sup>2</sup>]
- $v$  = daalsnelheid [m/s]

Bovendien dienen bij het geven van het stopcommando de massa traagheidsmomenten van de motor, de last en indien aanwezig van het contragewicht, vertraagd te worden.

$$(4) \quad P_{\text{dyn M}} = \frac{J_M \cdot n^2}{t_B \cdot 91200} \text{ [kW]}$$

Lijst van gebruikte afkortingen:

- $P_{\text{dyn M}}$  = dynamisch remvermogen van de motor [kW]
- $J_M$  = massa traagheidsmoment van de motor [kgm<sup>2</sup>]

$$(5) \quad P_{\text{dyn L}} = \frac{(m_L + m_{\text{contr}}) \cdot a_B \cdot v \cdot \eta}{1000} = \frac{(m_L + m_{\text{contr}}) \cdot v^2 \cdot \eta}{t_B \cdot 1000} \text{ [kW]}$$

Lijst van gebruikte afkortingen:

- $P_{\text{dyn L}}$  = dynamisch remvermogen van de last en eventueel contragewicht

Het piekremvermogen is de som van de resultaten van de formules 3, 4 en 5:

$$(6) \quad \hat{P}_B = P_B + P_{\text{dyn M}} + P_{\text{dyn L}} \text{ [kW]}$$

# SEW

Deze dient  $\leq$  het piekremvermogen van de remweerstand blijven:

$$(7) \quad \hat{P}_B \leq \hat{P}_{BW} = \frac{U_z^2}{R_{BW}} \text{ [kW]}$$

Het verschil tussen hijswerken met en zonder conragewicht is dat met het gebruik van een conragewicht het statisch remvermogen (3) vermindert. Het dynamische remvermogen (5) wordt echter vergroot.

---

## Inhoudsopgave

### **5. Installatie van de apparatuur**

- 5.1. Mechanische installatie in de schakelkast
- 5.2. Schakelkast-koelingsvoorwaarden
- 5.3. Elektrische installatie van frequentieregelaars en toebehoren
  - 5.3.1. Keuze van kabels en de afzekering daarvan, bedrading volgens de EMC-adviezen
  - 5.3.2. Schakelapparatuur volgens de EMC-adviezen

## 5. Installatie van de apparatuur

De gebruikelijke beschermingsklasse van apparatuur in de vermogenselektronica is IP 20. Daardoor is de installatie in een schakelkast met een voor de toepassing geschikte afdichtingsklasse (meestal IP 54) een voorwaarde voor het gebruik van dergelijke apparatuur. De schakelkast bevat alle schakelcomponenten die rond het bedrijf van een frequentieregelaar nodig zijn, zoals beveiligingen, relais, filters en smoorspoelen, zekeringen en andere beveiligingscomponenten, elektronische sturingen enz. Om bedrijfszekerheid van de apparatuur te kunnen garanderen, dient met mechanische, koeltechnische en elektrische aspecten rekening gehouden te worden. Deze worden in de volgende 3 onderhoofdstukken behandeld.

### 5.1. Mechanische installatie in de schakelkast

Bij het indelen van de schakelkast moet met vrije ruimte rondom de frequentieregelaar rekening worden gehouden vanwege:

- onbelemmerde toegang bij servicewerkzaamheden;
- montagevriendelijkheid;
- ongehinderde circulatie van koellucht onder en boven het apparaat (afhankelijk van het apparaat 100 - 150 mm).

Bij bevestiging van de regelaar dient een goed massacontact met de schakelkast tot stand te komen. Belangrijk is dus een zo groot mogelijk metallisch contactvlak. Dit geldt vooral voor net- en uitgangsfilters, waarvan de hoogfrequente filterfunctie onder meer afhankelijk is van de kwaliteit van de behuizingsaarding. Gelakte montageplaten, die uitsluitend via afstandsbouten met het schakelkastplaatmateriaal zijn verbonden, bieden een slechte basis voor goede hoogfrequent aardingvoorwaarden.

De inbouw van de bij de regelaar behorende randapparatuur dient zo dicht mogelijk (met in achtname van de op mechanische gronden benodigde vrije ruimten) bij de regelaar plaats te vinden. Dit geldt vooral voor:

- in- en uitgangsfilters;
- koppelrelais (zowel voor ingangen als voor uitgangen);
- analoge wenswaarden (inbouwpotentiometers; externe regelaars, die als uitgang een gewenste frequentiewaarde leveren).

De compacte, samenhangende inbouw van de bovengenoemde componenten is een belangrijke voorwaarde voor een in EMC opzicht correcte installatiewijze.

Kabelgoten moeten qua aantal en onderlinge afstand zodanig op elkaar afgestemd worden, dat de elektronikakabels gescheiden gelegd worden van de vermogenskabels (beveiligingsstuurkabels, regelaaruitgangskabels, remweerstandskabels, remmotorkabels enz.). Een afstand van minimaal 20 cm bij parallelle kabelgootloop is ter beperking van wederzijdse EMC beïnvloeding noodzakelijk.

### 5.2. Schakelkast-koelingsvoorwaarden

Voor de keuze van een geschikte schakelkast is kennis van het gemiddelde verliesvermogen van de ingebouwde componenten belangrijk. De ontstane verlieswarmte mag er niet toe leiden, dat de temperatuur in de schakelkast ontoelaatbaar hoog wordt. Het is gebruikelijk de maximum toelaatbare omgevingstemperatuur voor in te bouwen apparatuur zonder beperking van hun prestatiegegevens op 40 °C (ten dele ook 45 °C) te stellen.

Met de volgende oriënterende rekenwijze kan worden bepaald hoe groot het voor de warmte-uitstraling minimum beschikbare oppervlak van de schakelkast dient te zijn. Daarbij wordt zowel rekening gehouden met de afdichtingsklasse (beschermingsgraad) en het materiaal van de schakelkast (staal, aluminium of kunststof), als met de maximum omgevingstemperatuur.

Allereerst dient het gemiddelde verliesvermogen van alle apparatuur in de schakelkast bepaald te worden. Hieronder worden als voorbeeld enige componenten en hun globale waarden voor het verliesvermogen  $P_V$  genoemd:

Frequentieregelaars (IGBT-techniek) voor $U_{nom} = 3 \times 400 \text{ V} \approx$								
$P_{nom}$ [kW]	0,75	1,5	3	5,5	11	22	30	45
$I_{nom}$ [A]	2,5	3,5	7,5	12	23	47	60	85
$P_V$ [W]	80	100	170	250	400	750	1000	1400

Netfilters (voor $U_{nom} = 3 \times 400 \text{ V} \approx$ )								
$I_{nom}$ [A]	8	15	25	35	50	80	110	180
$P_V$ [W]	8	9	10	11	13	26	30	50

Uitgangsfilters (voor $U_{nom} = 3 \times 400 \text{ V} \approx$ en $f_{pwm} \geq 4 \text{ kHz}$ )								
$I_{nom}$ [A]	4	8	12	16	23	35	50	65
$P_V$ [W]	15	43	50	65	90	120	200	280

Magneetschakelaars (voor $400 \text{ V} \approx \text{AC-3}$ bedrijf)								
$I_{nom}$ [A]	4	11	15	22	30	45	55	90
$P_V$ [W]	3	3	4	5	5	8	9	15

Aardlek- en motorbeveiligingsschakelaars								
$I_{nom}$ [A]	16	25	35	50	63			
$P_V$ [W]	5	6	8	13	20			

Mespatoonzekeringen (grootte 00)								
$I_{nom}$ [A]	25	35	50	63	80	100	120	160
$P_V$ [W]	3	4	5	6	8	9	11	13

Draaistroom-scheidingstransformatoren								
$I_{nom}$ [A]	2,5	4	6	10	15	25	40	60
$P_V$ [W]	130	210	260	420	50	780	1300	1900

Silicium-gelijkrichters								
$I_{nom}$ [A]	16	25	35	50	80			
$P_V$ [W]	50	70	100	150	240			

Met de berekeningsparameters:

- toelaatbaar temperatuurverschil binnen en buiten de schakelkast en
- de geplande schakelkastgrootte en het daaruit volgende werkzame schakelkastoppervlak (achterwand en wartelplaat niet altijd meetellen), kan via de hierna volgende grafiek gecontroleerd worden of de in de eerste opzet bepaalde verliesvermogens door de schakelkast afgevoerd kunnen worden.

Wanneer het afvoerbare vermogen kleiner is dan het verliesvermogen, dan dient voor extra ventilatie, eventueel met filter (bij beschermingsgraad IP 54) gezorgd te worden (figuur 24).

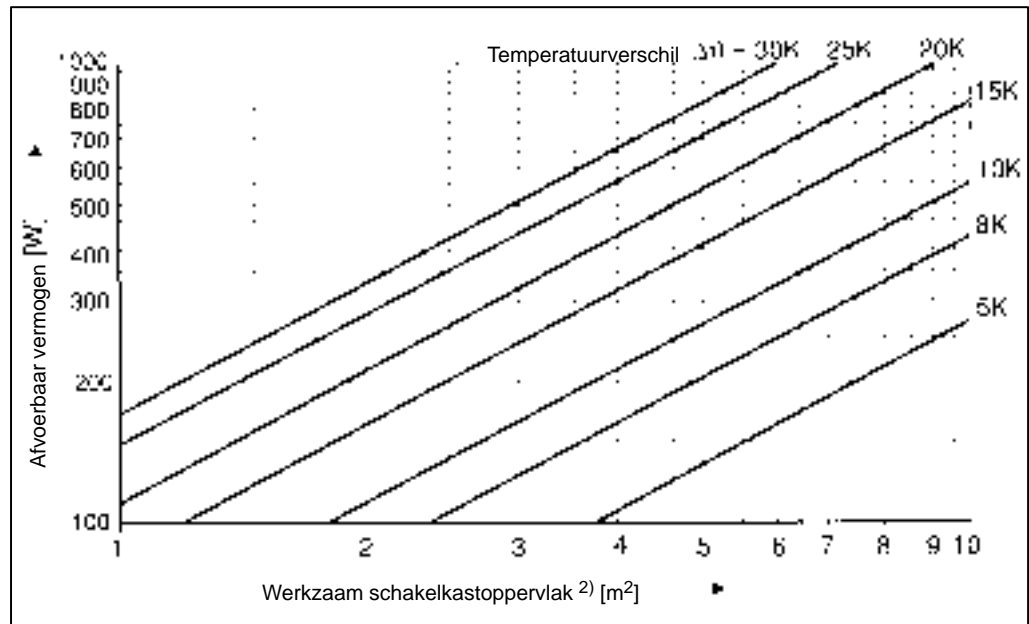


Fig. 24. - Warmte-afvoerend vermogen van een stalen <sup>1)</sup> schakelkast in beschermingsgraad IP 54.

1. Bij kasten van andere materialen geldt voor  $P_A$ :

- edelstaal:  $P_A \times 0,7$
- aluminium:  $P_A \times 2,2$
- kunststof:  $P_A \times 0,06$

2. Alleen de vrije vlakken mogen in rekening gebracht worden; dit zijn bijvoorbeeld bij een tussenkast, die tegen een wand is opgesteld, alleen de frontdeur(en) en het dak.

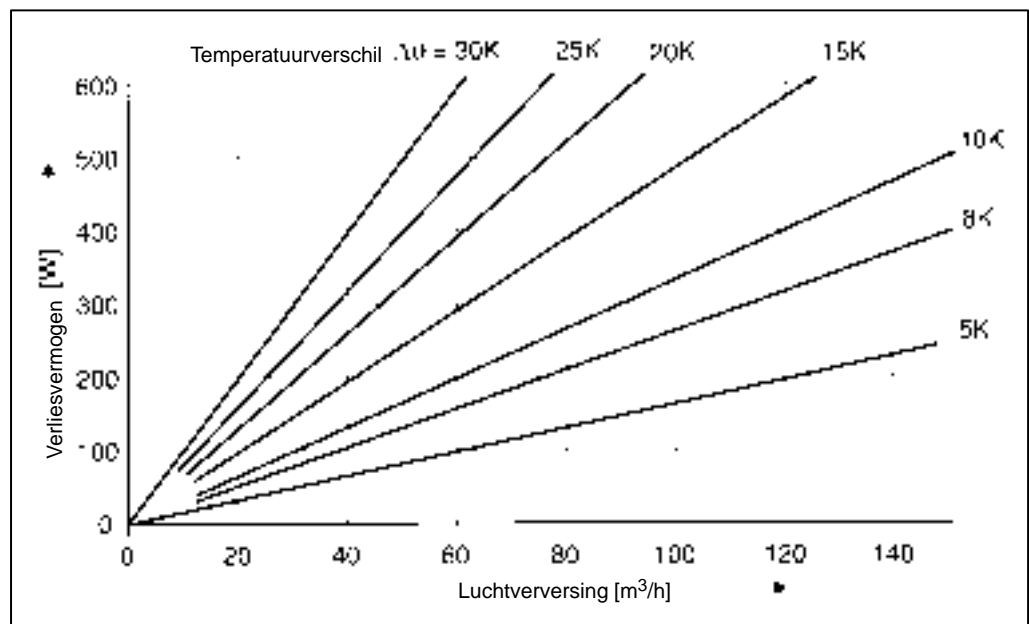


Fig. 25. - Noodzakelijke schakelkast-luchtverversing als afhankelijke van het af te voeren vermogen en het verschil tussen de buitentemperatuur en de temperatuur in de schakelkast.

## Het vermijden van condens in de schakelkast

De vorming van condens op elektrische componenten moet tijdens bedrijf voorkomen worden, omdat hierdoor kruipstromen kunnen ontstaan, die de elektrische functies van de apparatuur beïnvloeden. Tegen condensvorming helpt het inbouwen van een schakelkastverwarming, die de temperatuur in de schakelkast boven de dauwpunt-temperatuur houdt. Deze is afhankelijk van de klimatologische omstandigheden:

- relatieve vochtigheid;
- de luchttemperatuur.

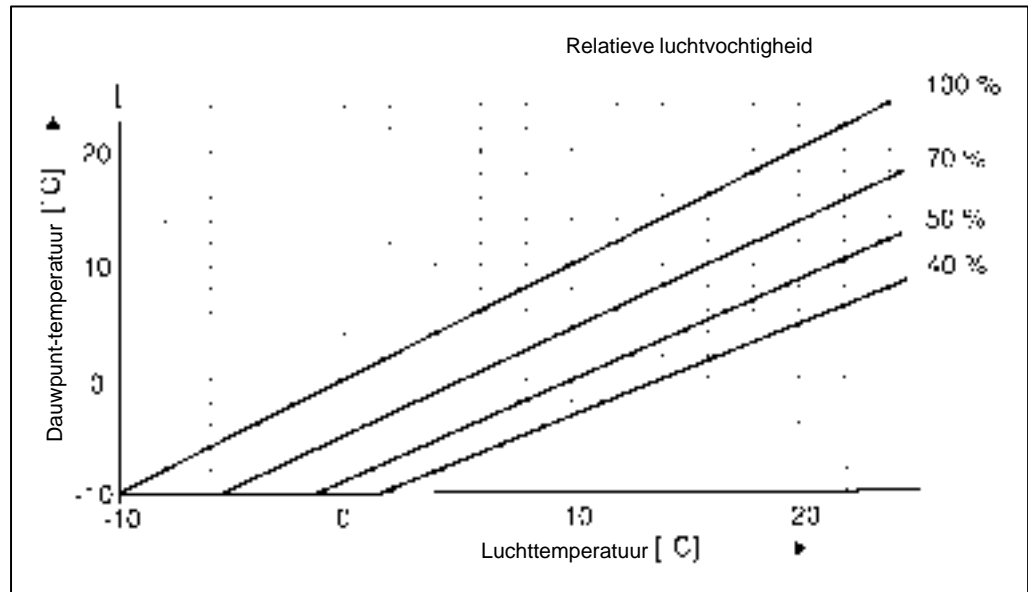


Fig. 26. - De dauwpunt-temperatuur als afhankelijke van de luchttemperatuur en de relatieve vochtigheid.

Wanneer niet gegarandeerd is, dat de temperatuur binnenin de schakelkast ook tijdens de bedrijfsrusttijden boven de dauwpunt-temperatuur ligt, dient ervoor gezorgd te worden, dat de in bedrijfstelling niet plaatsvindt in de dauwtoestand. Dit wordt bereikt door een voorafgaande verwarming van het inwendige van de schakelkast met een thermostatisch geregeld verwarmingselement (inbouw in het onderste derde deel van de schakelkast). De voorverwarmingstijdsduur dient ongeveer een uur te zijn.

### 5.3. Elektrische installatie van frequentieregelaars en toebehoren

Voor de elektrische installatie dient met de volgende normen rekening gehouden te worden. In Duitsland/Nederland gelden vooral:

- DIN VDE 0113 T.1 "Elektrische Ausrüstung von Maschinen"
- = DIN EN 60 204 T.1
- = IEC 204-1
- DIN VDE 0160 "Ausrüstung von Starkstromanlagen mit elektronischen Betriebsmitteln"
- NEN 1010 "Veiligheidsbepalingen voor laagspanningsinstallaties"

Toegevoegd gelden verdere vaknormen, die

- betrekking hebben op radiostoring (bv. DIN VDE 0875T.11 = EN 55011, of
- de EMC compatibiliteit vastleggen (DIN VDE 0843 = IEC 801).

Het **TN-S stelsel** is de meest voorkomende netvorm. Deze bestaat uit 3 fasedraden (L1, L2 en L3), de nulleider (N) en de veiligheidsaarde PE. Apparaten met nominale spanningen van 400 V of 500 V worden aan de 3 fasendraden en met de PE-klem aan de veiligheidsaarde aangesloten.

Als beveiliging komt in het algemeen alleen de netzijdige beveiliging, in de vorm van zekeringen of kortsluit-installatie-automaten, in aanmerking (zie de Technische Handleiding van de desbetreffende frequentieregelaar).

De conventionele aardlekschakelaar functioneert niet in die gevallen, waar bij de toepassing van de frequentieregelaar vereffeningstromen naar aarde ontstaan of waar bij storing foutstromen met gelijkstroomcomponenten optreden. Dit geldt vooral voor:

- Netfilters met ontstoringscondensatoren naar aarde.
- Kabels (vooral afgeschermd) tussen motor en frequentieregelaar. Deze hebben een parasitaire capaciteit naar aarde, die afhankelijk van de kabellengte en de puls-breedtemodulatie (frequentie en du/dt) een aanzienlijke lekstroom veroorzaken. Het verhelpen hiervan kan alleen door het toepassen van uitgangsfilters (zie hoofdstuk 4.3.).
- Aardfout in frequentieregelaar na de ingangsgelijkrichter (veroorzaakt DC fout).

Universele aardlekschakelaars herkennen daarentegen DC-foutstromen en zijn als beveiligingsmaatregel toelaatbaar. Met een nominale foutafschakelstroom van 300 mA zijn geen ongewenste afschakelingen door de lekstromen te verwachten.

Netten volgens het IT stelsel kenmerken zich door isolatie naar aarde, d.w.z. het sterpunt van de nettransformator is niet geaard. Vereffeningstromen naar aarde kunnen daarom niet ontstaan. Als beveiliging komen, naast de netzijdige kortsluit-installatie-automaten, zekeringen of isolatiebeveiliging door een isolatiebewaking in aanmerking.

De isolatiebewaking creëert zelf een kunstmatig netsterpunt en meet ten opzichte hiervan de mogelijke foutstromen van de aangesloten elektrische verbruikers, die zelf geaard dienen te zijn. De toe te passen isolatiebewakingen dienen volgens het puls-code-systeem te werken. De andere werkingsprincipes zullen bij frequentieregelaars niet werken.

### 5.3.1. Keuze van kabels en de afzekering daarvan, bedrading volgens de EMC-adviezen

#### Nettoevoerkabels

De bemeting van de afzonderlijke aders of kabeldoorsneden kan bepaald worden aan de hand van de veiligheidsbepalingen voor laagspanningsinstallaties.

De onderstaande tabel is gebaseerd op o.a. de tabellen 52 A en 53 A (NEN 1010) voor drie belaste leidingen (PVC-kabel of PVC-draden) bij een maximum omgevingstemperatuur van 30 °C, bovengronds gelegd in buizen of kabelgoten.

In het geval dat meerdere kabels worden toegepast, of de motorkabellengte langer is dan ca. 100 meter, verwijzen wij u naar de tabellen 52 B en 53 B.

Ontwerpstroom (A)	2	4	6	8	10	12	16	20	25	32	35	40	50	63	80	100
Toelaatbare stroom van de leiding (A)	2,89	5,79	7,86	10,5	13,1	14,5	19,4	24,4	30,2	35,4	38,6	44,2	55,2	69,6	88,3	111
Nominale waarde gl - smeltpatroon (A)	2	4	6	8	10	12	16	20	25	32	35	40	50	63	80	100
Geleiderdoorsnede (mm <sup>2</sup> )	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	4	6	6	10	10	16	25	25	35

Opmerking: Overstroombeveiligingen (smeltveiligheden of leidingsbeveiligingsschakelaars) zijn alleen voor nettoevoerleidingen noodzakelijk. Wanneer aan de uitgang van de frequentieregelaar echter een groep motoren ( $\Sigma P_{\text{mot}} \leq P_{\text{frequentieregelaar}}$ ) gekoppeld is, dan dient elke afzonderlijke motor-kabel eveneens volgens de bovenstaande tabel afgezekerd te worden.

## Motortoevoerkabels

De spanningsval over de totale lengte van de kabels dient volgens DIN VDE 0113 hoofdstuk 14.5, door een geschikte keuze van de doorsnede, tot maximaal 5% van de ontwerpspanning beperkt te worden. Uit de praktijk is gebleken, dat voor frequentieregeld bedrijf van motoren de volgens DIN VDE 0113 toelaatbare waarde te hoog is. Het koppel wordt onnodig beperkt. Om die reden dient de spanningsval in de toevoerkabel van de motor door de keuze van de geschikte doorsneden tot de volgende waarden - bij  $U_{nom} = 400\text{ V}$  - begrensd te worden:

Bij afzonderlijke aandrijvingen:  $\Delta U \leq 10\text{ V} = 2,5\%$

Bij groepsaandrijvingen en hijswerken:  $\Delta U \leq 5\text{ V} = 1,25\%$

De spanningsval kan met de volgende tabel bepaald worden (bij kortere leidingen kan deze proportioneel met de lengte omgerekend worden):

Kabel- door- snede [mm <sup>2</sup> ]	Stroombelasting I [A $\approx$ ]														
	4	6	8	10	13	16	20	25	30	40	50	63	80	100	125
<b>Koper</b>	<b>Spanningsval <math>\Delta U</math> [V] bij lengte 100 m en <math>\vartheta = 70^\circ\text{C}</math></b>														
1,5	5,3	8	10,6	13,3	17,3	21,3	*)	*)	*)	*)	*)	*)	*)	*)	*)
2,5	3,2	4,8	6,4	8,1	10,4	12,8	16	*)	*)	*)	*)	*)	*)	*)	*)
4	1,9	2,8	3,8	6,7	6,5	8,0	10	12,5	*)	*)	*)	*)	*)	*)	*)
6					4,4	5,3	6,4	8,3	9,9	*)	*)	*)	*)	*)	*)
10						3,2	4,0	5,0	6,0	8,2	10,2	*)	*)	*)	*)
16								3,3	3,9	5,2	6,5	7,9	10	*)	*)
25									2,5	3,3	4,1	5,1	6,4	8,0	*)
35											2,9	3,6	4,6	5,7	7,2

1) Belasting volgens NEN 1010 niet toelaatbaar.

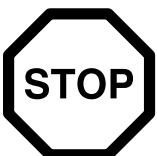


### Let op:

Bij het parallel leggen van de motorkabels van verschillende frequentieregelaars met een te kleine onderlinge afstand, kan een wederzijdse beïnvloeding van de apparatuur plaatsvinden (zie hoofdstuk 4.3.4.).

### Remweerstandskabel:

De kabel tussen remchopper en remweerstand (inbouwplaats bij voorkeur op het dak van de schakelkast) voert de hoge gelijkspanningspotentiala tot 750 V= bij het 400 V $\approx$  net; tot 900 V= bij een 500 V $\approx$  net. De isolatie van de kabel dient voor deze bedrijfsspanning geschikt te zijn. Als draaddoorsnede wordt dezelfde waarde als voor de nettoevoerkabel gekozen. De lengte van de kabel mag de 100 m niet overschrijden. Bij langere kabels kunnen capacatieve vereffeningstromen vooral bij kleine frequentieregelaars tot storingen leiden. De kabel dient niet naast niet-afgeschermde signalleidingen gelegd te worden.



### Let op:

Ter bescherming van de remweerstand dient in de stroomkring een bimetaalverbreekcontact opgenomen te worden, waarvan de uitschakelstroom aan de technische gegevens voor de remweerstand ontleend kan worden.

**Elektronica-signaalleidingen:**

Elektronica-stuurstromkringen behoren volgens DIN VDE 0113, deel 1, tab. 6 tot laagstroominstallaties ( $< 2$  A).

Daartoe dient de doorsnede bij

- enkeladerige, meeraderige (lint)kabels minimaal  $1 \text{ mm}^2$ , binnen schakelkasten ("behuizingen") minimaal  $0,2 \text{ mm}^2$
- meeraderige afgeschermd kabel minimaal  $0,3 \text{ mm}^2$ , binnen schakelkasten ("behuizingen") minimaal  $0,2 \text{ mm}^2$  te zijn.

**Afgeschermd kabels** bieden door aan- en afvoer onder een gemeenschappelijke afscherming de grootste bescherming tegen storingen. De afscherming dient aan beide zijden geaard te worden. De uiteinden van de afscherming dienen daarbij zo kort mogelijk (maximaal enkele centimeters) en daarmee inductiearm gehouden te worden. Zij dienen met de volledige omvlechtingdoorsnede aan massa (behuizingsaarde) gelegd te worden of met behulp van een metalen beugel om de afscherming te worden geaard.

Bestaat er in de installatie een ongelijk aardpotentiaal (vooral tussen ver uit elkaar geplaatste apparatuur), dan kan via de aan weerszijden aan aarde gelegde afscherming een potentiaalvereffeningsstroom ontstaan. Gecontroleerd dient te worden of deze de afgeschermd kabel niet overmatig verhit. In geval van nood kan het afschermingsuiteinde aan de niet-frequentieregelaarzijde niet direct maar via de gebruikelijke ontstoringcondensator worden geaard. Als alternatief komt een kabel met dubbele afscherming in aanmerking. De buitenste afscherming wordt aan de zijde van de frequentieregelaar en de binnenste aan de andere zijde met de aarde verbonden.

**Niet-afgeschermd kabels** mogen alleen gebruikt worden, wanneer de signaalkabel en de nul(kabel) t.o.v. elkaar getwist zijn (minimaal 2 slagen per 10 cm). Bovendien is het aan te bevelen deze te leggen in afzonderlijke kabelgoten (gescheiden van vermogensvoerende kabels, beveiligings-stuurkabels of remweerstandskabels).

**Aardkabels** dienen bij installaties, die meerdere frequentieregelaars en andere elektronische bedrijfsmiddelen bevatten, zoals PLC's, stervormig vanuit een centraal punt bedraad te worden. Zij mogen in geen geval van apparaat tot apparaat doorgelust worden.

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen twee soorten 0 V potentialen, die ook gescheiden bedraad dienen te worden:

- a. Analoo-0 V = referentiepotentiaal voor analoge signalen, bv. de gewenste waardegever van de frequentieregelaar of analoge uitgangssignalen (meetwaarde-uitgangen).
- b. Digitaal-0 V = referentiepotentiaal voor binaire signalen (in- en uitgangen) evenals de externe 24 V stroombron.

Aanbevolen doorsnede  $1,5 \text{ mm}^2$ . Stervormige bedrading vereist een doelmatige indeling van de schakelkast. De desbetreffende componenten dienen in hetzelfde of het naastliggende veld ingebouwd te worden, om de massa- en signaalkabels niet onnodig lang te laten worden.

**Gegevensvoerende leidingen** dienen principieel afgeschermd uitgevoerd te worden. De lengtebeperkingen kunnen aan de technische gegevens van de betreffende apparatuur ontleend worden. Zo geldt bijvoorbeeld voor de seriële poort (interface), volgens de EIA standaard RS 232C, een overdrachts capaciteit van 19 kBaud bij 2 m lengte en tot 4,75 kBaud bij 10 m lengte. Bij RS 485 poorten (interfaces) kunnen onafhankelijk van de baudrate kabellengten van 100 m en meer toegepast worden.

### 5.3.2. Schakelapparatuur volgens de EMC-adviezen

#### Vermogensschakelingen/beveiligingen

Beveiligings- en relaisspoelen vormen op basis van hun eigen inductiviteit aanzienlijke storingsbronnen. Storingen ontstaan hoofdzakelijk bij het afschakelen van de beveiliging/relais. Door zelfinductie worden in de stuurkring van de spoel spanningen van 2000 V en meer opgewekt. Wanneer de spoel-stuurkring en de onafgeschermdede elektronica-leidingen parallel in gemeenschappelijke goten liggen, dan worden aanzienlijke stoorspanningen overgedragen. Maatregelen om dit te verhelpen:

- Elektronica-leidingen beschermen, d.w.z. afgeschermdede kabels toepassen. Wanneer dit niet mogelijk is dienen de toe- en afvoeraders in elkaar getwist te worden, zie hoofdstuk 5.3.1. Dit levert echter slechts een beperkte bescherming tegen storingsbeïnvloeding.
- Geen installatie van beveiligings-/relaisstuurkabels en onafgeschermdede elektronica-kabels in gemeenschappelijke kabelgoten.
- Wisselstroomgeschakelde beveiligings-/relaisspoelen van een RC-netwerk voorzien. Er zijn standaardeenheden op de markt verkrijgbaar, die eenvoudig aan of op de beveiliging/relais gebouwd kunnen worden.
- Bij gelijkspanningsgeschakelde beveiligings-/relaisspoelen wordt het schakelcontact resp. -circuit, dat de beveiliging/relais schakelt, uitgevoerd met een vrijlooptiode. Deze bewerkstelligt dat de spoelstroom niet abrupt onderbroken wordt. Deze maatregel is ook al gewenst om het schakelcontact tegen slijtage door inbranding resp. de schakelketen (transistoren) tegen overspanning te beschermen.

**Let op:** De laatste twee van de genoemde maatregelen verlengen de afvaltijd van de geschakelde beveiliging/relais.

De **netzijdige beveiliging** volgens de gebruikscategorie AC3 wordt volgens de nominale ingangsstroom van de frequentieregelaar gedimensioneerd. Deze mag niet voor tipbedrijf van de aandrijving gebruikt worden. Daarvoor dienen uitsluitend de elektronica-commando's rechtsom/linksom/snelstop.

Beveiligingen aan de uitgaande zijde zijn over het algemeen niet nodig en dienen te worden vermeden. Indien speciale voorschriften dit vereisen, zoals galvanische scheiding tijdens servicewerkzaamheden aan de aandrijving, dan dienen de van toepassing zijnde in- en uitschakelvoorwaarden in acht genomen te worden.

Ook bij groepsaandrijvingen kan het toepassen van beveiligingen in de motorkabel noodzakelijk zijn om de motoren selectief uit de groep te schakelen. Over de grenzen van het uitgangszijdig schakelen van groepsaandrijvingen geeft hoofdstuk 3.3.2. informatie.

Het **rembeveiligingshulpcontact** dient geschikt te zijn voor de gebruikscategorie AC-3 (volgens IEC 158-1). Het stuurt de rem van de motor en wordt als regel via het signaal "rem" van de frequentieregelaar gestuurd. De frequentieregelaar biedt dit signaal aan als uitgangsrelaiscontact of als relaisstuursignaal. Een uitgangsrelais mag niet direct voor het aansturen van de rem van de motor gebruikt worden, omdat het schakelvermogen niet voldoende is.

De aansturing van de rem via de frequentieregelaar is van bijzonder belang bij hijswerktuigen, omdat een interne logica het geschikte tijdstip voor het lichten en invallen bepaalt.

## SEW remgrootten en -vermogens

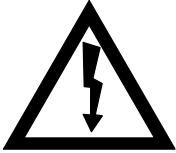
Remtype	B03	BMG05	BMG1	BMG2	BMG4	BMG8	BM15	BM30/31 BM32/62
Toegepast voor motoren...	DT63	DT71/80	DT80	DT90/100	DT100	DV112/132S	DV132M/ML DV160M	DV160L DV180/200/225
Remspoel houd-vermogen	32 W	32 W	36 W	41 W	51 W	57 W	95 W	95 W
Inschakelstroom	$I_{nom}$	$4 \times I_{nom}$	$4 \times I_{nom}$	$4 \times I_{nom}$	$4 \times I_{nom}$	$6,3 \times I_{nom}$	$7,5 \times I_{nom}$	$8,5 \times I_{nom}$

### Elektronica-relais (communicatierelais):

Deze dienen voor het schakelen van kleine spanningen en stromen (5...20 V., 0,1...20 mA) geschikt te zijn. Dit betekent geschikte schakelcontacten (bv. vergulde contacten, tegen stof beschermde of reedcontacten). Hulpcontacten van magneetschakelaars zijn voor dit doel meestal niet geschikt!

Communicatierelais dienen verschillende stroomkringen galvanisch van elkaar te scheiden en het doorgeven van storingen van storingsgevoelige elektronica signalen te verhinderen. Om die reden dienen deze relais in de nabijheid van de frequentieregelaar ingebouwd te worden (doelmatig  $\leq 50$  cm afstand).

## 6. Meettechniek: aanwijzingen voor de service



### Arbeidsveiligheid/voorkomen van ongevallen

Metingen aan elektrische bedrijfsmiddelen (bv. frequentieregelaars) mogen overeenkomstig de voorwaarden van de arbeidsinspectie alleen uitgevoerd worden door **elektrotechnisch geschoolde vaklieden**. Bij geopende apparatuur is de beveiliging tegen aanraking niet meer aanwezig. frequentieregelaars kunnen, op basis van de capaciteit van de gelijkspanningstussenkring, in en aan het apparaat nog verschillende minuten gevaarlijke spanningen voeren. Dit geldt vooral voor de bedrading en de aansluitingen van de tussenkring en de remweerstandskring.

### Aanwijzingen voor de meetnauwkeurigheid

De nauwkeurigheidsopgave van meetapparatuur (analoog of digitaal) wordt betrokken op de eindwaarde van het ingestelde meetbereik. Dit wil zeggen, dat men in eerste instantie een groot meetbereik kiest om de hoogte van de meetwaarde grof te bepalen. Vervolgens wordt omgeschakeld naar het kleinst mogelijke meetbereik, om de meetnauwkeurigheid te verhogen. Verder geldt de nauwkeurigheidsopgave alleen voor het opgegeven toepassingsbereik. Dit geldt vooral voor de **frequentie** en de **curvevorm** van het gemeten signaal.

### Metingen door de frequentieregelaar zelf uitgevoerd

De moderne frequentieregelaars hebben de belangrijkste meetfuncties geïntegreerd. De volgende waarden kunnen in het meetprogramma opgenomen zijn:

- netspanning
- tussenkringspanning
- motorspanning
- uitgangsfrequentie
- motorstroom (% van  $I_{\text{frequentieregelaar}}$ )
- belasting van het apparaat ( $I \times t$ )
- temperatuur van de frequentieregelaar
- signaaltoestand van de binaire in- en uitgangen en vrijgave-relais

De opgave van spanningen en stromen in het apparaat vindt normaliter plaats met een tolerantie van  $\pm 10\%$ . De frequentie wordt op basis van z'n vorming in het apparaat met de nauwkeurigheid van de momentele instelling aangegeven (gebruikelijk is een  $\Delta f = 0,05 \dots 0,1$  Hz). Deze nauwkeurigheid kan met externe meetapparatuur niet worden verkregen. De temperatuur van het koellichaam wordt uitsluitend in het bereik van de zinvolle beveiliging ( $\vartheta = 50 \dots 90$  °C) met een nauwkeurigheid van  $\pm 10\%$  aangegeven.

### Metingen met meetapparatuur

Conventionele meetapparatuur is voor gelijk- en wisselspanningen/stromen in het bereik van ca. 20...1000 Hz bij een sinusvormig signaal toepasbaar. Stroommeetangen zijn vaak alleen geschikt voor het frequentiebereik van 40...500 Hz. Dit toepassingsbereik is voor metingen aan frequentieregelaars ongeschikt, vooral aan de uitgang van het apparaat. Er dient dus op gelet te worden dat de **meetapparatuur minimaal voor frequenties vanaf 10 Hz alsmede niet-sinusvormige signalen geschikt is**. Dergelijke meetapparatuur gebruikt interne filters. Stroommeetangen werken niet volgens het transformatorprincipe, maar met Hall-elementen die in de luchtspleet van een ijzeren kern op de magnetische veldsterkte (proportioneel ten opzichte van de meetstroom) gebaseerd zijn.

### Het meten van bepaalde waarden

**Netstroom (ingangsstroom van de frequentieregelaar):** De waarde is proportioneel met het momentele elektrische uitgaande vermogen van het apparaat. Deze is dus bij benadering geschikt voor een indicatie voor het door de aandrijving geleverde vermogen (fout door rendement van motor en frequentieregelaar).

**Uitgangsspanning:** De waarde is proportioneel met het momentele elektrische uitgangsvermogen van de frequentieregelaar. Deze is bij benadering proportioneel met de hoogte van het door de aandrijving geleverde vermogen.

**Uitgangsstroom:** De waarde is proportioneel met de thermische belasting van de frequentieregelaar. Deze is niet geschikt om conclusies ten aanzien van het momentele motorkoppel te kunnen trekken. Deze is bij benadering proportioneel met de watt-stroom, die echter met conventionele meetmiddelen niet kan worden bepaald. Moderne frequentieregelaars kunnen uit de faseverschuiving tussen spanning en stroom de watt-stroom bepalen.

**Uitgangsfrequentie:** de waarde is bij benadering proportioneel met het motortoerental (fout ontstaat door de lastafhankelijke slip van de asynchroonmotor). Bij 4-polige motoren is daardoor de nauwkeurigheid bij  $n_{\text{nom}} = 1400$  r/min: + 6,7% of bij 1460 r/min: + 2,7%.

---

## Inhoudsopgave

### 7. Korte verklaring van vakuitdrukkingen (begrippen en afkortingen)

- 7.1. Frequentieregelaar
- 7.1.1. Parameterbegrippen
- 7.1.2. Apparatuurbegrippen
- 7.2. Vermogenshalfgeleiders
- 7.3. Begrippen rond motoren
- 7.4. Toerentalmeetapparatuur
- 7.5. Geheugencomponenten voor microprocessoren
- 7.6. Sturing, regeling, instelbereik, synchronloop
- 7.7. Storingsinvloeden, radiostoring
- 7.8. Lijst van de in tabellen, formules en afbeeldingen gebruikte tekens en afkortingen

## 7. Korte verklaring van vakuitdrukkingen (begrippen en afkortingen)

### 7.1. Frequentieregelaar

#### 7.1.1. Parameterbegrippen

##### Integrator

Hiermee wordt de werkzame veranderingssnelheid ten gevolge van sprongen in de gewenste waarde vastgelegd (gewenste-waarde-helling). De tijdopgave is altijd gebaseerd op een verandering van 0 tot 50 Hz. Dit betekent dus dat de effectieve integratietijd naar de 50 Hz waarde omgerekend dient te worden.

Bij het bevel "Stop" wordt een toerentalwijziging naar nul ingeleid. De integrator hellingshoek eindigt bij de waarde "Start-/Stop-frequentie". De rem wordt aangestuurd en de motor krijgt een gelijkspannings-namagnetisering, die eveneens een remmende werking heeft.

##### $f_{\min}$

Vooraf ingestelde minimum uitgangsfrequentie, die het apparaat in vrijgegeven toestand (ook zonder opgave van gewenste waarde) genereert. Het bereik tussen 0 -  $f_{\min}$  wordt met de ingestelde integratortijdshelling doorlopen. Gewenste waarden in het frequentiebereik tussen 0 -  $f_{\min}$  worden genegeerd.

##### $f_{\text{kantel}}$

Uitgangsfrequentie, waarbij de maximum uitgangsspanning van het apparaat bereikt is. Wanneer de frequentie verder verhoogd wordt, dan blijft de waarde van de uitgaande spanning constant. In de U/f grafiek ontstaat bij de waarde van  $f_{\text{kantel}}$  een knikpunt (kantelpunt). Onder  $f_{\text{kantel}}$  werkt de motor met een constant koppel, daarboven met een dalend koppel.

##### $f_{\max}$

Vooraf ingestelde maximum uitgangsfrequentie, die het apparaat bij de maximaal gewenste waarde (10 V of 20 mA) afgeeft.

##### Start/Stop-frequentie

Waarde van de uitgangsfrequentie, waarbij de integrator begint, resp. eindigt. Onder de start/stop-frequentie wordt de motor voor- resp. na-gemagnetiseerd (in tijd begrensde gelijkstroom, die een houdkoppel in de motor ontwikkelt).

##### Boost

Handmatig ingestelde verhoging van de uitgangsspanning, **die onafhankelijk is van de belastingssituatie**. De bovenproportionele verhoging van de spanning compenseert ohmse spanningsverliezen in de motor en de motorkabels bij voorbaat.

##### I x R compensatie

Automatische verhoging van de uitgangsspanning, die **afhankelijk is van de laststroom**, die in het apparaat gemeten wordt. De I x R compensatie wordt dus pas werkzaam onder last. Deze opzet van spanningsverhoging vermijdt een te hoge nullaststroom, die bij uitsluitend gebruik van de Boostverhoging vooral bij lage uitgangsfrequenties en onbelaste motor zou ontstaan.

**Slip**

Deze functie bewerkstelligt een automatische lastafhankelijke verhoging van de uitgangsfrequentie. De bij de nominale slip behorende frequentie van de aangesloten motor wordt ingegeven, om het de door de motorslip bepaalde toerentalval onder last te compenseren. De ingestelde compensatiewaarde wordt bij de nominale stroom van de frequentieregelaar bereikt.

**Poolparen**

De invoer van deze parameter is noodzakelijk voor de berekening van het motortoerental (4-polige motor = aantal poolparen is 2).

**Motorpotentiometer**

Deze functie maakt het mogelijk een interne quasi "gewenste waarde" opgave te doen met behulp van de ingangscmando's "Versnellen" en "Vertragen", die via drukknoppen op twee binaire ingangen beschikbaar zijn. Zolang geen van de beide bevelen wordt gegeven, werkt de frequentieregelaar op de laatste "gewenste waarde" instelling. Het commando voor de wijziging van de "gewenste waarde" is alleen effectief tijdens de duur van dit commando. De wijzigingssnelheid wordt bepaald door de steilheid van de integrator (flank)tijd Op, Neer. Meerdere drukknoppen voor de commando's "Versnellen" resp. "Vertragen" kunnen parallel geschakeld worden, zodat vanaf meerdere plaatsen een aanpassing van de "Gewenste waarde" mogelijk is. De menging (optelling) met andere "Gewenste waarden" is mogelijk.

**Snelstop**

= Afschakeling van het vrijgave-commando. Het commando, dat vertraging van de motor volgens de **snelstopflank** bewerkstelligt (4-kwadrant frequentieregelaar met remfunctie noodzakelijk). De snelstopflank is korter ingesteld dan die van de normale integrator, zodat dit commando geschikt is voor noodstopfuncties. Wanneer het vermogen van de frequentieregelaar te klein is voor het af te remmen massa traagheidsmoment, dan wordt de aandrijving afgeremd met het niveau van de stroombegrenzing en verlengt daarmee de remtijd. Bij de "Start/Stop-frequentie" eindigt de snelstopflank en wordt de rem aangestuurd. Tegelijkertijd krijgt de motor een na-magnetisatie, die eveneens een remmende werking heeft.

**Regelsper**

= Afschakeling van het vrijgave-commando. Het bevel blokkeert de wisselrichter en schakelt daarmee de uitgang onvertraagd stroomloos. De motor loopt ongeremd uit (zinnig bij pompen, ventilatoren, wikkelaandrijvingen).

**7.1.2. Apparatuurbegrippen****I-omvormer**

Stroomtussenkringomvormer, met gestuurde ingangs-gelijkrichters (volgestuurde thyristorbrug). De tussenkring (spoelen) krijgt via de thyristorbrug een stroom opgelegd (hervan stamt de naamgeving!). Economisch interessant voor aandrijfvermogens > 50 kVA, bij voorkeur voor afzonderlijke aandrijvingen. Het systeem is geschikt voor teruglevering van energie in het net en heeft dus geen remchopper en remweerstand nodig. De omvormer is niet bestand tegen gebruik zonder motor.

**U-omvormer (pulsomvormer)**

Gelijkspanningstussenkring-omvormer met een ongestuurde ingangsgelijkrichter (diodebrug). De tussenkring (condensatoren) krijgt via de diodebrug een gelijkspanning opgelegd (hervan stamt de naamgeving).

Economisch interessant vanaf de kleinste aandrijfvermogens, te bedienen zonder gekoppelde motor, en daarom zowel voor afzonderlijke als voor groepsaandrijvingen van motoren met afzonderlijke bij- en afschakeling geschikt. Elektrische remming via remchopper

en remweerstand. U- of pulsomvormers kunnen ook voorzien worden van een terugvoedingsoptie naar het net.

### Remchopper

Schakeltransistor, die verbonden is met de gelijkspanningstussenkring. Bij overschrijding van de vast ingestelde waarde van de tussenkringsspanning  $U_{ZK}$  (veroorzaakt door generatief bedrijf van de motor), schakelt deze en zet de remenergie in warmte om via de aangesloten remweerstand. Bij het bereiken van een lager, eveneens vast ingesteld uitschakelniveau van  $U_{ZK}$  schakelt de transistor weer uit.

### Terugvoeding in het net

Een netgericht 6 puls-wisselbedrijf (net-wisselrichter), die antiparallel aan de ongestuurde netgelijkrichter gekoppeld is. De 6-puls wisselrichter is met IGBT transistoren opgebouwd, die permanent door spanningsblokken van  $60^\circ$  aangestuurd worden. Daardoor is de netwisselrichter latent geschikt voor terugvoeding (in tegenstelling tot de remchopper, die pas vanuit een overschrijding van een  $U_{ZK}$  inschakeldrempel de remenergie in de tussenkring afbouwt).

Voordelen van de netterugvoeding (als IGBT netwisselrichter) ten opzichte van de remchopper-oplossing:

- sinusvormige terugvoeding in het net;
- remenergie van de motor wordt niet in warmte omgezet (in de remweerstand), maar is als nuttig bruikbare energie weer beschikbaar;
- de netterugvoeding kan principieel het vermogen continu, d.w.z. in S1-bedrijf, terugvoeden. Remweerstand worden uit economische motieven slechts voor bedrijf met een beperkte ID bemeten. Daardoor kunnen ze niet overbelast worden, wanneer de inschakelduur wordt overschreden.

## 7.2. Vermogenshalfgeleiders

### Thyristor

Silicium-halfgeleider met stuur-elektrode (gate). Een schakelpuls aan de gate kan de thyristor ontsteken, voor zo lang er een positief gerichte anode-kathodespanning is. Toepassing in netgerichte stroomomvormers (met gelijkspanningsuitgang).

### GTO

**Gate Turn Off** (thyristor) = uitschakelbare thyristor. Door een negatieve impuls aan de gate kan deze thyristor ook bij een positieve anode-kathodespanning uitgeschakeld worden. Toepassing in chopperschakelingen en U-omvormers van groter vermogen ( $P > \text{ca. } 250 \text{ kW}$ ).

### GTR

**Giant Transistor** = bipolaire transistor in een darlington-schakeling, d.w.z. 2-3 transistoren in cascade om de stroomversterking  $h_{fe}$  te verhogen. Stroomgestuurde transistor met een grotere aanstuuringscomplexiteit dan bij IGBT of MOSFET.

Toepassing in U-omvormers (ontwikkelingsstand 80-er jaren). Schakelfrequenties  $< 3 \text{ kHz}$ , d.w.z. geluidsproblemen.

### IGBT

**Insulated Gate Bipolar Transistor**. Transistor met spanningsgestuurde gate, d.w.z. weinig aanstuuringscomplexiteit. Toepassing in U-omvormers (ontwikkelingsstand 90-er jaren). Schakelfrequenties 2-20 kHz en hoger, d.w.z. dat modulatiegeluiden vermeden kunnen worden.

### MOSFET

**Metal Oxyd Silicon Field Effect Transistor**. De aanduiding FET wijst op de spanningsgestuurde eigenschap (MOS = productiewijze). Schakelfrequenties vanaf 10 kHz, d.w.z.

geen modulatiegeluiden. MOSFET's kenmerken zich ten opzichte van IGBT's door grotere verliezen (rendement!). Om die reden alleen economisch voor lagere spanningen d.w.z.  $U = 230\text{ V}$  en  $I < 25\text{ A}$ , dus  $P < 3\text{ kW}$ .

## MODULE

Kunststofbehuizing met een warmte-afvoerende potentiaalvrije bodem, geschikt voor montage direct op een koellichaam. Hierin omgoten bevinden zich meerdere vermogenshalfgeleiders in een brugschakeling (B 4 of B 6) of delen hiervan. Voordeel: eenvoudiger, compactere opbouw van apparatuur zonder isolatie-problematiek.

## IPM (SPM)

Intelligent Power Modul of Smart Power Module. Een module, die niet alleen de vermogenshalfgeleiders (meestal IGBT) maar ook de schakelcomponenten voor de beveiliging van de halfgeleider (overstroom), stroommeting alsmede de gate-aansturing (eventueel ook met potentiaalscheiding) omvat.

## 7.3. Begrippen rond motoren

### Pooltal

Het pooltal van de kortsluitrotormotor bepaalt met de voedingsfrequentie de ontwerp- resp. de nominale toerentallen van de motor. Bij 50 Hz en een 2-polige wikkeling bedraagt het synchroontoerental  $n_s = 3000\text{ r/min}$ , het asynchroontoerental  $n_a$  ca. 2850 r/min. Bij 4-polige motoren en 50 Hz is  $n_s = 1500\text{ r/min}$  en  $n_a$  ca. 1430 r/min.

### Aantal poolparen

Deze geeft het aantal poolparen aan (de helft van het pooltal).

### Temperatuurvoelers ("TF") = PTC's

Dit zijn voelers (3 stuks in serie), die bij de productie van de motor in de wikkelkoppen van de motor ingebed worden. Zij reageren op een verhoging boven de gedefinieerde motortemperaturen door een verandering van de weerstand van laag- naar hoogohmig (PTC weerstand). De weerstandsverandering is voor een bewakingsapparaat aanleiding om een afschakeling van de motor te bewerkstelligen. De Nominale Aanspreek Temperatuur (NAT) wordt op de warmteklasse (vroeger isolatieklasse) van de motor afgestemd.

### Thermostaat ("TH")

Het gaat hierbij om schakelelementen op basis van bi-metaal (3 stuks in serie), die in de wikkelkoppen van de draaistroomwikkeling zijn ingebed. Bij het bereiken van een bepaalde temperatuur (overeenkomstig de warmteklasse van de wikkelingenisolatatie) openen zij een contact, dat direct in de beveiligingskring van de motor is opgenomen. Er is geen speciaal bewakingsapparaat nodig! De aanspreekgevoeligheid is niet zo groot als bij "TF" (vanwege de grotere massa een trager aanspreken; schakelhysterese ca. 30 K; afkoeltijd ca. 15 min).

### Warmteklasse (isolatieklasse)

Deze geeft aan met welke grenstemperatuur de wikkeling en de isolatie daarvan belast mag worden (DIN VDE 0530, deel 1, tabel 1). De warmteklassen worden met letters aangegeven:

- warmteklasse B: grenstemperatuur 130 °C
- warmteklasse F: grenstemperatuur 155 °C
- warmteklasse H: grenstemperatuur 180 °C

### Schakelfrequentie

Deze geeft aan hoeveel start-/stopcycli de motor bij netbedrijf per uur kan verdragen, zonder thermisch overbelast te geraken. Bepalend hiervoor is de hoge aanloopstroom bij netinschakeling. De toelaatbare schakelfrequentie zonder last, de zogenaamde leeg-

loopschakelfrequentie, wordt in de documentatie opgegeven. Per definitie is er bij het bedrijf met een frequentieregelaar geen beperking vanuit de toelaatbare schakelfrequentie.

#### **Z-ventilator (verzwaarde ventilator)**

Eigen-geventileerde motoren hebben aan de B-zijde een ventilator (meestal van kunststof), die voor de nodige koellucht zorgt. Door vervanging hiervan tegen een gietijzeren ventilator (= Z-ventilator; Z = toegevoegde vliegwielmassa), wordt het massastraagheidsmoment van de motor vergroot. Door de toegevoegde te leveren versnellings- en vertragingarbeid worden koppelstoten afgezwakt.

Z-ventilatoren verminderen echter de toelaatbare schakelfrequentie. Ze worden hoofdzakelijk voor ongeregelde motoren toegepast. Bij motoren met voeding door een frequentieregelaar is de toepassing alleen zinvol wanneer de kinetische energie opgeslagen dient te worden.

### **7.4. Toerentalmeetapparatuur**

#### **Tachogenerator**

Algemeen begrip voor een apparaat ter bepaling van het toerental. Vaak wordt hieronder een conventionele gelijkstroomtachogenerator verstaan. Deze levert een gelijkspanning die proportioneel is met het toerental (tolerantie en temperatuurinvloeden bepalen de kwaliteit!), die voor weergave en regeldoeleinden gebruikt wordt.

Gebruikelijke spanningen zijn 20...60 V per 1000 r/min.

#### **Encoder (incrementeel)**

Verdere begrippen hiervoor: incrementeelgever, draaipulsgever. Deze levert een puls-frequentie, die proportioneel is met het toerental. Vaak is deze voorzien van 2 kanalen (A en B), die in elektrisch opzicht  $90^\circ$  ten opzichte van elkaar zijn verschoven. Met behulp hiervan kan de draairichting bepaald worden (spoor A voorrijlend of omgekeerd). Dit is bij toerentalregeling in meerdere kwadranten een noodzaak. Eventueel is er nog een derde kanaal (C) aanwezig, dat per geveer-omwenteling slechts één puls afgeeft (nulpuls). Deze is voor toerentalregelingen niet nodig maar dient evt. om het referentiepunt bij positie-neertaken te kunnen bepalen.

#### **Absolute encoder**

Verder begrip hiervoor: absolute hoekgever. Deze levert een puls-informatie, die kenmerkend is per hoekpositie. Het bereik van de verdraaiingshoek, waarin de geveer z'n code-informatie kan verstrekken, wordt aangegeven als "single turn" =  $360^\circ$  (enkel-slags hoekgever) of "multi-turn" = meerdere volledige omwentelingen (meertrapshoekgever, d.w.z. meerdere "single turn" worden via een vertragingsoverbrenging met elkaar verbonden). De puls-informatie wordt gecodeerd in Gray-, Binair- of BCD-code. Dit type geveer levert zijn hoekpositie-informatie direct na het inschakelen van de spanning, d.w.z. er is geen procedure nodig om de positie-referentie te hervinden ("homen"). Toepassing voor positie-neertaken, die een netuitval moeten kunnen doorstaan.

#### **TTL-gever**

TTL heeft betrekking op het signaalniveau (= 5 V) van de pulsen van encoders of absolute encoders. Om een stoorveilige overdracht van deze kleine spanning te bereiken, wordt een complementaire puls gecreëerd. Wanneer de primaire puls logica "1" is, dan dient de complementaire puls logica "0" te zijn en omgekeerd. De overdracht inclusief complementair kanaal voldoet aan de overdracht volgens RS 422 (volgens de EIA standaard).

#### **HTL-gever**

HTL heeft betrekking op het signaalniveau (15...30 V) van de pulsen van encoders of absolute encoders. De stoorveiligheid van de overdracht wordt bereikt door het hogere spanningsniveau. Complementaire impulsen zijn daarom ongebruikelijk. Vanwege de

hogere schakelflanken zijn grotere vermogens nodig om de leidingverliezen te compenseren dan bij de TTL-techniek. Lange geveleidingen (vanaf ca. 100 m) en hoge pulsfrequenties (vanaf ca. 50 kHz) worden beter opgelost met HTL-techniek.

## **Resolver**

Deze levert als signaal 2 analoge spanningen, waarvan de momentele waarde overeenkomen met de sinus resp. de cosinus van de gemeten hoekpositie.

Een statorwikkeling van de resolver wordt aangestuurd met een dragersignaal (ca. 6...10 V; 4...10 kHz), dat transformatorisch (contactloos) in een primaire rotorwikkeling geïnduceerd wordt. De rotorwikkeling induceert deze spanning afhankelijk van zijn rotor-hoekpositie in 2 statorwikkelingen, die 90° ten opzichte van elkaar verschoven zijn. Deze leveren daarmee de sinus- en de cosinusfunctie van de rotorhoekpositie.

Er zijn 2-, 4-, 6- en 8-polige resolvers. Bij 2-polige resolvers herhaalt de sinus-cosinus-informatie zich na 360°, bij 4-polige resolvers na 180° enz. Resolvers bevatten totaal geen elektronica-componenten, maar uitsluitend ijzer en koper, waardoor zij aan dezelfde levensduurwetmatigheden zijn onderworpen als asynchroon - of synchronmachines. Ze worden meestal in servomotoren met sinuscommutatie ingebouwd (rotorpositie-aangestuurd, toerentalregeling, positioneertaakstelling).

## **7.5. Geheugencomponenten voor microprocessoren**

### **ROM**

**Read Only Memory.** Geheugen met een niet te veranderen inhoud. De geheugeninhoud wordt bepaald bij de ROM-fabrikage. Een ROM is een geïntegreerd bestanddeel van een enkele-chip-processor.

### **PROM**

**Programmable Read Only Memory;** als boven, echter wordt de geheugeninhoud niet bij de fabricage geprogrammeerd, maar kan later onveranderbaar worden vastgelegd.

### **EPROM**

**Electrically Programmable ROM;** als boven, echter kan de geheugeninhoud door UV-licht gewist en de module opnieuw geprogrammeerd worden.

### **EEPROM**

**Electrically Erasable PROM;** eigenschappen als EPROM, echter wordt de geheugeninhoud door de processor in het apparaat geladen en kan tot 100.000 maal overschreven worden. De EEPROM dient voor de opslag van variabele informatie (parameterwaarden/storingsmeldingen enz.)

### **RAM**

**Random Acces Memory;** geheugen met keuzevrije ingrijpbaarheid. Werkgeheugen van de processor. De RAM-inhoud is spanningsgebonden, d.w.z. de inhoud gaat bij afschakeling van de voedingsspanning verloren.

## **7.6. Sturing, regeling, instelbereik, synchronloop**

### **Toerentalsturing**

Verandering van het toerental zonder controle van het resultaat, d.w.z. zonder meting en vergelijking met de ingestelde waarde (bijv. frequentieregelaar). De lastafhankelijke toerentalafwijking bedraagt ca. 2...7%. Het mogelijke instelbereik is beperkt tot ca. 1:20.

### **Toerentalregeling**

Het toerental wordt aan de motor via een geveer (gelijkspanningstachogenerator of encoder) gemeten en wordt als momentele waarde aan de toerentalregeling teruggekoppeld.

Deze vergelijkt de momentele waarde met de gewenste waarde en werkt via het regelorgaan een regelafwijking tegen (verschil tussen momentele en gewenste waarde). Afwijkingen in het toerental van  $< 1\%$  zijn standaard. Het mogelijke instelbereik (hier is ook toelaatbaar: regelbereik) ligt afhankelijk van de nauwkeurigheid en regelorgaan-eigenschappen tussen 1:80 en ca.1:400.

### **Toerentalnauwkeurigheid**

Begrip volgens richtlijn VDI/VDE 2185:

Dit is de maximum blijvende (statische) afwijking van de regelgrootte (momentele waarde van het toerental) tegenover de leidwaarde (gewenste waarde) na een gedefinieerde verandering van de belasting en wordt in % van de maximumwaarde van het instelbereik van de te regelen grootte (=  $n_{max}$ ) aangegeven.

De nauwkeurigheid is te interpreteren zonder voortekenen, d.w.z. de bandbreedte (+ en -) is dubbel zo groot. Naast de statische is er de dynamische nauwkeurigheid, overeenkomstig de bovengenoemde richtlijn de last-uitregeltijd.

### **Instelbereik**

Begrip volgens richtlijn VDI/VDE 2185:

"Het instelbereik van de regelgrootte" is de verhouding tussen het kleinste en grootste bedrijfstoerental onder last (d.w.z. bij nominaal koppel).

### **Gelijklooptregeling**

Dit is de toerentalregeling van twee of meer aandrijvingen, die voortdurend een gelijke toerentalrelatie ten opzichte van elkaar dienen te hebben. De gelijklooptregelafwijking dient in de regel onder de 1% te blijven. Dit vereist een toerentalregeling van elke afzonderlijke aandrijving met een regelnauwkeurigheid van  $< 0,5\%$ .

### **Synchroonloop**

Twee of meer aandrijvingen worden zodanig geregeld, dat over willekeurige bedrijfstijden geen verschiltoerentalen (resp. omwenteling-verschillen, d.w.z. verschillende afgelegde wegen) opgebouwd worden. Dynamische afwijkingen in het bereik kleiner dan 1 motoromwenteling zijn toelaatbaar.

Een synchroonregeling is met analoge regeltechnieken, vanwege de eis van correcties over langere perioden, niet mogelijk.

Voor de regeling worden gebruikelijk encoders (draaipulsgevers) en regelaars met verschil-tel-eigenschappen toegepast. De master levert de encodersignalen als gewenste waarde aan de slave-aandrijving. De slave vergelijkt deze met de encodersignalen van de eigen aandrijving (momentele waarde). De regelaar van de slave werkt de regelafwijking tegen.

### **Hoeksynchroonloop**

Deze regeling heeft vergaand dezelfde eigenschappen als de synchroonloop met het verschil, dat de dynamische afwijking niet groter dan een bepaalde hoek (max. enkele graden) mag zijn.

## **7.7. Storingsinvloeden, radiostoring**

### **EMC**

Electromagnetische compatibiliteit, wordt in de wetgeving over de onderlinge verdraagzaamheid van apparatuur als volgt verklaard:

EMC is de eigenschap van een apparaat om in een elektromagnetische omgeving bevestigd te werken zonder daarbij zelf elektromagnetische storingen te veroorzaken, die voor de andere in deze omgeving opgestelde apparatuur onverdraaglijk kan zijn.

Het is een begrip dat zowel emissie als gevoeligheid insluit. De eisen volgens de EMC-kwaliteit zijn opgenomen in DIN VDE 0113, deel 1 (hoofdstuk 5.8) = EN 60204, deel 1 en DIN VDE 0160 (hoofdstuk 5.3).

## **EMI**

**Electromagnetische immu**niteit, dus de bestendigheid tegen elektromagnetische storingen die op het apparaat inwerken (bijv. RFI / ESD / Bursts / nettransiënten).

## **PWM**

**Puls Width Modulation** van de uitgangsspanning (bv. om sinusvormige uitgangsströmen te verkrijgen).

## **RFI**

**Radio Frequency Interference**. Door schakelbedrijf, getakte processen of PWM-modulatie veroorzaakte stoorfrequenties, die in het radio-frequentiebereik liggen (150 kHz...30 MHz). Tot de RFI producenten behoren onder meer frequentieregelaars, die vanwege de PWM dergelijke storingen veroorzaken. Het gebruik van frequentieregelaars is onderworpen aan de EMC wetgeving, d.w.z. deze dienen zich te houden aan bepaalde grenswaarden voor radiostoring. De basis hiervoor is voorlopig de norm DIN VDE 0875 deel 11 = EN 55011. Volgens deze behoren frequentieregelaars over het algemeen tot de apparatuurklasse A (buiten woongebieden) en de groep 1 (ontwikkeling van hoogfrequente leidinggebonden energie). Een verdere verdeling van apparatuur naar werkfrequentie < of > 10 kHz wordt niet gemaakt.

## **ESD**

**Electrostatic Discharge**. De ontlading van statische elektriciteit (meestal van bedienend personeel op het apparaat). Storingsgevoeligheid volgens DIN VDE 0843, deel 2 = IEC 801-4.

## **Bursts**

Snelle reeks van stoerpulsen. Kenmerken: korte opbouwtijd, grote herhalingsfrequentie, lage energiehoeveelheid. Dergelijke storingen worden bv. door relaiscontacten, die een inductieve belasting schakelen, ontwikkeld.

Storingsgevoeligheid volgens DIN VDE 0843 deel 4 = IEC 801-4.

## **Nettransiënten**

Netoverspanningen. Kenmerken: niet periodiek, d.w.z. afzonderlijke puls/ hoge energieinhoud. Dergelijke storingen worden bv. door schakelprocessen in het sterkstroomnet ontwikkeld (motoren, trafo's, compensatie-installaties). Storingsgevoeligheid volgens DIN VDE 0160 A1.

## **Netharmonischen**

Spanningen of stromen met het n-voudige van de netfrequentie. In 50 Hz netten treden in eerste instantie de 5e, 7e, 11e en 13e stroombovenharmonischen op. Zij ontstaan door een niet-sinusvormige stroomafname, die hoofdzakelijk wordt veroorzaakt door netgelijkrichters (bv. ook het ingangsdeel van frequentieregelaars). Storingsgevoeligheid volgens DIN VDE 0160 (5.3.1.2).

## **Commutatieverstoringen**

Een periodieke verstoring van de netspanning, die veroorzaakt wordt door commutatie (d.w.z. stroomdoorgang van een diode of thyristor van de vermogenshalfgeleiders). Storingsgevoeligheid volgens DIN VDE 0160 (5.3.1.1.).

## 7.8. Lijst van de in tabellen, formules en afbeeldingen gebruikte tekens en afkortingen

$a_B$	= remvertraging [ $m/s^2$ ]
$\cos \varphi$	= arbeidsfactor (watt-vermogen/schijnvermogen)
ID	= relatieve inschakelduur van de motor omgerekend naar de betreffende bewegingstijd van de cyclus in %.
$\eta$	= rendement [uitgaand vermogen/ingaaand vermogen]
f	= frequentie [Hz]
$f_{\text{kantel}}$	= kantelfrequentie [Hz] = knikpunt van de U/f lijn van de omvormer tussen de bereiken constant koppel en constant vermogen
$f_{\text{max}}$	= instelbare maximum uitgangsfrequentie [Hz] van de regelaar
$f_{\text{min}}$	= instelbare minimum uitgangsfrequentie [Hz] van de regelaar
$f_{\text{nom}}$	= ontwerpfrequentie [Hz] van de motor
g	= zwaartekrachtversnelling $9,81 \text{ m/s}^2$
$i_{\text{tot}}$	= totale overbrengingsverhouding
$I/I_{\text{nom}}$	= stroomsterkte in verhouding tot de nominale motorstroomsterkte
$I_a$	= aanloopstroomsterkte [A] van de motor
$I_\mu$	= magnetisatiestroomsterkte [A] van de motor
$I_0$	= leegloopstroomsterkte [A] van de motor
J	= massatraagheidsmoment [ $\text{kgm}^2$ ]
$J_M$	= motormassatraagheidsmoment [ $\text{kgm}^2$ ]
$L_{PA}$	= meetvlak-geluidsdrumniveau [dB(A)]
$L_{WA}$	= meetvlak-geluidsvermogen [dB(A)]
$T/T_{\text{nom}}$	= motorkoppel in verhouding tot het nominale motorkoppel
$T_A$	= aanloopkoppel [Nm] van de motor
$m_{\text{contra}}$	= massa van het contra (vereffenings-)gewicht [kg] bij hijswerken
$T_{\text{kip}}$	= kipkoppel [Nm] van de motor
$T_{ka}$	= asynchroon kipkoppel [Nm] van de reluctantiemotor
$T_{ks}$	= synchroon kipkoppel [Nm] van de reluctantiemotor

$m_L$	= lastmassa [kg]
$T_{nom}$	= ontwerpkoppel (nominaal koppel) [Nm] van de motor
$T_{zadel}$	= zadelkoppel [Nm] van de motor
$n/n_{nom}$	= motortoerental in verhouding tot het nominaal motortoerental
$n_{gen}$	= oversynchrone (generatieve) motortoerental [ $\text{min}^{-1}$ ]
$n_{ing}$	= ingaand toerental [ $\text{min}^{-1}$ ]
$n_{kip}$	= kiptoerental [ $\text{min}^{-1}$ ]
$n_{mot}$	= ondersynchroon (motorisch) toerental [ $\text{min}^{-1}$ ]
$n_{nom}$	= ontwerptoerental [ $\text{min}^{-1}$ ] van de motor
$n_{synchroon}$	= synchroontoerental [ $\text{min}^{-1}$ ] van de motor
$P/P_{nom}$	= motorvermogen in verhouding tot het nominale motorvermogen
$P_B$	= statisch remvermogen [kW]
$\hat{P}_B$	= piekremvermogen [kW]
$P_{BW}$	= vermogen [kW] van de remweerstand
$\hat{P}_{BW}$	= piekremvermogen [kW] van de remweerstand
$P_{dynL}$	= dynamisch remvermogen [kW] ten behoeve van de last
$P_{dynM}$	= dynamisch remvermogen [kW] ten behoeve van de motor
$P_{omvormer}$	= afgegeven vermogen [kW] van de omvormer
$P_{verlies}$	= verliesvermogen [W]
$R_1$	= statorweerstand [ $\Omega$ ]
$R_2'$	= rotorweerstand [ $\Omega$ ] op de stator gereduceerd
$R_{BW}$	= weerstandswaarde [ $\Omega$ ] van de remweerstand
$R_{min}$	= minimum toelaatbare belastingsweerstand [ $\Omega$ ] van de omvormer
L1, L2, L3	= fasen van een draaistroomnet
$R_W$	= wikkelingsweerstand [ $\Omega$ ] van de motor
s	= slip [%] van de motor
$s/s_{nom}$	= slip ten opzichte van de nominale slip
S1	= ononderbroken bedrijf met 100% ID volgens DIN VDE 0530

$S_3$	= onderbroken bedrijf zonder aanloopinvloed volgens DIN VDE 0530
$\Delta\vartheta$	= temperatuurverschil [K]
$t_A$	= aanlooptijd [s] van de motor
$t_B$	= remtijd [s] van de motor
$U/U_{nom}$	= spanning ten opzichte van de nominale spanning
$\Delta U$	= spanningsval [V]
$U_{ingand}$	= ingangsspanning [V]
$U_{uit}$	= uitgangsspanning [V]
$U_{kortsluit}$	= relatieve kortsluitspanning [%]
$\Delta U_\mu$	= wijziging van de magnetisatiespanning [V] van de motor
$U_{nom}$	= ontwerpspanning [V]
$U_{piek}$	= netoverspanning [V]
$\Delta U_R$	= ohmse spanningsval [V]
$\Delta U_X$	= inductieve spanningsval [V]
$U_Z$	= tussenkringspanning van de frequentieregelaar [V]
$v$	= snelheid [m/s]
$X_h$	= reactantie [ $\Omega$ ] van de hoofdinductiviteit
$X_{1\sigma}$	= reactantie [ $\Omega$ ] van de statorinductiviteit
$X'_{2\sigma}$	= reactantie [ $\Omega$ ] van de rotorstrooiinductiviteit