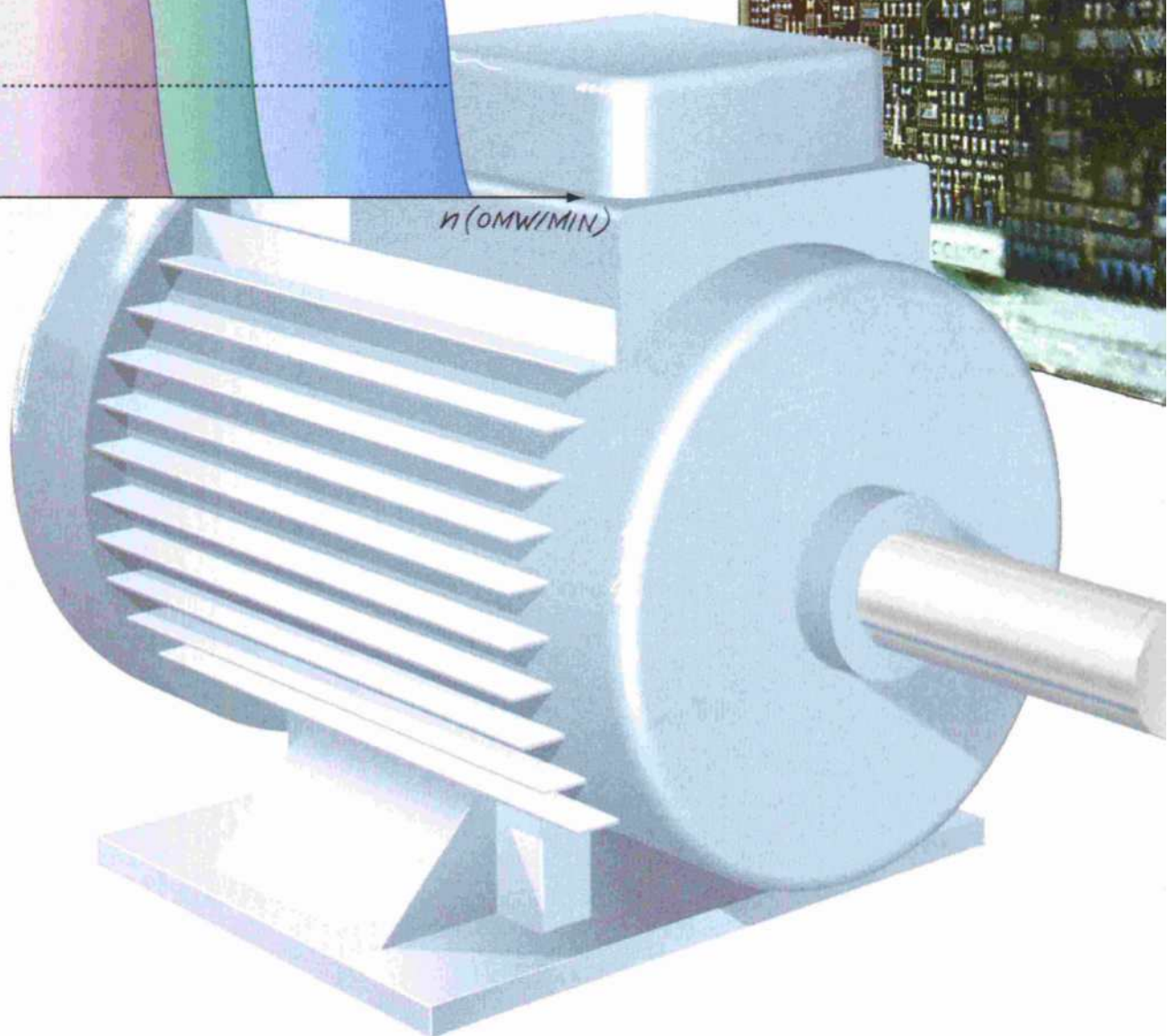
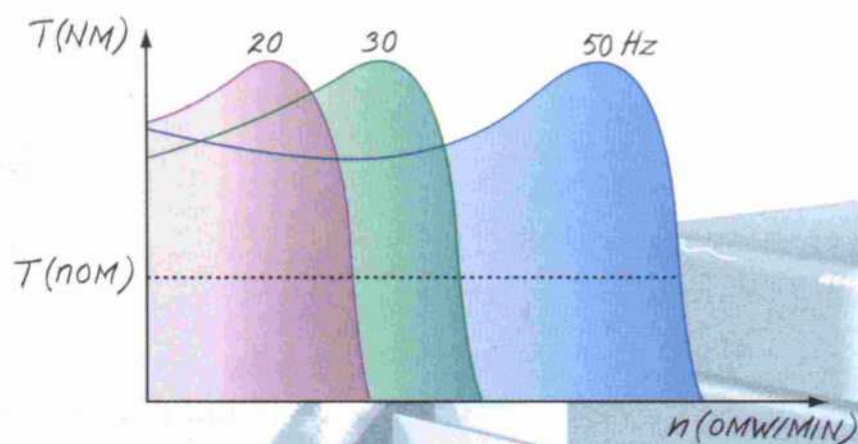


2^E EDITIE

ZO IS HET FREQUENTIE- GEREGELD



Zo is het frequentiegeregeld

e m o t r o n[®]

Zo is het frequentiegeregeld
2^e Editie

Eerste druk	: Januari 1996	
Tweede druk	: Juni 1996	
Derde druk	: Januari 1998	
Vierde druk	: September 1999	
Vijfde druk	: Maart 2001	
Artikelnummer	: 804110.02	
Uitgegeven door	: Emotron B.V, Bladel	
	Polakkers 5	Postbus 132
	5530 AC Bladel	5531 NX Bladel
	Nederland	
	tel. 0497-389222	
	fax 0497-386275	
	Internet: http://www.emotron.nl	
	E-mail: info@emotron.nl	

Copyright 1995 Emotron B.V. All rights reserved.

Niets uit deze uitgave mag worden veeleelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, geluidsband, elektronisch of op welke andere wijze ook en evenmin in een retrieval system worden opgeslagen zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel dit boek met zeer veel zorg is samengesteld, aanvaarden schrijvers noch uitgever enige aansprakelijkheid voor schade ontstaan door eventuele fouten en/of onvolkomenheden uit dit boek.

Voorwoord

Emotron ontwikkelt, produceert en verkoopt frequentieregelaars. Frequentieregelaars kunnen het toerental en koppel van draaistroommotoren regelen.

Het is de bedoeling van de samenstellers geweest om een cursusboek/naslagwerk te schrijven waarin geïnteresseerden in frequentieregelaars diverse aspecten gemakkelijk kunnen opzoeken.

Elk hoofdstuk is zo samengesteld dat het apart gelezen kan worden zonder voorgaande hoofdstukken door te lezen.

Zodoende kan het voorkomen dat een aantal zaken zich herhalen.

Om de werking van de frequentieregelaar te begrijpen is enige kennis van draaistroommotoren noodzakelijk. In hoofdstuk 1 tot en met hoofdstuk 8 wordt deze benodigde kennis kort behandeld.

Vanaf hoofdstuk 9 wordt de frequentieregelaar behandeld.

Hoofdstuk 25 geeft nog enkele rekenvoorbeelden.

De 2e Editie (vanaf de vierde druk) behandelt in het nieuwe hoofdstuk 17 de laatste ontwikkelingen op het gebied van veldgeoriënteerde regelingen.

September 1999

Inhoudsopgave

Hoofdstuk 1	
Elektromotoren	1
- Opbouw asynchrone motor	1
- Principe werking asynchrone motor	2
- Opwekking magnetisch veld	4
- Motoren direct op het net	7
- Afhankelijkheid van poolparen	7
Hoofdstuk 2	
Eigenschappen motoren	9
- Koppel	9
- Vermogen	9
- Toerental	10
Hoofdstuk 3	
Motorplaatje	13
Hoofdstuk 4	
Koppel/toeren-kromme	19
- Belasten van de motor	20
- Overbelasten	21
Hoofdstuk 5	
Aanlopen motoren	23
- Direct inschakelen	23
- Ster-driehoekschakeling	24
- Softstarter	25
- Frequentiegeregelde motor	25

Hoofdstuk 6	
Juiste vermogen bij een werktuig	27
- Het kiezen van de juiste motor	27
Hoofdstuk 7	
Bedrijfsgebieden motoren	33
- Vier kwadrantenbedrijf	35
Hoofdstuk 8	
Regelbaarheid motoren	39
- Regelgebieden	39
- Ex-motoren	40
- Blindstroomcompensatie	40
Hoofdstuk 9	
Frequentieregelaar	41
- Blokschema frequentieregelaar	41
- Principe werking frequentieregelaar	42
- Gelijkrichter	42
- Inverter	43
- Inverterschakelaars	44
- De Switch Mode Power Supply	46
Hoofdstuk 10	
Principe frequentieregelaar	47
- Principe van frequentieregeling	47
- Volt per Hertz-grafiek	49
- Verandering van U/f-verhouding	52
Hoofdstuk 11	
Veldverzwakking	55
- Een motor geschikt voor 50Hz	57
- Een motor geschikt voor 60Hz	58
Hoofdstuk 12	
I*R-compensatie	61
- Toepassing I*R-compensatie	64
Hoofdstuk 13	
Slipcorrectie	65

Hoofdstuk 14	
Remmend bedrijf	69
- Kortstondig remmen	70
- Langdurig remmen	71
- Gelijkstroom remmen	72
Hoofdstuk 15	
PWM modulatie	75
Hoofdstuk 16	
Vectormodulatie	77
- Gedetailleerde uitleg vectormodulatie	78
- Vorming fluxvectoren	79
Hoofdstuk 17	
Veld georiënteerde regeling	83
- Veldgeoriënteerde regeling	83
- Indirecte methoden	84
- Zonder sensor	84
- Directe regeling van flux en koppel	84
- Het motormodel	86
- Fluxregeling	87
- Koppelregeling	88
Hoofdstuk 18	
Regelbaarheid frequentieregelaar	91
- Regelgebied van 0 Hz t/m 50 Hz	91
- Regelgebied van 50 Hz t/m 2x nominale frequentie	91
Hoofdstuk 19	
Motorbelasting en koeling	95
Hoofdstuk 20	
Parallelbedrijf	97
Hoofdstuk 21	
Stroombegrenzing	99
Hoofdstuk 22	
Rendement frequentieregelaar	101

Hoofdstuk 23	
De juiste keuze	103
- Rekenvoorbeeld "vreemde koppels"	104
Hoofdstuk 24	
Keuze pooltal motor	105
- De voor- en nadelen van oversynchroon bedrijf	105
Hoofdstuk 25	
Belastingstaad en rekenvoorbeelden	109
- Toepassing van constant koppel	109
- Toepassing energiebesparing	115

Hoofdstuk 1

Elektromotoren

krachtbron

Een elektromotor is een *krachtbron* waarvan er dagelijks vele miljoenen over de gehele wereld werkzaam zijn. In dit hoofdstuk staan we stil bij de principiële werking, de voornaamste karakteristieken en eigenschappen van deze machine.

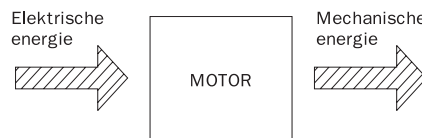
krachtbron

De kortsluitankermotor (een type elektromotor) wordt hoofdzakelijk toegepast in situaties waar een vermogen van nul tot vele honderden kilowatts nodig is.

Een elektromotor lijkt op het eerste gezicht eenvoudig van opbouw. Wat in de motor gebeurt is het volgende:

energieomzetting van de motor

De motor haalt energie uit het elektriciteitsnet en zet dit om in een draaiende (mechanische) beweging door middel van een magnetisch veld en inductie.



afbeelding 1.1 omzetting elektrische energie naar mechanische energie

Deze draaiende beweging kunnen we gebruiken om werktuigen (bijvoorbeeld: ventilatoren, transportbanden) aan te drijven.

Opbouw asynchrone motor

rotor en stator

Zoals iedere (elektrische) machine, bestaat ook een kortsluitankermotor uit een roterend deel, de *rotor* en een stilstaand deel, de *stator*. Tussen de stator en rotor bevindt zich een luchtspleet. In de stator bevinden zich drie afzonderlijke spoelen die 120° ten opzichte van elkaar zijn verdraaid.

magnetisch draaiveld

Principe werking asynchrone motor.

Wordt er op de spoelen een 3-fase sinusvormige spanning aangesloten, dan zal er een *magnetisch draaiveld* in de luchtspleet ontstaan. De snelheid van dit draaiveld wordt bepaald door de frequentie van het net. Met andere woorden het draaiveld loopt synchroon met de frequentie van het net.

$$n_s = \frac{f \star 60}{p}$$

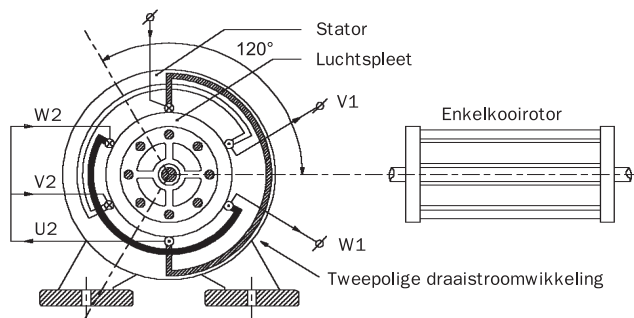
waarbij:

n_s = toerental van het magnetisch draaiveld (omw.min)

f = (net) frequentie (Hz)

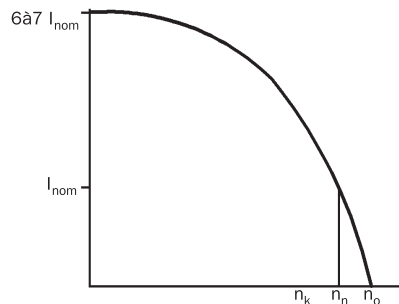
60 = omrekeningsfactor van sec. naar minuten

p = aantal poolparen



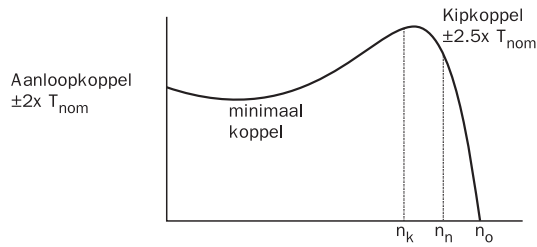
afbeelding 1.2 opbouw kortsluitankermotor

Indien de rotor gaat slippen worden er spanningen opgewekt, hierdoor gaan er stromen in de stator lopen volgens afbeelding 1.3.



afbeelding 1.3

Door het magneteveld in de stator ontstaan koppels volgens afbeelding 1.4.



afbeelding 1.4

Hier komen we in hoofdstuk 4 nog uitgebreid op terug.

Door de vrij hoge stroom die nu door de rotorstaven gaat lopen en het magnetische draaiveld van de stator zal er een magnetische kracht op de rotorstaven worden uitgeoefend. De rotor levert hierdoor een koppel (T) en zal gaan versnellen (accelereren) tot een snelheid om en nabij de snelheid van het statordraaiveld.

Indien er geen verliezen zijn (zoals: luchtweerstand en wrijving met de lagers) zal de rotorsnelheid de snelheid van het statordraaiveld aannemen. Er wordt dan geen inductiespanning meer opgewekt en dus ook geen inductiestroom. Zonder inductiestroom kan geen koppel (T) geleverd worden om de rotor te versnellen.

Doordat de motor nooit geheel verliesvrij is, is er altijd een koppel (T) nodig om verliezen te overwinnen. Hierdoor zal het rotortoerental altijd lager zijn dan het toerental van het magnetisch draaiveld van de stator.

Dit verschil noemen we de slip (s).

$$s = n_s - n_r$$

waarbij:

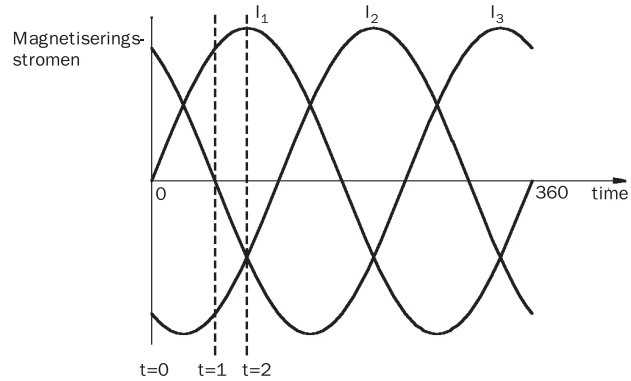
s = absolute slip

n_s = toerental van het magnetisch draaiveld

n_r = rotortoerental

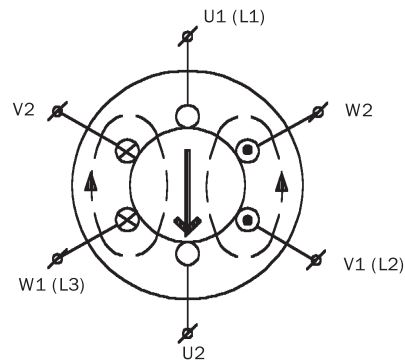
Opwekking magnetisch draaiveld

In onderstaande afbeelding wordt de opwekking van het magnetisch veld in een driefasenmotor grafisch weergegeven:



afbeelding 1.5 opwekking magnetisch veld

Sluiten we de drie fasen in driehoek of in ster aan op een draaistroomnet, dan zijn de magnetiseringsstromen I_1 , I_2 en I_3 120° in fase verschoven. Achtereenvolgens gaan we de tijdstippen $t=0$, $t=1$ en $t=2$ nader bekijken.

Tijdstip 0

afbeelding 1.6 de resulterende flux op tijdstip 0

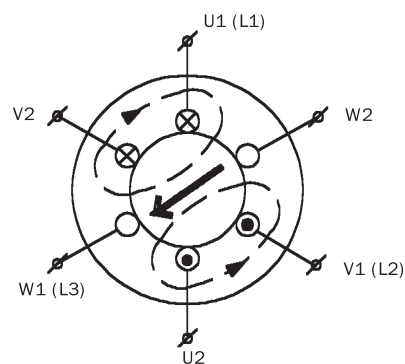
Op tijdstip 0 is de stroom door spoel U1, U2 nul. In deze spoel wordt geen magnetisch veld opgewekt.

In spoel V1, V2 is de stroom negatief. De stroom gaat er bij V2 in. Dit wordt aangegeven met een kruis. De stroom verlaat de spoel bij V1. Dit wordt aangegeven met een punt.

Deze stroom veroorzaakt een magnetisch veld waarvan de grootte evenredig is met I2.

Door spoel W1, W2 is de stroom positief. De stroom gaat er bij W1 in (kruis) en verlaat de spoel bij W2 (punt). Deze stroom veroorzaakt een magnetisch veld waarvan de grootte evenredig is met I3.

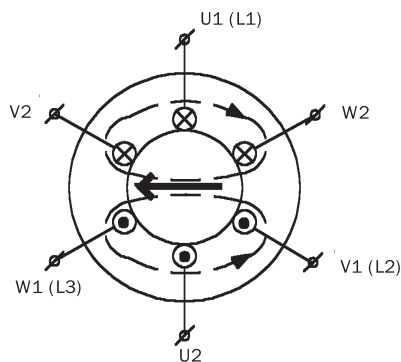
Omdat alleen door de spoelen V1, V2 en W1, W2 stromen vloeien ontstaat er een resulterend magnetisch veld in de richting zoals aangegeven in afbeelding 1.6.

Tijdstip 1

afbeelding 1.7 de resulterende flux op tijdstip 1

Op tijdstip 1 is de stroom door de spoel W1, W2 nul.
De stroom door spoel U1, U2 is positief. De stroom gaat er bij U1 in (kruis) en de stroom verlaat de spoel bij U2 (punt).
De stroom door V1, V2 is negatief. De stroom gaat er bij V2 in (kruis) en de stroom verlaat de spoel bij V1.
Door deze twee stromen ontstaat er een resulterend magnetisch veld zoals aangegeven in afbeelding 1.7.
Hieruit blijkt dat het resulterende veld rechtsom is gedraaid.

Tijdstip 2



afbeelding 1.8 de resulterende flux op tijdstip 2

Op tijdstip 2 is de stroom door spoel U1, U2 maximaal positief.
De stromen door de spoelen V1, V2 en W1, W2 zijn beide gelijk (negatief). Voor spoel U1, U2 geldt dat de stroom er bij U1 ingaat (kruis) en de stroom verlaat bij U2 de spoel.
Voor de andere twee spoelen kunt U dit zelf nagaan.
De drie verschillende stromen geven een resulterend magnetisch veld in de richting zoals aangegeven in afbeelding 1.8.

Bekijken we vervolgens de tijdstippen 0, 1 en 2 achter elkaar, dan merken we op dat de fluxvector van richting verandert en zijn grootte constant blijft.

frequentie en poolparen
bepalen het toerental

Motoren direct op het net

Motoren die direct op een elektriciteitsnet zijn aangesloten, nemen afhankelijk van de *netfrequentie* en het aantal *poolparen*, een bepaald synchroon toerental (n_s) aan.

$$n_s = \frac{f \star 60}{p}$$

waarbij:

n_s = toerental van het magnetisch draaiveld (omw/min)

f = (net) frequentie (Hz)

60 = omrekeningsfactor van sec. naar minuten

p = aantal poolparen

Afhankelijkheid van poolparen

Bij het ontwerpen van een kortsluitankermotor, dient vooraf te worden bepaald voor welk toerental deze motor geschikt moet zijn.

Is een motor voorzien van 4-polen (2 Noord- en 2 Zuidpolen), dan is het een motor met 2 poolparen en een statortoerental van 1500 omw/min. Bij vermeerdering van het aantal poolparen wordt het synchrone toerental verminderd (2 polen is 1 poolpaar).

Rekenvoorbeeld:

gegeven: 6 polen = 3 poolparen
f=50Hz

oplossing:

$$n_s = \frac{50 \star 60}{3} = 1000 \text{ (omw/min)}$$

De andere toerental mogelijkheden zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Aantal polen	2	4	6	8	10	12
n (omw/min)	3000	1500	1000	750	600	500
n_{rotor} (omw/min)	2920	1460	960	720	580	490

keuze motor

Bij *keuze* van een motor staat het toerental vast bij aansluiting op 50 Hz net.

Hoofdstuk 2

Eigenschappen motoren

Koppel (T)

prestaties

De *prestaties* van een motor, het koppel, hangen hoofdzakelijk af van het opgewekte magnetisch draaiveld en de stroom in de rotor.

Het koppel is simpelweg gesteld de kracht waarmee de as wordt rondgedraaid.

We vergelijken dit met het vastdraaien van wielmoeren van een auto met behulp van een kruissleutel.

*koppel=kracht*arm*

Op de moer, de "as", wordt door een hefboommechanisme een kracht uitgeoefend. De kracht die op de "as" wordt uitgeoefend noemt men *koppel (T)*.

Het koppel (*T*) kan worden berekend door de kracht (*F*) op het hefboommechanisme te vermenigvuldigen met de arm.

Het koppel wordt tegenwoordig gemeten in Newtonmeter, afgekort Nm, maar de vroegere eenheid kilogramkrachtmeter komt nog wel eens voor. (1 Nm = ca. 0,1 kgf.m)

Vermogen (P)

kracht

De *kracht* van een benzine motor hangt af van de cilinderinhoud van de motor. Als er gezegd wordt dat een auto een 2-liter motor heeft, dan wordt er bedoeld dat de motor een cilinderinhoud heeft van 2000 cm³.

Hoe meer (benzinelucht) mengsel zich in de cilinders kan verbranden, des te groter is de kracht om zich voort te bewegen.

We spreken bij een elektrische motor niet over een 2-liter motor, maar over het asvermogen (P_{as}) van een elektrische motor, uitgedrukt in kW.

Het asvermogen werd vroeger aangegeven in pk, waarbij 1pk = 736 Watt. Het toegevoerde vermogen (P_{toe}) bij draaistroommotoren

kan volgens formule op blz. 10 worden berekend.

kra

$$P_{\text{toe}} = \sqrt{3} \star U_L \star I_L \star \cos\varphi$$

waarbij:

$\sqrt{3}$ = berekeningsfactor voor 3 fasenet

U_L = lijnspanning

I_L = lijnstroom

$\cos\varphi$ = faseverschuiving tussen spanning en stroom

Toerental (n)

Het toerental is de snelheid waarmee de as ronddraait en wordt uitgedrukt in omwentelingen per minuut (omw/min).

Het toerental wordt door onderstaande formule bepaald:

$$n = n_s - s$$

waarbij:

n = rotortoerental (omw/min)

n_s = toerental van het magnetisch draaiveld (omw/min)

s = absolute slip

Hoeksnelheid (ω)

Een hoek kunnen we uitdrukken in graden: één keer rond = 360° .

We kunnen een hoek ook uitdrukken in radialen: één keer rond = 2π rad.

De hoeksnelheid van een as kunnen we dus uitdrukken in radialen per seconde (rad/s).

Wanneer een as n keer per minuut ronddraait komt dit overeen met $n/60$ per seconde. Per seconde wordt dan een hoek $2\pi n/60$ afgelegd, dus de hoeksnelheid ω is $2\pi n/60$.

Vermogen (P)

De relatie tussen toerental (n), koppel (T) en vermogen (P_{as}) wordt uitgedrukt door de formule:

$$P = \omega \star T$$

waarbij:

P = asvermogen (W)

ω = hoeksnelheid (rad/s)

T = koppel (Nm)

dus:

$$P = \frac{2\pi \star n \star T}{60}$$

Er geldt:

$$\frac{2\pi}{60} = \frac{1}{9.55}$$

$$P = \frac{T \star n}{9.55}$$

waarbij:

P = vermogen (W)

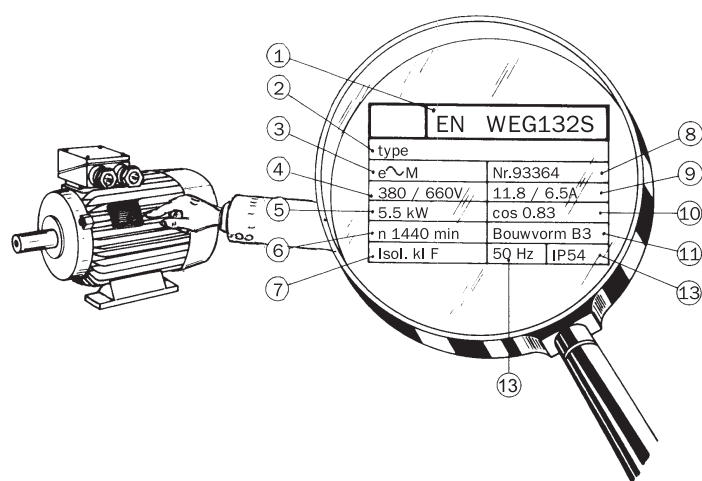
9.55 = constante

T = koppel (Nm)

n = rotortoerental (omw/min)

Hoofdstuk 3

Motorplaatje



afbeelding 3.1 het motorplaatje

Iedere motor is voorzien van een typeplaatje. Op dit plaatje zijn alle belangrijke gegevens van de motor vermeld.

1 de fabrieksnaam (EN)

2 typenummer motor (fabrieks-typenummer)

3 soort motor

De motor is geschikt voor een 3-fase voedingsnet.

4 spoelspanning

Een 3-fase motor kan in ster (Y) of in driehoek (Δ) worden aangesloten. Voor de Δ -schakeling, zie afbeelding 3.2.

Voor de Y-schakeling zie afbeelding 3.3.

Bij de Δ -schakeling staat de volledige lijnspanning over de 3 spoelen. De lijnstroom is dan $\sqrt{3}$ groter dan de spoelstroom.

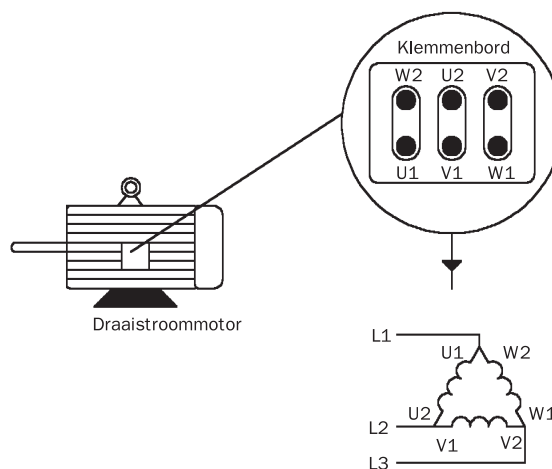
Bij de Y-schakeling wordt de lijnspanning verdeeld over de spoelen. Over elke spoel staat: lijnspanning/ $\sqrt{3}$.

De lijnstroom is dan gelijk aan de spoelstroom.

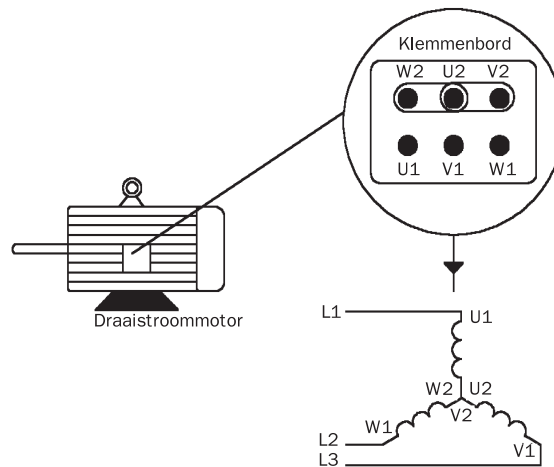
Staat op het motorplaatje vermeld 380/660V (zoals hier) of 380 Δ , dan zijn de motorwikkelingen per fase geschikt voor een spanning van 380V. Een dergelijke motor moet in driehoek worden aangesloten op een net met een lijnspanning van 380V.

Staat op het motorplaatje 220/380V of 380VY dan betekent dit dat de motorwikkelingen per fase geschikt zijn voor 220V. De motor moet in ster worden aangesloten op een net met een lijnspanning van 380V.

Let op: De laagste spanning die op het motorplaatje vermeld staat, is de maximale spanning die over een wikkeling mag staan.



afbeelding 3.2 motor in driehoek



afbeelding 3.3 motor in ster

5 asvermogen

Het vermogen dat vermeld staat is het nominale asvermogen (P_{as}).

Met behulp van de formule $T = (9,55 \cdot P) / n_{nom}$ kan men het nominale koppel (T_n) berekenen.

Nominaal koppel is dat koppel dat bij het nominale toerental continu geleverd kan worden. Wordt de motor zwaarder belast dan zal hij na verloop van tijd te warm worden. Als gevolg daarvan kunnen de lagers te warm worden, of kan de elektrische isolatie van de statorwikkelingen stuk gaan.

6 toerental

Het toerental is het nominale toerental (n_{nom}) bij nominale belasting.

Dus het statortoerental (n_s) minus de absolute slip (s).

De absolute slip bedraagt bij deze motor:

$$1500 - 1440 = 60 \text{ omw/min.}$$

7 isolatieklasse

De isolatieklasse geeft aan in welke warmteklasse het isolatiemateriaal van de motor is ingedeeld.

Voor elk materiaal geldt een maximum grenstemperatuur die niet overschreden mag worden.

Voor bijvoorbeeld materiaal geschikt tot warmteklasse F = 155° mag de maximum temperatuurstijging bij een omgevingstemperatuur van 35° niet meer dan 120° bedragen.

B	=	130°
F	=	155°
H	=	180°
C	=	180°

Het verschil tussen klasse H en C wordt veroorzaakt door het al of niet gebruiken van geïmpregneerd materiaal. Klasse C materialen zijn niet geïmpregneerd.

8 fabricagenummer

serie- of typenummer

9 stroom

De lijnstroom bij respectievelijk driehoek- en sterschakeling

10 $\cos \varphi$

De $\cos \varphi$ geeft de faseverschuiving aan tussen de spanning en de stroom. Dit is van belang als het toegevoerde vermogen en het energie verbruik wordt uitgerekend.

Niet alle stroom die uit het net wordt opgenomen wordt gebruikt voor het vermogen. Een deel van de stroom ($I \cdot \sin \varphi$) is voor het opwekken van het magnetisch draaiveld. Het overige deel van de stroom ($I \cdot \cos \varphi$) is ter beschikking voor het asvermogen.

11 bouwvorm

Met de bouwvorm wordt de manier en de plaats van bevestiging van de motor aangeduid (de vorm van het motorhuis).

12 frequentie

De motor behoort in dit geval aangesloten te worden op een net-frequentie van 50Hz.

13 mate van bescherming

IP (International Protection) dit geeft de beschermingsgraad van de motor aan, tegen het indringen van vloeistoffen en vaste stoffen.

De beschermingsgraad wordt weergegeven met de 2 letters IP en 2 cijfers. Het eerste cijfer geeft de bescherming aan tegen het indringen van vaste stoffen. Het tweede cijfer geeft de bescherming aan tegen het indringen van water. In beide gevallen geldt: Hoe hoger het cijfer, des te beter is de bescherming (zie verder IEC-norm, publicatie 34-5).

Rekenvoorbeeld:

Op een motorplaatje zijn de volgende gegevens af te lezen:

$$\begin{aligned}
 P_{nom} &= 5,5 \text{ kW} \\
 U_{nom} &= 3 \star 380/660\text{V} \\
 I_{nom} &= 11,8\text{A}/6,5\text{A} \\
 n_{nom} &= 1440 \text{ omw/min} \\
 \cos\varphi &= 0,83
 \end{aligned}$$

Hieruit volgt onder andere:

- Het opgenomen elektrisch actief vermogen bedraagt P_{toe} :

$$P_{toe} = \sqrt{3} \star U_l \star I_l \star \cos\varphi$$

invullen:

$$P_{toe} = \sqrt{3} \star 380 \star 11,8 \star 0,83 = 6,446 \text{ kW}$$

- het nominaal koppel T_{nom} :

$$T_{nom} = \frac{9,55 \star P_{nom}}{n_{nom}}$$

invullen:

$$T_{nom} = \frac{9,55 \star 5500}{1440} = 36,4 \text{ Nm}$$

- het rendement η :

$$\eta = \frac{P_{nom}}{P_{toe}}$$

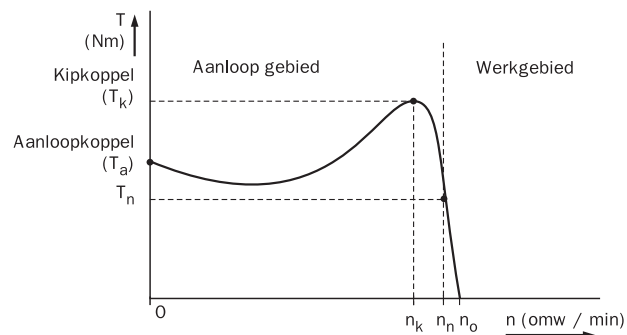
invullen:

$$\eta = \frac{5500}{6440} = 0,853$$

Hoofdstuk 4

Koppel/toeren-kromme

Het toerental (n) van een asynchrone motor is afhankelijk van de belasting. Het rotortoerental ligt 1-10% onder het statortoerental. De grafiek geldt voor een motor die aangesloten is op het net (50Hz). In de grafiek is het koppel (T) uitgezet tegen het toerental (n).



afbeelding 4.1 koppel/toeren-kromme

aanloopkoppel

kipkoppel

aanloopgebied

werkgebied

De koppel/toeren-kromme bevat twee belangrijke punten:

- Het *aanloopkoppel* (T_a) of lostrekkoppel. Dit is het koppel geleverd bij stilstand.
- Het *kipkoppel* (T_k) of maximale koppel

De koppel/toeren-kromme is te splitsen in twee gedeelten nl:

- *aanloopgebied* ($0 < n < n_n$)
 - *werkgebied* ($n_n < n < n_o$)
- waarbij:
- n_k = het toerental bij het kipkoppel
 - n_o = nullast toerental
 - n_n = nominale toerental

Belasten van de motor

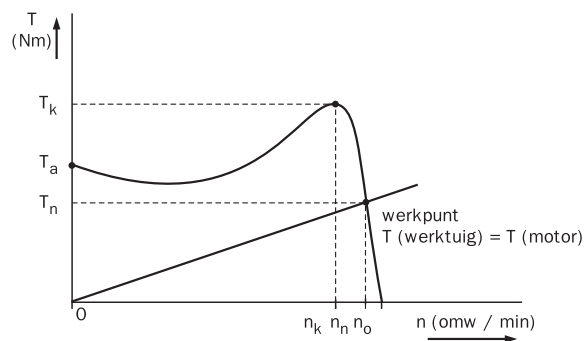
*slip neemt toe door
grotere belasting*

Door het belasten van de as, wordt er een groter koppel (T) gevraagd van de motor. In eerste instantie zal de rotor even worden geremd.

Hierdoor zal het verschil in toerental tussen het statorveld en de rotor (de absolute slip) toenemen. Dit betekent dat de opgewekte inductiespanning in de rotor groter zal worden. Een toename van de inductiespanning zorgt voor een grotere stroom in de rotorstaven, waardoor het koppel (T) toeneemt.

Het vermogen dat nodig is om dit koppel (T) op te wekken wordt via de luchtspleet uit het statordraaiveld onttrokken.

Hierdoor zal de stroom in de statorwindingen toenemen. Het net zal meer vermogen aan de motor gaan leveren.



afbeelding 4.2

In de afbeelding 4.2 is een belastingskromme getekend die lineair met het toerental toeneemt.

Aanloopgebied: ($0 < n < n_n$)

koppeloverschot

Tijdens het aanzetten geldt dat: $T_{motor} > T_{werktuig}$.

Door het *koppeloverschot* (verschil tussen motorkoppel en werktuigkoppel bij nul (omw/min) wordt de motor in versnelling gebracht. De motor zal het aanloopgebied zo snel mogelijk doorlopen.

lostrekkoppel

Het koppel op het moment van aanzetten wordt *lostrekkoppel* genoemd (verschil $T_{aanloop} - T_{werktuig}$ bij $n=0$).

Werkgebied: ($n_n < n < n_o$)

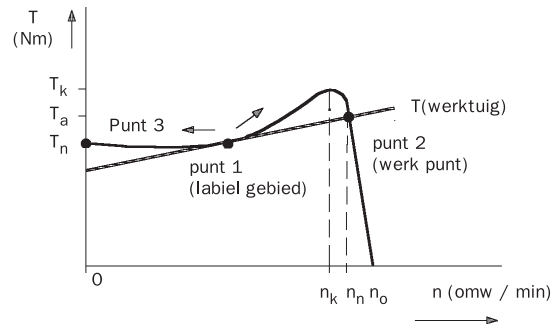
Na het passeren van het aanloopgebied komt de motor in het werkgebied terecht. In het werkgebied (steile flank T/n -kromme) stelt de motor zich op een bepaald toerental in. Dit is het snijpunt waarbij er evenwicht is tussen het motorkoppel en werktuigkoppel ($T_{motor} = T_{werktuig}$). De versnelling is 0, dus het toerental (n) is constant.

Dit *snijpunt* wordt het *werkpunt* van de motor genoemd.

De gegevens die voor het nominale werkpunt van toepassing zijn, zijn te vinden op het motorplaatje.

Overbelasten

In de koppel/toeren-kromme is een werktuigkoppel getekend.



afbeelding 4.3 belastings-grafiek

De motor zal zich instellen in het snijpunt met het werktuigkoppel (punt 1), in het labiele gebied.

Er kunnen twee dingen gebeuren:

- De motor heeft een koppeloverschot en begeeft zich over het kippkoppel en stelt zich in het werkgebied (punt 2).
- De andere mogelijkheid is dat motor een gering koppel te kort heeft en dat de motor bij een kleine tegenwerking ($T_{motor} < T_{werktuig}$) van het werktuig niet instaat is het benodigde koppel te leveren. Dit betekent dat de motor tot stilstand komt (punt 3).
Neemt daarna het werktuigkoppel af, dan zal de motor zich weer instellen in punt 1.

We kunnen dit vergelijken met een fietser die een heuvel beklimt. Een fietser fietst met een snelheid van 20 km/h.

Op een gegeven moment nadert hij een heuvel. Om de snelheid van 20 km/h vast te houden, dient de bestuurder meer inspanning (vermogen) te leveren. Doet hij dit niet dan neemt zijn snelheid af.
(eventueel tot stilstand)



Hoofdstuk 5

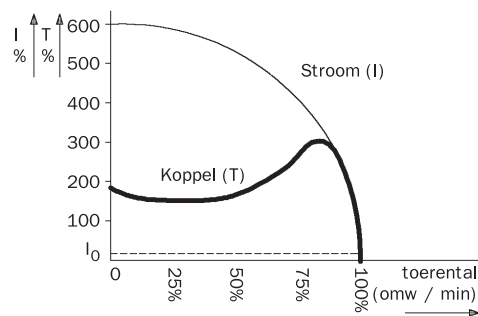
Aanlopen motoren

Standaard draaistroommotoren worden voor verscheidene doeleinden in de industrie gebruikt.

Er zijn verschillende manieren om een draaistroommotor in te schakelen en/of te regelen.

Direct inschakelen

Zoals de naam al zegt wordt de motor direct op het elektriciteitsnet aangesloten. De grootte van de stroom wordt alleen bepaald door de motorimpedantie. Bij aanlopen is de impedantie zeer laag. De aanloopstroom kan oplopen tot $6 \text{ à } 8 \times I_{nom}$.



afbeelding 5.1 motor direct op het net

Bij synchroon toerental is de rotorstroom nul maar de stator neemt nog wel magnetiseringsstroom op (de blindstroom I_0 , nodig om het magnetisch draaiveld op te wekken).

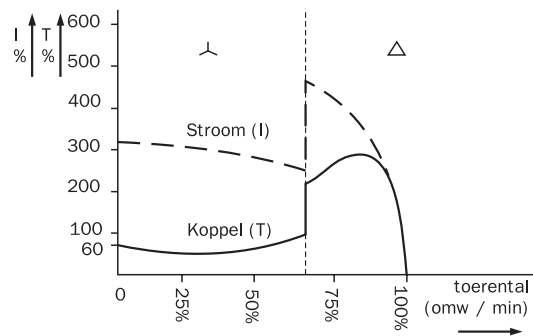
Ster-driehoek schakeling.

Bij inschakelen worden in eerste instantie de windingen in ster geschakeld. In ster staat er een lagere spanning over de wikkelingen. Door deze lagere spanning, nl: 380V in plaats van 660V, vermindert de stroom. Na een bepaalde tijd worden de windingen in driehoek gezet. Nu staat over iedere winding een spanning van 380 Volt. De aanloopstroom kan bij het toepassen van een ster-driehoek schakeling teruggebracht worden tot $3 \text{ à } 4 \times I_{nom}$.

In de sterstand zijn over het gehele toerentalbereik zowel het magnetisch draaiveld als de rotorstroom $\sqrt{3}$ maal kleiner dan in de driehoekstand. Het motorkoppel is daarom 3 maal zo klein als in de driehoekstand.

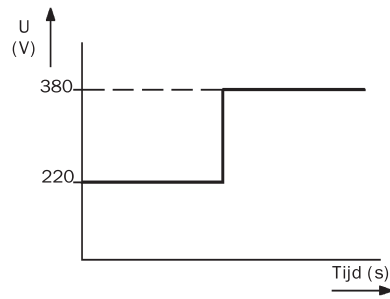
Ster/driehoekschakeling kan bij een 380 V net toegepast worden met 380/660V motoren.

Bij te vroeg overschakelen van ster naar driehoek kan er een kortstondige overschakelpiek ontstaan, die toch nog vele malen groter is dan I_{nom} . (zie afbeelding 5.2)



afbeelding 5.2 stroom- en koppelverloop bij ster/driehoekschakeling

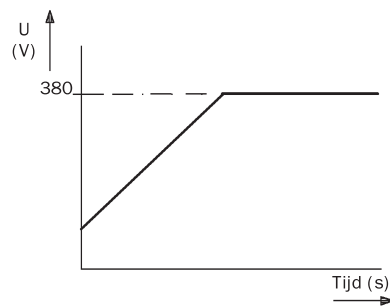
Het spanningsverloop bij ster/driehoekschakeling wordt weergegeven in afbeelding 5.3. Gedurende een aantal seconden worden de spoelen op een onderspanning aangesloten. Na enige tijd wordt er overgeschakeld naar driehoek en komt de volle netspanning (380V) op de wikkelingen te staan.



afbeelding 5.3 spanningsverloop bij ster/driehoekschakeling

Softstarter

Hierbij wordt de spanningssprong zoals bij ster/driehoekschakeling vloeiend doorlopen doordat de spanning gelijkmatig in de tijd elektronisch wordt opgeregeld. Met een softstarter kan de inschakelstroom tot $2,5 \text{ à } 3 \star I_{nom}$ begrensd worden, deze is echter afhankelijk van de toepassing.



afbeelding 5.4 spanningsverloop bij softstarters

Frequentieregelde motor

Later blijkt dat de inschakelstroom van een motor geregeld door een frequentieregelaar niet verder zal oplopen dan $1,5 \star I_{nom}$.

Deze aanloopstroom begrenzing is slechts één van de vele eigenschappen van de frequentieregelaar. Hier komen we uitgebreid op terug.

Hoofdstuk 6

Juiste keuze motorvermogen bij een werktuig

Rekenvoorbeeld

We gaan ervan uit dat de motor het werktuig direct, zonder overbrengingen en dergelijke, aandrijft.

Het gevraagde koppel van het werktuig is constant namelijk 48 Nm over een bereik van nul tot nominaal toerental.

In de motorcatalogus staat veel informatie over motoren met diverse vermogens bij verschillende toerentallen.

synchroon n t/min	grootte	P _{nom} kW	n _{nom} t/min	rende- ment	cos phi	I _{nom} bij 380V A	I _a — I _n	T _a — T _n	T _z — T _n	T _k — T _n	Massa traagheid moment kgm ²
3000	ZK 132 SK2	5.5	2860	85	0.91	10.8	6	2.4	2.1	2.7	0.020
	ZK 160 MK2	11	2890	87	0.90	21.4	6.2	2.6	2.2	2.8	0.040
	ZK 160 M2	15	2910	88	0.91	28.4	7.2	2.6	2.1	3.2	0.050
1500	ZK 132 SK2	4	1420	83	0.83	8.8	6.2	2.4	2	2.8	0.0135
	ZK 160 M4	11	1455	89	0.89	22.4	6	2.5	2.2	2.5	0.073

motorcatalogus

Het kiezen van de juiste motor.

We kiezen uit de motorcatalogus een motor van 5,5 kW.

Oplossing:

-Berekening van het nominale koppel (T_n):

$$T_{nom} = \frac{9.55 \star P_{nom}}{n_{nom}}$$

invullen:

$$T_{nom} = \frac{9.5 \star 5500}{2860} = 18 \text{ Nm}$$

Verder geeft de motorcatalogus informatie met betrekking tot het aanlooppkoppel (T_a) en kipkoppel (T_k). Dit wordt als een verhoudingsgetal weergegeven.

- Berekening van het *aanlooppkoppel* (T_a):

$$\text{verhoudingsgetal} = \frac{T_a}{T_{nom}} = 2.4$$

invullen:

$$\begin{aligned} T_a &= T_{nom} \star 2.4 = \\ T_a &= 18 \star 2.4 = 43 \text{ Nm} \end{aligned}$$

- Berekening van het *kipkoppel* (T_k):

$$\text{verhoudingsgetal} = \frac{T_k}{T_{nom}} = 2.7$$

invullen:

$$\begin{aligned} T_k &= T_{nom} \star 2.7 = \\ T_k &= 18 \star 2.7 = 48 \text{ Nm} \end{aligned}$$

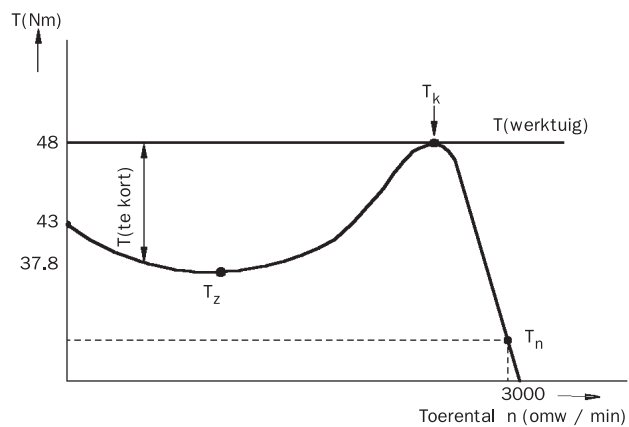
- Berekening van het *zadelkoppel* (T_z):

$$\text{verhoudingsgetal} = \frac{T_z}{T_{nom}} = 2.1$$

invullen:

$$\begin{aligned} T_z &= T_{nom} \star 2.1 = \\ T_z &= 18 \star 2.1 = 37.8 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Met behulp van deze vier gegevens: T_a , T_n , T_k en T_z kan globaal de koppel/toeren-kromme worden opgetekend.



afbeelding 6.1 koppel/toeren-kromme 5,5 kW-motor

Stel dat we een werktuig hebben met een constant koppel (T) van bijvoorbeeld 48 Nm en een motor met een vermogen van 5,5 kW, dan is de motor niet in staat het werktuig in beweging te zetten. De 5,5 kW-motor heeft niet genoeg (aanloop)koppel om het werktuig in beweging te zetten. Het werktuig vraagt een koppel van 48 Nm en de motor kan maar een aanloopkoppel leveren van 43 Nm.

We kiezen een motor van 15 kW. (zie motorcatalogus)

- Berekening van het *nominale koppel* (T_n):

$$T_{nom} = \frac{9.55 \star P_{nom}}{n_{nom}}$$

invullen:

$$T_{nom} = \frac{9.55 \star 15000}{2910} = 49 \text{ Nm}$$

- Berekening van het *aanlooppkoppel* (T_a):

$$\text{verhoudingsgetal} = \frac{T_a}{T_{nom}} = 2.6$$

invullen:

$$\begin{aligned} T_a &= T_{nom} \star 2.6 = \\ T_a &= 49 \star 2.6 = 127 \text{ Nm} \end{aligned}$$

- Berekening van *kipkoppel* (T_k):

$$\text{verhoudingsgetal} = \frac{T_k}{T_{nom}} = 3.2$$

invullen:

$$\begin{aligned} T_k &= T_{nom} \star 3.2 = \\ T_k &= 49 \star 3.2 = 156 \text{ Nm} \end{aligned}$$

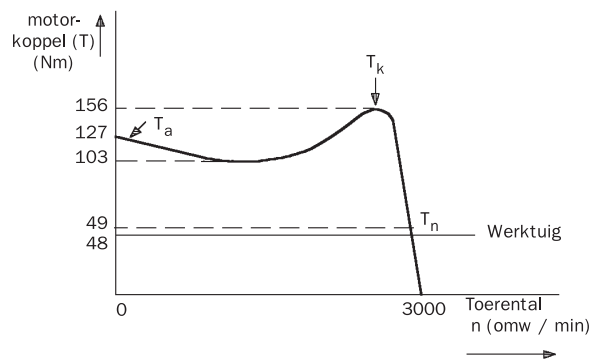
- Berekening van *zadelkoppel* (T_z):

$$\text{verhoudingsgetal} = \frac{T_z}{T_{nom}} = 2.1$$

invullen:

$$\begin{aligned} T_z &= T_{nom} \star 2.1 = \\ T_z &= 49 \star 2.1 = 103 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Met deze gegevens kan de koppel/toeren-kromme voor deze motor (P=15 kW) worden opgesteld.



afbeelding 6.2 koppel/toeren-kromme 15 kW-motor

Hiermee wordt duidelijk gemaakt dat met behulp van het motorplaatje en motorcatalogus een geschikte motor voor een werktuig bepaald kan worden.

dus:

bij $n = 0$ geldt:

$$\begin{aligned}
 \text{koppeloerschot} &= T_{\text{motor}} - T_{\text{werktuig}} \\
 &= 127 \text{ Nm} - 48 \text{ Nm} \\
 &= 79 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

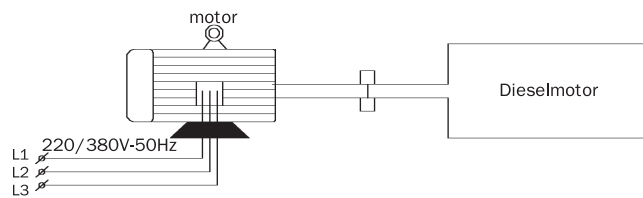
Hoofdstuk 7

Bedrijfsgebieden motoren

De vraag die we ons stellen is: "kan een kortsluitankermotor een remmend koppel leveren"?

Een gedachtenexperiment.

Een 4-polige kortsluitankermotor ($n_s = 1500$ omw/min) is aangesloten op een driefase net. De motor is aan de aszijde mechanisch verbonden met een dieselmotor. De dieselmotor bezit een "gaspedaal", waarmee het vermogen regelbaar is.



afbeelding 7.1

De volgende drie toestanden kunnen voorkomen:

1. de kortsluitankermotor drijft de dieselmotor aan.
2. de kortsluitankermotor en dieselmotor houden elkaar in "evenwicht".
3. de dieselmotor drijft de kortsluitankermotor aan.

De drie toestanden worden achtereenvolgens nader bekeken.

1. *de kortsluitankermotor drijft de dieselmotor aan.*

Wanneer we geen "gas" geven, drijft de kortsluitankermotor de dieselmotor aan. Het toerental zal iets lager zijn dan 1500 omw/min.

2. *de kortsluitankermotor en dieselmotor houden elkaar in "evenwicht".*

Door meer "gas" te geven voeren we het toerental van de dieselmotor op. De kortsluitankermotor hoeft steeds minder koppel (T) te leveren, waardoor de motorstroom afneemt.

Op een gegeven moment draaien beide motoren even snel. Het koppel (T) dat de kortsluitankermotor nu levert is nul.

blindstroom

De motor neemt alleen *blindstroom* ($I \cdot \sin \phi$) op om het magnetische veld intact te houden.

3. *de dieselmotor drijft de kortsluitankermotor aan.*

oversynchroon bedrijf

Trappen we het "gaspedaal" in dan zal de rotor van de motor sneller draaien dan 1500 omw/min. Wanneer de rotor van de motor sneller draait dan de draaisnelheid van het magnetische veld in de stator, spreken we van *oversynchroon bedrijf*. Het motorkoppel keert van teken om, de motorstroom is van "richting" veranderd.

Bovendien gaat de motorstroom weer toenemen, de $\cos \phi$ keert van teken om.

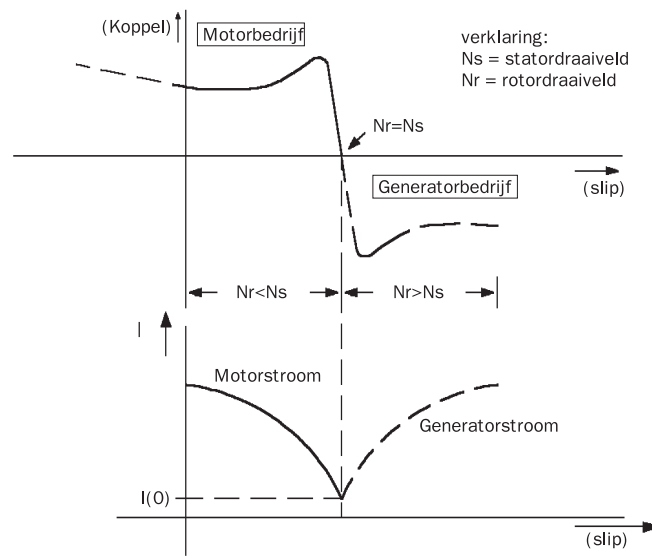
remmend koppel

Het motorkoppel is tegengesteld gericht aan de draairichting van het toerental, dat wil zeggen dat de motor een *remmend koppel* levert.

remenergie

De kortsluitankermotor neemt geen stroom uit het net op, maar levert energie terug aan het net. Bij oversynchroon bedrijf werkt de kortsluitankermotor als generator. De *remenergie* wordt omgezet in elektrische energie en wordt teruggegeven aan het net.

De drie situaties worden nog eens weergegeven in afbeelding 7.2

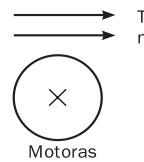


afbeelding 7.2 de stroom weergegeven bij motor-, neutraal- en generatorbedrijf

Vier kwadrantenbedrijf

Wat wordt er verstaan onder vier kwadranten bedrijf?

Er is reeds enkele malen een koppel/toeren-kromme van een kortsluitankermotor getekend. Daarbij hebben we verondersteld, dat de motoras slechts een kant op draait. Vanaf de aszijde gezien wordt een draairichting rechtsom (met de wijzer van de klok mee) positief genoemd.



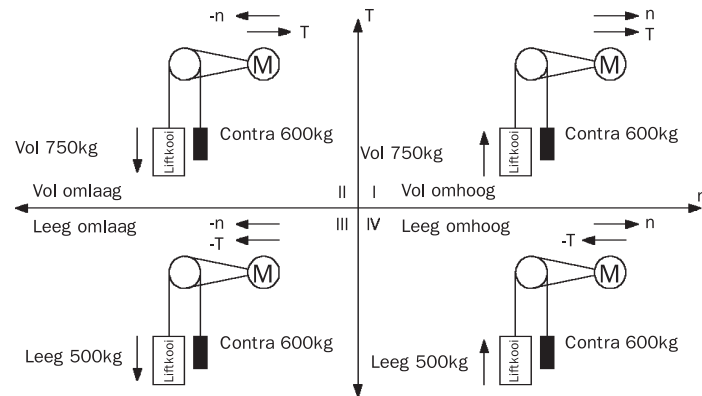
afbeelding 7.3 motoraszijde

Het kwadranten bedrijf wordt nader toegelicht met behulp van een lift.

Een lift beweegt zich verticaal. Dit geschiedt met behulp van een motor en een contra-gewicht.

Het contra-gewicht heeft een gewicht van 600 kg.

De lift heeft leeg een gewicht van 500 kg en vol van 750 kg.



afbeelding 7.4 vierkwadrantenbedrijf

Er ontstaan situaties waarbij de ene keer de liftkooi zwaarder is dan het contragewicht en de andere keer het contragewicht zwaarder dan de liftkooi.

Dit heeft gevolgen voor de aandrijfrichting van de motor om zodoende een juiste werking van de lift te waarborgen.

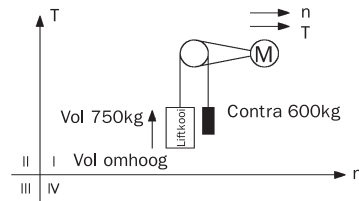
Kwadrant I (+n,+T)

{motorbedrijf rechtsom}

Een lift bevindt zich op de begane grond. Er stappen mensen in en de volle lift gaat nu naar de achtste etage.

motorbedrijf rechtsom

De motor moet arbeid verrichten en bevindt zich in het eerste kwadrant. Er moet een massa van $750-600=150$ kg overwonnen worden.



afbeelding 7.5 kwadrant I

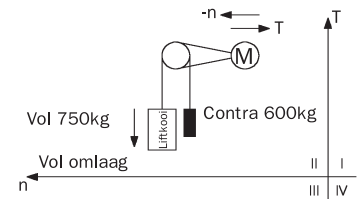
Kwadrant II (-n,+T)

{generatorbedrijf linksom}

Op de achtste etage stappen net zoveel mensen in als uit. De volle lift gaat vervolgens naar de vijfde etage.

generatorbedrijf linksom

Het tegenwerkend koppel dat geleverd moet worden, zorgt ervoor dat de lift zich niet versneld naar de vijfde etage begeeft. De motor werkt remmend in het tweede kwadrant.



afbeelding 7.6 kwadrant II

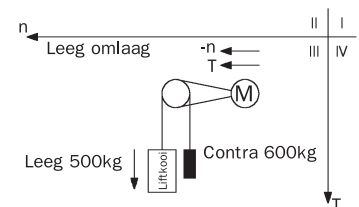
Kwadrant III (-n,-T)

{motorbedrijf linksom}

Op de vijfde etage stappen alle mensen uit zodat de lift leeg is. De massa van het contra gewicht is groter dan de massa van de liftkooi.

motorbedrijf linksom

Op de begane grond is de lift opgeroepen. Dat betekent dat de motor arbeid moet verrichten om omlaag te gaan.



afbeelding 7.7 kwadrant III

Kwadrant IV (+n, -T)

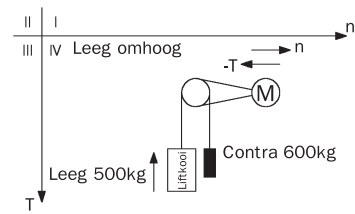
{generatorbedrijf rechtsom}

Aangekomen op de begane grond stapt één persoon in van 80kg. De lift gaat vervolgens naar de zesde etage.

generatorbedrijf rechtsom

Met één persoon in de lift is de massa van het contragewicht (600kg) groter dan het totale gewicht van de lift (500+80=580 kg).

De liftkooi wil versneld naar boven. De motor moet remmend werken in kwadrant vier.



afbeelding 7.8 kwadrant IV

Concluderend kan opgemerkt worden dat er zich weer drie verschillende toestanden (net zoals bij de dieselgenerator) kunnen voordoen namelijk:

1. *Motorbedrijf:*
de kortsluitankermotor drijft de lift aan.
2. *Generatorbedrijf:*
de lift drijft de kortsluitankermotor aan.
3. *Neutraal bedrijf:*
de kortsluitankermotor en lift houden elkaar in "evenwicht".

*vier kwadrantenbedrijf
indien motor zowel
motorisch als generato-
risch kan werken in
beide draairichtingen*

Er is sprake van vier kwadrantenbedrijf wanneer de motor in beide draairichtingen (links- en rechtsom), zich als motor en generator kan gedragen.

Met behulp van het vier kwadranten bedrijf kan het liftproces beheerst en gecontroleerd verlopen.

Hoofdstuk 8

Regelbaarheid motoren

We willen de motor, met name het toerental en koppel geschikt maken voor de toepassing waarvoor hij gebruikt wordt. De motor moet flexibel zijn. Met *flexibel* wordt bedoeld een regelbereik van nul omw/min tot het nominale toerental of hoger.

Vooraf voor industriële doeleinden moet de motor afgestemd worden op het productieproces. De motor moet continu regelbaar zijn.

Regelgebieden

Onderstaand overzicht geeft de regelgebieden van:

- servomotoren
- gelijkstroombmotoren
- frequentieregelde draaistroommotoren

Servo-motoren: 1:10000.

Dat wil zeggen dat de verhouding tussen het hoogste- en laagste toerental 10.000 is. De servo-motoren zijn verkrijgbaar tot een vermogen van maximaal 10 kW.

Gelijkstroom (DC) motoren met tachoregeling: 1:1000

Dat wil zeggen een regelgebied tussen bijvoorbeeld:
3 en 3000 omw/min.

Draaistroom (AC) motoren met frequentieregelaar zonder tachoregeling:

Bij motorvermogens van ca. 1kW tot 1:10, bij motorvermogens van 100kW en groter 1:50

Een draaistroommotor die wordt bestuurd door een moderne flux georiënteerde frequentieregelaar kan tegenwoordig door toepassing van snelle micro-processortechniek gelijkstroomachtige prestaties leveren. Dit levert voor de gebruiker een extra voordeel op, omdat de gelijkstroommotor relatief veel onderhoud vergt (de koolborstels) en de draaistroommotor nauwelijks onderhoud vraagt en robuuster is. Regelbereiken van 1:1000 en hoger zijn hierdoor mogelijk.

Ex-motoren

Explosievrije motoren (Ex-motoren) dienen door een erkende keuringsinstantie opnieuw gecertificeerd te worden, indien ze worden aangesloten op frequentieregelaars.

Het oorspronkelijke certificaat vervalt in dat geval.

Blindstroomcompensatie

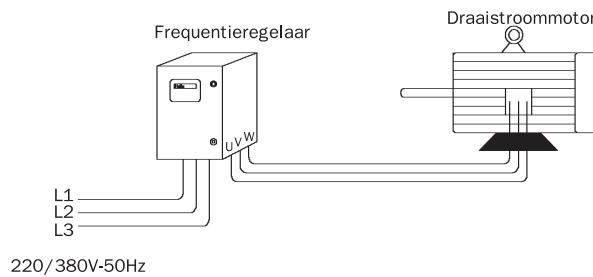
Blindstroomcompensatie door middel van zogenaamde $\cos\phi$ condensatoren zijn niet (meer) nodig zodra de motor door een frequentieregelaar wordt bestuurd.

Het is zelfs beter deze condensatoren helemaal weg te laten. Door de hogere harmonische netstromen die door de frequentieregelaar worden opgewekt, kunnen de condensatoren overbelast raken.

Hoofdstuk 9

De frequentieregelaar

De frequentieregelaar wordt geplaatst tussen het net en de motor. De regelaar is in staat de motor met een bepaald koppel (T) of toerental (n) te laten draaien.

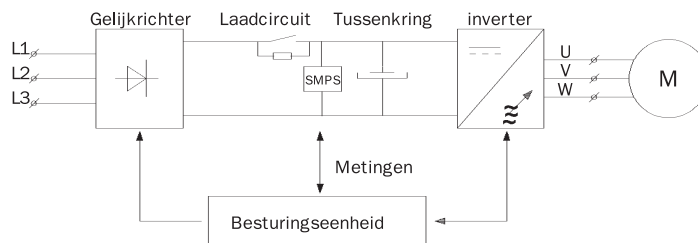


afbeelding 9.1

Blokschema frequentieregelaar

*blokschema
frequentieregelaar*

Van de frequentieregelaar kan het volgende blokschema worden weergegeven.



afbeelding 9.2 blokschema frequentieregelaar

wisselspanning
↓
gelijkspanning
↓
regelbare
wisselspanning

Principe werking frequentieregelaar

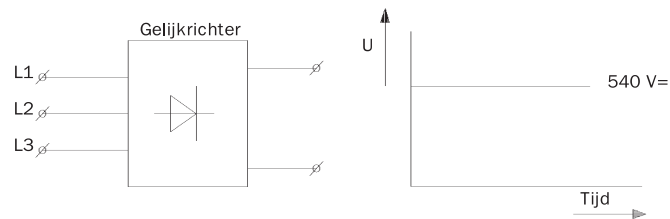
Van een wisselspanning wordt een gelijkspanning gemaakt. Deze gelijkspanning wordt pulserend zowel positief als negatief uitgestuurd; hieruit ontstaat een benaderde sinusvormige motorstroom.

De frequentie van deze "sinus" is te regelen door de afwisselende positieve en negatieve gelijkspanningen per tijdseenheid, te variëren. Met de breedte van de pulserende gelijkspanning kan de hoogte van de uitgangsspanning worden geregeld.

De 3-fase netspanning wordt door 6 ingangsdiodes (de gelijkrichter) gelijkgericht. Over de tussenkringcondensator staat een gelijkspanning gelijk aan de topwaarde van de lijnspanning ($380V \cdot \sqrt{2} = 540V$).

De laadstroom van de tussenkringcondensator wordt tijdens inschakelen begrensd door een opstartcircuit, zodat het voedende net en de smeltveiligheden niet met een piekstroom worden belast.

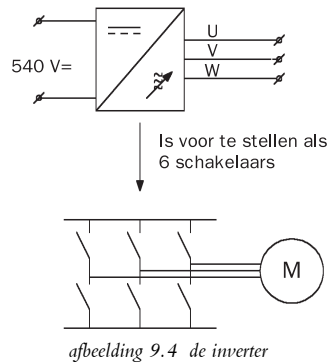
Gelijkrichter



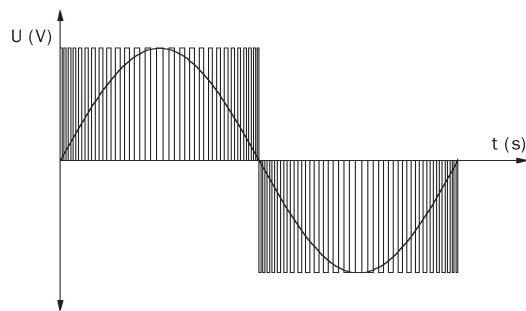
afbeelding 9.3 gelijkrichter

De inverter

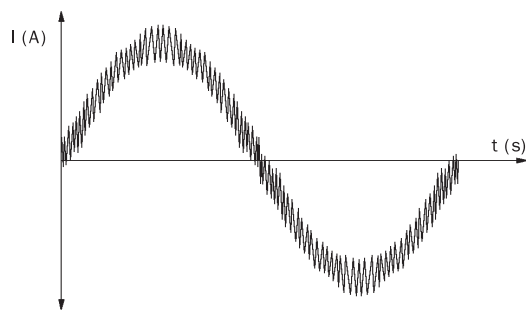
De *inverter* zet de gelijkspanning om in een wisselspanning. De inverter is te zien als zes "schakelaars". Elke schakelaar onderbreekt de gelijkspanning gedurende korte of langere tijd, zodat een benaderbare sinusvormige spanning ontstaat.



Afbeelding 9.5 geeft het spanningsverloop weer bij een inverter gestuurde gelijkspanning. Deze spanning wekt in de motor een stroom op zoals in afbeelding 9.6.



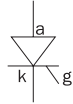
afbeelding 9.5 spanningsverloop



afbeelding 9.6 stroomverloop

Inverterschakelaars

Voor de inverterschakelaar worden/werden de volgende componenten gebruikt.

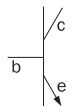


- de thyristor

Thyristoren zijn beschikbaar tot zeer hoge stromen en spanningen. Ze zijn weinig gevoelig en in hoge mate overbelastbaar. De doorlaatverliezen zijn laag, maar het totaal benodigde aanstuurvermogen is groot.

De thyristor wordt tegenwoordig niet meer gebruikt om de volgende reden:

- de thyristor is relatief te traag.
- de thyristor heeft een omvangrijk commutatiecircuit nodig (hij dooft niet automatisch) waardoor de frequentieregelaar minder compact kan worden gebouwd.



voor-, nadelen
Transistor

- de Transistor (Bipolair)

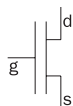
De vermogenstransistor is beschikbaar tot relatief hoge stromen en spanningen. De transistor wordt niet meer toegepast.

Voordelen transistoren:

- hoge schakelsnelheid.
- lage schakelverliezen.
- lage doorlaatverliezen.

Nadelen transistoren:

- groot aanstuurvermogen noodzakelijk.
- alleen betrouwbaar onder zeer goed gedefinieerde spanningen/stromen/aansturing.



voor-, nadelen
MOSFET

- MOSFET (Metal Oxide Silicium Field Effect Transistor)

De MOSFET is alleen beschikbaar voor kleinere stromen en niet te hoge spanningen.

Voordelen MOSFET:

- hoge schakelsnelheid.
- lage schakelverliezen.
- laag aanstuurvermogen nodig en er is dus een compacte bouw van de frequentieregelaar mogelijk.
- de MOSFET is makkelijk aan te sturen.

Nadelen MOSFET:

- hoge doorlaatverliezen.
- gevoelig voor statische elektriciteit.
- niet geschikt voor vermogens groter dan 2 kW.

Het type inverter dat nu in de frequentieregelaars van Emotron wordt gebruikt is de IGBT.

- IGBT (Insulated Gate Bipolair Transistor)

De IGBT is een combinatie van een *MOSFET* en een *transistor*.

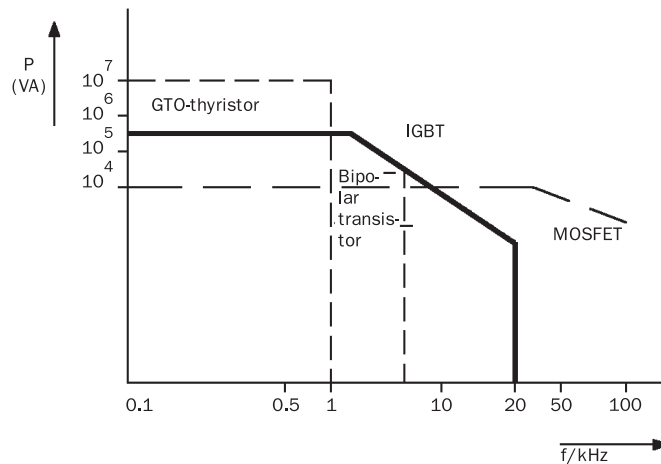
De IGBT gedraagt zich als een nagenoeg ideaal schakelement.

- nauwelijks aanstuurvermogen nodig, waardoor een compacte bouwwijze van de frequentieregelaar mogelijk is.
- hoge schakelfrequentie mogelijk.
- lage schakelverliezen.
- lage doorlaatverliezen.
- hoge overbelastbaarheid dus robuust.
- uitvoering als geïsoleerde module.

*IGBT is combinatie
MOSFET + Transistor*



*voordeel IGBT:
energiebesparend en
eenvoudig inzetbaar*



afbeelding 9.7 overzicht vermogenselektronica componenten

Door het opvoeren van de schakelfrequentie kan een idealere sinusvormige stroom in de motor opgewekt worden.

Hierdoor is de extra warmteontwikkeling in de motor ten gevolge van frequentieregeling zeer beperkt en bij kleinere motorvermogens nagenoeg verwaarloosbaar.

Door de schakelfrequentie op te voeren kan het extra modulatiegeluid van de motor worden beperkt.

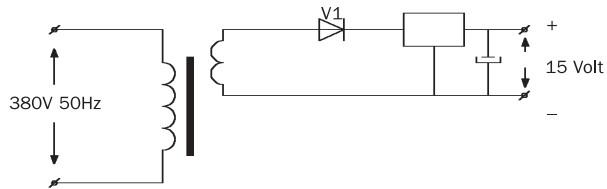
De SMPS

Een onderdeel van het blokschema (afbeelding 9.2) is de SMPS (Switch Mode Power Supply). De SMPS wordt in de meeste frequentieregelaars gebruikt.

In het kort kan worden gezegd dat de SMPS zorgt voor de constante voedingsspanning, voor de besturingselektronika van de frequentieregelaar. De SMPS betreft het vermogen uit de tussenkringcondensatoren!

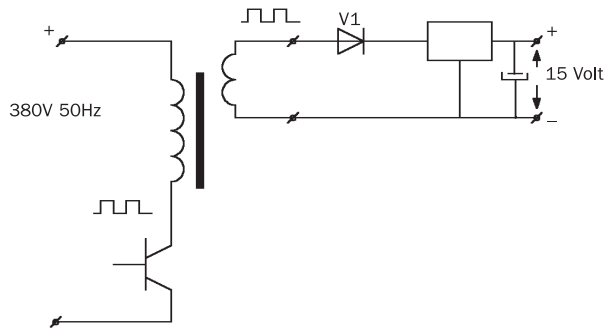
Nadeel van een transformator op het net aangesloten:

Groter, zwaarder en een slecht rendement van 40% à 50%.



afbeelding 9.8 transformator

Principe werking van de SMPS:



afbeelding 9.9 SMPS

Voordelen van een SMPS ten opzichte van een transformator:

hoog rendement $\pm 90\%$

door de hoge schakelfrequentie lichte transformator met ferrietkern mogelijk (dus compacte bouwvorm).

Door de regelelektronica is de SMPS gemakkelijk geschikt te maken voor grotere variaties in voedingsspanning en belasting.

Hoofdstuk 10

Principe frequentieregelaar

*functie frequentie-
regelaar*

Een *frequentieregelaar* is in staat een spanning en frequentie, afkomstig van het openbare elektriciteitsnet (220/380-50Hz), om te zetten in een regelbare spanning (U) en frequentie (f).

Principe van frequentieregeling

De frequentieregelaar zorgt ervoor dat bij verschillende toerentallen van de motor aan 3 voorwaarden wordt voldaan:

*drie voorwaarden bij
toerentalregeling*

1. de snelheid van het magnetisch veld in de motor laten variëren
2. het magnetisch veld in de motor in grootte constant houden.
3. het draaiveld moet gelijkmatig (niet sprongsgewijs) ronddraaien.

We zullen alle drie de voorwaarden toelichten.

1. *de snelheid van het magnetisch veld laten variëren.*

Om hieraan te voldoen moet de frequentie van de uitgaande spanning van de frequentieregelaar worden gevarieerd.

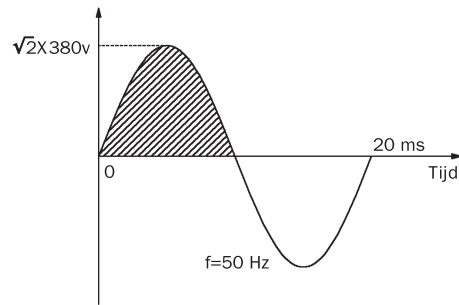
2. *het magnetisch veld in grootte constant houden.*

De energiemaatschappij levert een netspanning van 220/380V-50Hz. Een motor is ontworpen voor een bepaalde netspanning en netfrequentie.

Voor motoren die direct op het net worden aangesloten geldt het volgende:

- een constante grootte van het magnetisch veld
- een constante snelheid van het magnetische veld (een (net)frequentie van 50 Hz)

De oppervlakte van de sinusvorm is een maat voor de grootte (sterkte) van het magnetische veld.

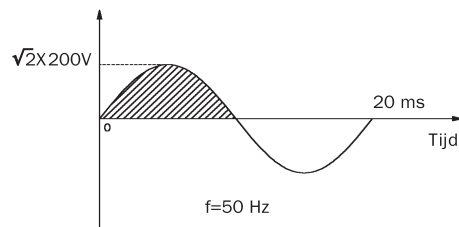


afbeelding 10.1 oppervlakte maat voor het magnetisch veld

magnetisch veld
veranderen

De (sterkte) grootte van dit *magnetische veld* kan *veranderen* door:

- alleen de spanning (U) te veranderen
- alleen de frequentie (f) te veranderen.



afbeelding 10.2 het magnetisch veld bij $U=200V$ en $f=50Hz$

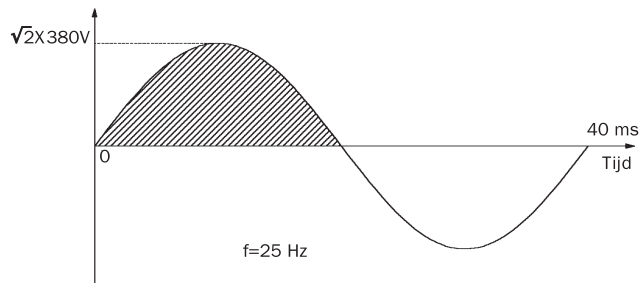
spanning veranderen

De spanning (U) veranderen:

Door de spanning te variëren van 380 Volt naar 200 Volt (afbeelding 10.2), wordt het oppervlak onder de sinus kleiner. Dit heeft tot gevolg dat de sterkte van het magnetisch veld afneemt.

Resultaat: de motor kan het gewenste koppel niet meer leveren.

mag
h
vera
n



afbeelding 10.3 het magnetisch veld bij $U=380V$ en $f=25Hz$

<i>frequentie veranderen</i>	<i>De frequentie (f) veranderen:</i> Door de frequentie te variëren van 50 Hz naar 25 Hz, verandert de snelheid. Dat betekent dat er in de motor een groter veld kan worden opgewekt. Dit magnetisch veld is te sterk zodat de motor in magnetische verzadiging raakt. Resultaat: de as gaat onstabiel ronddraaien en de motor stijgt in temperatuur.
<i>spanning/frequentie verhouding</i>	<i>Conclusie:</i> De sterkte van het magnetisch draaiveld wordt bepaald door de spanning/frequentie-verhouding (U/f-waarde) geleverd door het net.
<i>U/f-waarde</i>	Bij netaansluiting is de U/f-waarde:

$$\frac{U}{f} = \frac{380 (V)}{50 (Hz)} = 7,6$$

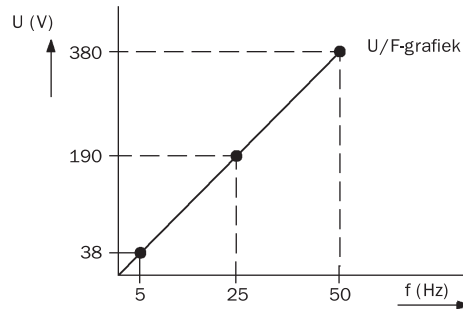
Volt per Hertz-grafiek

Bij frequentieregelaars wordt het magnetische veld bij verschillende toerentallen constant gehouden.

Dit gebeurt door bij lagere frequenties de spanning aan de motorklemmen evenredig met de frequentie te variëren.

Dit wordt weergegeven in de *Volt per Hertz grafiek* (U/f-grafiek).

Volt per Hertz grafiek



afbeelding 10.4 U/f-grafiek

De grafiek geldt voor een motor die geschikt is voor een U/f-waarde van 7,6 V/Hz.

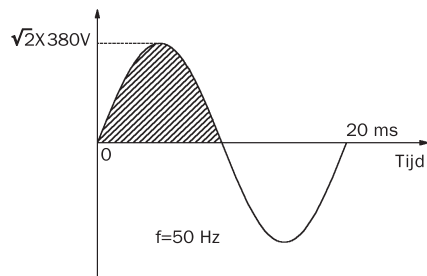
Berekening met de gegevens uit afbeelding 10.4:

$$\frac{U}{f} = \frac{380 \text{ (V)}}{50 \text{ (Hz)}} = \frac{U}{f} = \frac{190 \text{ (V)}}{25 \text{ (Hz)}} = \frac{U}{f} = \frac{38 \text{ (V)}}{5 \text{ (Hz)}} = 7,6$$

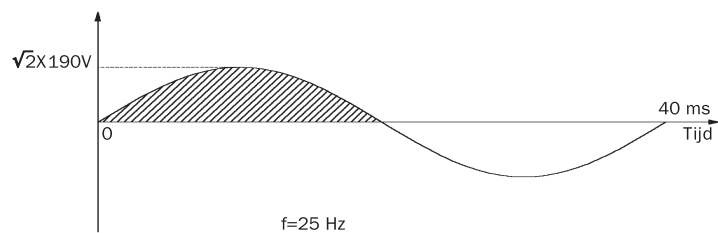
In het punt (380V,50Hz) levert de regelaar een spanning en frequentie, die gelijk is aan de netspanning en netfrequentie. Om dit constante veld bij lagere frequenties te handhaven, dient de spanning en frequentie veranderd te worden.

Bij lagere toerentallen, bijvoorbeeld 25 Hz staat er een spanning van 190 Volt en een frequentie van 25 Hz op de klemmen van een motor.

Dit wordt verduidelijkt met de afbeeldingen 10.5 en 10.6.



afbeelding 10.5 periodetijd is 20ms



afbeelding 10.6 periodetijd is 40ms

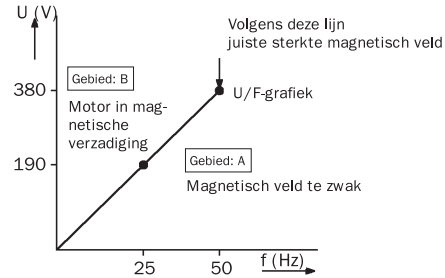
De oppervlakte onder beide sinussen is even groot. Gelijke oppervlakte betekent een gelijke sterkte van het magnetisch veld.

We moeten het principe: dat de frequentieregelaar de motor altijd voedt met een spanning 380 V/50 Hz loslaten.

De frequentieregelaar zorgt ervoor dat bij lagere frequenties de U/f -verhouding constant blijft.

Verandering van de U/f-verhouding.

Het magnetisch veld dat in de motor wordt opgewekt is afhankelijk van de spanning/frequentie (U/f) verhouding.



Verhoging U/f-verhouding

magnetische verzadiging

Wordt de U/f -verhouding verhoogd, dan zal de motor in *magnetische verzadiging* raken (gebied B). Een motor die in verzadiging is geraakt, is te herkennen aan de as die onstabiel en schokkend ronddraait. Verder zal de motor snel in temperatuur stijgen.

Eveneens zijn de stromen niet meer sinusvormig.

Verlaging U/f-verhouding

ondergemagnetiseerd

Wordt de U/f -verhouding verlaagd, dan is het magnetisch veld te zwak. De motor wordt *ondergemagnetiseerd* (gebied A). Het koppel dat de motor kan leveren is te laag.

Een juiste spanning/frequentie-verhouding zorgt voor een constant opgewekt koppel (T).

Een constante spanning/frequentie-verhouding is gewenst om over het gehele frequentiegebied (0 Hz basisfrequentie 50 Hz) geen koppelverzwakking te krijgen.

De grafiek 10.7 hoort specifiek bij een motor met een U/f -waarde van 7,6 V/Hz.

Een verkeerde instelling op de frequentieregelaar van de U/f -waarde leidt tot een verkeerde magnetisering van de kortsluitankermotor.

3. het draaiveld moet gelijkmatig (niet sprongsgewijs) ronddraaien.

Wat met deze voorwaarde wordt bedoeld is het volgende:

Wanneer met een gemiddelde snelheid van 100 km/h wordt gereden, wil dat niet zeggen dat gedurende één uur steeds 100 km/h wordt gereden. We kunnen af en toe 120 km/h en dan weer 80 km/h rijden, als de gemiddelde snelheid maar 100 km/h bedraagt.

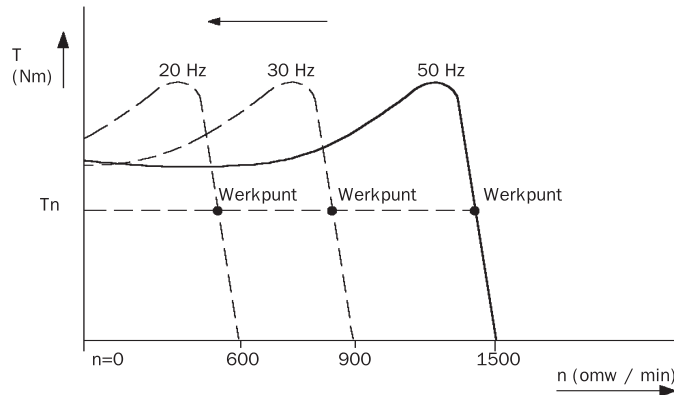
Met gelijkmatig ronddraaien wordt bedoeld, dat het draaiveld de omtrek aflegt in een constante hoeksnelheid. De gemiddelde hoeksnelheid is dan gelijk aan de snelheid in elk punt op de omtrek.

Deze voorwaarde wordt door de verschillende soorten frequentieregelaars slechts min of meer vervuld, waardoor allerlei nadelige gevolgen in de motor ontstaan. Deze bijverschijnselen zijn:

- "vierkant" lopen van de motor bij lage toerentallen.
- veel extra warmte-ontwikkeling in de motor. Om de motortemperatuur niet te hoog te laten oplopen, mag deze bij laag toerental niet continu belast worden.

Als aan de **drie voorwaarden** is voldaan, gebeurt bij frequentieregeling het volgende:

Bij vermindering van de frequentie (en dus ook de spanning) naar de motor schuift de koppel/toeren-kromme naar links.

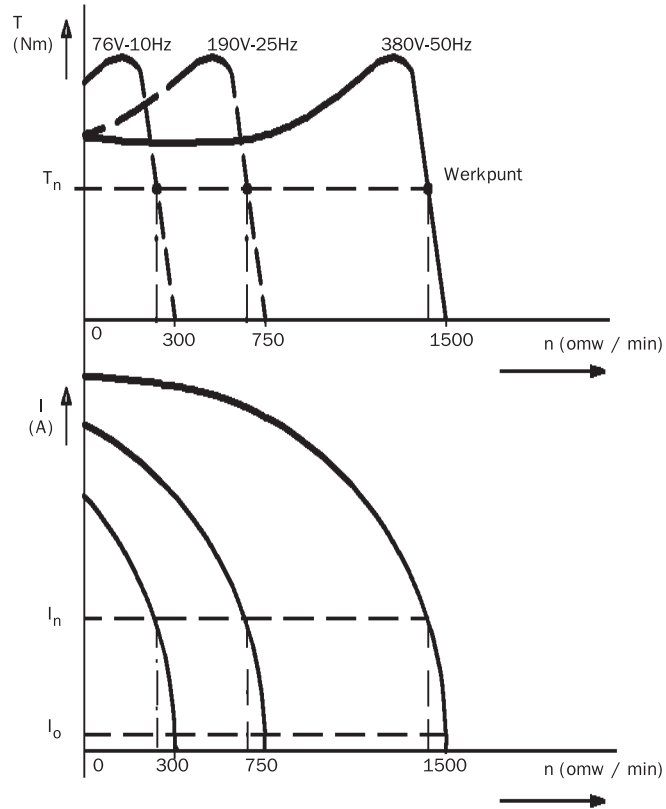


afbeelding 10.8 de koppel/toeren-kromme verschuift naar links

bij verlaging frequentie
blijft koppel/toeren-
kromme gehandhaafd

Omdat de frequentieregelaar bij verschillende frequenties de U/f -waarde constant houdt, zakt de koppel/toeren-kromme niet in. Hierdoor wordt het nominale koppel (T) over het frequentiegebied in stand gehouden.

Bij vermindering van de frequentie (en spanning) schuift de koppel/toeren-kromme in zijn geheel naar links. Dit geldt zo ook voor de stroom-kromme.



afbeelding 10.9 de stroom-kromme

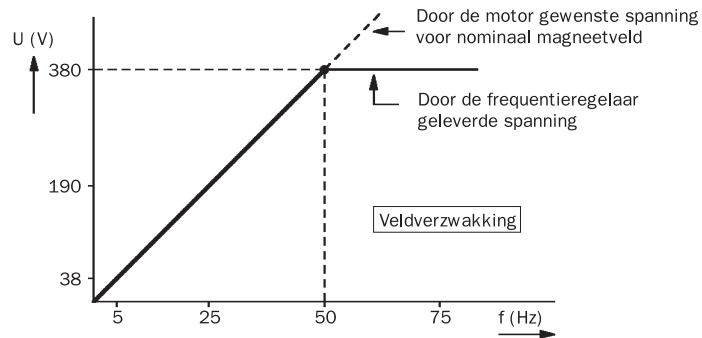
Wanneer de frequentie vanuit nul wordt opgeregeld zal de motor nooit een hoge aanloopstroom opnemen, terwijl het nominaal koppel (T) beschikbaar blijft, omdat een frequentieregelaar slechts $1,5 \cdot I_{nom}$ kan leveren, blijven we altijd rechts van het kipkoppel (zie hoofdstuk 4), het werkgebied van de motor.

Hoofdstuk 11

Veldverzwakking

magnetisch veld neemt af door kleinere u/f -waarde

Een frequentieregelaar kan de uitgangsfrequentie opvoeren tot boven de nominale frequentie van de motor. De frequentieregelaar kan echter geen hogere spanning afgeven dan de netspanning. Daarom vermindert de spanning/frequentie-waarde wanneer de uitgangsfrequentie hoger ligt dan de nominale frequentie. Door een kleinere U/f -waarde neemt de sterkte van het magnetisch veld af en daarmee het koppel (T). Bij toerentallen hoger dan de nominale frequentie wordt daarom over veldverzwakking gesproken.

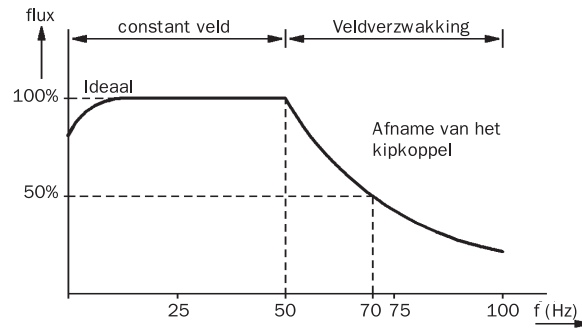


afbeelding 11.1

De gehele koppel/toeren-kromme en dus ook het kippkoppel (T_k) varieert kwadratisch met de sterkte van het magneetveld, want: Bij een bepaalde slip is de rotorstroom evenredig met het magneetveld. Dus het door de motor geleverde koppel $\approx (\text{magneetveld})^2$

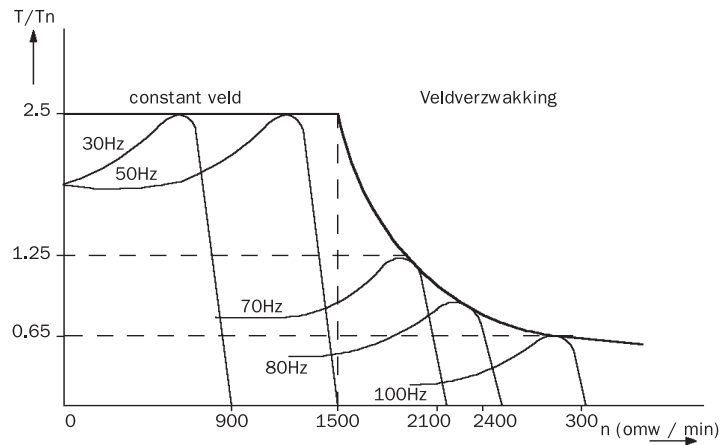
afname koppel bij
veldverzwakking

Bijvoorbeeld: Wanneer van de motor de nominale spanning/frequentie 380V/50Hz bedraagt dan is bij 380V/70Hz de hoogte van de koppeltoerenkromme nog slechts een factor $(5/7)^2$ zo groot. Dit betekent dat we in het veldverzwakingsgebied rekening moeten houden met een sterk verminderend kippkoppel (T_k). Het koppel (T) daalt kwadratisch met de spanning/frequentie verhouding.



afbeelding 11.2

Wordt in deze afbeelding de koppel/toeren-kromme getekend, dan blijkt dat bij frequenties hoger dan 50 Hz de koppel/toeren-kromme inzakt.



afbeelding 11.3

De voedingsspanning kan niet meer verder stijgen, (om de V/Hz-waarde constant te houden), omdat de frequentieregelaar geen hogere uitgangsspanningen kan leveren dan de ingangsspanning.

Boven de 50Hz motorfrequentie blijft de uitgangsspanning dus constant, waardoor de V/Hz-waarde afneemt. Hierdoor neemt de sterkte van het magnetisch veld af, vandaar dat we spreken over het veldverzwakkingsgebied. Omdat het vermogen in veldverzwakking constant is, neemt het koppel af met toenemend toerental volgens

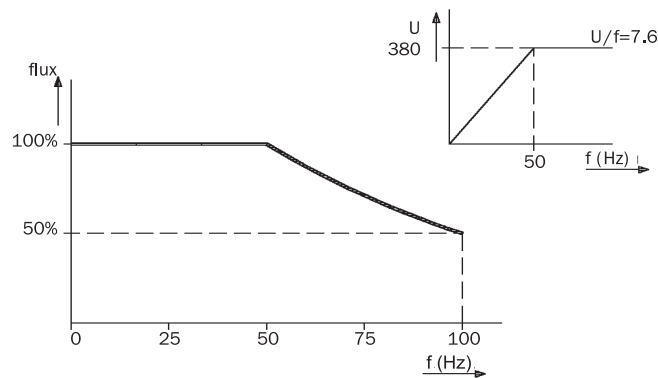
$$P = \omega \star T$$

Doordat de frequentieregelaar de frequentie opvoert kan de draaiveldsnelheid groter worden dan het nominale toerental. Deze eigenschap van de frequentieregelaar levert voordelen op, waarbij het nuttig kan zijn een motor te gebruiken in het veldverzwakkingsgebied. We mogen echter nooit de motor boven het kippkoppel belasten. In de praktijk moet men ongeveer $T < 2/3 T_k$ aanhouden. We mogen de motor met de nominale stroom belasten. Boven de 50Hz en bij nominale rotorstroom verloopt het toelaatbare koppel omgekeerd evenredig met de frequentie. Het vermogen is evenredig met het product van toerental (frequentie) en koppel, het toelaatbare vermogen blijft dus in het veldverzwakkingsgebied constant.

Een motor geschikt voor 50 Hz/380V

Een frequentieregelaar wordt aangesloten op een 380V net. De spanning/frequentie-verhouding van de frequentieregelaar wordt ingesteld op:

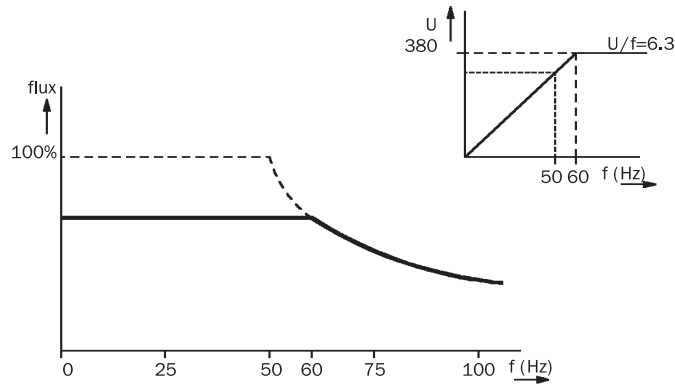
$$380 \text{ V} / 50 \text{ Hz} = 7,6$$



afbeelding 11.4

*wijziging van de u/f-
waarde is van invloed op
flux-karakteristiek*

Wijziging van de spanning/frequentie-verhouding is van invloed op de koppelkarakteristiek. Veranderen we de waarde bijvoorbeeld door $U/f = 380/60 = 6,3$ dan heeft dit invloed op de flux, zie afbeelding 11.5.



afbeelding 11.5

Door verlaging van U/f -waarde wordt de nominale uitgangsspanning pas bereikt bij een hogere frequentie. Het resultaat is dat de motor bij 50 Hz op een onderspanning is aangesloten.

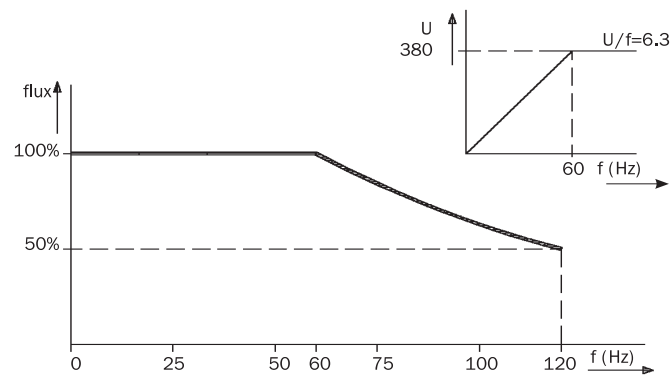
Hierdoor is er een constant, maar kleiner koppel over een grotere regelgebied.

Een motor geschikt voor 60 Hz

Het is mogelijk om een motor die geschikt is voor 60 Hz (zoals de motoren uit Amerika) door middel van een frequentieregelaar aan te sluiten op een frequentie van 50 Hz.

Daarbij moet de spanning/frequentie-verhouding anders worden ingesteld namelijk op: $380 \text{ V}/60 \text{ Hz} = 6,3$. De spanning/frequentie verhouding is nu juist ingesteld voor een optimaal magnetisch veld.

De motor zal zich nu hetzelfde gedragen als op een netfrequentie van 60 Hz. Het koppel (T) blijft van 0 t/m 60 Hz constant (zie afbeelding 11.6).



afbeelding 11.6

Hoofdstuk 12

I*R compensatie

Draait een motor aangesloten op een frequentieregelaar, op een lage frequentie (van 0 tot 5 à 10Hz), dan vermindert het geleverde koppel (T).

Afname van het motorkoppel bij lage frequenties, is als volgt te verklaren:

*ohms weerstand en
wisselstroomweerstand*

Een (motor)spoel bestaat uit een *ohms gedeelte* (R) en een *wisselstroom-impedantie gedeelte* (X_L).

De weerstand (R) is afhankelijk van de soort draad die wordt gebruikt. De wisselstroomimpedantie (X_L) is niet afhankelijk van het soort materiaal, maar van de frequentie. De wisselstroomimpedantie (X_L) is afhankelijk van de frequentie.

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

waarbij:

X_L = spoelimpedantie

f = frequentie

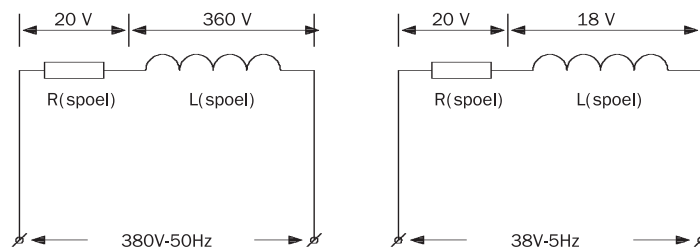
L = zelfinductie

Hoe lager de frequentie, des te lager de waarde van de wisselstroom weerstand.

Bij lage frequentie zal de waarde van het ohmse gedeelte een grotere invloed hebben dan het wisselstroomgedeelte.

De spanningsval over het ohmse gedeelte blijft constant, maar de spanningsval over het wisselstroomgedeelte neemt af. Daarmee neemt de sterkte van het magnetisch veld af.

Om dit spanningsverlies bij laag toerental te compenseren wordt er door de frequentieregelaar een extra spanning afgegeven. Vandaar de naam I*R-compensatie. Nu kan bij laag toerental wel een "krachtiger" koppel (T) worden verkregen.



afbeelding 12.1 vereenvoudigd vervangingschema van een motorspoel

Rekenvoorbeeld:

In afbeelding 12.1 is het vervangingschema van een motorspoel weergegeven. De spanningsval over het wisselstroomgedeelte zorgt voor de sterkte van het magnetisch veld.

We berekenen de extra spanning die nodig is om bij bijvoorbeeld 5 Hz nominale magnetisch veld op te wekken.

De U/f -verhouding uit afbeelding 12.1 bedraagt:

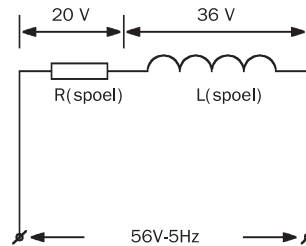
$$\frac{U}{f} = \frac{360 \text{ (V)}}{50 \text{ (Hz)}} = 7.2 \text{ V/Hz}$$

$$\frac{U}{f} = \frac{18 \text{ (V)}}{5 \text{ (Hz)}} = 3.6 \text{ V/Hz}$$

Uit de berekening blijkt dat de U/f -verhouding met betrekking tot de eigenlijke statorspoel (L) kleiner is geworden. De spanning over de wisselstroomweerstand (de spoel), die zorgt voor het magnetisch veld, is afgenomen. De frequentieregelaar zal een hogere spanning moeten afgeven om het magnetisch veld te herstellen.

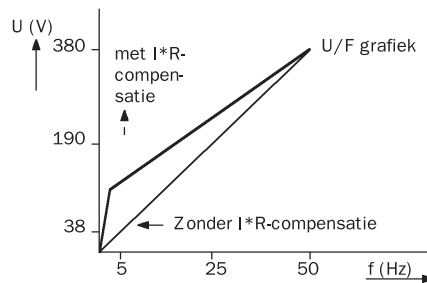
De extra afgegeven spanning (I*R-compensatie) moet in dit geval 56 Volt zijn, want:

$$\frac{U}{f} = \frac{56 - 20(V)}{5 (Hz)} = \frac{36}{5} = 7.6 V/Hz$$



afbeelding 12.2

Deze extra spanning geeft weer een nominaal veld.



afbeelding 12.3 bij lage frequentie extra spanning

Uit de grafiek blijkt dat bij laag toerental van de standaard U/f-grafiek wordt afgeweken. Er wordt een extra spanning door de frequentieregelaar geleverd.

Indien de frequentieregelaar de ohmse spanningsval slechts gedeeltelijk compenseert, zal de koppel/toeren-kromme van de motor lager zijn dan nominaal.

Wanneer de frequentieregelaar te veel spanning levert, raakt de motor in magnetische verzadiging. Er ontstaan hoge piekvormige stromen.

De frequentieregelaar kan ten gevolge van de hoge piekstromen uitschakelen.

*praktische instelling
I*R-compensatie*

Een praktische instelling van de I*R is dat zoveel I*R-compensatie wordt gegeven, dat de motor bij een laag startkoppel net niet in magnetische verzadiging raakt. Bij één op een ander moment optredend hoog startkoppel is de I*R-compensatie dan helaas niet optimaal. Een richtwaarde is, dat de motor bij ongeveer 1,5 voudige stroom tenminste ruim nominaal koppel (T_n) kan leveren.

Bij hogere gevraagde startkoppels is de motor niet altijd in staat het werktuig in beweging te brengen. Een oplossing is overdimensioneren van de motor en frequentieregelaar.

Toepassingen I*R-compensatie:

- indien een hoog aanloopkoppel wordt gevraagd.
- lange motorkabels waarbij het spanningsverlies niet verwaarloosbaar is.

Hoofdstuk 13

Slipcorrectie

De absolute slip (s) is het verschil in toerental tussen statordraaiveld (n_s) en het rotortoerental (n_r). Met andere woorden de absolute slip drukt het verlies in toerental uit.

$$s = n_s - n_r$$

De slip van een kortsluitankermotor is afhankelijk van:

1. de nominale slip van de motor

Richtwaarden voor een normmotor met betrekking tot de slip (relatief) zijn:

- 1 kW : ca 6%
- 10 kW : ca 3%
- 100 kW : ca 1,5%

*factoren waarvan de slip
afhankelijk is*

2. de belasting van de motor

De belasting bepaalt de slip in het werkpunt waarmee de rotor ronddraait. Als de motor zwaarder wordt belast zal de rotor in eerste instantie remmen. De slip (snelheidsverschil tussen statordraaiveld en rotor) wordt vergroot. Hoe groter de belasting des te groter de slip.

3. de temperatuur van de motor

Door het warm worden van de rotorstaven zal er weerstandstoename optreden. Dit betekent dat bij toenemende rotorweerstand (ten gevolge van temperatuurstoename) een zelfde rotorstroom (=motorkoppel) pas optreedt bij een grotere absolute slip (s).

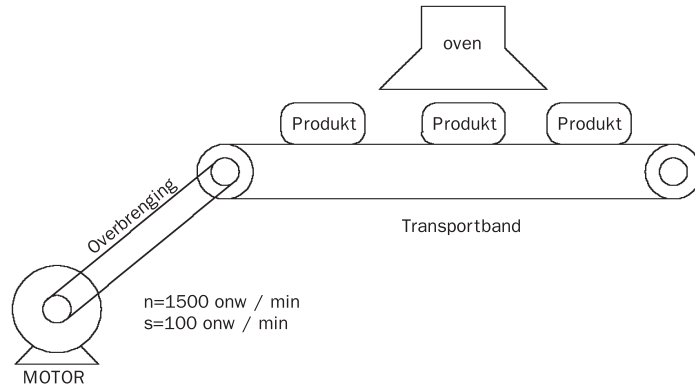
4. de ingestelde V/Hz-waarde

De U/f-waarde bepaalt de grootte van magnetische veld.

En deze bepaalt op zijn beurt weer de steilheid van de koppel/toeren-kromme.

Rekenvoorbeeld:

Aan de hand van een voorbeeld wordt een toepassing van slipcorrectie weergegeven.



afbeelding 13.1 transportband

Gegeven:

Een bakproces kan als volgt worden weergegeven. De baktijd wordt bepaald door de snelheid waarmee een transportband de oven passeert. De transportband wordt aangedreven door een 4-polige motor ($n=1500$ omw/min).

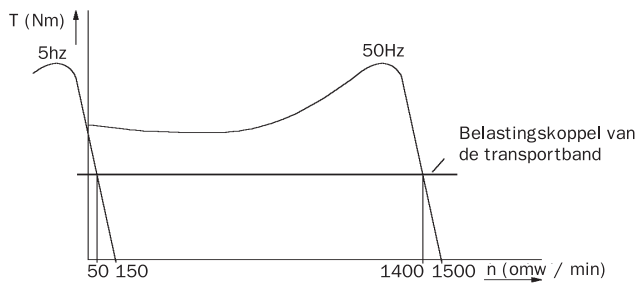
De absolute slip (s): 100 omw/min.

Bij een transportband is het gevraagde koppel ongeveer constant over het regelbereik.

De baktijd voor de producten is verschillend. Door de motor op een bepaalde frequentie te laten draaien wordt de juiste baktijd ingesteld.

Stel:

- De baktijd voor product 1 is 1 minuut. ($n=1500$ omw/min)
- De frequentieregelaar wordt ingesteld op 50 Hz.
- De baktijd voor product 2 is 10 minuten. ($n=150$ omw/min)
- De frequentieregelaar wordt ingesteld op 5 Hz.



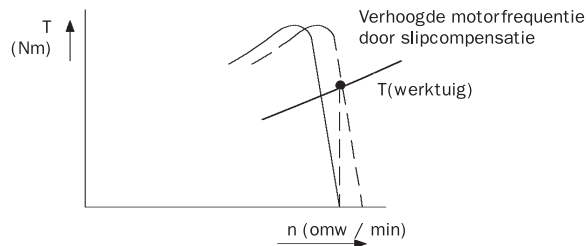
afbeelding 13.2

Rekening houdend met de slip betekent dat: product 1 met een toerental van 1400 omw/min de oven passeert. De baktijd wordt $1500/1400 \cdot 1\text{min.} = 1,06$ minuten.

De problemen doen zich voor bij lagere frequenties. Bij product 2 is het toerental $150-100 = 50$ omw/min.

Procentueel gezien is dit een overschrijding van de baktijd met 300%.

De baktijd wordt $1500/50 \cdot 1\text{min.} = 30$ minuten, zodat product 2 verbrandt.



afbeelding 13.3

Frequentieregelaars die voorzien zijn van zogenaamde slipcompensatie compenseren de belastingsafhankelijke toerentalafwijking grotendeels. Afhankelijk van de motorbelasting corrigeert de frequentieregelaar de uitgangsfrequentie, zodat het werkelijk toerental zo goed mogelijk overeenstemt met het gewenste toerental zie afbeelding 13.3. De frequentieregelaar verhoogt dus de frequentie om de slip te compenseren.

Let op: De slipcorrectie op een frequentieregelaar is lang niet zo nauwkeurig als een werkelijke toerentalregeling met tachoterugkoppeling. Of slipcorrectie voldoende is hangt af van de gewenste regelnauwkeurigheid, het regelbereik en het belastingskoppel bij lage toerentallen.

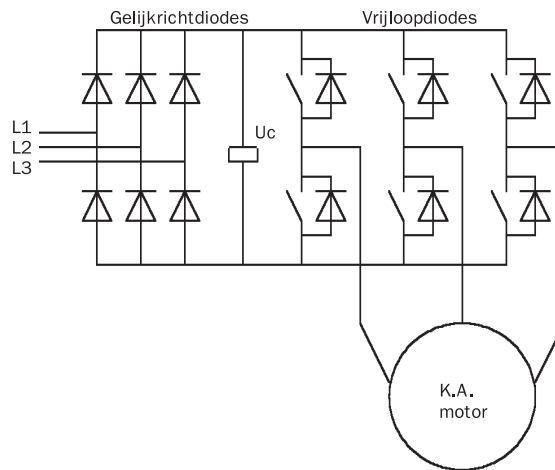
Hoofdstuk 14

Remmend bedrijf

generatorisch

remmend koppel

Motoren die direct op het net zijn aangesloten en waarvan het motortoerental hoger is dan de draaiveldsnelheid (oversynchroon toerental), gaan *generatorisch* werken. De motor levert elektrische energie aan het net. De opwekking van elektrisch energie zorgt ervoor dat de generatorwerking een *remmend koppel* uitoefent op de motor.

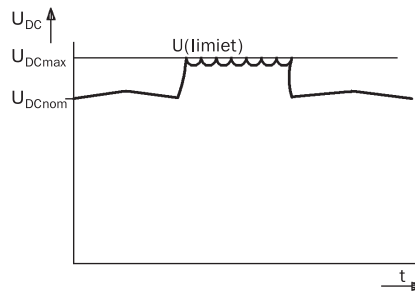


afbeelding 14.1 geen remenergie terug naar het net

Is een motor door middel van een frequentieregelaar op het net aangesloten, dan kan er geen energie aan het net worden geleverd vanwege de diode-ingangsgelijkrichter. Ten gevolge van de elektrische energieopwekking stijgt de spanning over de condensatorbatterij.

Kortstondig remmen

De tussenkringspanning zal ten gevolge van de generatorwerking stijgen, immers de frequentie van de rotor zal gedurende korte tijd groter zijn dan de frequentie van het statordraaiveld, waardoor de motor in generator bedrijf komt en energie teruglevert aan de frequentieregelaar. De tussenkringspanning mag niet te hoog worden in verband met de eventuele doorslag van de condensatoren en een maximale sperspanning van de IGBT. Door snelle regelcircuits wordt de toename van de tussenspanningskring begrensd. Denk hierbij aan het automatisch corrigeren van de uitgangsfrequentie.



afbeelding 14.2 maximale tussenkringspanning U_{DCMAX} (limiet)

Afhankelijk van de hoogte van de toegelaten overspanning en de hoogte van de maximale motorstroom kunnen remkoppels tot ca. 50% van het nominale motorkoppel worden gerealiseerd bij kleine vermogens. Bij grote vermogens neemt dit af tot 10-20%.

Dit hangt echter sterk af van:

- ontwerp van de motor
- motorvermogen (bij kleine motoren werkt dit remprincipe het best, omdat deze relatief grote verliezen hebben)
- de mate waarin een hogere dan nominale tussenkringspanning wordt toegelaten. Bij $U_{DCMAX} = 1,25 \cdot U_{DCNOM}$ is de remwerking veel sterker dan bij $U_{DCMAX} = 1,15 \cdot U_{DCNOM}$

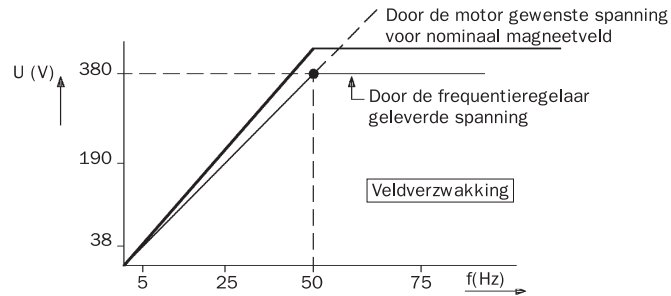
We zien dat, bij remmend bedrijf de tussenkringspanning U_c stijgt. Zolang de motor meer energie genereert als er via de ijzerverliezen in de motor gedissipeerd wordt, zou de tussenkringspanning blijven stijgen totdat er iets kapot gaat.

spanningsbegrenzing

De tussenkringspanning wordt voortdurend gemeten. Wordt deze te hoog dan regelt de frequentieregelaar de uitgangsfrequentie zodanig, dat de motor minder oversynchroon gaat draaien. Nu wordt er minder energie opgewekt die gedissipeerd moet worden.

Dit wordt *spanningsbegrenzing* (U_{limiet}) genoemd.

In het veldverzwakkinggebied (zie afbeelding 14.3) werkt dit remprincipe niet. Daar leidt een verhoogde tussenkringspanning U_c niet tot een hogere dan nominale V/Hz waarde van de uitgangsspanning.



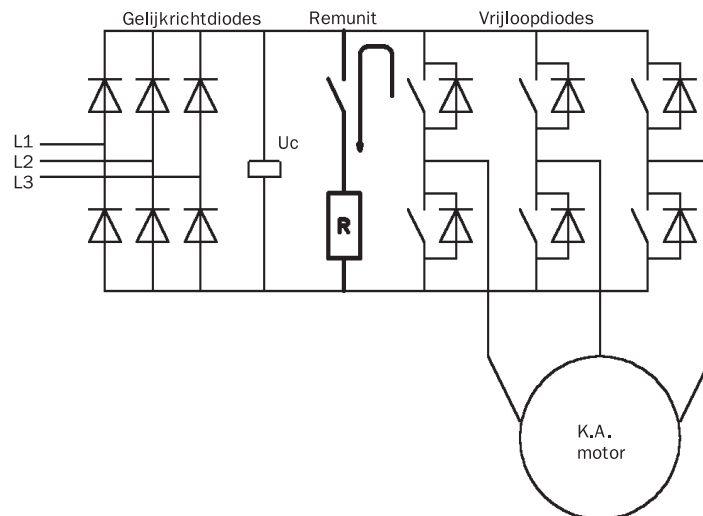
afbeelding 14.3

Langdurig remmen.

Moet er langdurig en/of met hoge remkoppels geremd worden dan zal de frequentieregelaar en motor samen deze remenergie niet meer kunnen verwerken. De motor zal te warm worden.

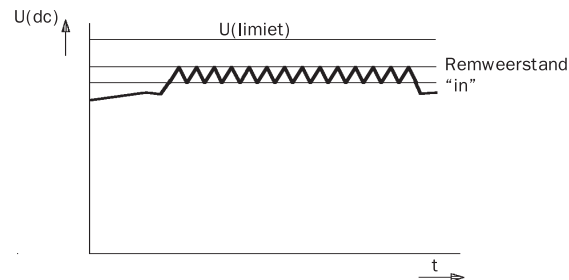
remunit

Frequentieregelaars kunnen voorzien worden van een zogenaamde "remunit". Deze remunit wordt parallel aan de condensatorbatterij geschakeld (afbeelding 14.4) en bestaat in principe uit een elektrische (vermogens)weerstand en een pulserende schakelaar.



afbeelding 14.4 energie via de remunit afgevoerd

Voordat de condensatorbatterij een te hoge spanning bereikt (afbeelding 14.4), komt de schakelaar automatisch pulserend "in" en de remenergie afkomstig van de genererende "motor" wordt in de weerstand vernietigd.



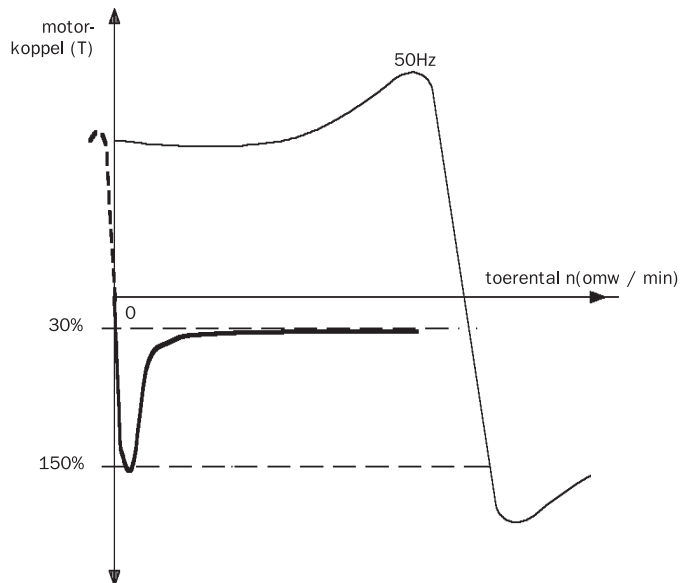
afbeelding 14.5

gelijkstroomremmen

Gelijkstroomremmen

Vectormodulatie levert nog een extra mogelijkheid op om remmend bedrijf te realiseren; en wel *gelijkstroomremmen*.

Het principe van gelijkstroomremmen met een kortsluitankermotor veronderstellen we hier bekend. Er wordt een stilstaand magneetveld door de stator opgewekt.



afbeelding 14.6

*gelijkstroomremmen
alleen in kortstondige
situaties*

Opvallend is, dat de helling van de koppel/toeren-kromme in het gebied van lage slip veel steiler is dan bij de gewone "50Hz koppel/toeren-kromme" van de motor; in de praktijk ongeveer 3x zo steil.

Gelijkstroomremmen kan met vectormodulatie gerealiseerd worden zonder extra hardware.

Wel is het zo, dat bij gelijkstroomremmen de gelijkstroom groter dient te zijn om een sterk remmende werking te kunnen verkrijgen.

Gelijkstroomremmen kan alleen bij kortstondige situaties worden toegepast. Met name worden de rotorstaven erg snel warm, bij langdurig gelijkstroomremmen zal de motor zeker verbranden. Ook hier is het sterk afhankelijk van de toepassing hoe gelijkstroomremmen gebruikt kan worden.

Hoofdstuk 15

PWM modulatie

met pwm een
sinusvormige stroom
gegenereren

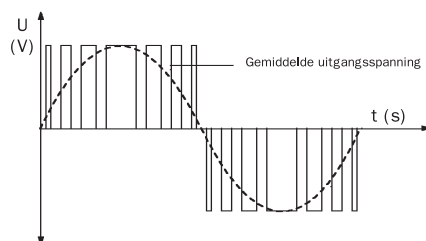
PWM staat voor *Puls Width Modulation*; in het Nederlands Puls Breedte Modulatie. Bij deze vorm van frequentieregeling wordt de *breedte van de pulsen gevarieerd*.

Met PWM willen we een sinusvormige stroom genereren om het volgende te realiseren:

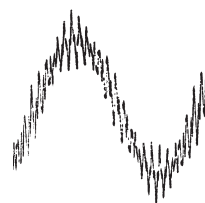
- lage extra motorverliezen
- mooie rondloop van de motor; ook bij lage toerentallen

Er zijn echter een aantal beperkingen voor deze manier van moduleren:

1. Relatief veel geluid in de motor omdat de spanning gemiddeld sinusvormig is, maar in werkelijkheid uit vele spanningpulsen bestaat van rond de 1 à 2 kHz.
2. PWM is minder geschikt voor aandrijvingen met hoge dynamische eigenschappen (snelwisselende belasting en toerental).
3. Dit modulatie principe is minder geschikt voor het aandrijven bij hoge toerentallen.
4. Deze manier maakt geen effectief gebruik van de inverterschakelaars. Deze schakelen in principe meer dan noodzakelijk.
5. Teveel spanningsverlies bij frequenties in de buurt van 50Hz.



afbeelding 15.1 spanningsverloop bij PWM



afbeelding 15.2 stroom bij PWM-modulatie

Hoofdstuk 16

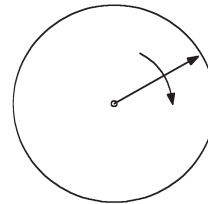
Vectormodulatie

ronddraaiende vector

Het gedrag van de motor wordt volledig bepaald door het magnetisch veld in de luchtspleet. We kunnen het magnetisch veld in de luchtspleet afbeelden als een *ronddraaiende vector*.

De pijl wijst naar de plaats waar het magnetisch veld maximaal positief is (voor het gemak uitgaande van een 2 polige motor). De lengte van de pijl is een maat voor de sterkte van het magnetisch veld.

In de ideale situatie beschrijft de punt van de fluxvector een cirkel en het magnetisch veld vertoont geen ongewenste variaties in sterkte.



afbeelding 16.1

Optimaal:

- juiste sterkte van het magnetisch veld
- cirkelvormig fluxbeeld
- juiste gemiddelde hoeksnelheid
- minimale variaties in hoeksnelheid

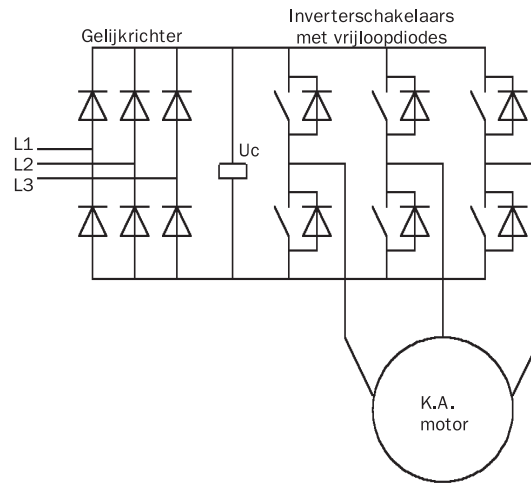
vectormodulatie

absolute grootte draaiveld

Het principe van *vectormodulatie* is erop gericht om een optimaal mogelijk magnetisch draaiveld in de motor op te wekken. Vector-modulatie zorgt ervoor dat zowel de hoeksnelheid als de *absolute grootte van het draaiveld* (lengte van de pijl) constant worden gehouden.

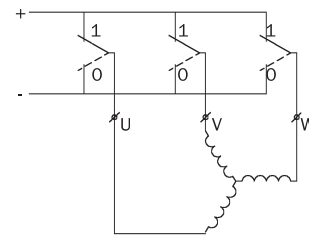
Dit resulteert in zeer goede dynamische eigenschappen en een reductie van het modulatiegeluid in de motor.

Gedetailleerde uitleg van vectormodulatie.



afbeelding 16.2 prinseschema

Van de beide schakelaars van één invertertak is er altijd één schakelaar gesloten en één geopend. De inverter kan daarom eenvoudiger weergegeven worden (afbeelding 16.3). Het magnetisch draaiveld in de motor is voor te stellen als een ronddraaiende fluxvector.



afbeelding 16.3

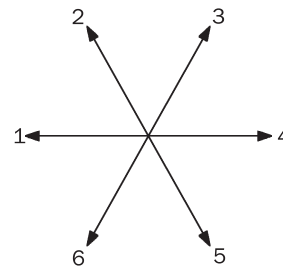
inverterschakelaars

De fluxvector wordt bepaald door de stand van de *inverterschakelaars*.

De verandering van de fluxvector is namelijk afhankelijk van de aangelegde spanning aan de motor-klemmen. Deze spanning wordt bepaald door een van de 8 toestanden die door de inverterschakelaars kan worden aangenomen (6 fluxvectoren en 2 nulvectoren).

De 8 toestanden zijn als volgt gedefinieerd:

U	V	W	Flux-vector
0	0	1	1
1	0	1	2
1	0	0	3
1	1	0	4
0	1	0	5
0	1	1	6
1	1	1	7
0	0	0	0



afbeelding 16.4

De fluxvectoren worden als volgt gevormd:

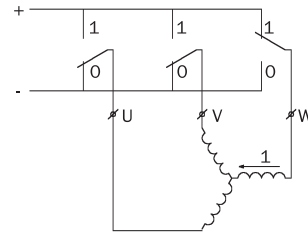
fluxvector 1:

U=0 V=0 W=1

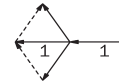
Er vloeit een stroom door de wikkeling aangesloten op klem W. Deze stroom verdeelt zich in het sterpunt in twee gelijke delen door de wikkelingen aangesloten op de klemmen U en V.

De drie magnetische velden in de drie wikkelingen leveren een resulterend magnetisch veld op, welke door een vectorvoorstelling is weergegeven in afbeelding 16.5.

ontstaan fluxvector 1



afbeelding 16.5



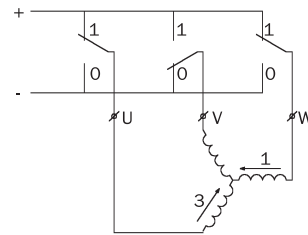
fluxvector 2:

U=1 V=0 W=1

Er vloeit een stroom door de wikkelingen aangesloten op de klemmen U en W. Deze stroom telt zich op in het sterpunt en gaat door de wikkeling aangesloten op klem V.

De drie magnetische velden in de drie wikkelingen leveren een resulterend magnetisch veld op, welke door een vectorvoorstelling is weergegeven in afbeelding 16.6.

ontstaan fluxvector 2



afbeelding 16.6



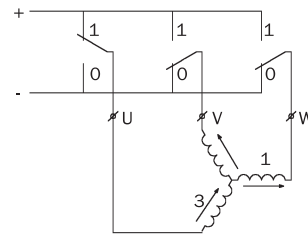
fluxvector 3:

U=1 V=0 W=0

Er vloeit een stroom door de wikkeling aangesloten op de klem U. Deze stroom verdeelt zich in het sterpunt in twee gelijke delen door de wikkelingen aangesloten op de klemmen U en V.

De drie magnetische velden in de drie wikkelingen leveren een resulterend magnetisch veld op, welke door een vectorvoorstelling is weergegeven in afbeelding 16.7.

ontstaan fluxvector 3



afbeelding 16.7



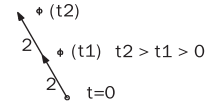
veranderd of stilstaand

De fluxvector kan door verschillende schakeltoestanden van de inverterschakelaars van richting worden *veranderd of stilstaan*. De flux-

*fluxgrootte en
fluxrichting*

vector bestaat uit twee componenten: de reeds aanwezige flux en de flux veroorzaakt door de fluxvector. De som van deze componenten geeft de totale *fluxgrootte en fluxrichting*.

Op het tijdstip $t=0$ is de aanwezige flux in de motor 0. Stel we zetten fluxvector 2 aan. Gedurende enige tijd zal een toenemend magnetisch veld worden opgebouwd in de richting van fluxvector 2.



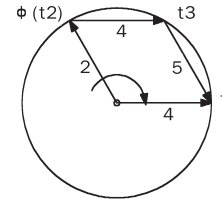
afbeelding 16.8

De toename zal in principe eindeloos doorgaan, zij het dat de stator in verzadiging komt waardoor de sterkte van het magnetisch veld op een bepaalde waarde blijft steken.

Wordt er na enige tijd over geschakeld naar toestand 4 ($U=1$, $V=1$ en $W=0$), dan ontstaat vanuit het reeds aanwezige magnetisch veld een verandering van het magnetisch veld in de richting van vector 4.

De in de motor aanwezige flux heeft de richting van fluxvector 2. Fluxvector 4 veroorzaakt een flux in de richting van fluxvector 4.

Op deze wijze ontstaat het mogelijke verloop van het magnetisch veld volgens de schakelvolgorde 4,5,6,1,2,3,enz.....



afbeelding 16.9

De opeenvolging van de fluxvectoren wordt telkens verkregen door slechts één wisselschakelaar (dit zijn 2 inverterschakelaars, IGBT's) te schakelen.

Hierdoor wordt het draaiveld verkregen met zo weinig mogelijk schakelacties van de inverterschakelaars.

Door de inverterschakelaars niet onnodig veel te schakelen, kan een hoge bedrijfszekerheid van de inverter gegarandeerd worden. Hoge motortoerentallen zijn hierdoor mogelijk en men heeft minimale schakelverliezen in de inverterschakelaars.

U	V	W	Flux-vector
0	0	1	1
1	0	1	2
1	0	0	3
1	1	0	4
0	1	0	5
0	1	1	6
1	1	1	7
0	0	0	0

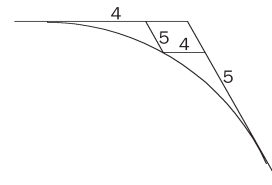
Zoals te zien is dit fluxverloop (wat ideaal een cirkel is) nog lang niet ideaal. Daarom wordt er naar een beter cirkelvormig verloop van het fluxpatroon gestreefd.

Dit kan men realiseren door de hoekpunten op te bouwen uit meerdere korter op elkaar volgende fluxvectoren.

De schakelvolgorde bestaat dan niet meer uit 1,2,3,4,5,enz...

De overgang tussen bijvoorbeeld 4 en 5 wordt dan opgevuld met extra schakelingen zoals 4,5,4,5 of nog meer.

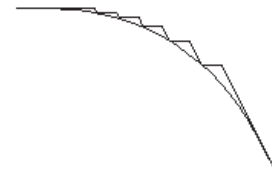
De fluxvector is nu geïdealiseerd tot een meer cirkelvormig verloop. Nadeel hiervan is dat de schakelfrequentie van de inverterschakelaar is verhoogd.



afbeelding 16.10

Op deze manier kan men bij alle frequenties vanaf de nominale frequentie (in Nederland 50Hz) een nagenoeg ideaal fluxpatroon creëren.

Indien men een frequentie wil verkrijgen die lager is dan de nominale frequentie, dan moet men gebruik gaan maken van de twee nultoestanden (0 en 7).



afbeelding 16.11

Aan de hand van het principeschema blijkt dat tijdens de toestanden 0 en 7 de motorwikkelingen zijn kortgesloten. De spanning is hierdoor gelijk aan 0 Volt. Gevolg is dat de fluxvector stil zal blijven staan in zijn laatste positie.

De toestanden 0 en 7 worden "stops" genoemd en de toestanden 1 t/m 6 "moves".

"stops" en "moves"

Door regelmatig stops tussen de schakelacties te plaatsen kan een lagere gemiddelde hoeksnelheid worden verkregen. Als je overgaat van een "move" naar een "stop", hoeft er telkens maar één wisselschakelaar te worden geschakeld.

Doordat de tijdsduur van de andere fluxvectoren onveranderd is, blijft het fluxpatroon gelijk. De periodeduur is toegenomen en de uitgangsfrequentie is afgenomen. De sterkte van het veld daarentegen blijft gelijk.

Door een verkorte tijd van de "moves" en geen "stops" in te voeren, kunnen we een hogere frequentie verkrijgen. Het magnetisch veld wordt kleiner maar de uitgangsfrequentie wordt verhoogd. Dit heeft als gevolg dat het toerental van de rotor stijgt maar dat het maximaal leverbare koppel kleiner wordt. (veldverzwakking)

Conclusie

Vectormodulatie heeft door het juist kiezen van de schakelpatronen de volgende eigenschappen:

- een constante sterkte van het magneetveld
- een constante cirkelvormigheid van het magneetveld
- een constant gemiddelde hoeksnelheid van het magneetveld

Hoofdstuk 17

Veldgeoriënteerde regeling

De in frequentieregelaars meest toegepaste regelmethode is sinusmodulatie en vectormodulatie, zie hoofdstukken 15 en 16. Tegenwoordig worden steeds vaker veldgeoriënteerde regelmethode en andere "directe" regelmethode gebruikt. Men komt benamingen tegen zoals "flux-georiënteerde regeling, fluxvector regeling, sensorloze veldregelingen" etc. Deze frequentieregelaars zijn vooral bedoeld voor hoogdynamische toepassingen waar hoge regelnauwkeurigheid geëist wordt. Regelbereiken van 1:1000 en hoger, die normaal gesproken alleen mogelijk zijn met gelijkstroom- of synchroonmotoren zijn nu ook mogelijk met een standaard draaistroommotor. In tegenstelling tot de meeste sinus- en vectormodulatoren, wordt iedere puls die naar de motor wordt gestuurd vooraf berekend.

Veldgeoriënteerde regeling

veldgeoriënteerde regeling

De theorie voor veldgeoriënteerde regeling is ontwikkeld in de jaren '60 en '70 met de bedoeling om een volledig regelbaar aandrijfsysteem te krijgen met een asynchrone motor. *Veldgeoriënteerde regeling* kan het best worden beschreven als koppelregeling door schatting van de flux. In die tijd was de DC-motor het enige alternatief voor industriële toepassingen waarbij volledige regeling van koppel en toerental vereist was. Door het genereren van koppel te beschrijven via vectorrepresentatie van de elektrische grootheden, verkreeg men een geschikt wiskundig model. De daarvoor benodigde rekenkracht is pas enkele jaren beschikbaar met de komst van zeer snelle rekenprocessoren (*DSP's: Digital Signal Processor*). De flux kan worden berekend met behulp van een wiskundig motormodel en de rotorstroom kan worden geschat door integratie van de fasespanningen.

DSP

In de praktijk bestaan er al veel versies van veldgeoriënteerde regeling. Veel min of meer verwarrende namen zoals Fluxvectorregeling, Vector-veldregeling, Vectorregeling enz. zijn gebruikt om de methoden te definiëren. De verschillen tussen de methoden liggen meestal in de manier van schatten van de flux of hoe de stroom of flux geregeld wordt. Men kan echter spreken van indirecte en directe methoden voor het regelen van flux en koppel.

Indirecte methoden

De meeste veldgeoriënteerde regelmethode die in het verleden werden gebruikt, kunnen als indirect worden beschouwd, aangezien ze de stroom regelen om de vereiste flux te krijgen. De teruggekoppelde parameters zijn de motorfasestromen door meting en het toerental of de positie van de rotor via tacho of encoder.

Met indirecte veldgeoriënteerde regeling kunnen koppel en toerental uitstekend geregeld worden aan de hand van complexe real-time berekeningen. Minpunten zijn de grote gevoeligheid voor variaties in de motorparameters en tijdsvertraging in de fluxregeling. Een gebruikelijke koppelresponsietijd bedraagt 10–20 ms.

zonder sensor

Zonder sensor

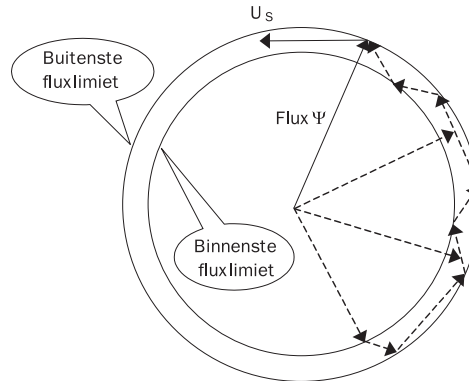
Voor de meeste toepassingen zou het beter zijn als de motor geregeld kon worden zonder assensoren. Extra sensoren betekenen immers hogere kosten en een complexere configuratie. In de loop der jaren zijn talloze voorstellen gedaan om het rotortoerental terug te koppelen zonder sensoren. De meeste methoden gaven echter bij lage toerentallen en toerental 0 geen optimale resultaten. Pas sinds kort is het mogelijk om in de meeste industriële toepassingen motoren zonder sensoren te gebruiken. De belangrijkste oorzaken hiervan zijn nieuwe technieken voor het schatten van het toerental en de beschikbaarheid van rekenkracht (DSP's).

Directe regeling van flux en koppel

Directe regeling van flux en koppel is in principe een veldgeoriënteerde regelmethode. De flux en het koppel worden hierbij niet indirect geregeld via de stroom, maar worden daarentegen direct geregeld doordat elke schakelactie in de inverter rechtstreeks de elektromagnetische toestand van de motor beïnvloedt. Een momentane verandering van flux of koppel wordt bereikt door de geschikte spanningsvector te kiezen. Een essentieel onderdeel van directe regeling vormt het motormodel dat een schatting van de momentane flux en koppel geeft. Door de berekende momentane waarden te vergelijken met de referentiewaarden kunnen flux en koppel geregeld worden via een gesloten lus.

fluxregeling

De directe *fluxregeling* wordt geïllustreerd in afbeelding 17.1, waar de spanningsvectoren zodanig worden gekozen dat de vector binnen twee limietcirkels blijft. Deze limietcirkels stellen de fluxreferentie met hysteresis voor.

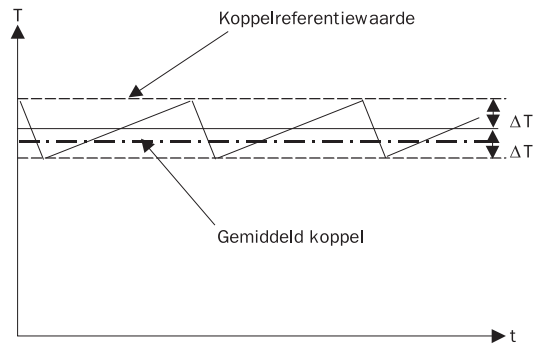


afbeelding 17.1 fluxregeling

In de motor is fysiek slechts één flux aanwezig. De flux kan echter worden weergegeven door twee fluxvectoren, de stator- en de rotorfluxvector. De twee vectoren beschrijven hoe de flux ontstaat uit de stator- en rotorstroom. In een asynchrone motor wordt koppel opgewekt door de interactie tussen flux en rotorstroom. Met directe regeling wordt dit beschreven door de interactie tussen de fluxvectoren van stator en rotor. Het koppel kan worden veranderd door de grootte van de flux te veranderen (d.w.z. de lengte van de vectoren) of door de hoek tussen de fluxvectoren te veranderen. De beste methode is echter meestal om de fluxgrootte constant te houden en het koppel te veranderen door de hoek tussen de vectoren te veranderen. Door de statorfluxvector door verschillende spanningsvectoren te bewegen, neemt het koppel overeenkomstig snel toe of af.

Het koppel wordt geregeld door de geschatte koppelwaarde te vergelijken met de referentiewaarde en vervolgens de gewenste schakeltoestand te realiseren, zodat de statorfluxvector zich verplaatst. Wanneer het koppel boven de referentie uitstijgt wordt een nulvector toegevoegd, wanneer het koppel lager wordt wordt een geschikte spanningsvector toegepast. In afbeelding 17.2 is het principe van *koppelregeling* met hysteresis te zien.

koppelregeling



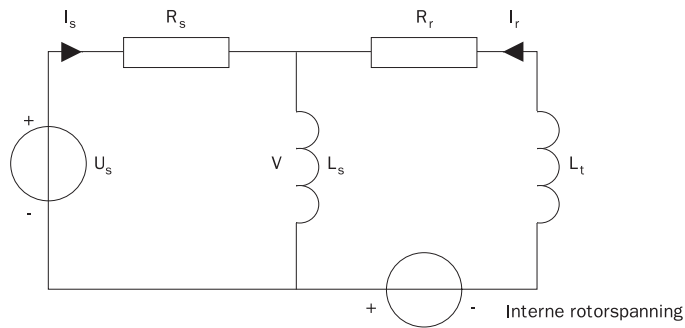
afbeelding 17.2 koppelregeling

De momentane flux en het koppel worden door het motormodel via de gemeten fase-spanningen- en stromen geschat. Het is voor de regeling van de flux en het koppel erg belangrijk dat deze schatting nauwkeurig is. De flux wordt vooral geschat door integratie van de aangeboden spanning. Het koppel wordt geschat door een vectorberekening waarbij ook de statorflux en de fasestroom betrokken worden.

Het motormodel

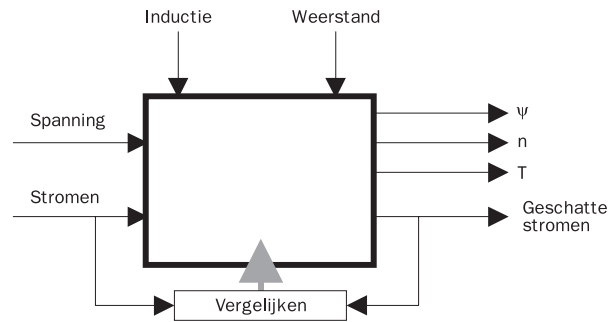
motormodel

Bij de Emotron-benadering is uitgegaan van het algemene *motormodel* van afbeelding 17.3, waarbij het de bedoeling was om dit model zelfregelend te maken. Het omvat de motorspanning U_s , de statorweerstand R_s , de statorinductie L_s , de rotorweerstand R_r , de totale lekinductie L_t en een van het toerental afhankelijke spanning U_r . Om de stator- en rotorflux van het motormodel te berekenen, is het nodig het toerental te schatten. Daarom werd een toerentalschatter ingevoerd, die de gemeten fasestroom en de geschatte waarden van de stator- en rotorflux van het motormodel zelf gebruikt om het toerental te berekenen. Het gevolg is dat zowel het toerental, dat aan het motormodel wordt aangeboden, als de flux, die aan de toerentalschatter wordt aangeboden, geschatte waarden zijn en niet gemeten. Als we echter het motormodel combineren met de toerentalschatter om een zogenaamde toestandsobservator te creëren, kunnen de rotor- en statorflux en het toerental nauwkeurig worden geschat. Het koppel kan eenvoudig uit de statorflux en de gemeten fasestroom berekend worden op de hierboven beschreven wijze.



afbeelding 17.3 motormodel

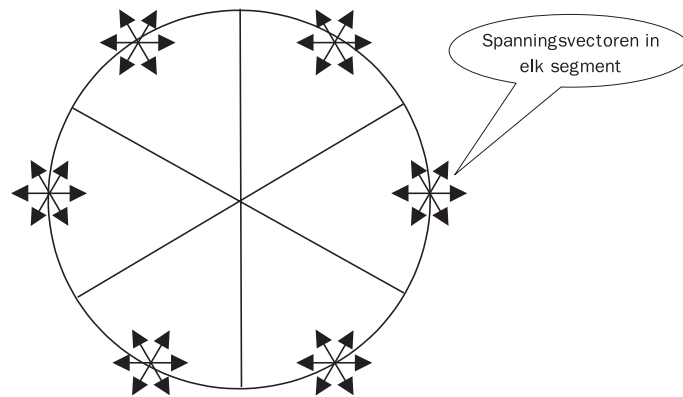
De in de frequentieregelaar gerealiseerde toestandsobservator wordt weergegeven in afbeelding 17.4. Flux, koppel en toerental worden geschat aan de hand van de gemeten stroom en spanning en motorparameters voor inductie en weerstand. Verder geeft het model ook een schatting van de stromen, die worden vergeleken met de werkelijk gemeten stromen en worden gebruikt om de motorparameters in het model aan te passen. Zo worden fouten in de schatting door zelfregeling vrijwel geheel geëlimineerd.



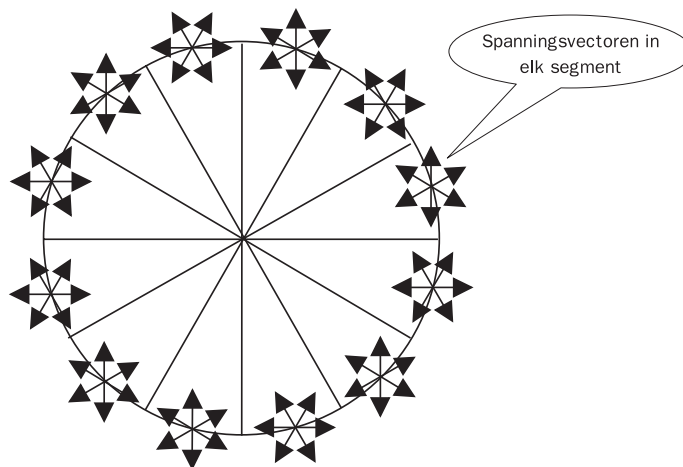
afbeelding 17.4 blokschema van het motormodel

Fluxregeling

Bij eerdere methoden voor directe fluxregeling is de fluxvectorcirkel verdeeld in 6 segmenten en er worden maar 4 spanningsvectoren gebruikt, zie afbeelding 17.5. Emotron ontdekte dat een veel betere en nauwkeuriger regeling bij lage toerentallen bereikt kon worden door de fluxvectorcirkel in 12 segmenten te verdelen waardoor alle 6 spanningsvectoren in elk segment gebruikt kunnen worden, zie afbeelding 17.6.



afbeelding 17.5 bestaande fluxregelingsstrategie



afbeelding 17.6 verbetering door het aantal segmenten te verdubbelen en alle 6 spanningsvectoren in elk segment te kunnen gebruiken

Koppelregeling

Door het koppel binnen hysteresisgrenzen te regelen, bestaat het risico dat het gemiddelde koppel afwijkt van de gewenste koppelreferentiewaarde. De reden hiervoor is de asymmetrische koppelvariatie binnen de hysteresisband, zie afbeelding 17.2. Afhankelijk van het toerental kan het gemiddelde koppel hoger of lager zijn dan de koppelreferentie.

Voor stationaire situaties kan dit gemakkelijk worden gecompenseerd, maar in dynamische situaties zou er een verschil ontstaan tussen de twee gemiddelde koppelniveaus, wat zou resulteren in schokkerig gedrag. Emotron heeft een regelalgoritme toegepast dat zorgt voor een dynamische verandering van de hysteresisgrenzen, waardoor ongewenste verschillen geëlimineerd worden. De Emotron-methode zorgt ervoor dat het gemiddelde koppel gelijk is aan het referentiekoppel, ook in dynamische situaties.

Hoofdstuk 18

Regelgebied frequentieregelaar

Regelgebied: 0 Hz t/m 50 Hz

De frequentieregelaar is in staat de uitgangsspanning (frequentie en amplitude) probleemloos te variëren.

De frequentieregelaar biedt de 4-polige motor bij een toerental van 750 omw/min een spanning en frequentie van 190V-25Hz aan.

- Bij elke willekeurige frequentie levert de motor een constant koppel (T). De koppel/toeren-kromme verschuift als het ware in zijn geheel naar links.
- neemt de rotor een lagere draaisnelheid aan, dan wordt de motor niet meer optimaal gekoeld. Zonder geforceerde koeling is langdurig motorbedrijf bij laag toerental niet gewenst.

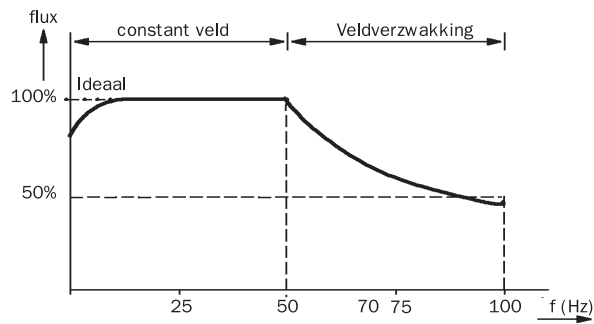
Regelgebied van 50 Hz t/m 2x nominale frequentie.

De regelaar is in staat de frequentie op te voeren tot boven de nominale frequentie (veldverzwakking).

Langdurige oversynchroon toerental kan ongewenst zijn in verband met de mechanische aspecten. Toerentallen tot 3000/4000 omw/min zijn met veel standaard motoren zonder meer mogelijk.

In veldverzwakkingsgebied is er kwadratische afname van het kippkoppel (T_k) (zie hoofdstuk 11).

De twee regelgebieden worden weergegeven in afbeelding 18.1.

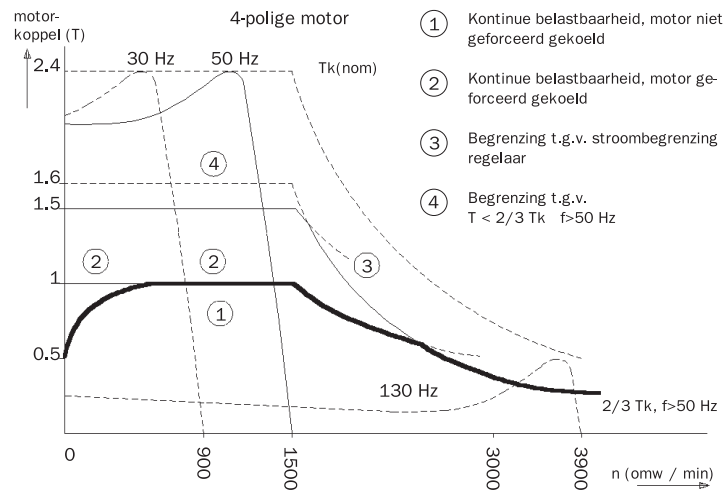


afbeelding 18.1

Afbeelding 18.1 geeft al een aardig beeld van het regelgebied van de frequentieregelaar.

Voor de rest hangt de belastbaarheid van de frequentieregelde aandrijving af van:

- de verhouding stroombegrenzing I_{max}/I_{nom} van de frequentieregelaar ten opzichte van de nominale stroom. De regelaar kan maximaal $1,5 \times I_{nom}$ leveren
- wel of niet geforceerde koeling
- de verhouding T_k/T_n van de motor. In de afbeelding 18.2 is gekozen voor $T_k/T_n = 2,4$



afbeelding 18.2 oppervlakte 1 geeft het regelgebied weer van de frequentieregelaar

Oppervlakte 1 is het continu bruikbare werkgebied van de frequentie-geregelde aandrijving.

Verklaring van de lijnen uit afbeelding 18.2.

lijnnummer 1:

Dit is het continu leverbare koppel bij een motor waar geen gebruik wordt gemaakt van geforceerde koeling. De motor wordt gekoeld door de fan op de motoras.

lijnnummer 2:

Dit is het continu leverbare koppel bij een motor waar gebruik is gemaakt van geforceerde koeling.

lijnnummer 3:

Dit is het maximale koppel (T) dat de aandrijving levert bij een stroom van $1,5 \cdot I_{nom}$.

lijnnummer 4:

Bij frequentie groter dan 50Hz is een afname van het maximaal leverbare koppel (T).

Hierdoor komt de slip in de buurt van de kipslip.

Bij een gering tegenstootkoppel zal het werkpunt van de motor over het kipkoppel schieten en de motor zal tot stilstand komen.

Vandaar dat meestal wordt gesteld, dat de slip niet groter mag worden dan 2/3 deel van de kipslip. Dit heeft gevolg dat het maximaal toelaatbare belastingskoppel kleiner moet zijn dan 2/3 T_k .

Hoofdstuk 19

Motorbelasting en koeling

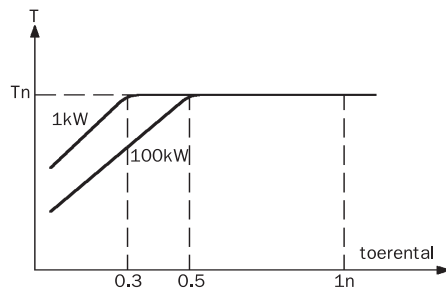
Een standaard kortsluitankermotor wordt gekoeld met een ventilator op de motor-as aan de niet-aandrijfzijde. Het koelend vermogen van de ventilator neemt af naarmate het motortoerental afneemt.

Of de maximum toelaatbare motortemperatuur wordt overschreden hangt uiteraard af van de warmteontwikkeling in de motor, welke weer afhankelijk is van het aandrijfkoppel dat de motor moet leveren (motorstroom). Hieruit kan geconcludeerd worden dat de koeling bepalend is voor het langdurig toelaatbare koppel.

De opwarmtijd van een kortsluitankermotor varieert van enige minuten (vermogens kleiner dan 1 kW) tot vele tientallen minuten (vermogens rond 100 kW).

*afname koppel bij laag
toerental*

Een motor met een groot vermogen maakt veel meer gebruik van de ventilator dan een motor van klein vermogen. Een kleine motor heeft namelijk een relatief groter koelend oppervlak (verhouding oppervlak en volume), en geeft daardoor relatief veel warmte af door middel van straling.



afbeelding 19.1 koppel/toeren-kromme

Om bij lage toerentallen toch een hoog aandrijfkoppel mogelijk te maken, kun je de motor geforceerd koelen. Een gedeeltelijke oplossing wordt bereikt door een extra grote motor te kiezen.

Hoofdstuk 20

Parallel bedrijf

Een frequentieregelaar kan meerdere parallel-geschakelde motoren regelen. Wanneer de motortoerentallen verschillend moeten zijn, kunnen bijvoorbeeld motoren met verschillende synchrone toerentallen worden toegepast (bijvoorbeeld 1500 en 3000 omw/min). De motoren kunnen tegelijkertijd in snelheid worden geregeld, waarbij de verhouding tussen de verschillende toerentallen gehandhaafd blijft over het gehele regelbereik.

*de voorwaarden bij
parallel bedrijf*

De totale stroom van de motoren mag de maximaal toegestane uitgangsstroom van de frequentieregeling niet overschrijden.

De uitgangsstroom van de frequentieregeling kan groter zijn dan de nominaalstroom van een afzonderlijke motor. Daarom is het gebruikelijk elke motor apart thermisch te beveiligen, zoals bij directe netaansluiting.

Zijn de diverse motoren erg verschillend in vermogen, dan kunnen bij toepassingen waarbij het werktuig een groot aanloopkoppel vraagt problemen ontstaan bij het starten en bij lage toerentallen. Dit komt doordat kleine motoren een relatief hoge statorweerstand hebben en daardoor extra I^2R -compensatie vragen bij start en lage toerentallen. Deze extra spanning brengt grotere motoren in magnetische verzadiging.

Automatische regelingen in frequentieregelingen die specifiek ontwikkeld zijn op basis van één frequentieregelaar met één motor (zoals auto I^2R -compensatie, slipcorrectie, koppelregeling en invangschakeling) mogen dan ook niet worden gebruikt.

Ook moderne veldgeoriënteerde frequentieregelaars zijn ontworpen voor gebruik met één motor (zie ook hoofdstuk 17)

De motoren dienen altijd apart beveiligd te worden door middel van een thermische beveiliging of thermistoren.

Hoofdstuk 21

Stroombegrenzing

De frequentieregelaar varieert de frequentie en houdt daarbij de onderlinge verhouding spanning/frequentie constant.

De koppel/toeren-kromme verschuift volgens afbeelding 21.1 horizontaal naar links, waarbij de eigenschappen van de motor onveranderd blijven.

De motorstroom die door de regelaar wordt geleverd is begrensd op $1,5 \times I_{nom}$. Op deze manier worden motor en frequentieregelaar beveiligd tegen extreem hoge stromen.

Wanneer de motor zwaarder wordt belast zal de regelaar een grotere stroom moeten gaan leveren.

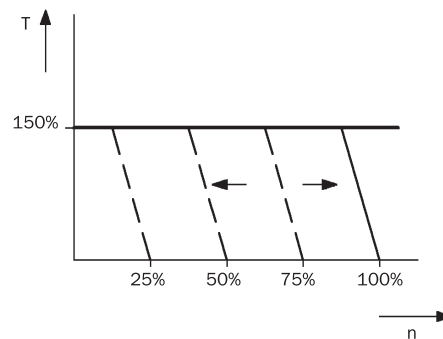
Op een gegeven moment gaat de regelaar in stroombegrenzing zodat de frequentieregelaar geen grotere stroom levert dan $1,5 \times I_{nom}$.

In de frequentieregelaar gebeurt het volgende:

De regelaar gaat zijn maximale stroom leveren $1,5 \star I_{nom}$, dus ook $1,5 \star T_n$.

De frequentieregelaar verlaagt de frequentie, waardoor de koppel/toeren-kromme en de stroom/toeren-kromme naar links verschuiven (zie afbeelding 10.9).

*frequentieregelaar in
stroombegrenzing*



afbeelding 21.1 terugregelen van de frequentie bij stroombegrenzing

Gedurende 60 seconden blijft de frequentieregelaar de maximale stroom leveren. Neemt de belasting niet af, dan komt de motor stil te staan en zal de frequentieregelaar "trippen" op overbelasting ($I \star t$). Neemt het belastingskoppel af, dan regelt de frequentieregelaar de frequentie weer op. De motor neemt zijn oorspronkelijke snelheid aan.

Hoofdstuk 22

Rendement frequentieregeling

Het rendement van de frequentieregelaar wordt bepaald door de verhouding tussen uitgaand en ingaand vermogen.

Aan de ingangszijde is de stroom niet-sinusvormig (vanwege de diode gelijkrichter) en aan de uitgangszijde zijn de spanning en stroom niet-sinusvormig. Hierdoor is het niet eenvoudig om het ingangsvermogen P_{oe} en het uitgangsvermogen P_{uit} nauwkeurig te meten.

Richtwaarden van nominale rendementen (bij nominale uitgangsstroom en nominale uitgangsfrequentie) zijn:

Nominaal vermogen	100 kW;	rendement = 98 %
Nominaal vermogen	10 kW;	rendement = 97,5 %
Nominaal vermogen	1 kW;	rendement = 97 %

Rendementsbepaling "via" de verliezen is in de praktijk het best bruikbaar.

De verliezen in de frequentieregelaar spelen op twee gebieden een belangrijke rol:

1. Verliezen uiten zich in de vorm van warmte in de regelaar. Deze verliezen moeten worden afgevoerd en bepalen daarmee de constructie van de frequentieregelaar en de af te voeren warmte in een schakelkast.

2. Verliezen worden uit het voedende net opgenomen en moeten door de gebruiker worden betaald. Een belangrijke factor speelt het aantal bedrijfsuren op jaarbasis evenals de gemiddelde belasting. Eén en ander is afhankelijk van de toepassing. Een extra verlies van 1kW betekent op jaarbasis:

$$1 \text{ kW} \times 365 \text{ dgn} \times 24 \text{ uur} = 8760 \text{ kWh.}$$

Indien voor 1 kW, fl 0,15 betaald moet worden, betekent dit fl1300,- per jaar.

Verliezen en hoge schakelfrequentie

Hoge schakelfrequenties kunnen toegepast worden om extra motorgeluid te beperken.

Dit heeft echter direct invloed op het rendement. De verliezen van de frequentieregelaar worden mede bepaald door de schakelverliezen van de inverterschakelaars (IGBT's).

Bij lagere toerentallen blijven de verliezen gemiddeld constant.

Bij lagere belasting nemen de verliezen ongeveer lineair af. Bij nullast zijn de verliezen nagenoeg te verwaarlozen.

Hoofdstuk 23

De juiste keuze

Interessante wetenswaardigheden voor de gebruiker:

- is er een foutindicatie-systeem aanwezig?
- hoe bepaal ik doorsnede van de motorkabels?
- is de motor beveiligd tegen overbelasting?
- is de frequentieregelaar beveiligd tegen kortsluiting en aardsluiting?
- in welke ruimten mag ik een bepaalde regelaar gebruiken?
- is de frequentieregelaar beschermd tegen thermische overbelasting?
- hoe reageert de frequentieregelaar op belastingsvariaties?
- is de bedieningswijze eenvoudig?
- welke normen gelden er (Machinerichtlijn, EMC, CE)?

Bepaling grootte frequentieregelaar

Om de juiste frequentieregelaar te kiezen zijn een aantal gegevens van belang.

- nominaal vermogen van het werktuig.
- koppel/toeren-kromme van het werktuig.
- regelnauwkeurigheid en regelbereik.
- voedingsspanning.
- wijze van sturing.
- wel/niet remmend bedrijf.

Meestal heeft de engineer voldoende aan het nominale vermogen en de koppel/toeren-kromme van het werktuig om de juiste grootte van de frequentieregelaar vast te stellen.

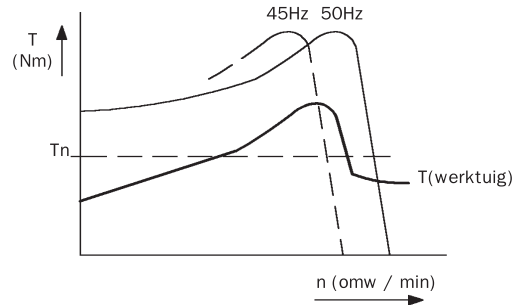
Het volgende kan zich voor doen. Een motor (...kW) drijft een werktuig aan en is direct aangesloten op het net.

Wil men de motor laten regelen door een frequentieregelaar, dan kiest men de regelaar met hetzelfde vermogen als de motor. Soms is een groter vermogen echter absoluut noodzakelijk.

Denk aan:

- extreme hoge startkoppels.
- hoge pulserende koppels
- "vreemde" koppel/toeren-kromme

Let op "vreemde koppels"



afbeelding 23.1

Als een motor direct op het net is geschakeld meten we de stroom bij een frequentie van 50 Hz. We weten niets over de toestanden lager dan 50 Hz.

- onder welke factoren meten we de stroom bij 50 Hz?
- meten we onder de zwaarste bedrijfsomstandigheden?

Als de frequentie terug wordt geregeld, betekent dit dat de koppel/toeren-kromme naar links verschuift. In de situatie van afbeelding 23.1 vraagt het werktuig bij een toerental overeenstemmend met 45Hz een tweemaal zo'n groot koppel dan bij een "50Hz toerental". Toerentallen rond de 45Hz zijn dus niet mogelijk. De motor en frequentieregelaar moeten dan tweemaal zo groot worden gekozen.

De stroom die door een frequentieregelaar moet worden geleverd bepaalt in grote mate de kostprijs.

Daarom is het belangrijk om de te verwachten stroom te berekenen.

Men wil eigenlijk niet overdimensioneren vanwege de grotere aanschafkosten. Maar aan de andere kant wil men een "reserve" inbouwen voor onvoorziene situaties (er wordt bijvoorbeeld meer stroom gevraagd voor het lostrekkoppel in verband met vastzitten van bijvoorbeeld een transportband).

Afhankelijk van de gevraagde stroom van het werktuig of uitgangsstroom van de regelaar kan de juiste frequentieregelaar worden bepaald

*de frequentieregelaar
wordt bepaald door de
grootte van de stroom*

Hoofdstuk 24

Keuze pooltal motor

De toepassing van oversynchroon toerental ($f > 50\text{Hz}$) biedt soms voordelen.

De voor- en nadelen van oversynchroon bedrijf

Voordelen:

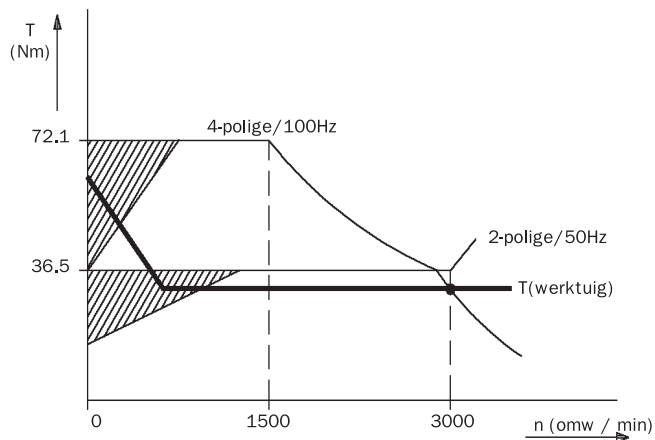
- de motor sneller laten draaien, zonder een nieuwe motor te plaatsen.
- in installaties waar een konstant vermogen wordt gevraagd. Bij laag toerental een hoog koppel en bij hoog toerental een laag koppel.

Nadelen:

- de mechanische aspecten oa: de slijtage van de lagers wordt vergroot.
- kans op overbelasting van de motor, zie blz 93.

Rekenvoorbeeld:

Een werktuig (10 kW) vraagt een konstant koppel (T), in het lage toerengebied kunnen plakkoppels optreden van 180% van het nominale koppel van het werktuig. (zie afbeelding 24.1)



afbeelding 24.1 weergave van maximale koppel bij 2- en 4 polige motor

Oplossing:

Uit de motorkatalogus kiest men een 2 polige motor van 11 kW.

synchroon n t/min	grootte	P _{nom} kW	n _{nom} t/min	rende- ment	cos phi	I _{nom} bij 380V A	I _a I _n	T _a T _n	T _z T _n	T _k T _n	Massa traagheid moment kgm ²
3000	ZK 132 SK2	5.5	2860	85	0.91	10.8	6	2.4	2.1	2.7	0.020
	ZK 160 MK2	11	2890	87	0.90	21.4	6.2	2.6	2.2	2.8	0.040
	ZK 160 M2	15	2910	88	0.91	28.4	7.2	2.6	2.1	3.2	0.050
1500	ZK 132 SK2	4	1420	83	0.83	8.8	6.2	2.4	2	2.8	0.0135
	ZK 160 M4	11	1455	89	0.89	22.4	6	2.5	2.2	2.5	0.073

De motor kan een constant koppel (T) leveren over het hele regelgebied. Het maximale koppel (T) dat deze motor samen met een frequentieregelaar kan leveren, is echter niet voldoende voor het startkoppel van het werktuig, zodat deze oplossing niet voldoet.

We kunnen twee verschillende oplossingen kiezen.

- 1) - een twee-polige motor met een groter vermogen en een grotere frequentieregelaar.
 - extra koeling bij laag toerental (geforceerde koeling).

Of

- 2) - een vier-polige motor met een vermogen van 11kW en een koppel dat 2x zo groot is.

*twee-polige motor*Een *twee-polige motor* heeft een koppel (T) van:

$$T = \frac{9.55 \star 11000}{2890} = 36.5 Nm$$

Kiest men een vier-polige motor (1500 omw/min) met hetzelfde vermogen (11kW), dan heeft deze motor een twee maal groter koppel dan de twee-polige motor.

$$T = \frac{9.5 \star 11000}{1455} = 72.1 Nm$$

*vier-polige motor*Een *vier-polige motor* heeft een koppel (T) van:

Door de vier-polige motor in het veldverzwakking te gebruiken kan een toerental van 3000 omw/min worden bereikt.

Van 0 t/m 1500 omw/min is het koppel (T) konstant en voldoende om het werktuig aan te drijven. Na de 1500 omw/min werkt de 4-polige motor in het veldverzwakkingsgebied. Hier zal het koppel (T) afnemen, maar voldoende zijn om het werktuig aan te drijven.

Zoals afbeelding 18.2 weergeeft moeten we ook letten op het kippkoppel. Verder weten we ook dat:

- de 4-polige motor heeft een 2,5-voudig kippkoppel.
- het kippkoppel daalt quadratisch.
- we willen niet verder belasten dan $2/3 T_k$.
- Het werktuig vraagt ongeveer 30Nm (uit de grafiek afgelezen).

$$\left\langle \frac{50}{f} \right\rangle^2 \star 2.5 \star 72.1 \star \frac{2}{3} = 30$$

$$\left\langle \frac{50}{f} \right\rangle^2 = 0.25$$

$$\left\langle \frac{50}{f} \right\rangle = 0.5 \Rightarrow f = 100 Hz$$

Door deze toepassing hoeft men geen motor met een groter vermogen aan te schaffen, maar een motor met een ander pooltal. De uitgangsfrequentie van de regelaar wordt zodanig verhoogd dat het gewenste toerental wordt bereikt.

Hoofdstuk 25

Belastingsaard & rekenvoorbeelden

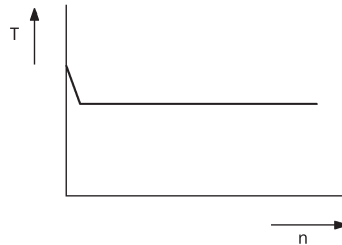
Om de juiste grootte van de frequentieregelaar te kiezen dient eerst het vermogen van de motor te worden bepaald.

Het motorkoppel dient groter te zijn dan het gevraagde werktuigkoppel.

Bovendien moet er rekening worden gehouden met het afnemen van de belastingscapaciteit bij lage toerentallen, omdat de motor niet optimaal wordt gekoeld.

Toepassing van constant koppel.

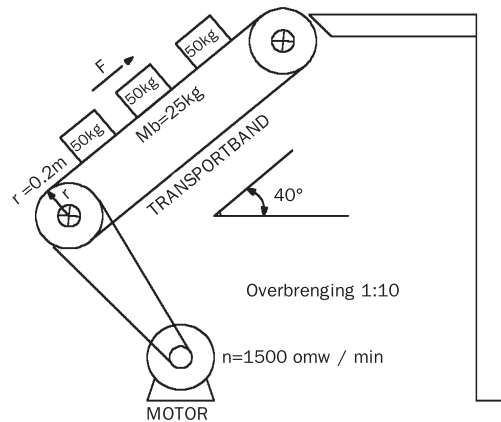
Rekenvoorbeeld



afbeelding 25.1 constant koppel

Gegeven: (zie figuur 25.2)

- 4-polige motor ($n=1500$ omw/min).
- overbrenging van 1:10
- de producten hebben elk een gewicht van 50 kg
- massa van de band = 25 kg
- diameter van de aandrijfrol $r=0,2$ m
- rendement overbrenging 90%

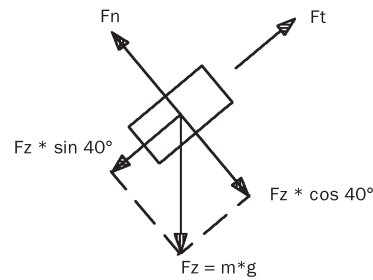


afbeelding 25.2

Gevraagd:

Het vermogen van de aandrijfmotor.

Oplossing:



afbeelding 25.3

In afbeelding 25.3 zijn de krachten schematisch getekend. De zwaartekracht F_z wordt ontbonden in een kracht loodrecht op de band: $F_z \cdot \cos 40^\circ$ en een kracht evenwijdig met de band: $F_z \cdot \sin 40^\circ$. De reactiekracht (F_n) van de band heft de kracht $F_z \cdot \cos 40^\circ$ op. Voor de wrijvingskracht rekenen we $0,1 \cdot$ de zwaartekracht (F_z).

De kracht die band nodig heeft om te versnellen bedraagt:

$$F_{nodig} = (m \cdot g) \sin 40^\circ + 0,1 \cdot F_z$$

waarbij:

F_z = zwaarte kracht (N)

m = massa (kg)

g = gravitatiekracht (m/s^2)

invullen:

$$F_{nodig} = (3 \cdot 50 \cdot 10) \cdot \sin 40^\circ + 0,1 (3 \cdot 50 \cdot 10) =$$

$$F_{nodig} = 1112 \text{ N}$$

De massa van de transportband wordt niet meegerekend.

Het koppel op de transportband (rollen):

$$T = F \cdot r = 1112 \cdot 0,2 = 222,4 \text{ Nm}$$

Het koppel dat door de motor geleverd moet worden, is de overbrengingsverhouding (i) kleiner.

(i = motortoerental / werktuigtoerental = $1500/150 = 10$):

$$T_{overbrenging} = \frac{222,4}{10} = 22,24 \text{ Nm}$$

Brengen we het rendement van de overbrenging (0,9) nog in rekening dan wordt het benodigde motorkoppel:

$$T_{motor} = \frac{T_{overbrenging}}{\eta} = \frac{22,4}{0,9} = 24,7 \text{ Nm}$$

We moeten een motor kiezen die een koppel van 24,7 Nm kan leveren.

Dat betekent een motor met een vermogen van:

$$P = \frac{T \star n}{9.55} = \text{invullen} := \frac{24.7 \star 1500}{9.55} = 3.87 \text{ kW}$$

Uit de motorcatalogus kiezen we een motor van 4kW.

synchroon n t/min	grootte	P _{nom} kW	n _{nom} t/min	rende- ment	cos phi	I _{nom} bij 380V A	I _a I _n	T _a T _n	T _z T _n	T _k T _n	Massa traagheid moment kgm ²
3000	ZK 132 SK2	5.5	2860	85	0.91	10.8	6	2.4	2.1	2.7	0.020
	ZK 160 MK2	11	2890	87	0.90	21.4	6.2	2.6	2.2	2.8	0.040
	ZK 160 M2	15	2910	88	0.91	28.4	7.2	2.6	2.1	3.2	0.050
1500	ZK 132 SK2	4	1420	83	0.83	8.8	6.2	2.4	2	2.8	0.0135
	ZK 160 M4	11	1455	89	0.89	22.4	6	2.5	2.2	2.5	0.073

Een motor van 4 kW heeft een nominaal koppel van:

$$T_{nom} = \frac{P \star 9.55}{n} = \frac{4000 \star 9.55}{1420} = 26.9 \text{ Nm}$$

We berekenen de versnelling van de motor van stilstand tot nominaal toerental (1500 omw/min). Het koppeloverschot zorgt ervoor dat de transportband in versnelling wordt gebracht. Bij de frequentieregelaar gaan we uit van het 1,5 $\star$ het nominale koppel.

Tijdelijke overbelasting van regelaar en motor is nu toegestaan.

Het koppeloverschot bedraagt:

$$\Delta T = T_{1.5 \star nom} - T_{nodig} = 40.35 - 24.7 = 15.65 \text{ Nm}$$

De versnelling is ook afhankelijk van de massa traagheid van de motor en de bewegende delen.

$$t_a = \frac{J}{\Delta T} \star \frac{n_r - n_0}{9.55}$$

waarbij:

ΔT = koppelverschil
 J = massa traagheidmoment
 n_r = nominaal toerental
 n_0 = toerental bij stilstand
 t_a = aanlooptijd

bij een rechtlijnige beweging geldt:

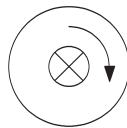
$$F = m \star a = m \star \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

waarbij:

F = kracht
 m = massa
 a = versnelling
 v = snelheid



bij roterende beweging geldt:



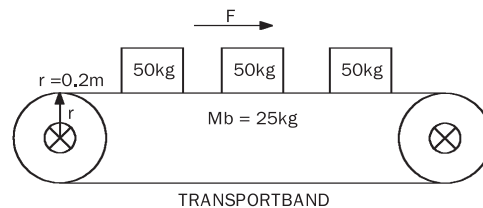
$$T = J \star \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

waarbij :

$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \text{hoeksnelheid}$
 T = koppel
 J = massa traagheid

Eerst bekijken we de invloed die J op de massa heeft direct op de rolband

$$J = m \star r^2$$



Dit moet teruggerekend worden naar de motoras, omdat we met een overbrenging te maken hebben. De overbrengingsverhouding wordt i genoemd.

De massatraagheid die op de motoras geldt (J_2) is dus afhankelijk van de i:

$$J_2 = \left\langle \frac{\omega_1}{\omega_2} \right\rangle^2 \star J_1$$

$$J_2 = \left(\frac{1}{i^2} \right) \star J_1$$

Dan berekenen we vervolgens de J (massatraagheid):

$$J = (m_{band} + m_{product}) \star r^2 \star \frac{1}{i^2} =$$

$$invullen: J = (150 + 25) \star 0.2^2 \star 0.1^2 = 0.07 \text{ kgm}^2$$

$$J_{totaal} = J_{berekend} + J_{tabel}$$

invullen:

$$J_{totaal} = 0.07 + 0.0135 = 0.0835 \text{ kgm}^2$$

De aanlooptijd is:

$$t_a = \frac{0.0835}{15.65} \star \frac{1420 - 0}{9.55} = 5.6 \text{ sec.}$$

De motor loopt in combinatie met een frequentieregelaar in 0,8 seconden aan.

Om de motor nog sneller te laten aanlopen moeten we een motor en frequentieregelaar met een groter vermogen kiezen. Het koppelverschil wordt hierdoor groter. De motor heeft een groter koppeloverschot om te versnellen.

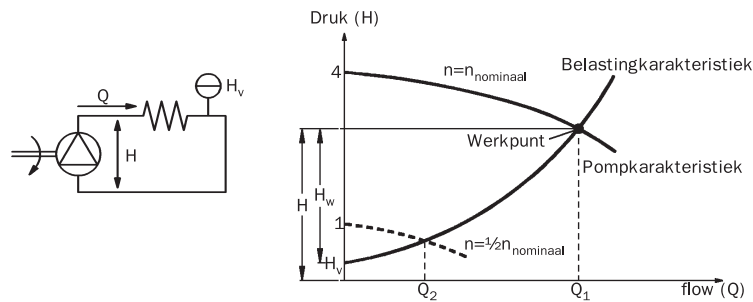
Door de acceleratietijd op de frequentieregelaar op een bepaalde waarde in te stellen kan de aanlooptijd langer worden gemaakt.

De motor loopt dan niet in 0,8 seconden aan maar bijvoorbeeld in 5 seconden.

Toepassing energiebesparing

Rekenvoorbeeld

In dit voorbeeld wordt aangegeven hoe door toerenregeling energie bespaard kan worden bij een flow-regeling met behulp van een frequentiegestuurde pomp.



afbeelding 25.4 pompregeling met voordruk

- Q = hoeveelheid doorstroming per tijdseenheid
- H = druk over de pomp
- H_v = Statische voordruk (bijvoorbeeld: drukvat)
- H_w = Wrijvingsdruk (belasting)

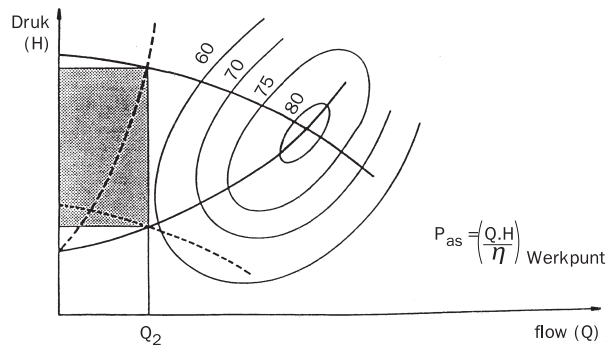
De belastingslijn van de pomp is kwadratisch.

$$H \approx n^2$$

$$Q \approx n$$

De lijn $n = n_{\text{nominiaal}}$ geeft de pompkarakteristiek bij nominaal toerental van de pomp.

De lijn $n = \frac{1}{2}n_{\text{nominiaal}}$ geeft de pompkarakteristiek bij 50% toeren van de pomp. We zien dat het werkpunt zich op de belastingslijn instelt.



afbeelding 25.5

In deze afbeelding zijn tevens de rendementen van de pomp weergegeven (ei-vormige cirkels). De gestippelde belastinglijn geldt, indien er geen toerenregeling wordt toegepast maar bijvoorbeeld een flowregeling met kleppen.

We zien dat bij de kleppen regeling een (onnodige) hoge druk wordt gehandhaafd bij dezelfde flow.

Afbeelding 25.6

Horizontaal staat de flow uitgezet, vertikaal het benodigde asvermogen van de pomp. De vermogensschaal is betrekkelijk willekeurig gekozen, we veronderstellen in dit rekenvoorbeeld, dat bij 100% toeren van de pomp het benodigde asvermogen van de pomp 100 kW bedraagt. Bij terugregeling van de flow met de regelklep neemt het asvermogen van de pomp maar weinig af, bij terugregeling van de flow met toerentalregeling neemt het asvermogen zeer snel af.

De redenen hiervoor worden kort toegelicht.

- bij flowregeling met de regelklep neemt het product ($Q \cdot H$) maar weinig af, omdat bij verder sluiten van de regelklep de druk H toeneemt
- bij flowregeling met toerentalregeling neemt het product ($Q \cdot H$) snel af, omdat bij terugregeling van het toerental de druk H snel afneemt.

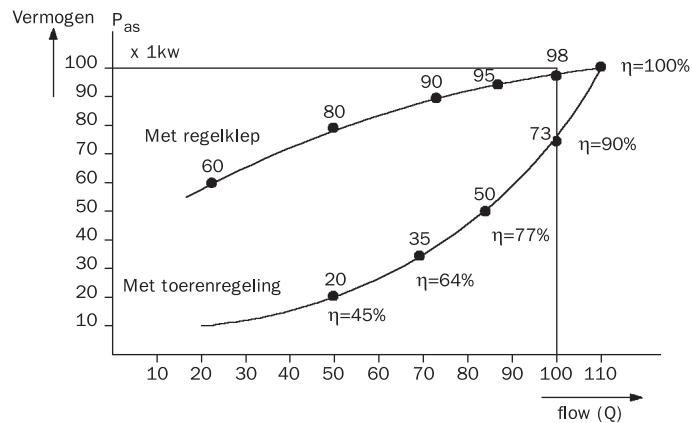
Zeer opvallend is, dat in nominale situatie (100% flow) het verschil in benodigd asvermogen reeds 25% bedraagt!

De oorzaak is de lichte overdimensionering van de pomp, de veronderstellingen ten aanzien van deze dimensioneringen zijn echter zeer reëel!

Om nu de energiebesparingen op jaarbasis te kunnen bepalen, is het nog nodig te weten welke bedrijfspunten hoeveel uur per jaar zullen voorkomen. We zullen dit onderwerp verder uitwerken, waarbij we uitgaan van een pompproces in continu bedrijf.

Laten we stellen dat per jaar 7000 bedrijfsuren gemaakt worden (één jaar is 8760 uur). Voorts veronderstellen we, dat 2000 uur per jaar de nominale flow geleverd moet worden, 3000 uur 85%, 1000 uur 70% en 1000 uur 50%.

De benodigde pompasvermogens zijn bekend (zie afbeelding 25.6).



afbeelding 25.6

Om nu de elektrische opgenomen vermogens in de beide situaties te kunnen bepalen, dienen nog de rendementen van de aandrijvingen in de berekeningen betrokken te worden.

Bij de smookklepregeling gaan we uit van aandrijvingen door middel van een draaistroom kortsluitankermotor met een verondersteld rendement van 94% over het gehele vermogensgebied van 100 kW tot 80 kW.

Bij de flowregeling door middel van de regelbare aandrijving moeten we met een lager rendement rekenen.

Dit alles is gedaan in de onderstaande tabel.

		control valve				adjustable drive			
Q	hours/year	Pa (kW)	η	Pe (kW)	kWh x 100	Pa (kW)	η	Pe (kW)	kWh x 1000
100%	2000	100	0,94	106	212	73	0,90	81	162
85%	3000	95	0,94	101	303	50	0,86	58	174
70%	1000	90	0,94	96	96	35	0,80	44	44
50%	1000	80	0,94	85	85	20	0,70	28	28
	7000				696				408

We zien de vier veronderstelde bedrijfspunten van 100%, 85%, 70% en 50% onder elkaar genoemd, met de bijbehorende pomp-asvermogens bij smoorklepregeling.

Dit gedeeld door het rendement van de draaistroomkortsluitanker-motor geeft de opgenomen elektrische vermogens.

Vermenigvuldigd met het aantal bedrijfsuren levert dit het aantal kWh.

Opgeteld per jaar betekent dit 696 MWh.

In het geval van de regelbare aandrijving is de rekensom precies zo gemaakt.

De benodigde mechanische vermogens zijn aanmerkelijke kleiner, echter het rendement van de regelbare aandrijving is lager dan dat van een ééntoerental aandrijving.

De veronderstelde rendementen zijn in de tabel weergegeven. De benodigde elektrische vermogens worden ook vermenigvuldigd met het aantal bedrijfsuren. Opgeteld per jaar betekent dit 408 MWh.

De besparing in dit voorbeeld bedraagt dus $696 - 408 = 288$ MWh!!!

In procenten uitgedrukt betekent dit $288/696 \star 100\% = 41\%$

De kostenbesparing is bepaald, wanneer de bespaarde kW-uren kunnen worden ingevuld in het aansluitcontact met het stroomleverende bedrijf. De rekening van het stroomleverende bedrijf bestaat in het algemeen uit een energiedeel en een vastrechtdeel. Op het energiedeel wordt bespaard, wanneer minder kW-uren worden verbruikt.

Bij de oplossing met de toerental geregelde pomp kan de regelklep vervallen!

Daartegenover staat, dat apparatuur voor het regelen van de pomp aangeschaft en opgesteld moet worden.

Index

A

- aanloopgebied 19
- aanloopkoppel 19
- aanloopmethoden
 - direct 23
 - ster/driehoek 24,14
 - frequentieregelde 25
- acceleren 3
- afhankelijkheid van poolparen 7
- asynchrone motor 1
 - opbouw 1
 - belasten motor 20
 - principe werking 2

B

- bedrijfsgebieden motoren 33
- belastingsaard en rekenvoorbeelden 109
 - constant koppel 109
 - toepassing energiebesp. 114
- beschermingsgraad 16
- blindstroom 34
- blindstroomcompensatie 40
- boost (zie I*R-compensatie)
- bouwworm 16

C

- cirkelvormig fluxbeeld 81
- contra-gewicht 36
- condensatorbatterij (zie tussenkring)
- constant koppel (zie belastingsaard)
- cos ϕ 16, 40, 110

D

- dieselmotor 33
- digital Signal Processor 83
- directe regeling 84
- direct op net geschakelde motor (zie aanlopen motoren)
- diode 69
- draairichting as 35
- draaiveld 2
- draaiveldtoerental 2

- driehoekschakeling 14
- DSP 84

E

- eigenschappen motoren 9
 - koppel 9
 - vermogen 9
 - toerental 10
- energie 69
 - energie besparing 115
 - elektrische energie 1
 - mechanische energie 1
 - terugleveren aan net 69
- elektrisch actief vermogen 15
- explosievrije motoren 40

F

- fabrieksnaam 13
- fabriekstype nummer (zie typenummer)
- fabricagenummer (zie typenummer)
- fase verschuiving 16
- flexibel 39
- flowregeling 115
- fluxregeling 85,87
- fluxvector 77,81,83
 - fluxgrootte (zie vectormodulatie)
 - fluxrichting (zie vectormodulatie)
- frequentieomvormer (zie frequentieregelaar)
- frequentieregelaar
 - blokschema 41
 - principe werking 42
 - principe 47
 - sinusvormige stroom 43,75
- frequentieregelde aanloop (zie aanloopmethode)
- frequentieregelde motor (zie regelgebieden motor)
- frequentie variëren (zie magnetisch veld)

G

geforceerde koeling 93
gelijkrichter 42
generator bedrijf 37,69

- linksom (zie vierkwadrantenbedrijf)
- oversynchroonbedrijf 34
- rechtsom (zie vierkwadranten bedrijf)

GTO (zie invertorschakelaar)

H

hoeksnelheid 10

I

IEC-norm (zie beschermingsgraad)
ingangsdioden (zie diode)
IGBT (zie inverterschakelaar)
inductie 1
inductiestroom 3
inverter 43
inverterschakelaar 43,78

- IGBT 45
- MOSFET 44
- Thyristor 44
- Transistor (bipolair) 44

ingaandvermogen (zie rendement)
IP (international protection) 16
I*R-compensatie 61

- praktische instelling 64
- ohmse weerstand 61
- wisselstroomweerstand 61
- toepassing 64

isolatieklasse 15

J

juiste motorvermogen bij werktuig 27

K

kipkoppel (zie koppel/toeren-kromme)
koppel

- extreme hoge startkoppels 103
- definitie 9
- hoge pulserende koppels 104
- vreemde koppels 104
- startkoppel (zie I*R-compensatie)

koppeloverschot (zie koppel/toeren-kromme)
koppelregeling 86,88
koppelresponsietijd 84
koppel/toeren-kromme 19

- aanloopgebied/labielgebied 20
- aanloopkoppel 19
- kipkoppel/maximale koppel 17
- koppeloverschot 20
- kwadratische afname (zie veldverzwakking)
- lostrekkoppel 19

- werkgebied/stabielgebied 20

kortsluitankermotor (opbouw) 2
krachtbron 1
kwadratisch koppel (zie belastingsaard)

L

labielgebied (zie koppel/toeren-kromme)
lift 34
lostrekkoppel 20
luchtspleet 2
lijnsparing 12

M

magnetische verzadiging (zie I*R-compensatie)

- spanning variëren 48

mate van bescherming (zie beschermingsgraad)
magnetisch veld 47,48

- opwekking 4
- frequentie variëren 49
- spanning variëren 48
- spanning en frequentie variëren 49

magnetisering stroom (zie blindstroom)
massatraagheid 113
maximale koppel (zie koppel/toeren-kromme)
maximale toelaatbare koppel 93
minimum geluid 45
modulatiegeluid 45
motor

- belasten 20,65
- energieomzetting 1
- keuze pooltal 7
- motor 58Hz 57
- motor 70Hz 58

motorbedrijf 37

- linksom (zie vierkwadranten bedrijf)
- rechtsom (zie vierkwadranten bedrijf)

motorbelasting en koeling 95
motorkoppel (zie koppel)
motormodel 86
motorplaatje 13
MOSFET (zie inverterschakelaar)
move 81

N

neutraal bedrijf (zie vierkwadrantenbedrijf)
nullasttoerental 19

O

ohmse weerstand (zie $I \cdot R$ -compensatie)
 ondergemagnetiseerd 52
 - onderspanning 52
 oversynchroon bedrijf (zie generatorbedrijf)
 - voor- en nadelen 105
 - rekenvoorbeeld 106
 overschakelpiek 19
 onderspanning (zie ondergemagnetiseerd)
 overbelasting ($I \cdot t$) 100

P

parallel bedrijf 97
 pooltal motor (zie motor)
 prestaties van motor (zie eigenschappen motor)
 puls breedte modulatie
 (zie puls width modulation)
 pulserende schakelaar (zie remunit)
 puls width modulation 75
 - sinusvormige stroom 40,75

R

regelgebieden 37
 - gelijkstroombmotor 39
 - frequentiegeregelde motor 39
 - 0 t/m 50Hz 91
 - groter dan 50Hz 91
 - servomotor 39
 remenergie 34,71
 rembedrijf 69
 - langdurig 71
 - kortstondig 70
 - gelijkstroombremmen 73
 remmend koppel 34
 remunit 71
 - pulserende schakelaar 71
 - vermogensweerstand 71
 remweerstand (zie remunit)
 rendement 101
 - ingaand vermogen 101
 - uitgaand vermogen 101
 rotor 1
 rotordraaiveld (rotortoerental)
 rotortoerental 3

S

schakelverliezen 80
 sensoren 84
 slipcorrectie 65
 - nominale slip 65
 - rekenvoorbeeld 66
 - temperatuur motor 65
 - instelling 67
 sinus φ 110,111

sinusvormige stroom (zie frequentieregelaar of PWM)
 SMPS 46
 softstarter (zie regelgebieden)
 soort motor 13
 spanning/frequentie-verhouding 49,55,57,62
 spanningsbegrenzing 70
 spanningsvectoren 85
 spanningsverloop 19
 - softstarter 25
 - ster/driehoek 24
 spanning variëren (zie magnetisch veld)
 spoelspanning 14
 spoelbenaming
 - spoel U1,U2 5,6
 - spoel V1,V2 5,6
 - spoel W1,W2 5,6
 stabiel gebied (zie koppel/toeren-kromme)
 startcompensatie (zie $I \cdot R$ -compensatie)
 stator 1
 statortoerental 3
 statordraaiveld 3
 sterschakeling (zie aanloopmethode)
 stops 81
 stroom
 te verwachten stroom 104
 uitgangstroom 104
 stroombegrenzing 99

T

toerental 10,15
 type plaatje (zie motorplaatje)
 typenummer motor 13
 thyristor (zie inverterschakelaar)
 tussenkring 71
 - condensatorbatterij 70
 tussenkringspanning 70

U

U/f-grafiek 50,51
 U/f-waarde 49,52
 - verhoging U/f-waarde 52
 - verlaging U/f-waarde 52
 - juiste instelling U/f-waarde (zie veldverzwakking)
 uitgaandvermogen (zie rendement)
 uitgangstroom (zie stroom)

V

- vectormodulatie 77
 - absolute grootte 77
 - cirkelvormig fluxbeeld 77
 - fluxgrootte 80
 - gemiddelde hoeksnelheid 77
 - ronddraaiende vector 77
 - variatie hoeksnelheid 77
- vectormodulatoren 83
- veldgeoriënteerde regeling 83
- veldverzwakking 55
 - constant asvermogen 59
 - juiste instelling U/f-waarde 56
 - afname koppel 56
- verandering spanning/frequentie-verhouding 52
 - spanning/frequentie omhoog 52
 - spanning/frequentie omlaag 52
- verhoudingsgetal
- kipkoppel/nominale koppel 25,27
- vermogensweerstand (zie remunit)
- verliezen 1
 - luchtspleet 1
 - wrijving 1
- vermogen
 - asvermogen 15
 - definitie 16
 - constant (as)vermogen (zie veldverzwakkingsgebied)
 - toegevoerde vermogen 1
- vier kwadrantenbedrijf 33
 - generatorbedrijf 33,34,35,36
 - liftproces 36
 - motorbedrijf 33,34,35
 - neutraalbedrijf 33,38
- volt per hertz-grafiek (zie U/f-grafiek)

W

- werkgebied (zie koppel/toeren-kromme)
- werkpunt 20
- werktuigkoppel 20
- wisselstroomweerstand (zie $I \cdot R$ -compensatie)

Z

- zadelkoppel (zie koppel/toeren-kromme)
- zelfinductie 61