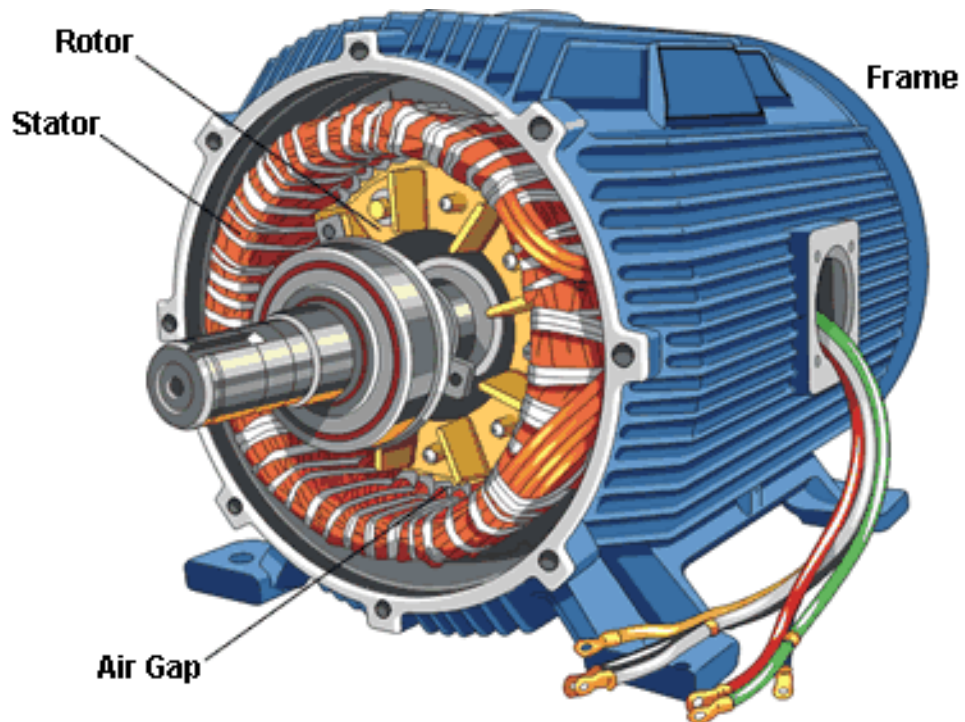
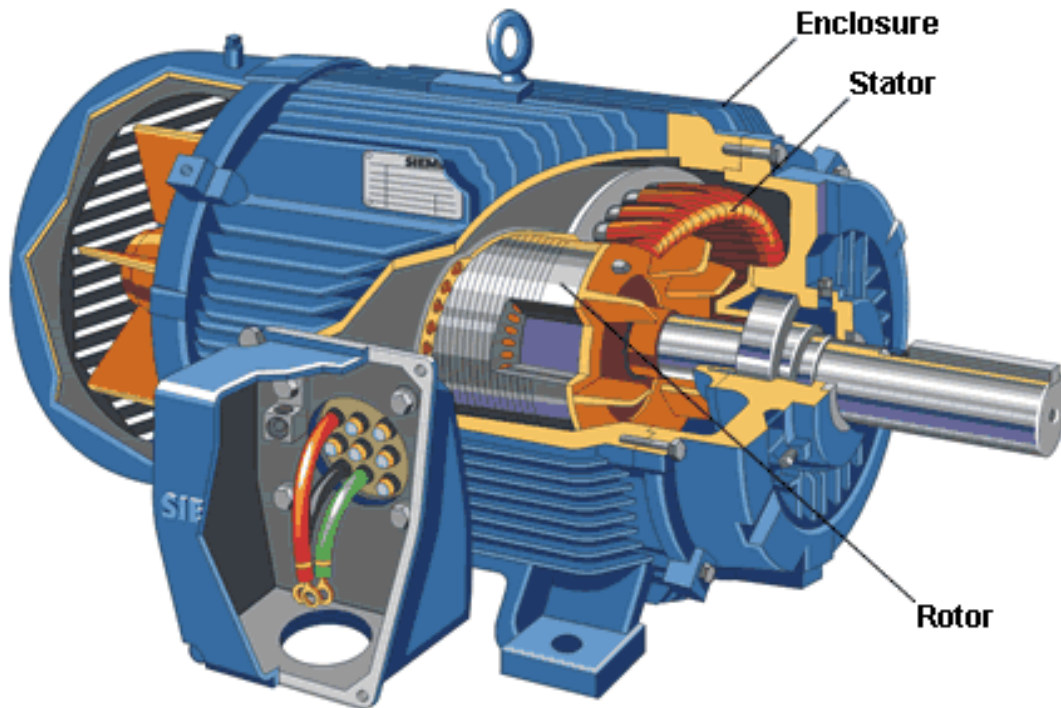


Asynchrone motoren (inductiemotor)



1. Inleiding

In het vorige hoofdstuk hebben we de synchrone motor bestudeerd welke is afgebeeld op onderstaande tekening:



Deze motor had enkele praktische beperkingen: hij start niet vanzelf, kan uit de pas vallen bij een bruusk sterk veranderende belasting en er is een extra gelijkspanning nodig om de rotor te bekrachtigen. Dit maakt dat de synchrone motor slechts in een aantal specifieke gevallen toegepast wordt.

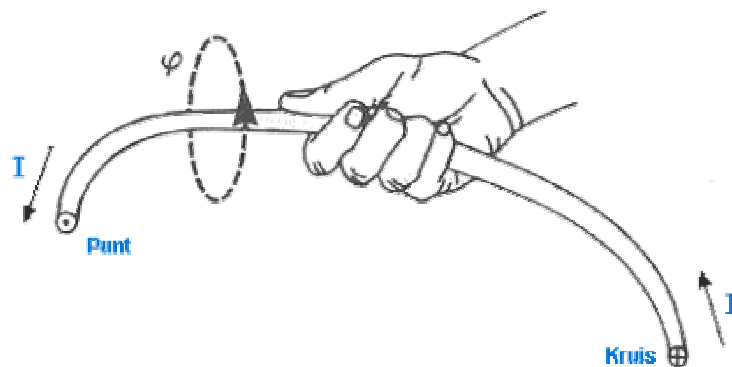
Een alternatief voor de synchrone motor is de asynchrone motor. Deze motor is buitengewoon interessant voor industrieel gebruik: hij is gestandaardiseerd, robuust en vereist weinig onderhoud. Bovendien is hij bedrijfszeker en niet duur.

2. Draaiveld opwekken

- a) Door aansluiten van een driefasespanning ($L1/L2/L3$) op de 3 wikkelingen ($U1-U2/V1-V2/W1-W2$) in de stator zal er een driefase stroom vloeien in deze wikkelingen.

We onderstellen dat een fasestroom binnendringend is (kruisje) in de geleiders van de eerste spoelzijde (bijvoorbeeld $U1$) van de betreffende fasespoel als deze stroom positief getekend is in de sinusoidale voorstelling.

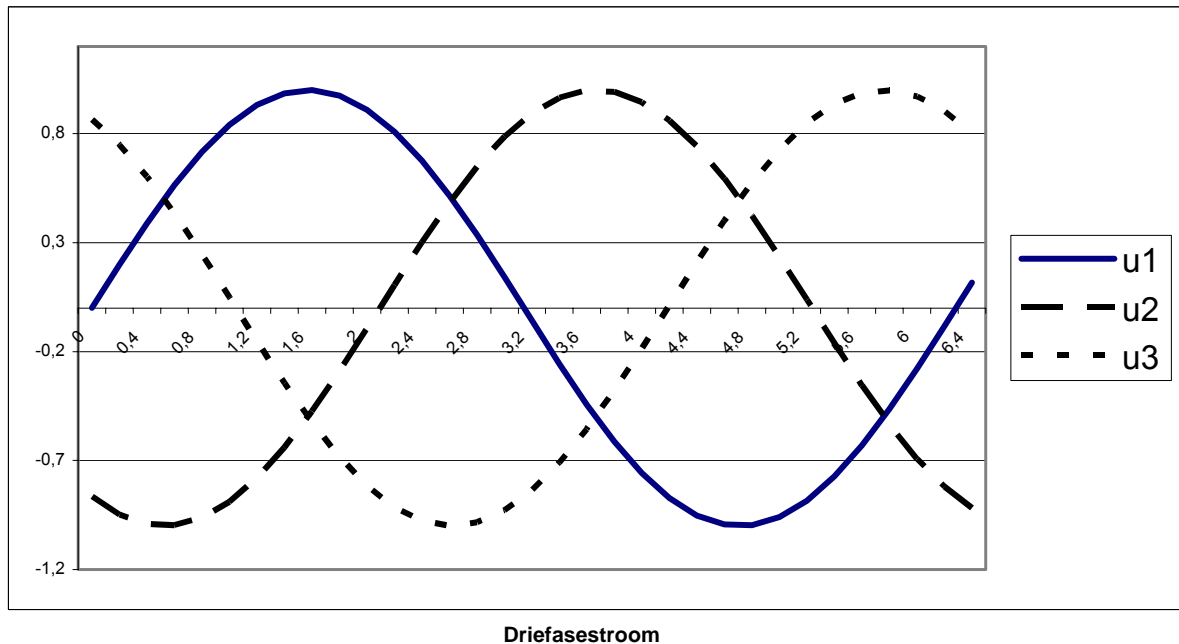
- b) Wanneer we de stromen aangeduid hebben op de tekening kunnen we met behulp van de rechterhandgreep de veldlijnen tekenen rond de geleiders: we nemen de geleider vast met de duim in de richting van de stroom, dan is de richting van de vingers de richting van de veldlijnen.



Rechterhandgreep

- c) De veldlijnen rond al de geleiders zorgen voor een magnetisch veld met $2p$ polen. Dit magnetisch veld draait rond (daarom noemen we dit een draaiveld) met een rotatiefrequentie

$$n_s = \frac{f}{p}. \text{ De sterkte van dit magnetisch veld (flux) is steeds even groot.}$$

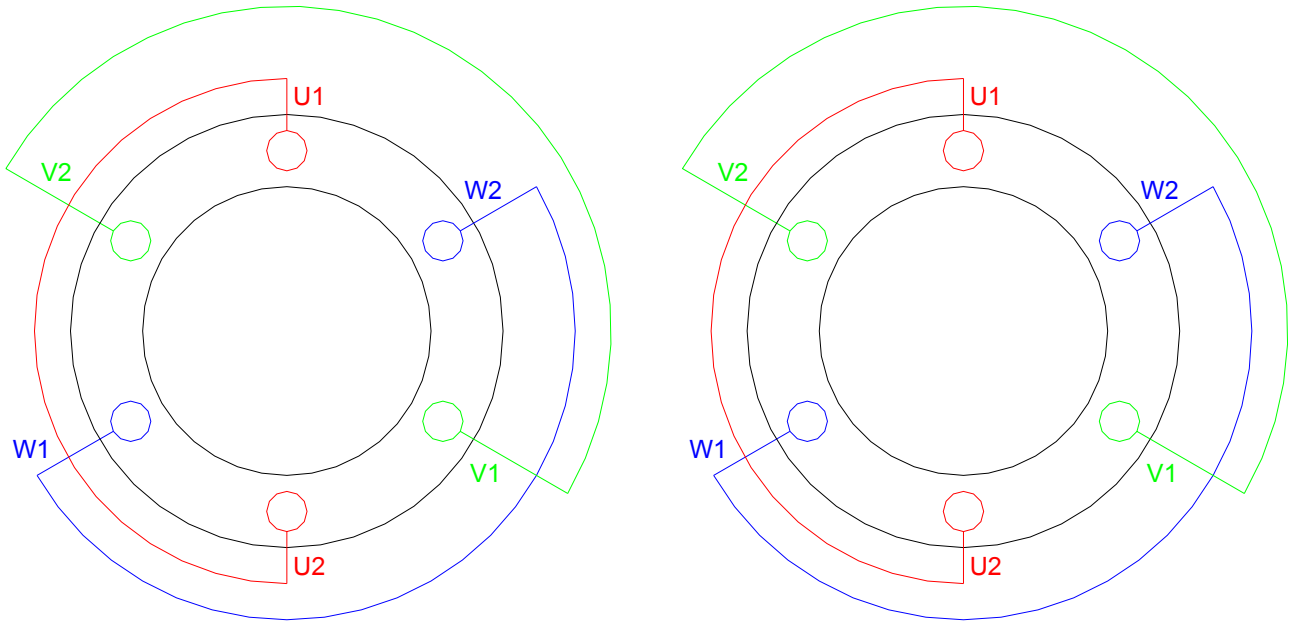


2.1. Tweepolig draaiveld opwekken

In de volgende tekening is de stator getekend met de 3 statorwikkelingen (fasen). Elke wikkeling bestaat uit 1 spoelengroep. Wanneer we op deze machine een driefasespanning aansluiten zal er een tweepolig magnetisch veld (dit is één noord en één zuid) worden opgewekt. Dit draaiveld draait rond met een rotatiefrequentie van tr/min. Teken in onderstaande tekening hoe het draaiveld gericht is op 2 verschillende ogenblikken.

Opmerking:

- De hoek tussen het begin en het einde van een spoel, dus tussen U_1 en U_2 is $180/p^\circ$, dus hier $180/1=180^\circ$.
- De hoek tussen het begin van de verschillende spoelen is $120/p^\circ$, dus hier ligt V_1 $120/1^\circ$ verder dan U_1

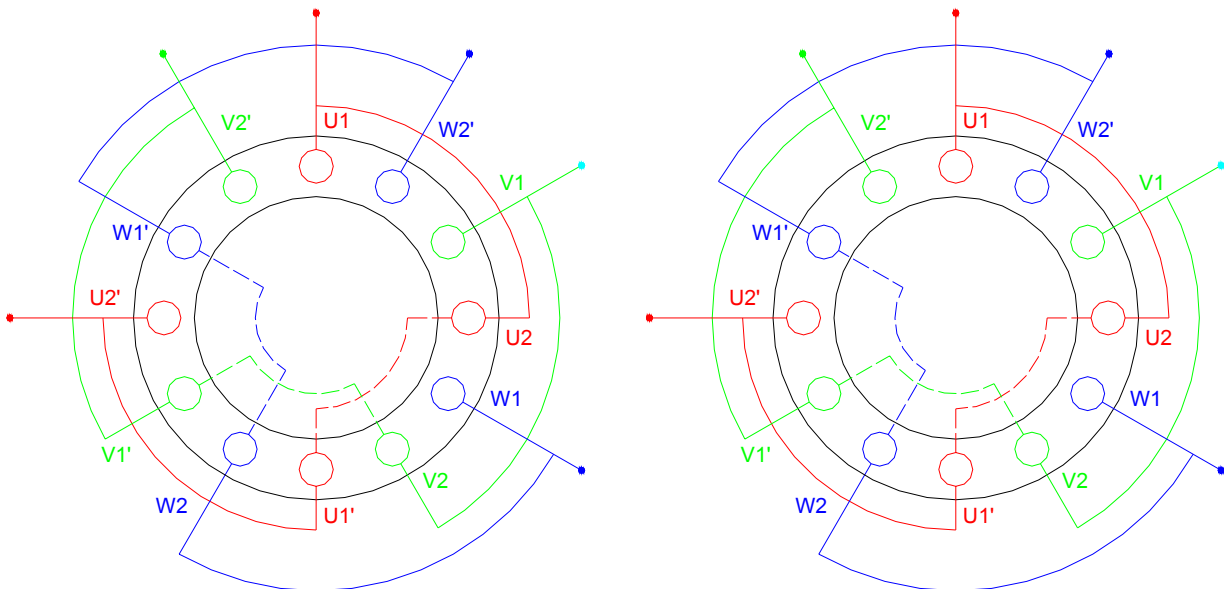


2-polig draaiveld

2.2. Vierpolig draaiveld opwekken

Op de volgende tekening is een stator getekend waarin de spoelen anders zijn aangebracht: elke wikkeling bestaat uit 2 spoelengroepen, waardoor er een 4-polig magnetisch veld wordt opgewekt. Dit draaiveld draait rond met een rotatiefrequentie van tr/min.

De hoek tussen het begin en het einde van één spoel van een fase is hier $180/p^\circ$, dus $^\circ$.
De hoek tussen het begin van de verschillende fasen is hier $120/p^\circ$, dus $^\circ$.

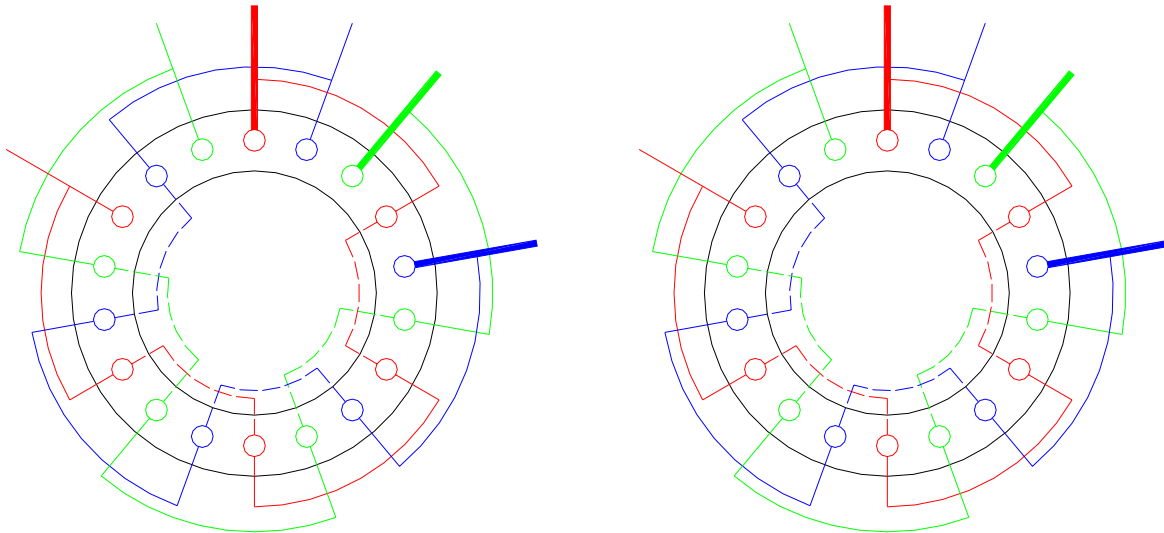


4-polig draaiveld

2.3. Zespolig draaiveld opwekken

Tot slot nog een stator met 3 spoelengroepen per fase, waarbij een 6-polig magnetisch veld wordt opgewekt. De rotatiefrequentie van het draaiveld wordt dan tr/min.

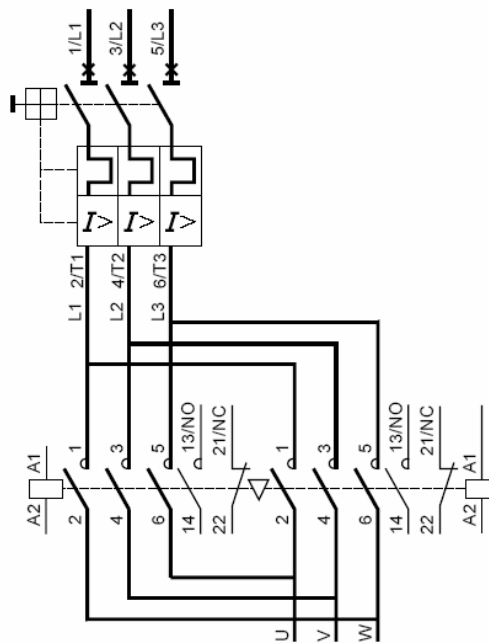
De hoek tussen het begin en het einde van één spoel van een fase is hier $180/p^\circ$, dus $^\circ$.
 De hoek tussen het begin van de verschillende fasen is hier $120/p^\circ$, dus $^\circ$.



6-polig draaiveld

Opmerking:

- ✓ We kunnen de draaizin van het draaiveld (en dus ook van de motor) omkeren door 2 van de 3 toevoerdraden om te wisselen. Dit kan bijvoorbeeld met 2 contactoren: slechts één van de 2 contactoren wordt bekrachtigd.



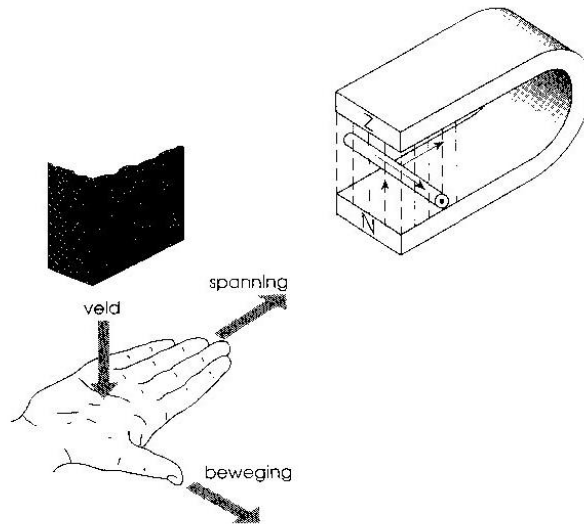
Opgave: Teken de stuurkring van deze omkeerschakeling

3. Principewerking

- a) Door een driefasespanning aan te sluiten op de 3 fasen van een motor ontstaat er een draaiveld.

Dit draaiveld heeft een rotatiefrequentie $n_s = \frac{f}{p}$.

- b) De rotorleiders worden gesneden door de veldlijnen van dit draaiveld, waardoor er daarin een inductiespanning (vandaar ook de naam inductiemotor) wordt opgewekt, welke we kunnen zoeken met de rechterhandregel: veldlijnen in de rechterhandpalm, duim volgens (schijnbare) beweging, dan duiden de vingers de zin van de spanning aan.

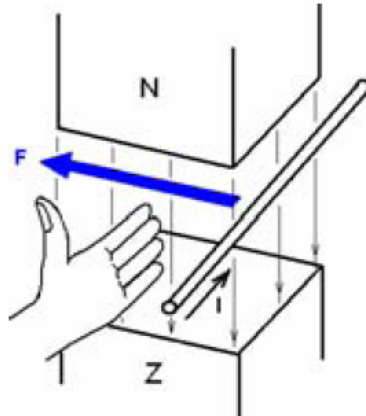


Rechterhandregel

- c) Omdat de rotorleiders een gesloten keten vormen zullen er inductiestromen vloeien in de rotorleiders. Die kortgesloten keten bestaat bij de kooirotor uit staven die kortgesloten zijn door 2 ringen, bij een sleepringankermotor is dat de driefasewikkeling die aangesloten is op een aanloopinrichting.
- d) Zo ontstaan stroomvoerende geleiders in een magnetisch veld. Hierop ontstaan er Lorentzkrachten. De zin van deze kracht kunnen we zoeken met de linkerhandregel: de veldlijnen in de handpalm, de vingers volgens de stroom, dan is de richting waarin de duim wijst de richting van de Lorentzkracht.



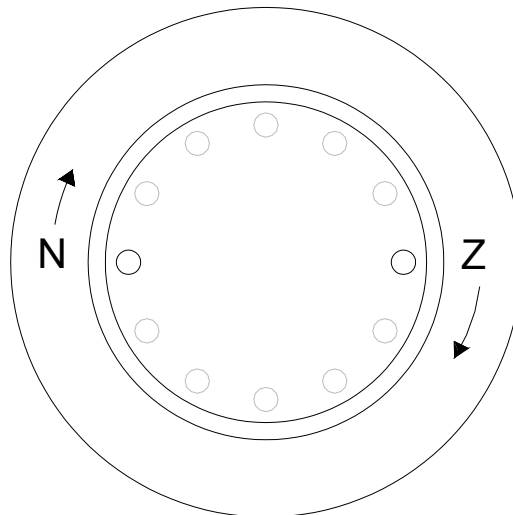
Opmerking:
Hendrik Antoon Lorentz: geboren op 18 juli 1853 in Arnhem was één van Nederlands grootste wis- en natuurkundigen.



Linkerhandregel

e) De resulterende lorentzkrachten vormen een koppel dat de rotor doet ronddraaien in de zin van het draaiveld.

Pas deze regels toe op onderstaande tekening, om zo de draaizin te zoeken van deze motor.



De rotor kan nooit het synchrone toerental bereiken, omdat er dan geen veldlijnen meer worden gesneden. Dus is het noodzakelijk dat de rotor trager draait dan het draaiveld: men zegt dat de motor asynchroon draait.

Voorbeeld : bij een 2-polige asynchrone motor draait het draaiveld rond met een rotatiefrequentie van 3000 tr/min, maar de rotor zelf zal slechts ronddraaien aan 2900 tr/min. De rotor geleiders worden dan gesneden door de veldlijnen met een toerental gelijk aan 100 tr/min.

Opmerking:

- ✓ De werking van een inductiemotor is te vergelijken met de werking van een transformator: de statorwikkeling waaraan het net wordt aangesloten is te beschouwen als de primaire. De rotor geleiders waarin een spanning wordt opgewekt is dan de secundaire van de transfo.
- ✓ De rotor heeft dezelfde draaizin als het draaiveld.

4. Samenstelling

4.1. Kooiankermotor (kortsluitmotor)



❖ Voordelen:

- Eenvoudig
- goedkoop

❖ Nadelen:

- Geen groot aanzetkoppel
- Grote aanloopstroom

4.1.1. Stator

Dit is het onbeweeglijke deel van de motor. Hij bestaat uit het statorhuis, waarin een ijzeren kern (statorblikpakket) wordt geperst.

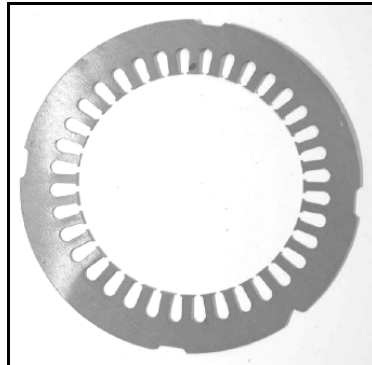
- **Statorhuis:** het huis van kleine machines bestaat uit aluminium spuitgietwerk, voor grotere motoren wordt gietijzer gebruikt, voorzien van koelribben (om het koeloppervlakte te vergroten)



Statorhuis

- **Statorkern met statorwikkelingen**

Het statorblikpakket (of statorkern) bestaat uit dunne lamellen die ten opzichte van elkaar geïsoleerd zijn door een laagje vernis om zo de wervelstromen te beperken.

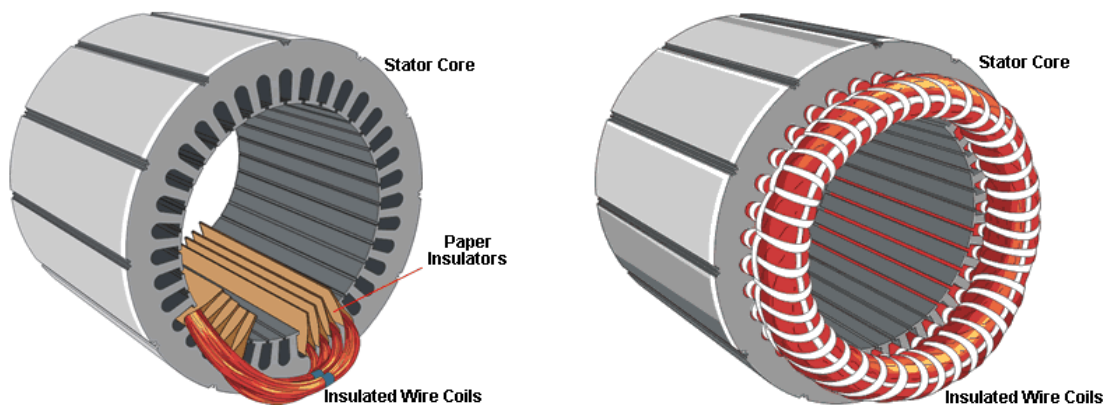


Lamel van stator

De statorkern mag niet geïsoleerd zijn ten opzichte van het statorhuis omdat de warmte dan moeilijker wordt afgegeven aan de koelribben en omdat deze door het trillen van de statorkern toch vlug zou beschadigd worden.

De stator is aan de binnenzijde voorzien van gleuven waarin 3 wikkelingen zijn aangebracht. Elke fasewikkeling bestaat uit een aantal spoelen, die vooraf op mallen of vormen worden gewikkeld uit geïsoleerde koperen geleiders (draadgeleiders of staafgeleiders). De spoelen worden voorzien van een isolerende mantel.

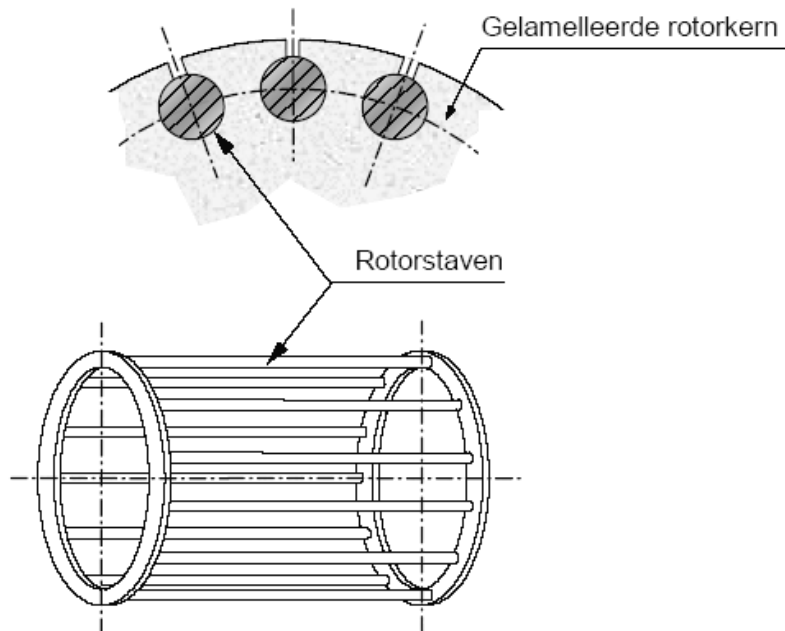
Elke spoel bestaat uit meerdere windingen. In iedere spoel onderscheiden we 2 spoelzijden en 2 spoelkoppen. De spoelzijden omvatten alle werkzame of actieve geleiders van alle windingen waaruit een spoel is opgebouwd. Het begin en het einde van een spoel zijn de uitlopers. Een winding bestaat uit 2 geleiders.



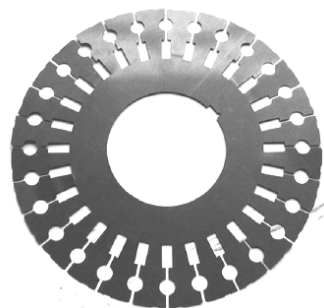
Statorblikpakket met gleuven en statorwikkelingen



4.1.2. Kooirotor



Net als de stator is ook de rotor opgebouwd uit dunne ijzeren lamellen met gleuven die op de as worden geperst.



Lamel van rotor

De rotor van een kortsluitmotor heeft in de gleuven ronde, ovale of trapeziumvormige staafjes (koper of aluminium). Deze staafjes zijn aan beide uiteinden van de rotor met behulp van een aluminium kortsluitring met elkaar verbonden. De kooirotor kan ook vervaardigd worden met een spuitgietconstructie zoals in onderstaande figuren.



Kooirotor

4.1.3. Klemmenkast met klemmenbord

Bij de asynchrone motor is iedere fasewikkeling ontworpen voor een bepaalde fasespanning. Afhankelijk van de grootte van de lijnspanning van het net, worden de statorwikkelingen in ster of in driehoek geschakeld in de klemmenkast.

Op het kenplaatje van de motor worden steeds 2 spanningen aangegeven die t.o.v. elkaar een verhouding hebben die gelijk is aan $\sqrt{3}$ (bijvoorbeeld 230/400) : de kleinste spanning (bvb. 230 V) is de waarde die over de fase van een motor moet staan.

Dus wanneer de spanning van het net gelijk is aan de kleinste waarde op het kenplaatje, plaatsen we de motor in driehoek.

Is de spanning van het net gelijk aan de grootste (bvb 400 V) waarde op het kenplaatje, dan schakel je de motor in ster. Er komt dan immers een spanning over elke wikkeling te staan die gelijk is aan de kleinste waarde.

Dit alles maakt het mogelijk dat een bepaalde motor op 2 soorten netten kan werken.

Standaardmotoren hebben een klemmenbord voor 6 klemmen. Als de motor rechtstreeks van het net L1, L2 en L3 wordt gevoed op U1, V1 en W1, draait de motor in wijzerzin, gezien voor het D-asuiteinde.

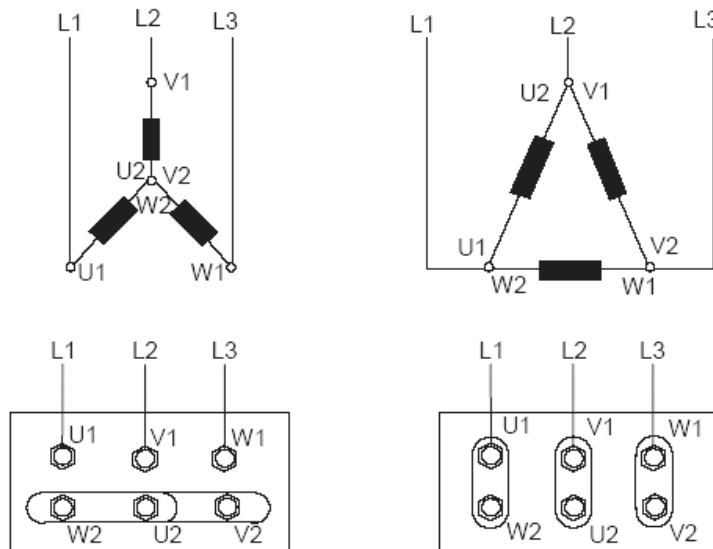
Opmerking:

Voor het vaststellen van de draaizin bestaan ook afspraken: men definieert de 2 uiteinden van de motor als volgt:

- D-uiteinde: is het actieve asuiteinde, waarop men de belasting aansluit
- N-uiteinde is het niet-actieve asuiteinde. Dit is meestal de ventilatorzijde.

Om de draaizin te bepalen kijken we op het D-uiteinde. Draait de motor in wijzerzin, dan draait de motor rechts, in tegenwijzerzin links.

Zoals blijkt uit onderstaande figuur liggen het eind-en beginpunt van een wikkeling (bijvoorbeeld U1 en U2) niet onder elkaar op het klemmenbord. Dit is om schakeltechnische redenen : om de motor in ster te schakelen moeten we een horizontale verbinding maken, voor driehoek verticale verbindingen. In de klemmenkast is eveneens een massaklem aanwezig. Deze bevindt zich meestal op een verhoging binnenin de klemmenkast.



4.1.4. Kenplaatje

LN		D Mot. Nr.	
Δ/Y 230/400 V	1,65 / 0,95 A		
0,37 kW	$\cos\varphi$ 0,80		
2800	min^{-1}	50 Hz	
UErr.	V	IErr.	A
Is.Kl. F	IP 20	CA	CB
Typ	SE 2662-3H	VDE 0530	

LN		D Mot. Nr.	
Δ 380 V	0,85 A		
0,3 kW	$\cos\varphi$ 0,84		
2800	min^{-1}	50 Hz	
UErr.	V	IErr.	A
Is.Kl. F	IP 20	CA	CB
Typ	SE 2662-3G	VDE 0530	

Elektrische motoren zijn altijd voorzien van kenplaatje of typeplaatje met daarop de volgende gegevens:

- ✓ Naam van de constructeur: → LN: luccas-nülle
- ✓ Soort machine → AC of DC / 1-fasig of 3-fasig
- ✓ Typenummer: → SE 2662-3H
- ✓ Nominale spanning: → ΔY 230/400 V of $\Delta 380$ V (is eigenlijk ΔY 400/690 V)
- ✓ Nominale stroom: → 1,65 in driehoek / 0,95 A in ster
- ✓ Nominaal vermogen: → 0,37 kW

Maximaal asvermogen of nuttig vermogen dat de motor kan leveren.

Het afgegeven vermogen van motoren werd vroeger in paardenkracht (pk) uitgedrukt. Komt u die eenheid nog ergens tegen dan geldt de volgende omrekeningsformule: 1 pk = 0,736 kW.

Het rendement η van de motor wordt bepaald door de verhouding tussen het nominaal vermogen en het toegevoerde elektrisch vermogen:

$$\eta = \frac{P_{\text{kenplaatje}}}{\sqrt{3} \times U_{\text{lijn}} \times I_{\text{lijn}} \times \cos \varphi}$$






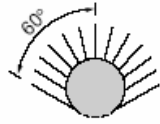
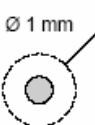

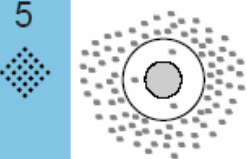
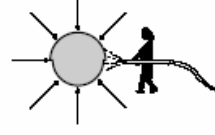
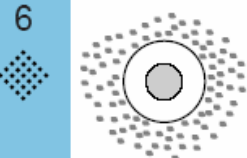
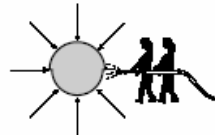
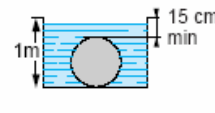
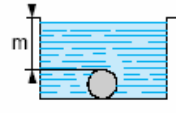
- ✓ Nominaal toerental: → 2800 min^{-1}
Dit is het toerental van de motor bij nominale spanning, nominale frequentie en nominale belasting.
- ✓ Arbeidsfactor ($\cos \varphi$): → $0,80$
Dit is de verhouding tussen het effectief vermogen P en het schijnbaar vermogen S.
- ✓ Nominale frequentie: → 50 Hz
- ✓ Beschermingsgraad: → $IP20$
Deze beschermingscode van de motor geeft de mate van bescherming aan tegen binnendringen van vloeistoffen en vaste voorwerpen.
De code bestaat uit de letters IP (index of protection) en twee cijfers (soms drie: schokvastheid).

Het eerste cijfer geeft de graad van mechanische bescherming weer van personen tegen contact met bewegende of onder spanning staande delen van de motor en de beschermingsgraad van de motor tegen indringing van vaste, vreemde lichamen. Het varieert van 0 tot 6.

Het tweede cijfer, variërend van 0 tot 8, geeft de graad van bescherming aan tegen het binnendringen van vocht.

1er karakteristiek cijfer: dit correspondeert met een bescherming van het materiaal tegen binnendringing door vreemde vaste lichamen en met een bescherming van personen tegen bereikbaarheid van gevaarlijke onderdelen.

2e karakteristieke cijfer: dit correspondeert met een bescherming van het materiaal tegen binnendringing van water met schadelijke gevolgen.

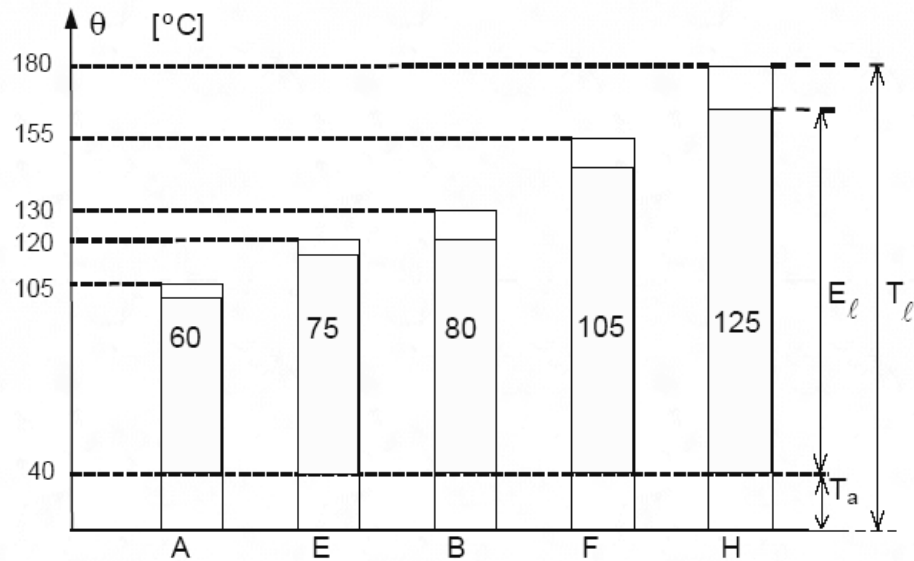
	Bescherming van het materiaal	Bescherming van personen		Bescherming van het materiaal	Bescherming van personen
0	Geen bescherming	Geen bescherming	0	Geen bescherming	
1	 <p>Ø 50 mm</p> <p>Bescherming tegen binnendringing van vaste lichamen met een diameter groter of gelijk aan 50 mm.</p>	<p>Bescherming tegen bereikbaarheid met de rug van de hand of onbedoelde contacten).</p>	1	 <p>Bescherming tegen verticale val van waterdruppels (condensatie).</p>	
2	 <p>Ø 12,5 mm</p> <p>Bescherming tegen binnendringing van vaste lichamen met een diameter groter of gelijk aan 12,5 mm.</p>	<p>Bescherming tegen bereikbaarheid met een vinger van de hand.</p>	2	 <p>Bescherming tegen val van waterdruppels onder een hoek van ten hoogste 15°.</p>	
3	 <p>Ø 2,5 mm</p> <p>Bescherming tegen binnendringing van vaste lichamen met een diameter groter of gelijk aan 2,5 mm.</p>	<p>Bescherming tegen bereikbaarheid met een gereedschap van Ø 2,5 mm.</p>	3	 <p>Bescherming tegen wateren regen onder een hoek van ten hoogste 60°.</p>	
4	 <p>Ø 1 mm</p> <p>Bescherming tegen binnendringing van vaste lichamen met een diameter groter dan 1 mm.</p>	<p>Bescherming tegen bereikbaarheid met een draad van Ø 1 mm.</p>	4	 <p>Bescherming tegen binnendringen van water uit alle richtingen.</p>	
5	 <p>Bescherming tegen stof (geen schadelijke neerslag).</p>	<p>Bescherming tegen bereikbaarheid met een draad van Ø 1 mm.</p>	5	 <p>Bescherming tegen hogedruk-waterstralen uit alle richtingen.</p>	
6	 <p>Volledig beschermd tegen stof (waterdicht).</p>	<p>Bescherming tegen bereikbaarheid met een draad van Ø 1 mm.</p>	6	 <p>Bescherming tegen omvangrijke hogedruk-waterstralen, vergelijkbaar met zegelolven.</p>	
			7	 <p>Bescherming tegen de gevolgen van tijdelijke onderdompeling.</p>	
			8	 <p>Bescherming tegen de gevolgen van langdurige onderdompeling onder gespecificeerde voorwaarden.</p>	

- ✓ Isolatieklasse: → F
Tijdens de productie worden de statorwikkelingen volledig ondergedompeld in tropenvaste lak of vernis. De gebruikte isolatiematerialen bepalen de isolatieklasse van de motor.

isolatieklasse	Max. toegelaten temp.
A	105°C
E	120 °C

B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C

Grenstemperaturen voor isolatieklassen:



✓ Uit de catalogoog:

- $\frac{I_a}{I}$: geeft weer hoeveel maal groter de aanloopstroom is dan de nominale stroom
- $\frac{M_a}{M} = \frac{T_a}{T}$: geeft weer hoeveel maal groter het aanloopkoppel is dan het nominale koppel.
- $\frac{M_{\max}}{M} = \frac{T_{\max}}{T}$: geeft weer hoeveel maal groter het kipkoppel (max) groter is dan het nominale koppel
- Massatraagheidsmoment J (kgm²) : nodig bij versnellingsberekeningen.

Het massatraagheidsmoment heeft bij roterende bewegingen in feite een soortgelijke functie als de massa bij lineaire bewegingen.

- Gewicht: van belang bij transport en montage

Voorbeeld: Siemens M3000 aluminium motors

IP 55 – IC 411 – Insulation class F, temperature rise class B

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency		Power factor cos φ	Current		Torque		
				Full load 100%	3/4 load 75%		I_N A	I_s I_N	T_N Nm	T_s T_N	T_{max} T_N
3000 r/min = 2 poles			400 V 50 Hz			Basic design					
0.09	M2VA 56 A	3GVA 051 001-...	2820	59.8	53.3	0.69	0.32	3.9	0.31	2.9	2.7
0.12	M2VA 56 B	3GVA 051 002-...	2840	67.2	63.8	0.64	0.41	4.1	0.41	3.2	2.8
0.18	M2VA 63 A	3GVA 061 001-...	2820	73.7	70.6	0.64	0.56	4.2	0.62	3.5	3.1
0.25	M2VA 63 B	3GVA 061 002-...	2810	77.5	75.8	0.71	0.67	4.5	0.87	3.6	3.3
0.37	M2VA 71 A	3GVA 071 001-...	2840	77.1	76.5	0.77	1.05	5.5	1.25	3.8	3.9
0.55	M2VA 71 B	3GVA 071 002-...	2830	79.2	78.2	0.78	1.39	5.7	1.86	3.6	3.7
0.75	M2VA 80 A	3GVA 081 001-...	2870	81.2	79.3	0.75	1.8	6.2	2.49	2.9	3.6
1.1	M3VA 80 C	3GVA 081 313-...	2850	83.1	82.9	0.85	2.5	8.1	3.69	4.2	3.5
1.5	M3AA 90 L	3GAA 091 312-...C	2900	85.9	86.5	0.87	3.2	7.7	5	2.7	3.6
2.2	M3AA 90 LB	3GAA 091 313-...C	2880	85.8	87.1	0.87	4.4	7.4	7.3	3.0	3.6
3	M3AA 100 LB	3GAA 101 312-...C	2920	87.6	87.5	0.86	5.9	10.0	9.9	3.9	4.9
4	M3AA 112 M	3GAA 111 022-...C	2860	87.7	88.9	0.93	7.1	7.9	13.4	2.7	3.1
4	¹⁾ M2AA 112 M	3GAA 111 001-...A	2850	86.0	86.0	0.91	7.4	7.5	13.4	2.8	3.0
5.5	M3AA 132 SA	3GAA 131 023-...C	2900	88.6	89.0	0.88	10.3	9.0	18.1	3.8	4.6
5.5	¹⁾ M2AA 132 SA	3GAA 131 001-...A	2855	86.0	86.0	0.88	10.5	7.8	18.4	3.2	3.4
7.5	M3AA 132 SB	3GAA 131 024-...C	2915	90.9	91.3	0.90	13.3	11.0	24.6	5.1	5.2
7.5	¹⁾ M2AA 132 SB	3GAA 131 002-...A	2855	87.0	87.0	0.90	13.9	8.5	25	3.4	3.6
11	M3AA 160 MA	3GAA 161 101-...C	2930	91.2	91.2	0.88	20	6.3	36	1.9	2.5
15	M3AA 160 M	3GAA 161 102-...C	2920	91.7	91.7	0.90	26.5	6.6	49	2.3	2.5
18.5	M3AA 160 L	3GAA 161 103-...C	2920	92.4	92.4	0.91	32	7.3	60	2.6	2.7
22	M3AA 180 M	3GAA 181 101-...C	2930	92.8	92.8	0.89	38.5	7.2	71	2.5	2.7
30	M3AA 200 MLA	3GAA 201 001-...C	2955	93.2	93.2	0.88	53	7.3	97	2.4	3.1
37	M3AA 200 MLB	3GAA 201 002-...C	2950	93.6	93.6	0.89	64	7.3	120	2.5	3.2
45	M3AA 225 SMB	3GAA 221 001-...C	2960	93.9	93.9	0.88	79	7.3	145	2.5	2.8
55	M3AA 250 SMA	3GAA 251 001-...C	2970	94.4	94.4	0.89	95	7.5	177	2.0	3.0
75	M3AA 280 SMA	3GAA 281 001-...C	2970	94.7	94.7	0.90	127	8.2	241	2.6	3.2
90	²⁾ M3AA 280 SMB	3GAA 281 002-...C	2970	95.4	95.6	0.90	152	8.3	290	2.7	3.4

IP 55 – IC 411 – Insulation class F, temperature rise class B

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency		Power factor cos φ	Current		Torque		
				Full load 100%	3/4 load 75%		I_N A	I_s I_N	T_N Nm	T_s T_N	T_{max} T_N
1500 r/min = 4 poles			400 V 50 Hz			Basic design					
0.06	M2VA 56 A	3GVA 052 001-...	1340	51.1	45.8	0.67	0.29	2.5	0.43	2.2	2.2
0.09	M2VA 56 B	3GVA 052 002-...	1370	55.5	50.2	0.62	0.39	2.8	0.63	2.9	2.9
0.12	M2VA 63 A	3GVA 062 001-...	1400	63.7	58.4	0.59	0.46	3.1	0.82	2.6	2.6
0.18	M2VA 63 B	3GVA 062 002-...	1380	65.6	62.1	0.64	0.64	3.1	1.25	2.5	2.6
0.25	M2VA 71 A	3GVA 072 001-...	1410	70.4	69.1	0.71	0.78	4.3	1.71	2.7	2.9
0.37	M2VA 71 B	3GVA 072 002-...	1420	74.6	72.1	0.69	1.05	4.4	2.51	2.6	2.8
0.55	M2VA 80 A	3GVA 082 001-...	1400	75.3	73.1	0.76	1.40	4.6	3.75	2.6	2.9
0.75	M2VA 80 B	3GVA 082 002-...	1410	78.2	75.6	0.74	1.90	4.7	5.08	3.5	3.9
1.1	M3AA 90 L	3GAA 092 312-...C	1420	83.9	84.3	0.80	2.4	6.1	7.4	2.9	3.4
1.5	M3AA 100 LA	3GAA 102 311-...C	1440	85.6	85.5	0.82	3.2	6.9	10	2.8	3.4
2.2	M3AA 100 LC	3GAA 102 313-...C	1450	86.5	86.6	0.77	4.8	8.5	14.5	4.0	4.6
3	M3AA 112 MA	3GAA 112 021-...C	1455	87.5	87.8	0.81	6.2	7.9	19.7	2.7	3.7
4	M3AA 112 M	3GAA 112 022-...C	1455	89.3	89.8	0.76	8.6	8.5	26.3	3.0	4.1
4	¹⁾ M2AA 112 M	3GAA 112 001-...A	1435	84.5	85.5	0.80	8.6	7.0	27	2.8	3.0
5.5	M3AA 132 S	3GAA 132 023-...C	1460	89.3	89.7	0.84	10.6	7.6	36	2.2	3.4
5.5	¹⁾ M2AA 132 S	3GAA 132 001-...A	1450	87.0	87.0	0.83	11.1	7.3	36	2.2	3.0
7.5	M3AA 132 M	3GAA 132 024-...C	1450	90.1	90.5	0.87	14	8.5	49	3.3	3.2
7.5	¹⁾ M2AA 132 M	3GAA 132 002-...A	1450	88.0	88.0	0.83	14.8	7.9	49	2.5	3.2
11	M3AA 160 M	3GAA 162 101-...C	1465	91.5	92.0	0.83	21	7.9	72	3.4	3.4
11	¹⁾ M2AA 160 M	3GAA 162 101-...A	1460	90.3	90.3	0.81	21.5	6.7	72	2.9	2.8
15	M3AA 160 L	3GAA 162 102-...C	1460	91.8	92.0	0.82	29	9.6	98	4.8	3.7
15	¹⁾ M2AA 160 L	3GAA 162 102-...A	1455	91.1	91.1	0.84	28.5	6.8	98	3.0	2.8
18.5	M3AA 180 M	3GAA 182 101-...C	1470	92.3	92.3	0.84	35	7.0	120	3.1	2.7
22	M3AA 180 L	3GAA 182 102-...C	1470	93.1	93.6	0.85	40	8.5	143	3.6	2.9
22	¹⁾ M2AA 180 L	3GAA 182 102-...A	1470	92.4	92.4	0.83	41	7.0	143	2.9	2.8
30	M3AA 200 MLB	3GAA 202 001-...C	1475	93.4	93.6	0.84	55	8.2	194	4.3	3.2
30	¹⁾ M2AA 200 MLA	3GAA 202 001-...A	1475	92.9	92.9	0.83	56	7.3	194	3.7	2.8
37	M3AA 225 SMA	3GAA 222 001-...C	1480	93.6	93.6	0.84	68	6.6	239	2.4	2.5
45	M3AA 225 SMB	3GAA 222 002-...C	1480	94.2	94.2	0.83	83	6.7	290	2.7	2.6
55	M3AA 250 SMA	3GAA 252 001-...C	1480	94.6	94.6	0.86	98	7.5	355	2.3	2.8
75	M3AA 280 SMA	3GAA 282 001-...C	1480	94.8	95.0	0.86	132	7.1	486	3.4	3.5
90	²⁾ M3AA 280 SMB	3GAA 282 002-...C	1475	95.0	95.5	0.88	157	7.7	583	5.0	3.2

IP 55 – IC 411 – Insulation class F, temperature rise class B

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency		Power factor cos φ 100%	Current		Torque		
				Full load 100%	3/4 load 75%		I_N A	I_s A	T_N Nm	T_s Nm	T_{max} Nm
1000 r/min = 6 poles			400 V 50 Hz			Basic design					
0.09	M2VA 63 A	3GVA 063 001-...	910	47.1	42.5	0.56	0.51	2.1	0.95	2.1	2.1
0.12	M2VA 63 B	3GVA 063 002-...	910	57.5	52.8	0.58	0.57	2.1	1.27	2.1	2.1
0.18	M2VA 71 A	3GVA 073 001-...	920	61.1	57.7	0.69	0.65	2.9	1.88	2.1	2.2
0.25	M2VA 71 B	3GVA 073 002-...	920	64.9	62.3	0.64	0.86	3.2	2.61	2.5	2.7
0.37	M2VA 80 A	3GVA 083 001-...	925	72.9	70.8	0.72	1.05	3.8	3.82	3.1	3.4
0.55	M2VA 80 B	3GVA 083 002-...	925	73.3	71.9	0.71	1.55	3.4	5.68	2.9	3.1
0.75	M3AA 90 S	3GAA 093 001-...A	930	71.5	70.7	0.67	2.36	4.0	7.5	1.9	2.3
1.1	M3AA 90 L	3GAA 093 002-...A	930	74.4	72.5	0.69	3.25	4.0	11	1.9	2.3
1.5	M3AA 100 L	3GAA 103 001-...A	950	80.0	77.0	0.71	3.92	4.5	15	1.9	2.3
2.2	M3AA 112 M	3GAA 113 001-...C	940	80.5	80.5	0.74	5.4	5.6	22	2.1	2.7
3	M3AA 132 S	3GAA 133 001-...C	960	84.5	84.5	0.75	6.9	6.1	30	2.4	2.6
4	M3AA 132 MA	3GAA 133 002-...C	960	85.5	85.5	0.78	8.7	7.1	40	2.6	2.8
5.5	M3AA 132 MB	3GAA 133 003-...C	955	86.0	86.0	0.78	11.9	6.9	55	2.8	2.8
7.5	M3AA 160 M	3GAA 163 101-...C	970	89.3	89.3	0.79	15.4	6.7	74	2.0	2.8
11	M3AA 160 L	3GAA 163 102-...C	970	89.8	89.8	0.78	23	7.1	109	2.2	2.9
15	M3AA 180 L	3GAA 183 101-...C	970	90.8	90.8	0.78	31	7.0	148	2.1	3.0
18.5	M3AA 200 MLA	3GAA 203 001-...C	985	91.1	91.1	0.81	36	7.0	179	2.5	2.7
22	M3AA 200 MLB	3GAA 203 002-...C	980	91.7	91.7	0.81	43	7.2	214	2.5	2.7
30	M3AA 225 SMB	3GAA 223 001-...C	985	92.8	92.8	0.83	56	6.6	291	2.5	2.7
37	M3AA 250 SMA	3GAA 253 001-...C	985	93.7	93.7	0.83	69	7.3	359	2.8	2.8
45	M3AA 280 SMA	3GAA 283 001-...C	985	94.1	94.1	0.84	82	7.3	436	2.8	2.8

IP 55 – IC 411 – Insulation class F, temperature rise class B

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency		Power factor cos φ 100%	Current		Torque		
				Full load 100%	3/4 load 75%		I_N A	I_s A	T_N Nm	T_s Nm	T_{max} Nm
750 r/min = 8 poles			400 V 50 Hz			Basic design					
0.055	M2VA 63 B	3GVA 064 002-...	680	38.3	31.8	0.48	0.47	1.8	0.78	2.1	2.1
0.09	M2VA 71 A	3GVA 074 001-...	690	45.8	37.5	0.57	0.52	2.2	1.25	2.3	2.3
0.12	M2VA 71 B	3GVA 074 002-...	690	46.4	38.1	0.55	0.69	2.2	1.67	2.5	2.5
0.18	M2VA 80 A	3GVA 084 001-...	700	59.9	54.5	0.60	0.75	3.1	2.46	3.2	3.6
0.25	M2VA 80 B	3GVA 084 002-...	700	70.7	67.4	0.62	0.85	3.1	3.52	2.9	3.1
0.37	M3AA 90 S	3GAA 094 001-...A	700	61.5	43.4	0.56	1.6	3.0	5	1.9	2.4
0.55	M3AA 90 L	3GAA 094 002-...A	690	62.9	56.4	0.57	2.35	3.0	7.5	1.7	2.1
0.75	M3AA 100 LA	3GAA 104 001-...A	700	72.0	63.6	0.59	2.55	3.5	10	2.1	2.7
1.1	M3AA 100 LB	3GAA 104 002-...A	700	73.0	68.8	0.64	3.35	3.5	15	2.1	2.7
1.5	M3AA 112 M	3GAA 114 001-...C	695	74.5	74.5	0.65	4.5	4.1	21	1.9	2.4
2.2	M3AA 132 S	3GAA 134 001-...C	720	80.5	80.1	0.67	5.9	5.3	29	1.9	2.5
3	M3AA 132 M	3GAA 134 002-...C	720	82.0	82.1	0.68	7.8	5.5	40	2.4	2.6
4	M3AA 160 MA	3GAA 164 101-...C	715	84.1	84.7	0.69	10	5.2	54	2.1	2.4
5.5	M3AA 160 M	3GAA 164 102-...C	710	84.7	85.5	0.70	13.4	5.4	74	2.4	2.6
7.5	M3AA 160 L	3GAA 164 103-...C	715	86.3	87.2	0.70	18.1	5.4	100	2.4	2.8
11	M3AA 180 L	3GAA 184 101-...C	720	88.7	89.2	0.76	23.5	5.9	146	2.4	2.6
15	M3AA 200 MLA	3GAA 204 001-...C	740	91.1	91.1	0.82	29	7.4	194	1.8	3.0
18.5	M3AA 225 SMA	3GAA 224 001-...C	730	91.1	91.1	0.79	37	6.2	242	1.9	2.7
22	M3AA 225 SMB	3GAA 224 002-...C	730	91.5	91.5	0.77	45	6.0	288	1.9	2.7
30	M3AA 250 SMA	3GAA 254 001-...C	735	92.8	92.8	0.79	59	6.9	390	1.9	2.9
37	M3AA 280 SMA	3GAA 284 001-...C	735	93.2	93.2	0.81	71	7.2	481	2.0	2.9

Nog een ander voorbeeld:

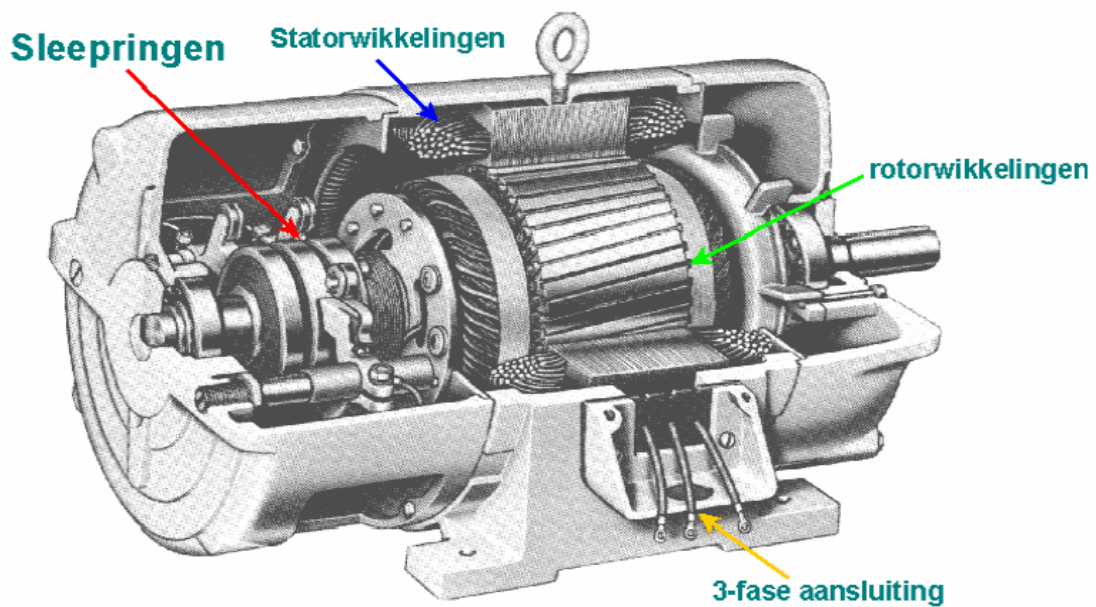
SEW-EURODRIVE		Bruchsal / Germany			
Typ	DFV 160 M 4 / BM			3 ~ IEC 34	
Nr.	3001234568,001,00	IM	B5		
kW	11 S1	cos φ	0.83		
50Hz V	220 - 240 Δ / 380 - 415 Y	A	39.0 / 22.5		
60Hz V	240 - 266 Δ / 415 - 460 Y	A	35.5 / 20.5		
r / min	1440 / 1740	IP	55	KL	F
Bremse	V 230 AC	Nm	150	Gleichrichter	BGE1.5
Kg	109	Ma		Nm	i
Schmierstoff		Made in Germany 184 103 3.16			

4.2. Sleepingmotor



LN		DS Mot. Nr.	
Y/Δ 400/230 V		1,16/2	A
0,27 kW		cos.φ 0,72	
1340		min ⁻¹	50 Hz
U _{Err.}	95 V	I _{Err.}	A
Is.Kl.	F	IP 20	CA CB
Typ	SE2662-3J	VDE 0530	

kenplaatje sleepingmotor

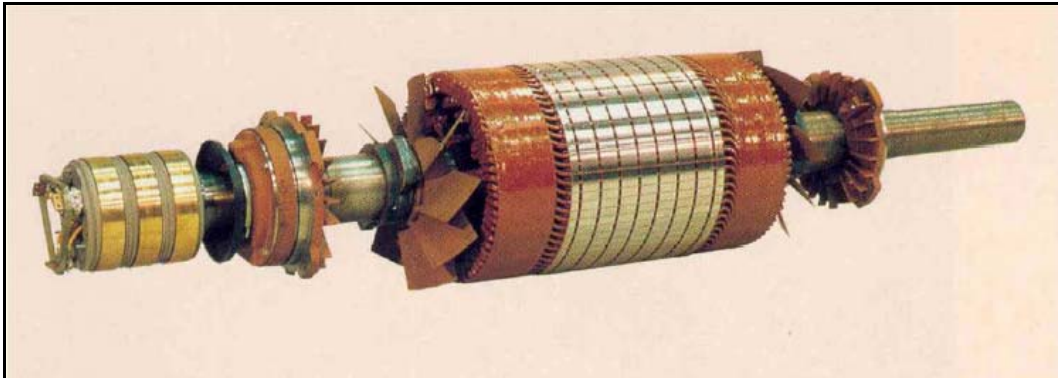


- ❖ Voordelen
 - Aanloopstroom daalt
 - Aanloopkoppel stijgt
- ❖ Nadelen
 - Duurder dan kooiankermotor
 - Vraagt meer onderhoud

4.2.1. Stator

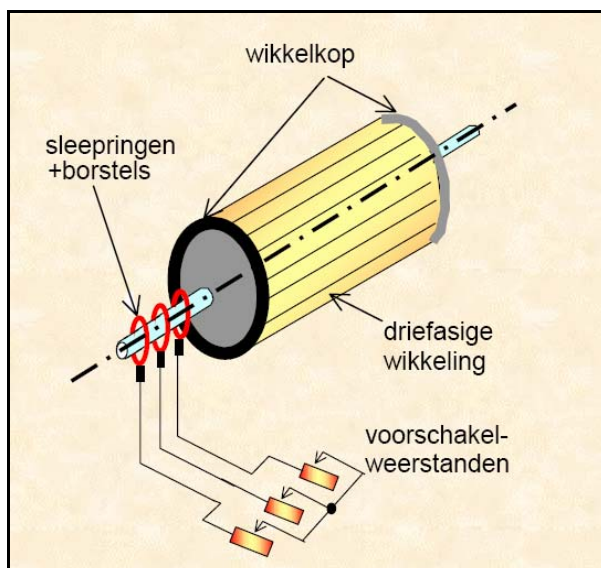
De stator van de sleepringmotor is hetzelfde als de stator van de kooiankermotor.

4.2.2. Sleepringrotor



Rotor van de sleepringmotor

In de gleuven van de gelamelleerde rotor worden, net zoals in de statorwikkeling, een driefasige wikkeling gelegd met evenveel polen als de statorwikkeling. De drie wikkelingen worden steeds in ster geschakeld. Het sterpunt is niet bereikbaar voor de installateur, maar de drie vrije uiteinden van de wikkelingen zijn verbonden met drie sleepringen die geïsoleerd zijn ten opzichte van elkaar. Op deze sleepringen rusten borstels die verbonden zijn met de aansluitklemmen K,L,M in de klemmenkast. Aan deze klemmen worden mechanisch of elektronisch veranderlijke rotorweerstand aangesloten.

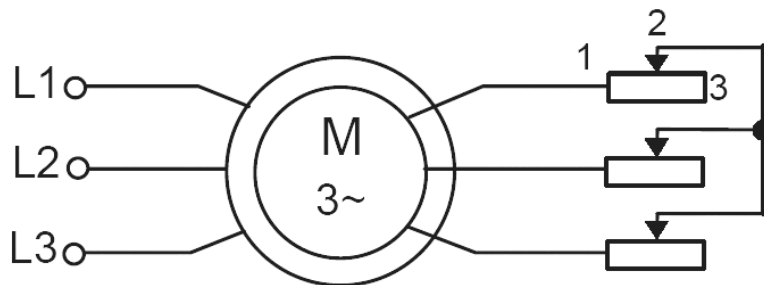


Aanloopweerstand met 6 trappen

Zo kunnen we een bepaalde weerstand in serie schakelen met de vaste rotorweerstand. Dit is belangrijk bij het aanzetten omdat op die manier niet alleen de aanzetstromen beperkt worden, maar ook het aanloopkoppel zal stijgen. Deze motor wordt dus vooral gebruikt bij zeer grote vermogens en ook waar men moet starten bij zeer grote belasting.

In onderstaande voorbeeld staat het symbool van een sleepringmotor : dit zijn 2 cirkels, waarbij de buitenste cirkel de stator voorstelt (waarop we netspanning aansluiten) en de binnenste de rotor (die verbonden is met de K,L en M klemmen).

Bij het starten wordt in dit voorbeeld de volledige weerstand ingeschakeld (R3). Vervolgens wordt overgeschakeld naar stand 2 (halve weerstand) en bij volledige aanloop naar stand 1 (geen extra weerstand).



R1		geen bijkomende weerstand
R2		bijkomende rotorweerstand half ingeschakeld
R3		bijkomende rotorweerstand volledig ingeschakeld

5. Slip en toerental

Onder normale omstandigheden is het toerental van de rotor iets kleiner dan het toerental van het draaiveld (anders zouden de rotorgeleiders geen veldlijnen snijden).

Het verschil tussen het toerental van het draaiveld en de rotor heet slip (s)

$$s = n_s - n_r$$

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

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

Normaal bedraagt de slip 4-11 %.

Opmerking: synchrone toerentallen n_s bij 50/60 Hz

	50 Hz r/min	60 Hz r/min
2-polig	3000	3600
4-polig	1500	1800
6-polig	1000	1200
8-polig	750	900
12-polig	500	600
16-polig	375	450
24-polig	250	300

Voorbeeld:

Op het kenplaatje van een 2-polige motor is bijvoorbeeld een rotatiefrequentie van 2850 tr/min vermeld. De frequentie is 50 Hz.

Bereken de slip (uitkomst = 5%)

Oplossing:

6. Rotorparameters

6.1. Rotor-emk

We bekijken de motor bij het aanzetten: elke fase van de motor is te vergelijken met een éénfasige transfo: de stator vervult de functie van de primaire windingen en de rotor deze van de secundaire.

Wanneer we een driefasespanning aansluiten op de 3 windingen van de stator, zal er een draaiveld ontstaan. Dit draaiveld snijdt ook de statorgeleiders zodat ook er over elke statorwinding een zelfinductiespanning E_s wordt opgewekt. De veldlijnen snijden dus de statorgeleiders aan n_s toeren per minuut, dus $E_s = 4,44 \times N_s \times \phi \times p \times n_s$ is de inductiespanning die wordt opgewekt over elke statorwinding.

De secundaire spanning (in de rotor) is net zoals bij de transfo afhankelijk van de windingverhouding. Deze windingverhouding is de verhouding tussen het aantal windingen van een statorwinding en een rotorwinding (we gaan er dan van uit dat de rotor een sleepringrotor is)

$$\rightarrow \frac{E_{r0}}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \text{ waardoor } E_{r0} = \frac{N_r}{N_s} \times E_s$$

Hierbij is E_{r0} de spanning die wordt opgewekt over een rotorwinding bij het begin van de aanloop ($n_r = 0$ tr/min).

Wanneer de motor op toeren komt zal de opgewekte spanning in de rotor dalen van E_{r0} tot E_r omdat er minder veldlijnen worden gesneden: dit komt omdat het verschil tussen het toerental van het draaiveld en van de rotor verkleint.

In de formule " $E = 4,44 \times N \times \phi \times f = 4,44 \times N \times \phi \times p \times n$ " is n het toerental waarmee de veldlijnen de rotorgeleiders snijden. Dit is het verschil tussen het toerental van het draaiveld en de rotor.

$$\text{Dus,} \quad \rightarrow E_r = 4,44 \times N_r \times \phi \times p \times (n_s - n_r)$$

$$\rightarrow E_r = 4,44 \times N_r \times \phi \times p \times n_s \frac{(n_s - n_r)}{n_s}$$

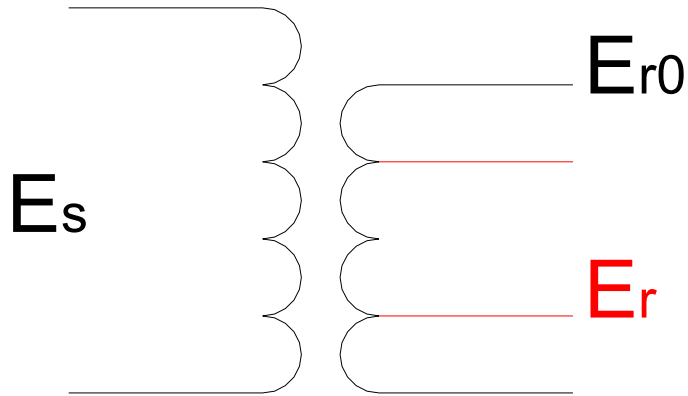
$$\rightarrow E_r = [4,44 \times N_r \times \phi \times p \times n_s] \times s$$

Hetgeen tussen haakjes staat is de spanning die wordt opgewekt over één fase van de rotor, wanneer de rotorgeleiders worden gesneden door de veldlijnen met een toerental n_s . Dus de rotor staat stil. In vorige paragraaf hebben we reeds gezien dat de rotorspanning bij stilstand van de rotor gelijk is aan E_{r0} .

$$\rightarrow E_r = E_{r0} \times s$$

E_r is hierin de opgewekte spanning over een rotorwinding tijdens het aanlopen

Besluit: bij stilstand is de rotorspanning gelijk aan E_{r0} . Bij nominaal toerental is de slip en dus ook de rotorspanning zeer klein.



6.2. Rotorfrequentie

We hebben reeds de formule $f = p \times n$ gezien. Wanneer we de frequentie van de opgewekte spanning in de rotor willen berekenen is n hier het verschil tussen het toerental van het draaiveld en de rotor.

$$\begin{aligned} \text{Dus,} \quad & \rightarrow f_r = p \times (n_s - n_r) \\ & \rightarrow f_r = p \times (n_s - n_r) \times \frac{n_s}{n_s} \\ & \rightarrow f_r = s \times n_s \times p \\ & \rightarrow \boxed{f_r = s \times f_s} \text{ en } f_s \text{ is bij ons meestal 50 Hz.} \end{aligned}$$

Hierin is f_s de frequentie van de aangesloten spanning, dus meestal 50 Hz. Dus bij stilstand ($s=1$) is de rotorfrequentie 50 Hz. Bij nominaal toerental (s = klein) daalt de frequentie tot een kleine waarde.

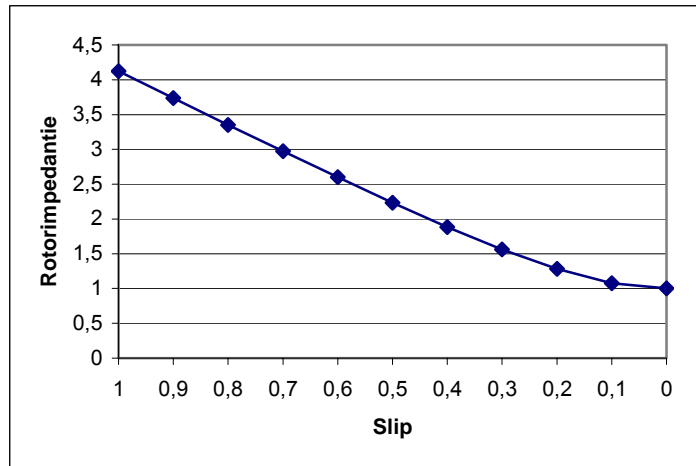
6.3. Rotorimpedantie

De rotor van een kooiankermotor kan voorgesteld worden door een serieschakeling van de rotorweerstand R_r en de lekreactantie X_r (afhankelijk van constructie van rotorleiders). Samen vormen ze de rotorimpedantie Z_r .

$$\begin{aligned} & \rightarrow Z_r = \sqrt{R_r^2 + X_r^2} \\ & \rightarrow Z_r = \sqrt{R_r^2 + (\omega_r \times L_r)^2} \\ & \rightarrow Z_r = \sqrt{R_r^2 + (2 \times \pi \times f_r \times L_r)^2} \\ & \rightarrow \boxed{Z_r = \sqrt{R_r^2 + (2 \times \pi \times s \times f_s \times L_r)^2}} \end{aligned}$$

Dus bij het begin van de aanloop (toerental is 0, $s=1$) is de impedantie maximaal. Bij nominaal toerental is de rotorimpedantie iets groter dan R_r .

Voorbeeld: $R_r=1 \Omega$ en $X_{r0}=4\Omega$:



Opmerking:

- ✓ $X_r = \omega_r \times L_r = (2 \times \pi \times f_r) \times L_r = 2 \times \pi \times (s \times f_s) \times L_r = s \times \omega_s \times L_r = s \times X_{r0}$.
Hierbij is X_{r0} de reactantie van de rotor bij stilstand van de rotor. De reactantie X_r is dus ook afhankelijk van de slip.
- ✓ Bij de kooirotor is de ohmse weerstand van de rotor veel kleiner dan de inductieve reactantie, omdat de rotorwikkeling gemaakt is met dikke aluminium of koperen staven. De waarde van de ohmse weerstand kan dus nooit gewijzigd worden. De inductieve reactantie daarentegen hangt af van de rotorfrequentie, dus van de slip.

6.4. Rotorstroom

De grootte van de rotorstroom is uiteraard te berekenen met : $I_r = \frac{E_r}{Z_r}$

Dus,

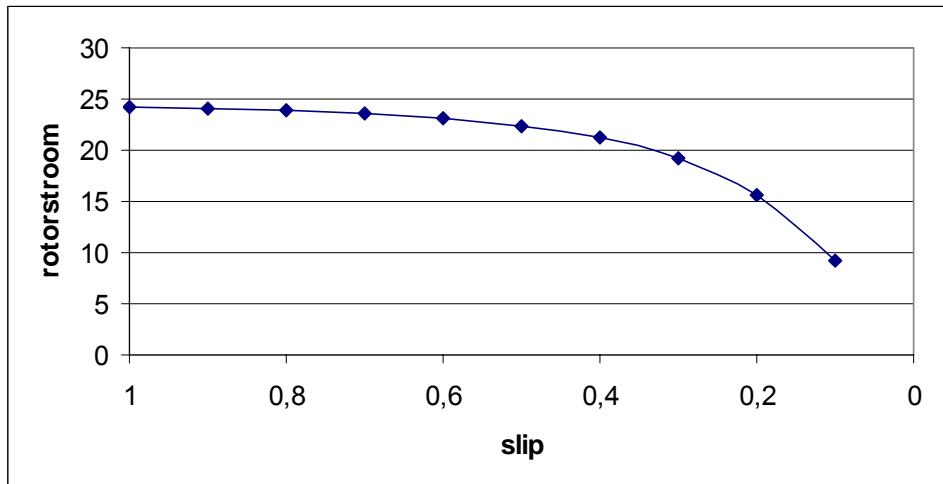
$$\rightarrow I_r = \frac{s \times E_{r0}}{\sqrt{R_r^2 + X_r^2}}$$

$$\rightarrow I_r = \frac{s \times E_{r0}}{\sqrt{R_r^2 + (s \times X_{r0})^2}}$$

$$\rightarrow I_r = \frac{E_{r0}}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{r0})^2}}$$

Voorbeeld: $E_{r0} = 100 \text{ V}$; $R_r = 1 \Omega$; $X_{r0} = 4 \Omega$:

slip	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
I_r	24,25	24,09	23,86	23,54	23,08	22,36	21,2	19,21	15,62	9,285



Bij het starten van de motor is de slip gelijk aan 1, waardoor I_r de noemer in bovenstaande breuk maximaal is: E_{r0} , R_r en X_{r0} zijn immers constanten. Wanneer de motor verder aanloopt daalt de slip waardoor de noemer groter wordt en de rotorstroom zal dalen.

6.5. Faseverschuiving tussen emk en rotorstroom

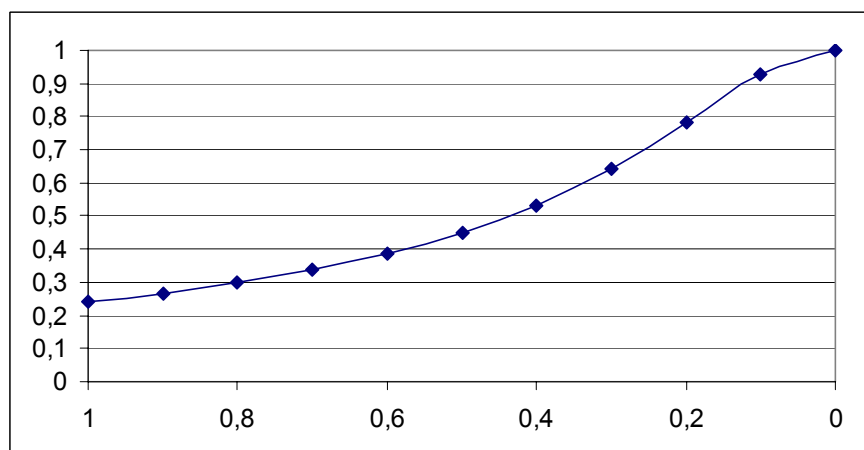
De arbeidsfactor van de rotorkooi kan berekend worden met:

$$\rightarrow \cos \varphi_r = \frac{R_r}{Z_r}$$

$$\rightarrow \cos \varphi_r = \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + (s \times X_{r0})^2}}$$

Voorbeeld: $E_{r0} = 100 \text{ V}$; $R_r = 1\Omega$; $X_{r0} = 4\Omega$:

slip	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
arbeidsfactor	0,243	0,268	0,298	0,336	0,385	0,447	0,53	0,64	0,781	0,928	1



Dus, bij het aanlopen is de arbeidsfactor klein, omdat de slip dan groot is. Bij nominaal toerental is de arbeidsfactor iets kleiner dan 1, omdat s zeer klein wordt.

Opmerking:

- ✓ Bij de kooiankermotor is de ohmse weerstand klein, zodat bij het starten van de motor de verhouding $\frac{R_r}{Z_r}$ klein is. De rotorstroom ijlt dus sterk na op de rotorspanning, zodat het opgenomen elektrisch actief vermogen P , en dus ook het afgeleverd mechanisch vermogen, in de rotor zeer klein is.
- ✓ Bij de sleepringmotor kan de verhouding $\frac{R_r}{Z_r}$ gelijk worden gemaakt aan 1, door bijschakelen van aanloopweerstand.

6.6. Statorstroom

Het verloop van de statorstroom is bijna identiek met dit van de rotorstroom (op de windingverhouding na)

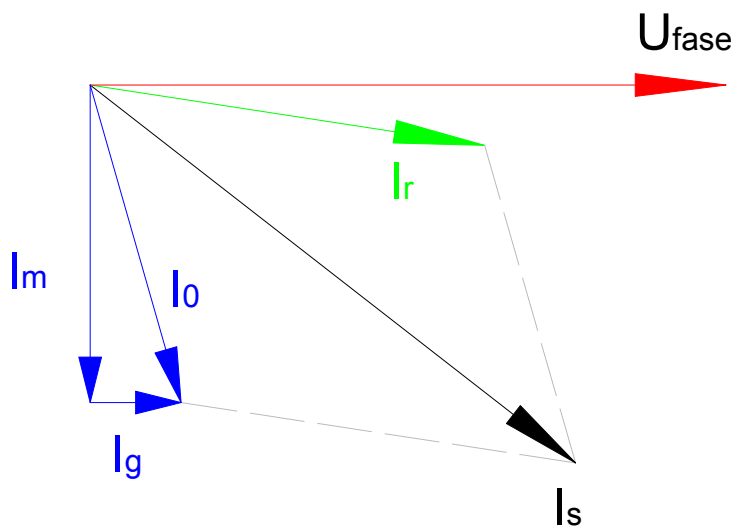
Bij aanloop is de stroom, net als in de rotor, zeer groot. Bij nullast is hij iets groter dan 0 en bij vollast is hij nominaal.

$$\rightarrow I_L = \frac{P_t}{\sqrt{3} \times U_L \times \cos \varphi} \quad \text{met} \quad P_t = \frac{P_n}{\eta}$$

Dus wanneer de belasting, dit is het nuttig afgeleverd mechanisch vermogen of asvermogen, verandert, zal ook de lijnstroom veranderen.

De statorstroom kan per fase beschouwd worden als de vectoriële som van nullaststroom I_0 en de belastingsstroom I_r .

- ✓ I_0 is de nullaststroom en bestaat uit de volgende 2 componenten:
 - I_m : is 90° naijlend op U en wekt het draaiveld op samen met de stromen van de 2 andere fasen. Deze stroom is onafhankelijk van de belasting.
 - I_g : is in fase met U en compenseert de ijzer-wrijvings- en ventilatieverliezen. Hij is onafhankelijk van de belasting en veel kleiner dan I_m .
- ✓ I_r is de belastingsstroom. Deze is ongeveer in fase met U en compenseert de afgeleverde mechanische energie met een gelijke hoeveelheid elektrische energie. Hij is uitsluitend afhankelijk van de belasting (bij grote belasting is deze groot en omgekeerd)



Bij een grote belasting is I_r groot, waardoor de hoek tussen I_s en U kleiner wordt (betere arbeidsfactor)

7. De arbeidsfactor

De arbeidsfactor van de motor is de faseverschuiving tussen de stroom door de statorspoelen en de spanning over deze spoelen.

Deze arbeidsfactor is ook afhankelijk van het toerental:

- ✓ Tijdens het aanlopen is de arbeidsfactor slecht.
- ✓ Bij vollast bereikt de arbeidsfactor zijn maximale waarde. Praktische waarden zijn 0,65 voor kleine en 0,9 voor grote inductiemotoren.
- ✓ Bij nullast is de arbeidsfactor terug slecht.

8. Vermogen en rendement

8.1. Formule voor rendement

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

$$\eta = \frac{P_{\text{nuttig}}}{P_{\text{toegevoegd}}} \quad (28.1)$$

Het toegevoegd elektrisch vermogen kan berekend worden met de volgende formule:

$$\rightarrow P_t = P_e = \sqrt{3} \times U_L \times I_L \times \cos \varphi \quad (28.2)$$

Het rendement is vooral afhankelijk van het volgende:

- ✓ De belasting: bij nullast is het rendement namelijk gelijk aan 0. Bij nominale belasting bereikt het rendement zijn maximale waarde. Boven of onder deze nominale belasting is het rendement kleiner.
- ✓ De grootte van de motor: grote motoren hebben een groter rendement dan kleine omdat de slip kleiner is.
- ✓ Het toerental: sneldraaiende motoren bezitten bij eenzelfde vermogen een hoger rendement dan traagdraaiende.

8.2. Verliezen in de motor

8.2.1. Ijzerverliezen

- ✓ *Hysteresisverlies*: dit ontstaat wanneer ijzer door een wisselstroom wordt gemagnetiseerd en gedemagnetiseerd, dit kost energie.
- ✓ *Wervelstroomverlies*: ontstaat doordat magneetvelden spanningen opwekken in de ijzerkern en alle overige geleiders. Deze spanningen veroorzaken stromen die rond de magneetvelden cirkelen en tot warmteverlies leiden.

De totale ijzerverliezen, in stator en in rotor, zijn praktisch constant. Bij stijgende belasting nemen de ijzerverliezen in de stator iets toe, omdat de slip en de rotorfrequentie stijgt. In de rotor verkleinen ze echter met ongeveer een zelfde waarde.

→ We kunnen deze ijzerverliezen + mechanische verliezen bepalen met de **nullastproef**:

De motor wordt losgekoppeld van de belasting. Het nullastvermogen P_0 dat we meten dient enkel om de verliezen in de motor te compenseren. De koperverliezen in de rotor kunnen verwaarloosd worden t.o.v. de andere verliezen omdat de rotorstroom bij nullast zeer klein is.

Het nullastvermogen P_0 (dat we meten met een watt-meter) is dus enkel nog de som van de ijzerverliezen, de mechanische verliezen en de jouleverliezen in de stator. De weerstand van de statorwikkeling en de stroom erdoor kunnen we eveneens opmeten waardoor:

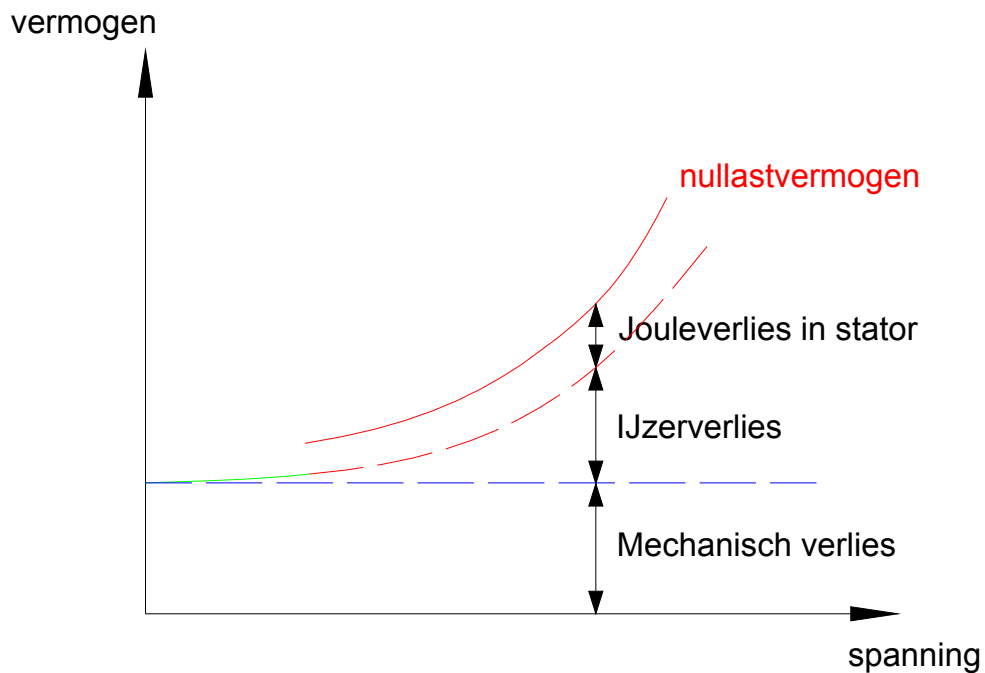
$$\rightarrow P_0 = P_{\text{ijzer}} + P_{\text{mech}} + R_s \times I_s^2 \quad (28.3)$$

$$\rightarrow P_{\text{ijzer}} + P_{\text{mech}} = P_0 - R_s \times I_s^2 \quad (28.4)$$

Om nu de ijzerverliezen van de mechanische verliezen te scheiden, passen we op de stator een driefasige regelbare spanning toe: we verlagen de spanning van de nominale waarde tot de waarde waarbij het toerental de neiging vertoont te dalen. We meten telkens het nullastvermogen P_0 en de aangesloten spanning U en zetten deze in een grafiek met de spanning in de x-as en het nullastvermogen in de Y-as.

Voor elke waarde van het nullastvermogen trekken we daar de jouleverliezen in de stator vanaf, waardoor we de onderste curve bekomen. Deze nieuwe kromme verlengen we tot op de Y-as. Dit snijpunt met de Y-as stelt het mechanisch verlies voor, omdat bij een spanning gelijk aan 0 de ijzerverliezen 0 zijn.

$$\text{Dus,} \quad \rightarrow P_{ijzer} = P_0 - R_s \times I_s^2 - P_{mech} \quad (29.1)$$



8.2.2. Jouleverliezen of koperverliezen

Dit zijn de warmteverliezen door de ohmse weerstand van de stator-en rotorwikkelingen.

$$\rightarrow P_{s-joule} = 3 \times R_s \times I_s^2 \quad (29.2)$$

- R_s = ohmse weerstand van de statorwikkeling
- I_s = stroom in een statorwikkeling

$$\rightarrow P_{r-joule} = m \times R_r \times I_r^2 \quad (29.3)$$

- R_r = ohmse weerstand van de rotorwikkeling
- I_r = rotorstroom

Bij de sleepringmotor is $m=3$, bij de kooianker is deze gelijk aan het aantal rotorstaven, gedeeld door het aantal poolparen.

→ We kunnen de jouleverliezen bepalen met behulp van de **kortsluitproef** :

de rotor van de motor wordt onbeweeglijk vastgezet (door té fel te belasten), waardoor de machine in kortsluittoestand verkeert.

Op de stator wordt dan slechts een sterk verlaagde driefase-spanning aangesloten, die ongeveer 10 tot 20 % van de nominale spanning (=kortsluitspanning) bedraagt, zodanig dat de vollaststroom (I van op het kenplaatje) in de statorketen vloeit.

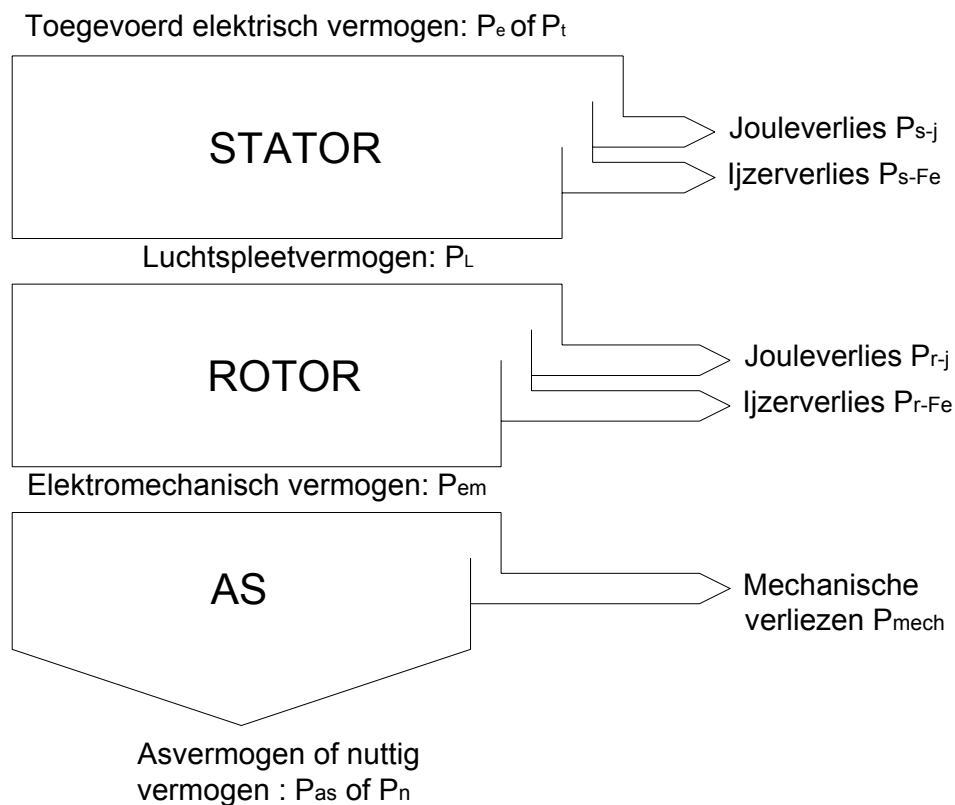
Omdat de rotor stil staat zijn de wrijvings- en ventilatieverliezen (= mechanische verliezen) gelijk aan 0 W. Door de sterk verlaagde spanning kunnen de ijzerverliezen eveneens verwaarloosd worden.

Wanneer we dan het opgenomen vermogen meten (= P_k) stelt dit het totale jouleverlies voor in de rotor en de stator.

8.2.3. Mechanische verliezen: deze nemen toe wanneer de snelheid vergroot.

- ✓ Wrijvingsverlies: ontstaat in de kogellagers van de rotor en bij de sleepringen op de borstels van een sleepringmotor.
- ✓ Ventilatieverlies: dit zijn luchtwrijvingsverliezen te wijten aan de luchtweerstand die de ventilator van de motor ondervindt.

8.3. De vermogendiagram



De motor neemt uit het net een bepaald elektrisch vermogen P_e op en ontwikkelt in de wikkelingen van de stator het jouleverlies P_{s-j} en het ijzerverlies P_{s-Fe} in het blikpakket van de stator. Het resterend vermogen noemen we het luchtspleetvermogen P_L .

$$\rightarrow P_e = \sqrt{3} \times U_L \times I_L \times \cos \varphi \quad (30.1)$$

$$\rightarrow P_L = P_e - (P_{s-j} + P_{s-Fe}) \quad (30.2)$$

In de rotor ontstaan gelijkaardige verliezen als in de stator, namelijk jouleverlies P_{r-j} en ijzerverlies P_{r-Fe} (verwaarlozen omdat de rotorfrequentie $f_r = s \times f_s$ zeer klein is). Het enige verschil is dat alle rotorgrootheden afhankelijk zijn van de slip (of toerental). Het overblijvende elektromechanisch

vermogen P_{em} kan de rotor theoretisch afgeven aan de as van motor. Maar er moet nog rekening gehouden worden met het mechanisch verlies P_{mech} .

$$\rightarrow P_{em} = P_L - P_{r-j} = T_{em} \times \omega_r = T_{em} \times \frac{2 \times \pi \times n_r}{60} \quad (31.1)$$

$$\rightarrow P_{em} = P_n + P_{mech} \quad (31.2)$$

Het vermogen dat nog overblijft is het nuttig mechanisch vermogen (asvermogen). Dit vermogen staat vermeld op de kenplaat van de motor.

$$\rightarrow P_n = T_n \times \omega_r = T_n \times \frac{2 \times \pi \times n_r}{60} \quad (31.3)$$

- T_n = nuttig askoppel
- ω_r =mechanische rotorhoeksnelheid

Uit deze formule kunnen we het koppel halen:

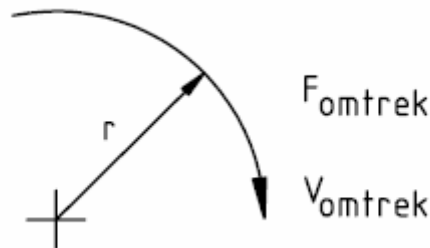
$$\rightarrow T_n = \frac{P_n}{\omega_r} = \frac{P_n}{2 \times \pi \times \frac{n_r}{60}} = 9,55 \times \frac{P_n}{n_r} \quad (31.4)$$

Met n_r uitgedrukt in toeren per minuut en het vermogen in watt.

Opmerking:

We kunnen deze formule nog op een andere manier afleiden:

Dit illustreren we met een voorbeeld. Wanneer om een object te verslepen een kracht nodig is van 1200 N en de gewenste sleepsnelheid 0,5 m/s, dan is hiervoor een vermogen $P = F \times v$ nodig van 1200 N * 0,5 m/s = 600 Nm/s = 600 W.



Het vermogen in bovenstaande figuur (draaibeweging in plaats van sleepbeweging) is te berekenen volgens: $P = F_{omtrek} \times v_{omtrek}$

En omdat $v_{omtrek} = 2 \times \pi \times r \times \frac{n}{60}$ m/s (met n in tr/min) is:

$$\rightarrow P = F_{omtrek} \times \left(\frac{2 \times \pi \times r \times n}{60} \right) \text{ W.}$$

Wanneer we het hierin $F \cdot r$ vervangen door het koppel verkrijgen we terug de reeds bekende formule:

$$\rightarrow P = \frac{T \times 2 \times \pi \times n}{60} = \frac{T \times n}{9,55} \text{ in W} \quad (31.5)$$

$$\rightarrow T = \frac{9,55 \times P}{n} \text{ in Nm} \quad (31.6)$$

Nog even enkele formules herhalen:

$$\rightarrow P_L = T_{em} \times \omega_s = T_{em} \times \frac{2 \times \pi \times n_s}{60} \quad (32.1)$$

$$\rightarrow P_{em} = T_{em} \times \omega_r = T_{em} \times \frac{2 \times \pi \times n_r}{60} \quad (32.2)$$

Beide vermogens verschillen van elkaar door de optredende verliezen in de rotor. Omdat we de ijzerverliezen in de rotor verwaarlozen (omdat de rotorfrequentie zeer klein is) is dit verschil gelijk aan het jouleverlies in de rotor.

$$\rightarrow P_{r-j} = P_L - P_{em} = R_r \times I_r^2 \quad (32.3)$$

⇓ We vervangen P_L en P_r door bovenstaande formules

$$\rightarrow P_{r-j} = \left[T \times \frac{2 \times \pi \times n_s}{60} \right] - \left[T \times \frac{2 \times \pi \times n_r}{60} \right] \quad (32.4)$$

$$\rightarrow P_{r-j} = \frac{T \times 2 \times \pi}{60} \times (n_s - n_r) \quad (32.5)$$

⇓ We vermenigvuldigen teller en noemer met n_s

$$\rightarrow P_{r-j} = \frac{T \times 2 \times \pi}{60} \times (n_s - n_r) \times \frac{n_s}{n_s} \quad (32.6)$$

$$\rightarrow P_{r-j} = \frac{T \times 2 \times \pi}{60} \times n_s \times s \quad (32.7)$$

$$\rightarrow P_{r-j} = P_L \times s \quad (32.8)$$

Hieruit kunnen we besluiten dat het jouleverlies in de rotor afhankelijk is van de slip en dat:

$$\rightarrow P_{em} = P_L - P_{r-j} = P_L - P_L \times s = P_L \times (1 - s) \quad (32.9)$$

$$\rightarrow P_L = \frac{P_{r-j}}{s} = \frac{m \times R_r \times I_r^2}{s} \quad (32.10)$$

Opmerking:

8.4. Oefeningen

- a) Een driefasen kooiankermotor wordt in driehoek aangesloten op een net met een lijnspanning van 3*400 V/ 50 Hz. Hij neemt uit dit net een vermogen op van 10 kW en een lijnstroom van 25 A. De ohmse weerstand van de statorwikkeling is 0,25 Ω. De motor is 4-polig en heeft bij nominale belasting een slip van 5%. Zijn mechanische verliezen zijn 400 W, het ijzerverlies in de stator is 200 W.

Bepaal:

- de rotatiefrequentie van de motor → 1425 tr/min
- jouleverlies in de stator → 156,6 W
- het luchtspleetvermogen → 9643,4 W
- de jouleverliezen in de rotor → 482,2 W
- het nuttig vermogen → 8761 W
- het rendement → 87,6%
- de arbeidsfactor → 0,61

b) Bij een driefasige vierpolige asynchrone motor, in ster geschakeld op een net van $3 \cdot 400 \text{ V}$, worden volgende gegevens verstrekt:

- het opgenomen vermogen is 12 kW
- de weerstand van de statorwikkeling is $0,18 \Omega$ per fase
- de ijzerverliezen in de stator bedragen 250 W
- de mechanische verliezen zijn 500 W
- de opgenomen stroom is 30 A
- de slip is 5% bij nominale belasting

Bepaal:

- het luchtspleetvermogen $\rightarrow 11264 \text{ W}$
- het jouleverlies in de rotor $\rightarrow 563 \text{ W}$
- het elektromechanisch vermogen $\rightarrow 10700 \text{ W}$
- het nuttig vermogen $\rightarrow 10200 \text{ W}$
- het rendement van de motor $\rightarrow 85\%$
- de arbeidsfactor $\rightarrow 0,608$
- het toerental van de motor $\rightarrow 1425 \text{ tr/min}$
- het nuttig koppel $\rightarrow 68,38 \text{ Nm}$

c) Een driefasige kooiankeromotor, aangesloten op een net van $3 \cdot 400 \text{ V}$, 50 Hz levert een vermogen van 22 kW . Bij vollast is het toerental van de motor 960 tr/min . De statorverliezen bedragen 5% van het toegevoerd vermogen. Het rendement bedraagt 92% en de arbeidsfactor is $0,85$.

Bepaal:

- het aantal polen in de stator $\rightarrow 6$
- de slip van de motor $\rightarrow 4\%$
- het toegevoerd vermogen $\rightarrow 23913 \text{ W}$
- de opgenomen lijnstroom $\rightarrow 42,74 \text{ A}$
- de statorverliezen $\rightarrow 1196 \text{ W}$
- het luchtspleetvermogen $\rightarrow 22717 \text{ W}$
- koperverlies in de rotor $\rightarrow 909 \text{ W}$

9. Koppel van de motor

9.1. Afleiden van de formule voor het koppel

Het koppel dat de motor ontwikkelt is ongetwijfeld één van de belangrijkste factoren die de keuze van een motor bepalen.

We kunnen dit vergelijken met fietsen: het vraagt meer energie om te starten dan om een bepaalde snelheid te onderhouden (het aanzetkoppel is groter dan het nominaal koppel). Het is ook moeilijker om tegen een helling naar boven te rijden (motor onder belasting). Soms gebeurt het wel dat een helling té stijl is en dat we niet naar boven geraken ook al persen we alles uit de benen. (het maximaal koppel van de motor is dan nog kleiner dan het lastkoppel)

De rotor draait rond doordat op elke rotor geleider een Lorentzkracht werkt. Deze krachten vormen samen het koppel T op de rotoras. Het koppel is dus de kracht die op elk ogenblik aanwezig is op de rotoras en kan berekend worden met:

$$\rightarrow T_{em} = F_L \times r \quad (34.1)$$

We vertrekken van de reeds gevonden formule :

$$\rightarrow P_{r-j} = R_r \times I_r^2 = s \times P_L \quad (34.2)$$

$$\begin{aligned} & \downarrow \\ \rightarrow & P_L = \frac{R_r \times I_r^2}{s} \quad (34.3) \end{aligned}$$

Voor een kooirotor moet $R_r \times I_r^2$ nog vermenigvuldigd worden met de factor m . De factor m is een constante die het aantal rotorstaven per poolpaar voorstelt, dus:

$$\rightarrow m = \frac{z}{p}$$

Voor een sleepringankermotor is $m=3$

Vergelijking (34.3) wordt dan:

$$\rightarrow P_L = \frac{m \times R_r \times I_r^2}{s} \quad (34.4)$$

en het luchtspleetvermogen in punt 8:

$$\rightarrow P_L = T_{em} \times \omega_s = T_{em} \times \frac{2 \times \pi \times n_s}{60} \quad (34.5)$$

$$\begin{aligned} & \downarrow \\ \rightarrow & T_{em} = \frac{P_L}{\omega_s} \quad (34.6) \end{aligned}$$

We vervangen in (34.6) P_L door (34.4)

$$\rightarrow T_{em} = \frac{\frac{m \times R_r \times I_r^2}{s}}{\omega_s} \quad (34.7)$$

$$\begin{aligned} & \downarrow \\ \rightarrow & T_{em} = \frac{m \times R_r \times I_r^2}{s \times \omega_s} \quad (34.8) \end{aligned}$$

↓ we vervangen I_r door $I_r = \frac{E_{r0}}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{r0})^2}}$ (reeds gezien in punt 6.4)

$$\rightarrow T_{em} = \frac{m \times R_r}{s \times \omega_s} \times \frac{E_{r0}^2}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{r0}^2} \quad (35.1)$$

↓

$$\rightarrow T_{em} = \frac{m \times E_{r0}^2}{\omega_s} \times \frac{\frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{r0}^2} \quad (35.2)$$

↓ We noemen $\frac{m \times E_{r0}^2}{\omega_s}$ de koppelconstante Cte.

$$\rightarrow T_{em} = Cte \times \frac{\frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{r0}^2} \quad (35.3)$$

↓ We vermenigvuldigen met $\left(\frac{s}{s}\right)^2$, dit is toch gelijk aan 1

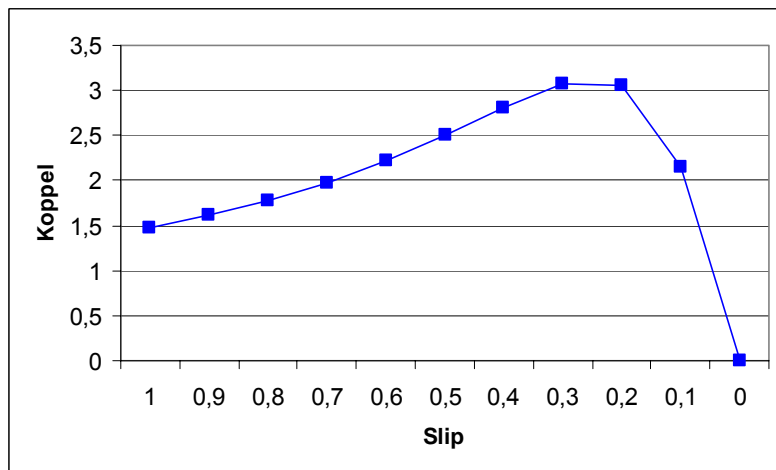
$$\rightarrow T_{em} = Cte \times \frac{\frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{r0}^2} \times \left(\frac{s}{s}\right)^2 \quad (35.4)$$

↓

$$\rightarrow T_{em} = Cte \times \frac{s \times R_r}{R_r^2 + (s \times X_{r0})^2} \quad \text{uitgedrukt in Nm (newton-meter)} \quad (35.5)$$

Voorbeeld: Cte=25; Rr=1Ω; Xr0=4Ω :

Slip	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
Koppel	1,47	1,61	1,78	1,98	2,22	2,5	2,81	3,07	3,05	2,16	0



We kunnen dus besluiten dat het koppel dat een motor levert enkel nog afhankelijk is van de slip, omdat C_{te} , R_r en X_{r0} constant zijn.

Opmerking:

Bij een vaste waarde van de slip is het koppel evenredig met het kwadraat van de aangelegde spanning omdat E_{r0} evenredig is met de aangelegde spanning.

9.2. De koppel-toerenkarakteristiek

Wanneer we het koppel in functie van de toerental van de rotor ($n_r = n_s \times (1 - s)$) in een grafiek tekenen komen we tot onderstaande grafiek. Deze grafiek noemen we de **koppel-toerenkarakteristiek**.

We kunnen dus besluiten dat het koppel dat de motor levert, afhankelijk is van het toerental.

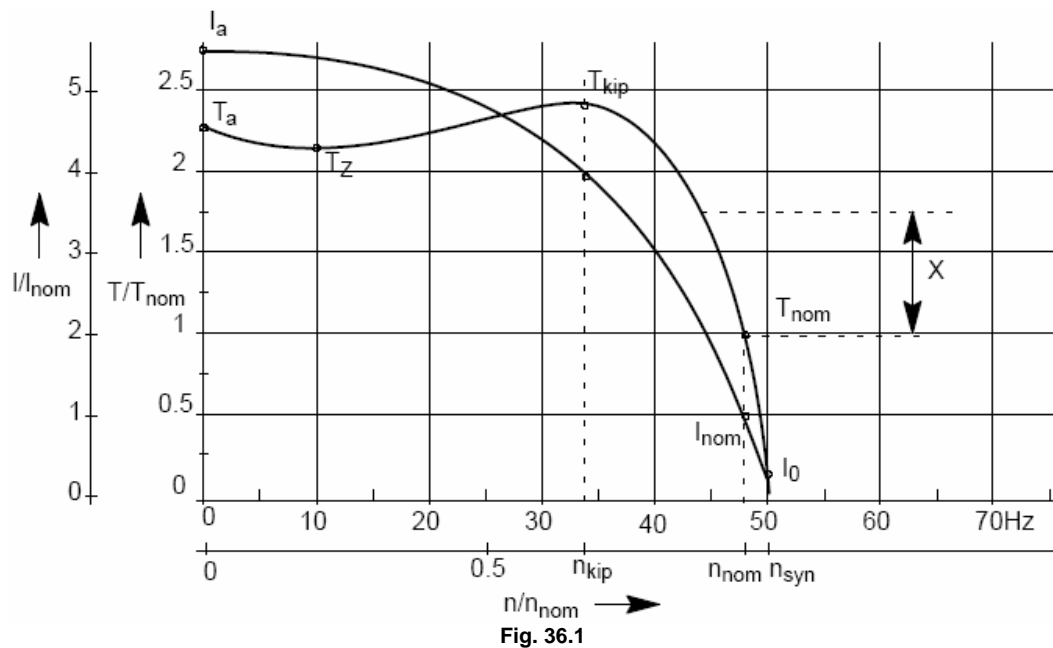


Fig. 36.1

Hierin is:

- ✓ **T_a (of M_a):** aanzetkoppel of losbreekkoppel van de motor: dit koppel dient om een last vanuit rusttoestand in beweging te brengen. Hoe groter dit koppel, des te gemakkelijker loopt de motor aan.
- ✓ **T_z (of M_z):** motorzadelkoppel
- ✓ **T_{kip} (of M_{kip}):** kippkoppel: dit is het maximale koppel dat de motor kan leveren bij nominale spanning en frequentie. Volgens de normen moet de motor dit koppel gedurende 15 sec kunnen aanhouden zonder stil te vallen.

De slip waarbij het koppel maximaal is, is te vinden door de afgeleide functie van de uitdrukking van het koppel af te leiden naar R_r/s en gelijk te stellen aan 0. Na een wiskundige berekening kom je tot de volgende resultaten:

$$\rightarrow s_{kip} = \frac{R_r}{X_{r0}} \quad (36.1)$$

We kunnen het maximum koppel dus naar links verplaatsen (grotere slip, maar kleiner toerental) door de weerstand van de rotorketen te vergroten. Dit wordt toegepast bij slepringmotoren.

- ✓ T_{nom} (of M_{nom}): nominaal koppel. De motor is gemaakt om dit koppel continu te leveren.

Ook het verloop van de statorstroom in functie van de slip is weergegeven in de grafiek:

- ✓ I_a : aanloopstroom .
- ✓ I_0 : nullaststroom: dit is de stroom wanneer de motor onbelast draait
- ✓ I_{nom} : nominale stroom: stroom bij nominale belasting.

Verklaring van het verloop van de koppeltoerentalcurve:

Bij stilstand is de rotorfrequentie groot waardoor de rotorkring sterk inductief is. Hierdoor zullen de rotorstromen sterk najen op de rotorspanning (welke de draaiflux veroorzaakt). De Lorentzkracht is afhankelijk van de stroom en van de inductie B . Op plaatsen waar de stroom groot is, is de inductie klein en omgekeerd (door de grote faseverschuiving ϕ_r) zodat het resulterend koppel niet maximaal is bij aanzetten.

Naarmate de rotorsnelheid stijgt zal de rotorkring minder inductief worden omdat de rotorfrequentie en dus ook X_r daalt. De faseverschuiving ϕ_r wordt dus kleiner. Ook de opgewekte rotorspanning E_r daalt meer dan dat de impedantie Z_r daalt zodat de rotorstroom I_r kleiner worden. Maar deze kleinere stroom bevinden zich nu in een sterker magnetisch veld (kleinere faseverschuiving) zodat het resulterende koppel stijgt.

Wanneer de rotorsnelheid bijna gelijk is aan de synchrone snelheid, zijn de rotorspanningen en dus ook de rotorstromen zeer klein geworden, waardoor het koppel terug daalt.

9.3. Het werkpunt van de motor

Wat bedoelen we met het werkpunt van de motor?

Het werkpunt is het snijpunt van de koppel-toerentalcurve van de motor met de lastcurve.

We hebben een motor met een bepaalde koppel-toerentalcurve (groene lijn). Deze motor moet een belasting aandrijven (last 1). Bij het aanlopen is het koppel van de motor groter dan het koppel van de belasting: de motor zal hierdoor versnellen tot het punt waar het koppel van de motor gelijk is aan het koppel van de belasting (werkpunt 1). Al de energie die de motor levert wordt dan aan de belasting gegeven, de motor zal niet meer versnellen, maar blijven verder draaien op een constant toerental n_2 . De stroom daalt van de maximale waarde bij stilstand tot in punt 6.

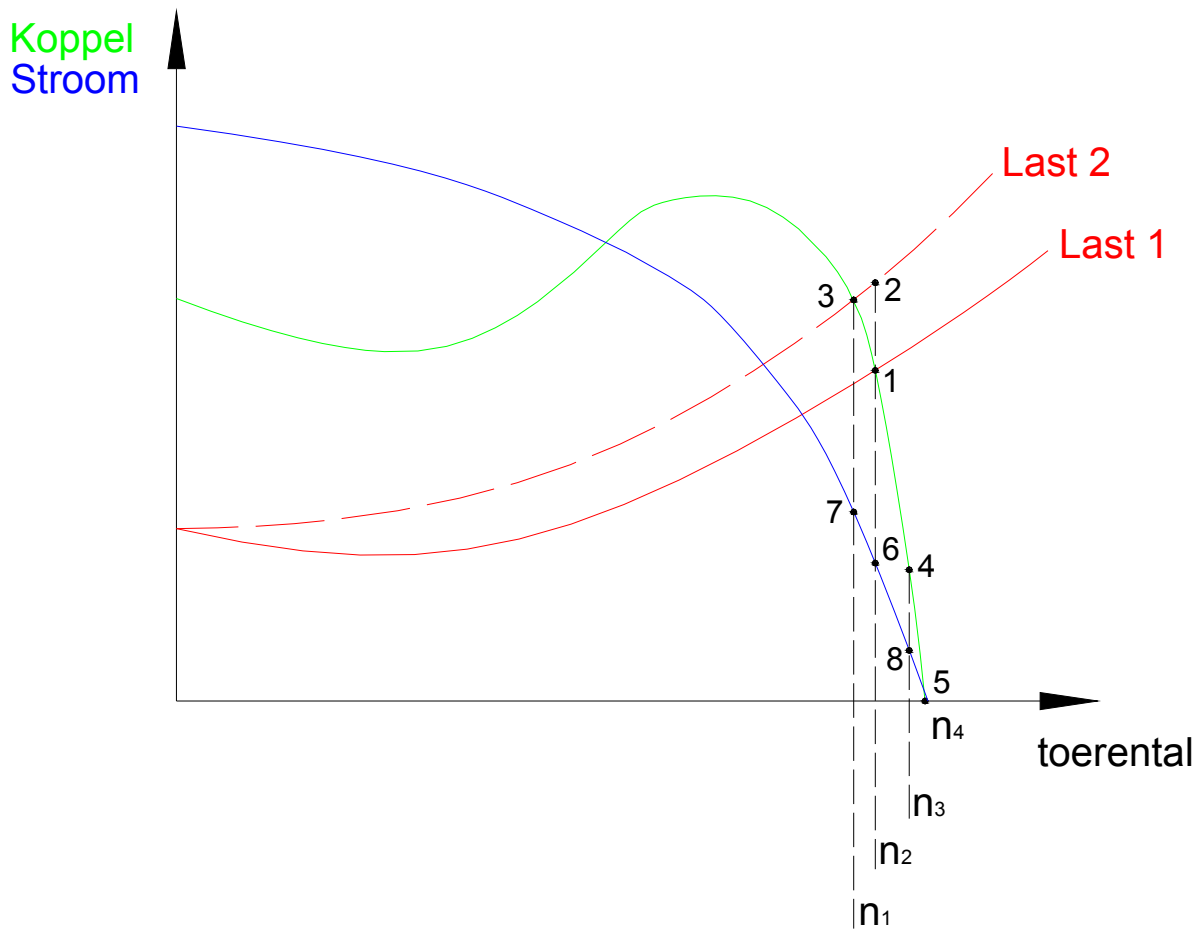
Wanneer de belasting stijgt van last 1 naar last 2 zien we dat het koppel dat de belasting vraagt groter is dan het koppel dat de motor kan leveren (punt 2). Daardoor zal de motor vertragen zodat het werkpunt verschuift van punt 1 naar 3. Het koppel dat de motor levert is terug gelijk aan het koppel dat de belasting vraagt: de motor lever nu een groter koppel bij een kleiner toerental. We zien ook dat bij deze grotere belasting de stroom gestegen is van punt 6 naar 7.

Wanneer we de belasting wegnemen (nullast) zal de motor versnellen en het werkpunt verschuiven naar 4. De motor moet slechts een klein koppel leveren om de verliezen te compenseren en draait aan een hoog toerental (bijna gelijk aan het synchroon toerental). De stroom daalt tot een kleine waarde (punt 8)

In punt 5 (bij het synchroon toerental= toerental van het draaiveld) zien we dat de motor geen koppel levert. Dit is logisch, want wanneer de motor even snel zou ronddraaien als het draaiveld, zouden er geen veldlijnen gesneden worden door de rotor geleiders, geen emk, geen stroom en dus ook geen Lorentzkracht.

Het aanlopen van een motor zal geen problemen opleveren wanneer de motorkarakteristiek bij ieder toerental boven de lastcurve gelegen is. Het verschil tussen deze 2 noemen we het versnellingskoppel.

Bij het dimensioneren van een motor voor een bepaalde machine dient het werkpunt zo dicht mogelijk bij de nominale waarde van de motor

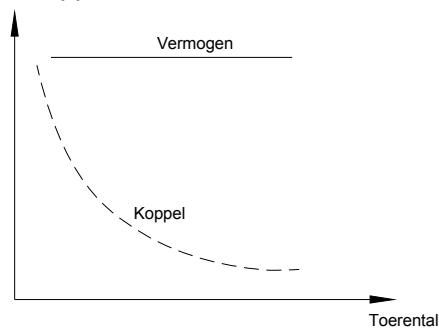


9.4. Verschillende belastingen

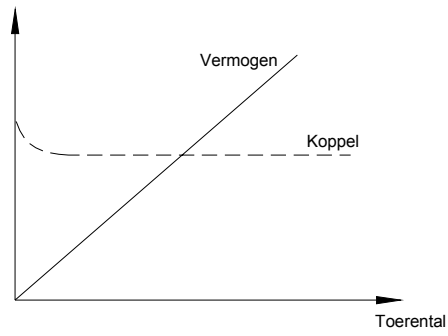
9.4.1. Machines met een constante trekkraft:

deze worden bijvoorbeeld gebruikt voor het oprollen van materialen met een constante trekkraft. Hiertoe behoren ook machines voor het snijden van fineer- en gereedschapsmachines.

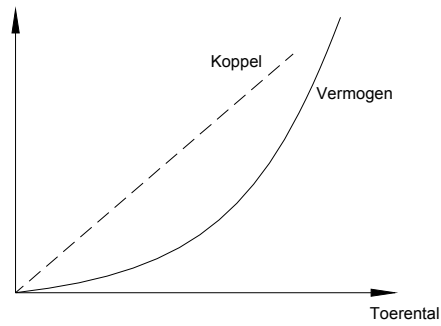
Op de grafiek zien we dat deze machines een hoog koppel nodig hebben om te starten, maar eens ze op toeren zijn is slechts een klein koppel vereist.



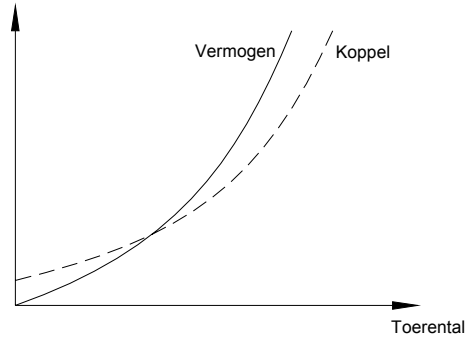
9.4.2. Transportbanden, kranen, verdringerpompen:



9.4.3. Walsen, vlakmachines en andere materiaalbewerkingsmachines:



9.4.4. Machines waar sprake is van centrifugaalkrachten: ventilatoren, centrifuges, centrifugaalpompen:



10. Equivalent schema

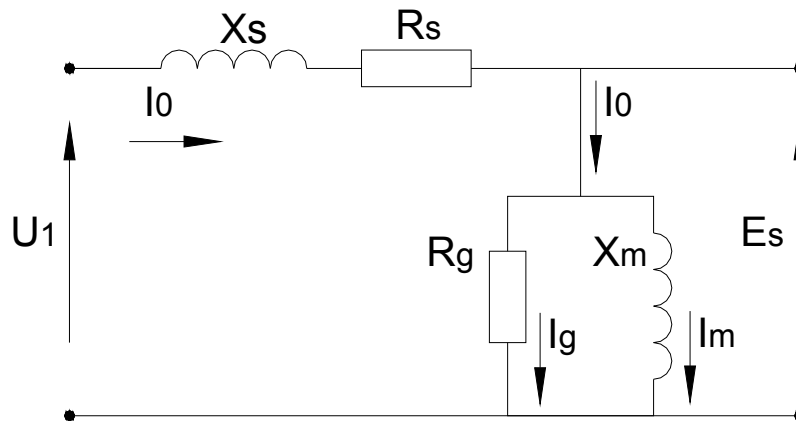
Waarom hebben we een equivalent schema nodig?

Dit schema laat ons toe om wiskundig alle parameters van de inductiemotor te bepalen.

Asynchrone motoren hebben in principe 6 spoelen: 3 spoelen in de stator en 3 in de kortsluitrotor (die zich magnetisch gedraagt alsof hij uit 3 spoelen bestaat).

We weten ook reeds dat een asynchrone motor elektrisch gezien vergeleken kan worden met een transformator: de stator is te vergelijken met de primaire wikkeling en de rotor met de secundaire wikkeling van de transformator. Het ligt bijgevolg voor de hand dat de equivalente keten van de asynchrone motor dezelfde elementen bezit als de transformator. De slip van de motor is de enige grootte die bij een transformator niet voorkomt en die bijgevolg een verschil maakt tussen de twee diagrammen.

De equivalente kring van de stator van een inductiemotor met open rotorkring ziet er dan als volgt uit:

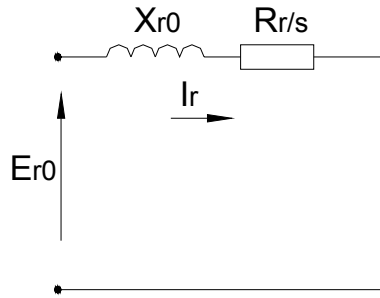


Hierin is

- ✓ U_1 : aangelegde fasespanning aan één statorwikkeling
- ✓ I_0 : nullaststroom
- ✓ X_s : lekreactantie van de statorwikkeling
- ✓ R_s : ohmse weerstand van de statorwikkeling
- ✓ R_g : stelt ijzerverlies voor
- ✓ I_g : actieve component van I_0 die in fase is met U_1 .
- ✓ X_m : stelt component voor die draaiveld opwekt
- ✓ I_m : reactieve component van I_0 die 90° najilt op U_1 .
- ✓ E_s : opgewekte zelfinductiespanning in de statorwikkeling

In punt 6.4 hebben we reeds volgende formule afgeleid :
$$I_r = \frac{E_{r0}}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{r0})^2}}$$

We kunnen hieruit afleiden dat de rotor van een inductiemotor zich gedraagt **“alsof”** (dit is zo niet) er een constante emk E_{r0} een stroom stuurt door een impedantie die gevormd wordt door een veranderlijke weerstand R_r/s en een constante inductantie X_{r0} , of de rotorkring in schemavorm:



Hierin is

- ✓ E_{r0} : de opgewekte spanning over de rotorwikkeling bij stilstand van de rotor,
- ✓ I_r : rotorstroom,
- ✓ X_{r0} : inductieve reactantie van de rotorwikkeling bij stilstand van de rotor,
- ✓ R_r : ohmse weerstand van een statorwikkeling,
- ✓ s : slip

De weerstand van de rotorkring (R_r/s) kunnen we opsplitsen in 2 delen: een deel R_r dat de werkelijke ohmse weerstand vertegenwoordigt en een deel R_r' dat de veranderlijke weerstand vertegenwoordigt.

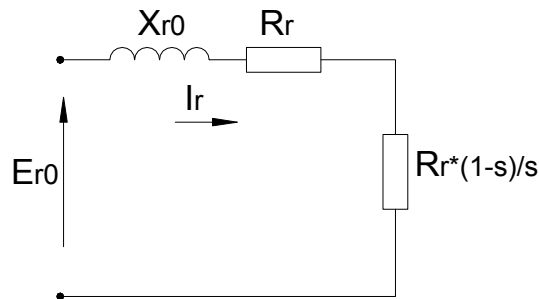
Omdat de 2 weerstanden een serieschakeling vormen, is het onderling verband als volgt uit te drukken:

$$\rightarrow \frac{R_r}{s} = R_r + R_r' \tag{41.1}$$

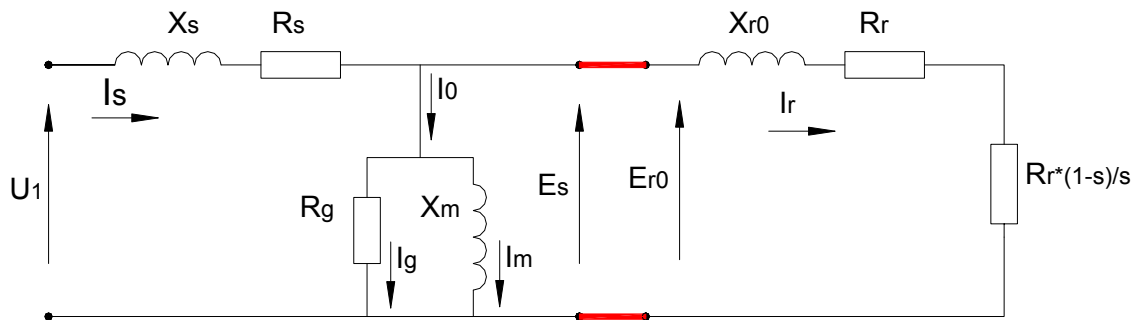
$$\Downarrow$$

$$\rightarrow R_r' = \frac{R_r}{s} - R_r = \frac{R_r - s \times R_r}{s} = R_r \times \left(\frac{1-s}{s} \right) \tag{41.2}$$

Dus,



Wanneer de windingsverhouding $k = \frac{N_{stator}}{N_{rotor}} = \frac{E_s}{E_{r0}}$ gelijk is aan 1 is E_s gelijk aan E_{r0} . We mogen dan de equivalente kring van de stator en de rotor met elkaar verbinden en krijgen het volgende:



Wanneer de windingsverhouding k niet gelijk is aan 1 moeten is E_s niet meer gelijk aan E_{r0} . Daarom moeten net zoals bij de transfo, alle secundaire impedanties vermenigvuldigt worden met k^2 , de secundaire stroom I_r met $1/k$ en E_{r0} met k .

→ **Waarom? (ter info!)**

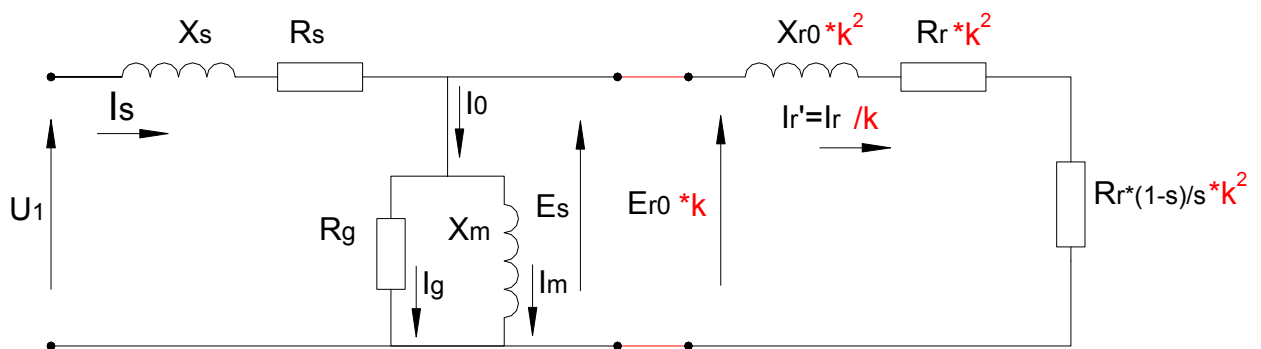
Wanneer we de equivalente keten van de rotor en de stator met elkaar verbinden bij een k verschillend van 1, leggen we eigenlijk aan de rotorkring een spanning E_s aan die k maal te groot is omdat:

$$\begin{aligned} \rightarrow k &= \frac{N_{stator}}{N_{rotor}} = \frac{E_s}{E_{r0}} = \frac{I_r}{I_r'} & \text{waarbij } \vec{I}_r' &= \vec{I}_s - \vec{I}_0 \\ \Rightarrow E_s &= k \times E_{r0} \\ \Rightarrow I_r &= k \times I_r' & \Rightarrow I_r' &= \frac{I_r}{k} \end{aligned}$$

De spanningsvergelijking in de secundaire kring wordt dan:

$$\begin{aligned} \rightarrow \vec{k \cdot E_{r0}} &= \vec{k \cdot X_{r0} \cdot I_r} + \vec{k \cdot R_r \cdot I_r} + \vec{k \cdot R_r' \cdot I_r} \\ \rightarrow \vec{k \cdot E_{r0}} &= \vec{k \cdot X_{r0} \cdot (k \cdot I_r')} + \vec{k \cdot R_r \cdot (k \cdot I_r')} + \vec{k \cdot R_r' \cdot (k \cdot I_r')} \\ \rightarrow \vec{k \cdot E_{r0}} &= \vec{(k^2 \cdot X_{r0}) \cdot I_r'} + \vec{(k^2 \cdot R_r) \cdot I_r'} + \vec{(k^2 \cdot R_r') \cdot I_r'} \end{aligned}$$

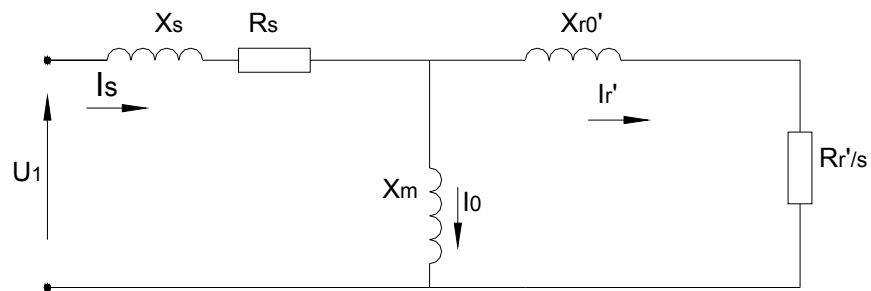
We krijgen dan het globaal equivalente schema:



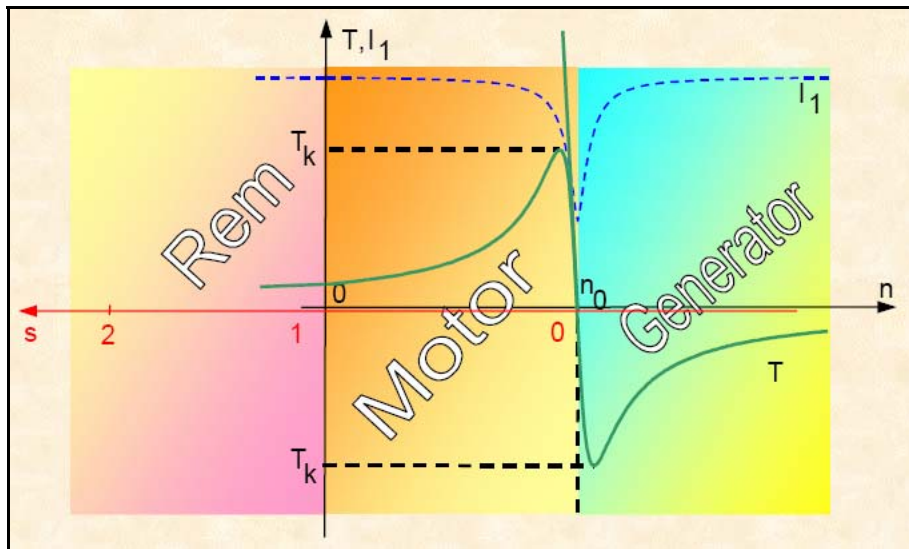
Opmerking:

- ✓ $X_{r0} \times k^2 = X_{r0}'$: naar de stator getransfereerde X_{r0}
- ✓ $\frac{R_r}{s} \times k^2$: dit is de naar de stator getransfereerde veranderlijk rotorweerstand
- ✓ $\frac{I_r}{k} = I_r'$: dit is de naar de stator getransfereerde rotorstroom

In dit schema wordt soms R_g verwaarloosd omdat bij nullast de frequentie en dus ook de ijzerverliezen zeer klein zijn. Bij belasting stijgt de frequentie weliswaar zodat de ijzerverliezen terug stijgen, maar dit wordt dan weer gecompenseerd door kleinere wrijvings- en ventilatieverliezen zodat. We komen zo tot een vereenvoudigd equivalent schema:



11. Werkgebieden van de motor



In het **motorgebied** draait de rotor in de zin van het statordraaiveld, met een rotoatiesnelheid tussen 0 en de synchrone snelheid, waarbij de slip varieert tussen 1 en 0.

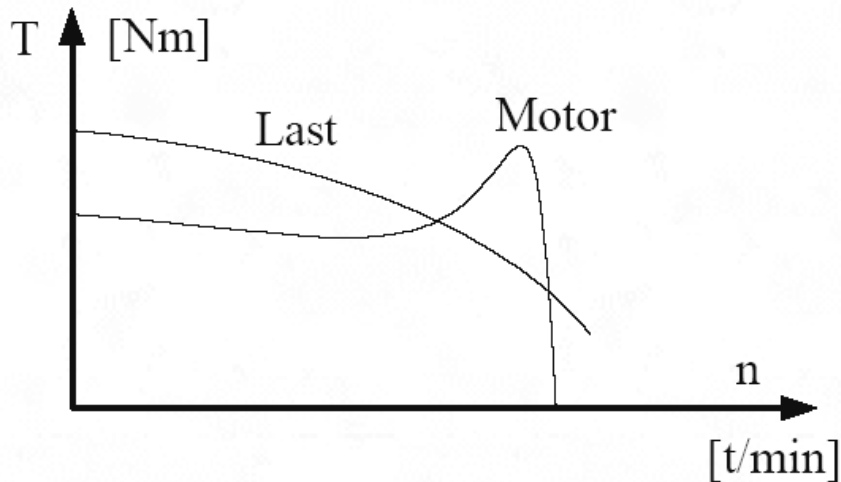
In het **remgebied**, waar de slip groter is dan 1, wordt de rotatie van de rotor tegengewerkt door omkering van de draaizin van het draaiveld. Hiervoor worden 2 fasen verwisseld. De rotor komt tot stilstand en de stator wordt van het net geschakeld voordat de rotor in de andere zin kan starten.

In het **generatorgebied** wordt de motor aangedreven met een snelheid boven de synchrone snelheid, terwijl de stator aangesloten blijft op een spanning met constante frequentie. Deze spanningsbron bepaalt de synchrone snelheid en levert het vereiste reactief vermogen voor draaiveld op te wekken.

12. Aanlopen van asynchrone motoren

Het aanlopen van een driefasige asynchrone motor stelt wel eens problemen wat aanloopstromen I_a en aanloopkoppel M_a betreft.: de aanloopstroom moet binnen bepaalde grenzen blijven. Het schakelen van motoren kan manueel d.m.v. een nokkenschakelaar of automatisch via contactoren en de nodige bedieningselementen (vb. drukknop) plaatsvinden. In de hedendaagse technologie wordt meer en meer gebruik gemaakt van elektronische motorsturingen zoals de softstarters en frequentieregelaars.

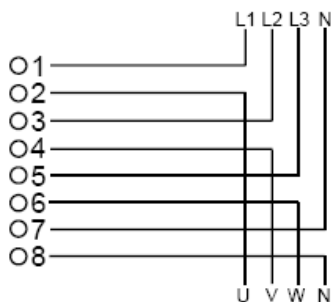
12.1. Direct aanzetten van asynchrone motoren



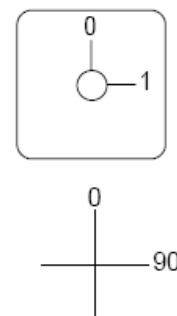
Dit is de meest eenvoudige schakeling waarbij de motor rechtstreeks (met beveiliging) op het net wordt geschakeld. Dit is enkel mogelijk bij motoren met een beperkt vermogen ($< 2,2$ kW). De aanloopstroom kan hier 6 à 7 maal de nominale stroom bereiken, terwijl het aanloopkoppel een waarde van 0,5 tot 1,5 maal het nominale koppel aanneemt.

De directe aanloop kan gebeuren via een aan/uit nokkenschakelaar of via een contactor en start-stop schakeling.

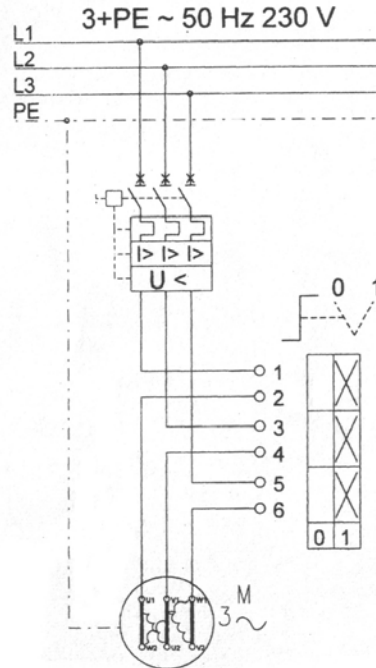
a) Directe aanloop via AAN/UIT nokkenschakelaar



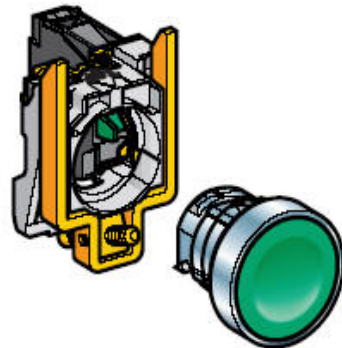
	0	90	
		X	1
		X	2
2 polen		X	3
		X	4
3 polen		X	5
		X	6
4 polen		X	7
		X	8



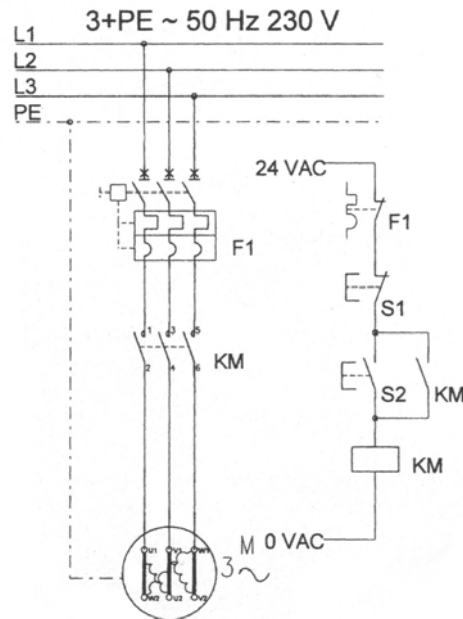
In de stand 0 is er geen contact tussen L1 en U, L2 en V, L3 en W. Wanneer we de nokkenschakelaar met de hand draaien naar stand 1 (90°), dan wordt inwendig in de nokkenschakelaar 1 en 2 met elkaar verbonden (en dus L1 met U), 3 met 4, 5 met 6, 7 met 8.



b) Automatische directe aanloop



Drukknopkast met start/stop drukknop in de stuurkring



Stuur- en vermogenkring van een start-stop-schakeling

Hier moeten we de motor starten met een start-drukknop en stoppen met een stop-drukknop . Deze bevinden zich in de stuurkring (rode draden)

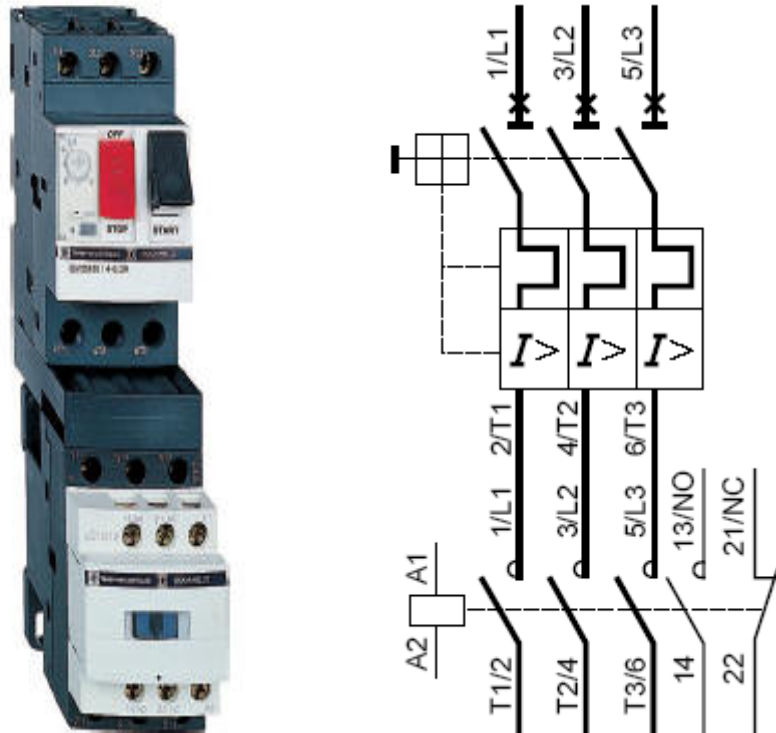
Wanneer we op de start-drukknop duwen, zal er spanning komen te staan over de spoel in de contactor. De contactor zal “bediend” worden , zodat de vermogencontacten van de contactor die zich in de vermogenkring (zwarte draden) bevinden gaan sluiten. Er komt spanning te staan op de klemmen van de motor, waardoor deze begint te draaien. Wanneer we de start-drukknop loslaten zal de contactor bekrachtigd blijven door het overname-contact van de contactor dat parallel over de start-drukknop staat.

Wanneer we de motor willen stoppen moeten we op de stop-drukknop duwen, zodat de spanning over de spoel van de contactor wegvalt. De vermogencontacten in de vermogenkring gaan terug open en de motor valt stil.

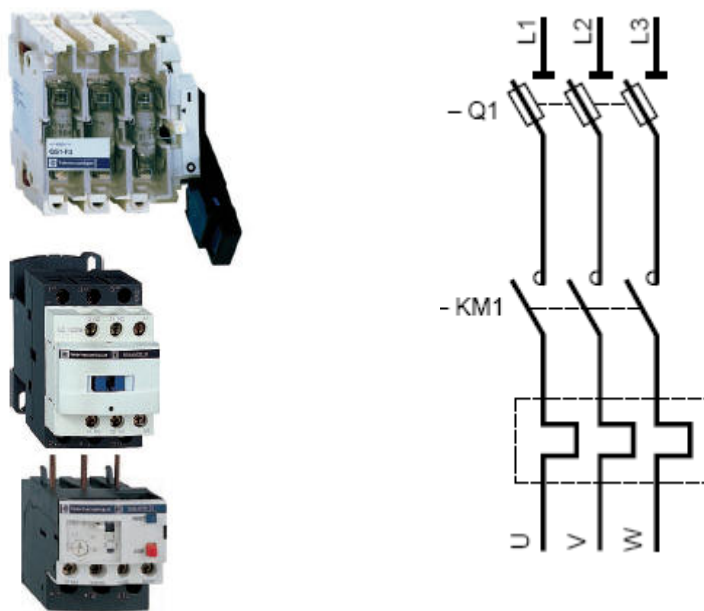
We moeten de motor beveiligen tegen overbelasting en kortsluiting:

Tegen overbelasting beveiligen we met een thermisch-magnetische motorbeveiliging, ofwel met een thermisch overbelastingsrelais. De NC-hulpcontacten van deze componenten plaatsen we in de stuurkring (in serie met de stop-drukknop) zodat de spanning over de contactorspoel wegvalt wanneer de motor wordt overbelast.

Wanneer we een thermisch-magnetische motorbeveiliging gebruiken hebben we ook al een beveiliging tegen kortsluiting. Wanneer we een thermisch relais gebruiken moeten we nog smeltveiligheden of een magnetische motorbeveiliging bijplaatsen.



Vermogenkring van directe aanloop met thermisch-magnetische motorbeveiligiger en contactor



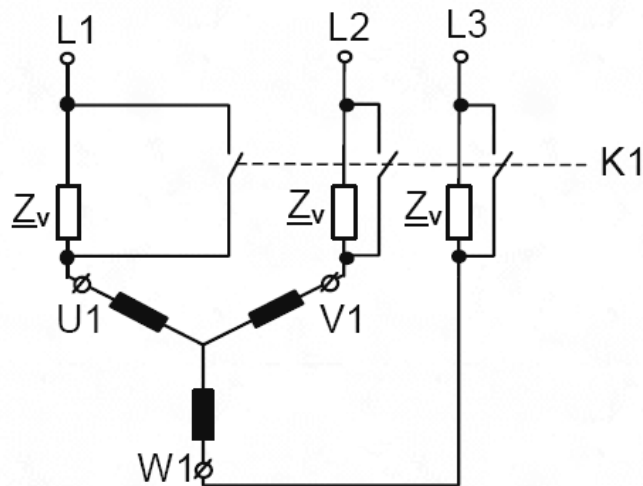
Vermogenkring van directe aanloop van motoren (met grotere vermogens) met scheider (met smeltveiligheden), contactor en thermisch relais

12.2. Aanloop met verlaagde spanning

Grotere motoren (>2,2 kW) worden bij het aanzetten aan een verlaagde spanning gelegd, met als doel de aanloopstroom binnen de voorgeschreven grenzen te houden en het aanloopkoppel te verminderen.

12.2.1. Aanloop met statorvoorschakelimpedanties

De motor wordt bij het aanzetten op het net geschakeld via drie impedanties die in serie geschakeld zijn met de motorwindingen. Als de motor zijn normale snelheid bereikt heeft worden de impedanties kortgesloten door contactor K1 en krijgt de motor de volle voedingsspanning. Omdat de spanning over de statorwinding bij aanloop kleiner is zal ook het koppel kleiner zijn. Opmerking: bij het kortsluiten van de impedanties is er geen onderbreking van de stroomkring en ontstaan er dus ook geen vonken.



12.2.2. Aanloop met aanzettransformator (spaartransformator)

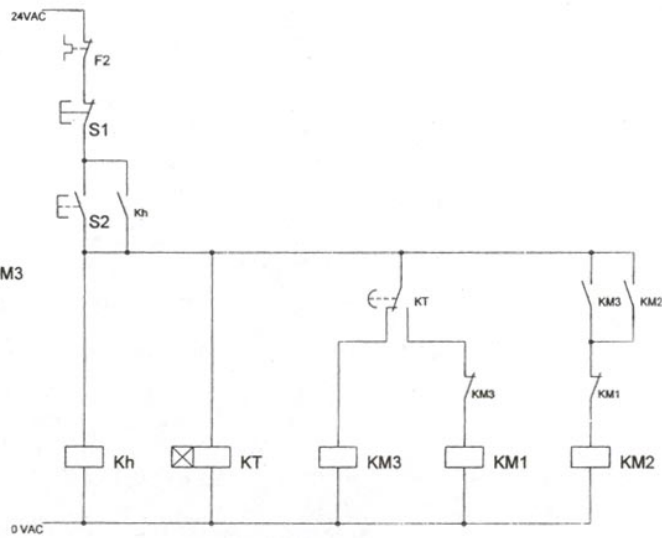
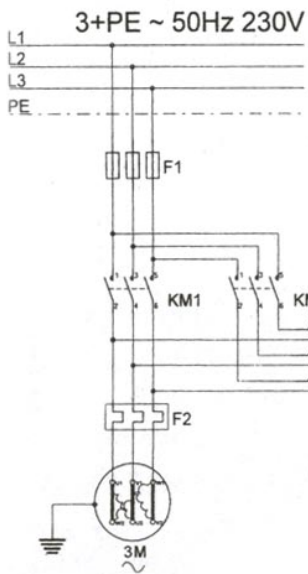
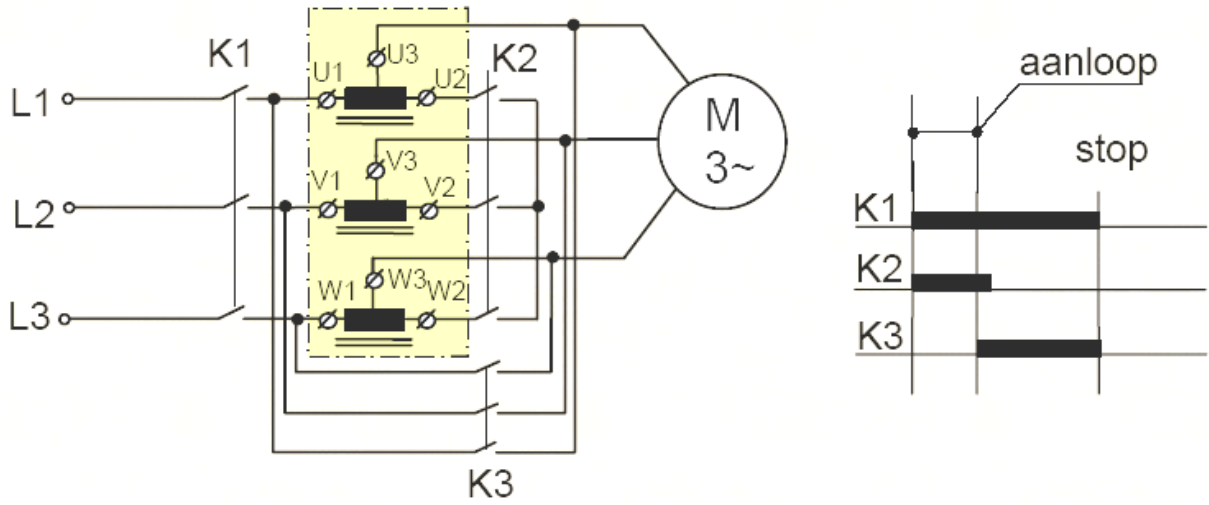
Een andere mogelijkheid om de motor met verlaagde spanning aan de statorklemmen te laten aanlopen is die met een spaartransformator. Hiermee kan men de stroom en het aanloopkoppel gedurende het aanlopen verlagen tot de gewenste waarde. Hier hebben we geen verlies door warmte.

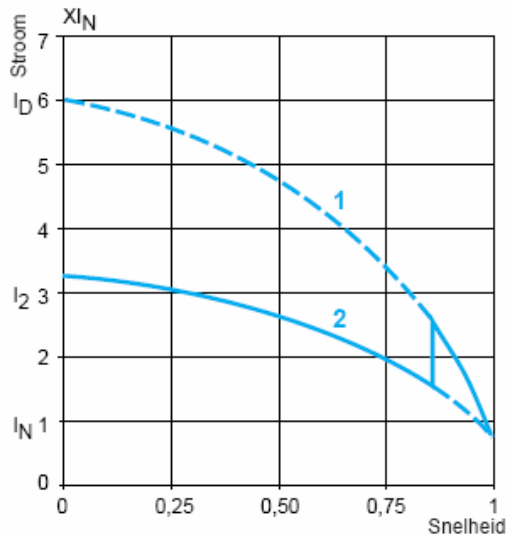
Dit aanzetsysteem wordt toegepast bij motoren met een vermogen dat groter is dan 100 kW.

Het opstarten verloopt in 3 stappen:

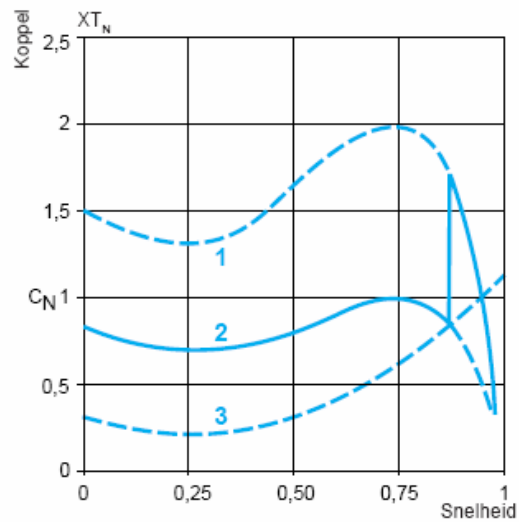
- ✓ Eerst wordt de spaartransfo in ster verbonden met het net door sluiten van K1 en K2: de motor wordt nu op verlaagde spanning opgestart.
- ✓ In de tweede stap opent K2: In deze overgangsfase fungeert de transfo als smoorspoel. Dit verzekert een continuïteit van de spanning in de motor op het ogenblik van de omschakeling naar het net.
- ✓ Dan zal K3 sluiten waardoor de motor op volle voedingsspanning wordt geschakeld.

spaartransformator





- 1 Rechtstreekse koppingsstroom
2 Stroom met spaartransformator

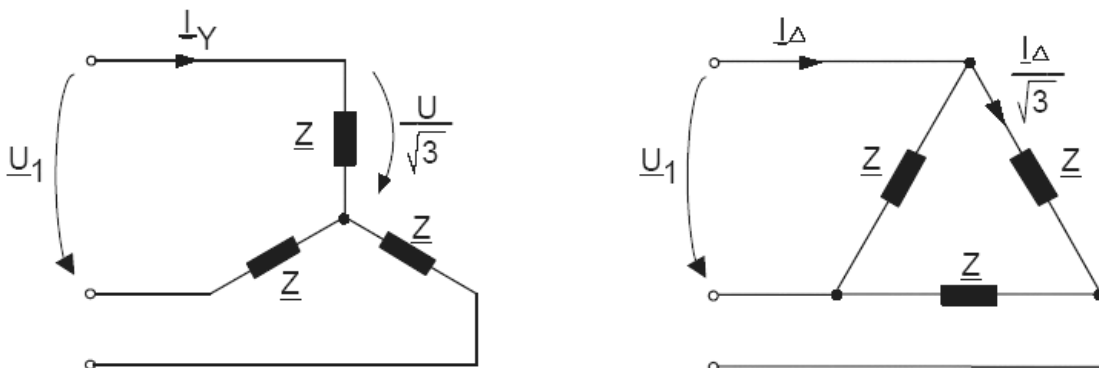


- 1 Rechtstreeks motorkoppel
2 Koppel met spaartransformator
3 Weerstandskoppel van de machine

12.2.3. Aanloop in ster-driehoek

Hier worden, bij het aanlopen van de motor, de statorwikkelingen via een schakeling manueel (ster-driehoek nokkenschakelaar) of automatisch in ster geschakeld.

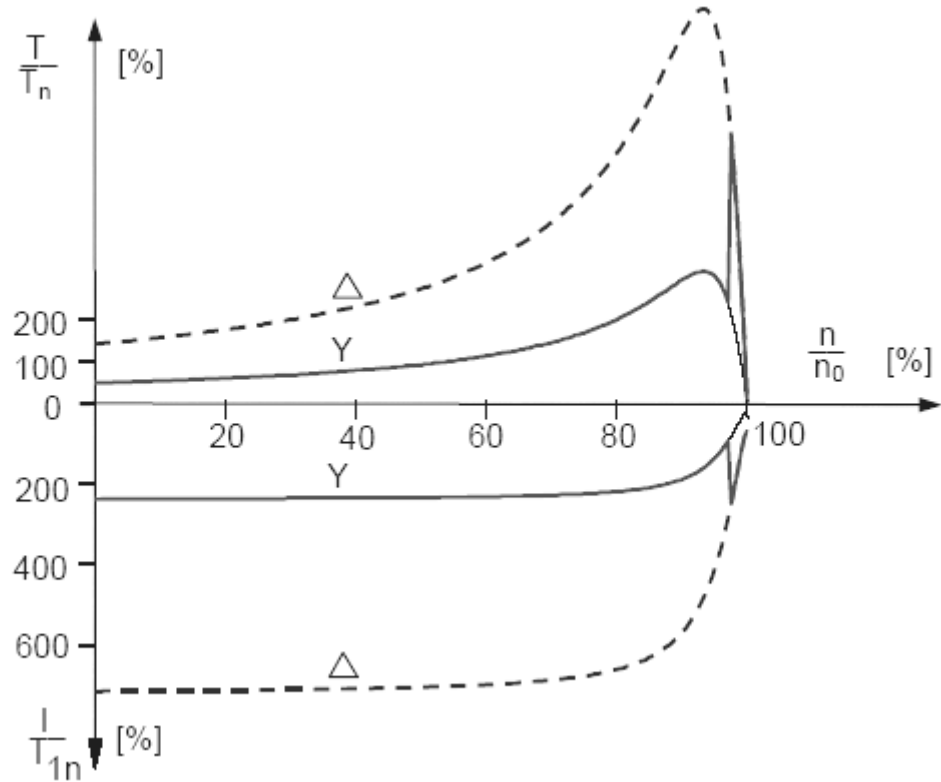
Wanneer de motor op snelheid is gekomen, wordt naar de Δ -stand overgeschakeld. De wikkelingen van de motor krijgen nu hun volle spanning of lijnspanning waardoor de motor op nominaal regime kan verder draaien.



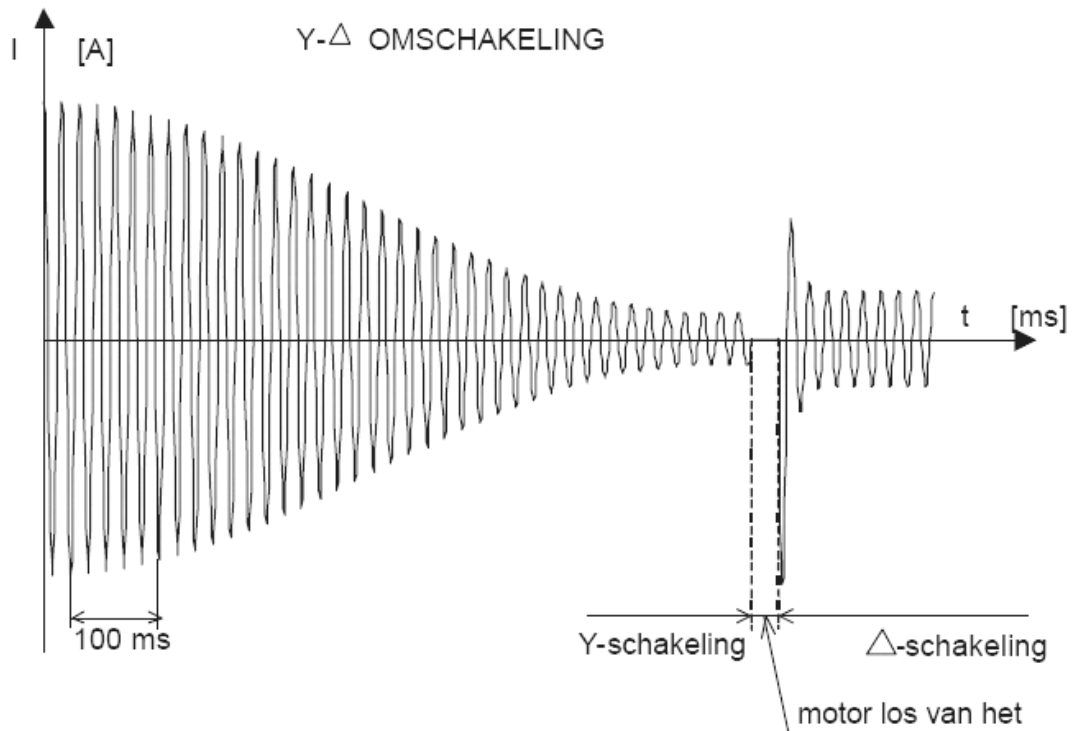
Bij deze aanloopmethode worden het aanloopkoppel en de aanloopstroom teruggebracht tot $1/3$ van de waarde die men zou krijgen bij directe inschakeling met de statorwikkeling in driehoek. Vandaar dat ster-driehoekschakelaars vooral worden gebruikt waar er geen groot belastingskoppel nodig is bij het aanzetten, zoals bij zaagmachines, draibanken, freesmachines, ...

Oefening:

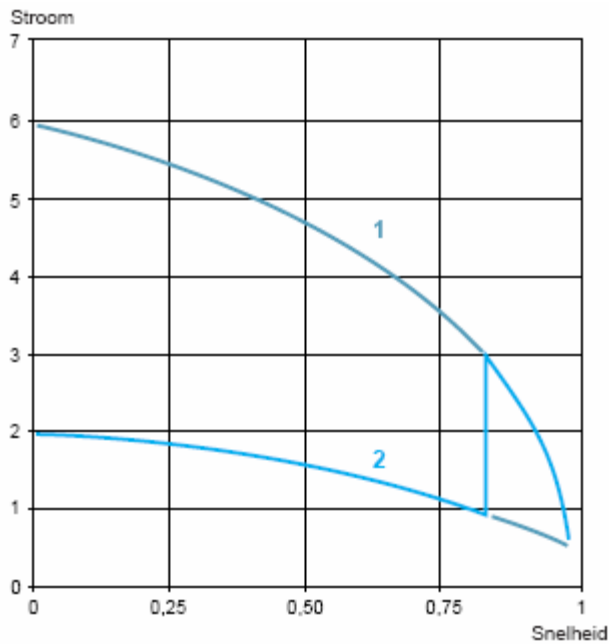
Drie identieke impedanties $\hat{Z} = 80 + 60j$ zijn achtereenvolgens in ster en in driehoek aangesloten op een driefasen evenwichtige spanning van $3 \cdot 400$ V, 50 Hz. Bereken in de 2 gevallen de lijnstroom en vergelijk deze met elkaar.



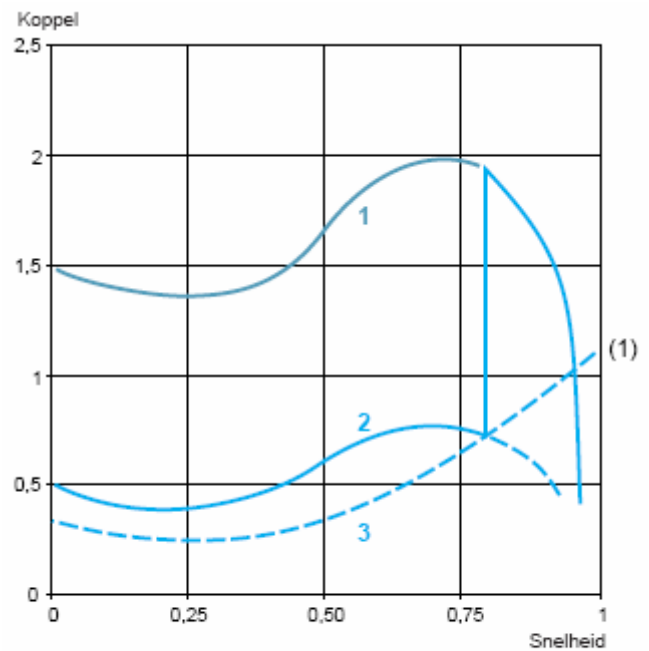
In bovenstaande figuur is de koppeltoerentalkarakteristiek van een inductiemotor met Y- Δ schakeling weergegeven. Onderaan op de figuur is het stroomverloop getekend. Merk de stroompiek bij het overschakelen van weergegeven. Onderaan op de figuur is het stroomverloop getekend. Merk de stroompiek bij het overschakelen van Y naar Δ .



Ofwel in 2 aparte grafieken:



- 1 Start in koppeling "driehoek"
2 Start in koppeling "ster"



- 1 Start in koppeling "driehoek"
2 Start in koppeling "ster"
3 Weerstandskoppel van de machine

Opmerkingen:

- ✓ Merk op dat er geen plaatjes mogen verbonden zijn aan het klemmenbord omdat de schakelaar nu de juiste verbindingen maakt. Ook moeten de 6 aansluitklemmen bereikbaar zijn.
- ✓ Mag ik een motor, met op het kenplaatje 230/400 V, aanlopen via ster-driehoek op een net van 3*400V?

Nee, omdat er maximum 230 V over de fasewikkeling mag staan. Wanneer we dus in ster driehoek aanlopen is er in ster nog geen probleem, maar wanneer we overschakelen op driehoek staat er dan 400 V over elke wikkeling. Dit is dus té veel, waardoor de wikkelingen té fel zullen opwarmen.

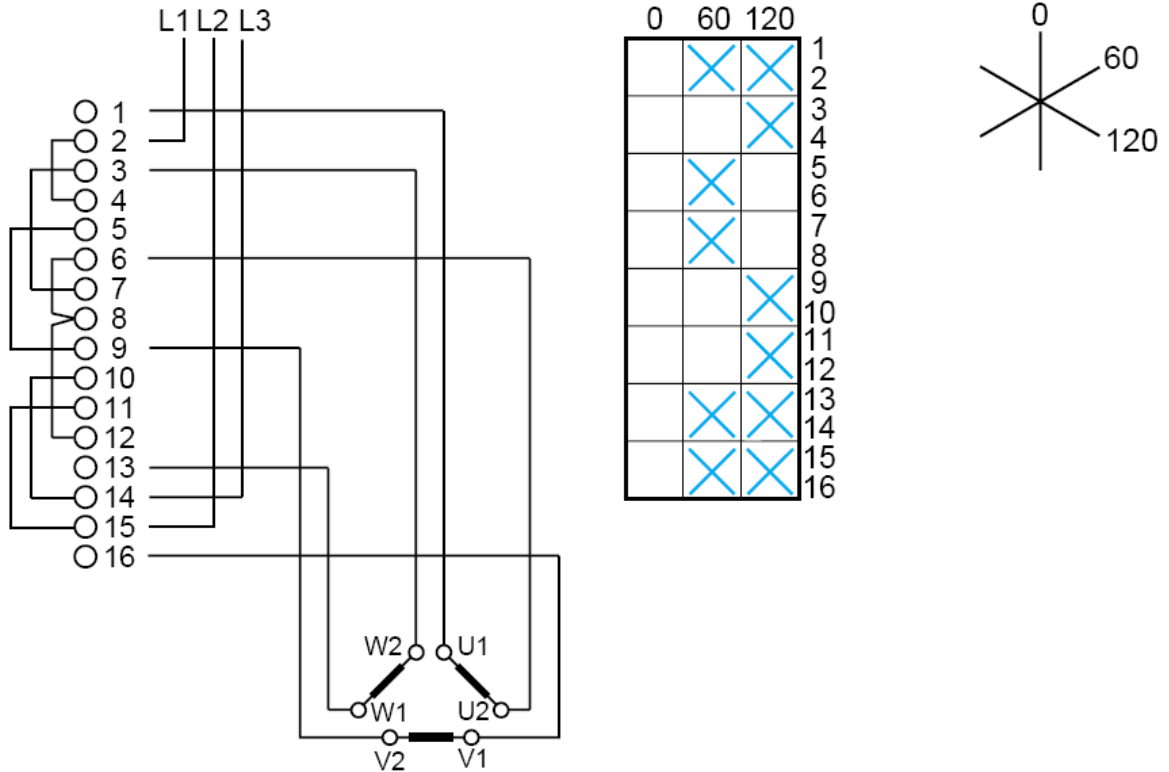
Wanneer ik deze motor toch wil laten aanlopen in ster-driehoek, zal je de netspanning moeten verlagen tot 3*230 V.

- ✓ Bij het overschakelen van ster naar driehoek, blijft de motor draaien vanwege de inertie. Dit betekent dat de motor een spanning opwekt en even als generator werkt.

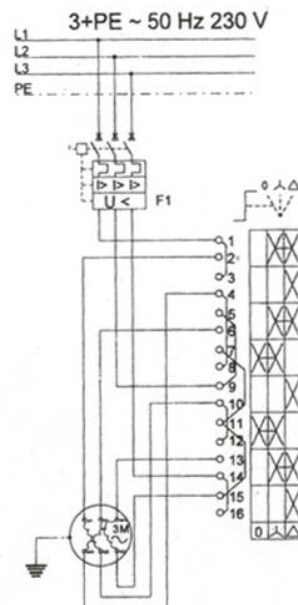
a) Ster-driehoek nokkenschakelaar:

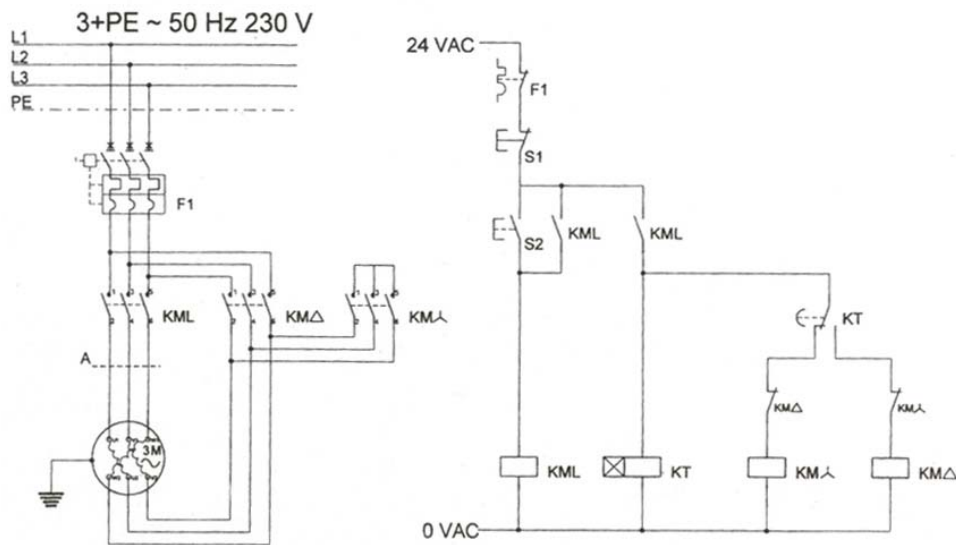
Bij het startten van de motor draaien we eerst naar 60°. In de tabel zien we welke klemmen inwendig worden doorverbonden (hier staat namelijk een kruisje). Bij 60° wordt de motor in ster aangesloten. Wanneer we de schakelaar verder draaien naar 120°, wordt de motor in driehoek verbonden.

Opmerking: De aansluitingen links tussen de bolletjes zijn reeds aanwezig. Enkel de draden rechts van de bolletjes moeten nog aangesloten worden.



Voorbeeld voor de verbinding tussen 3 en 4: in stand 0 staat er geen kruisje, dus geen verbinding. Ook wanneer we overschakelen naar de sterstand zal 3 niet verbonden worden met 4. Pas bij overgang van ster naar driehoek zien we een kruisje in de tabel staan en zal 3 met 4 verbonden worden inwendig in de contactor.



b) Automatische ster-driehoekschakeling:

De aanlooptijd in sterschakeling wordt meestal d.m.v. een tijdschakelaar (op de contactor) ingesteld tussen 0 en 30 s.

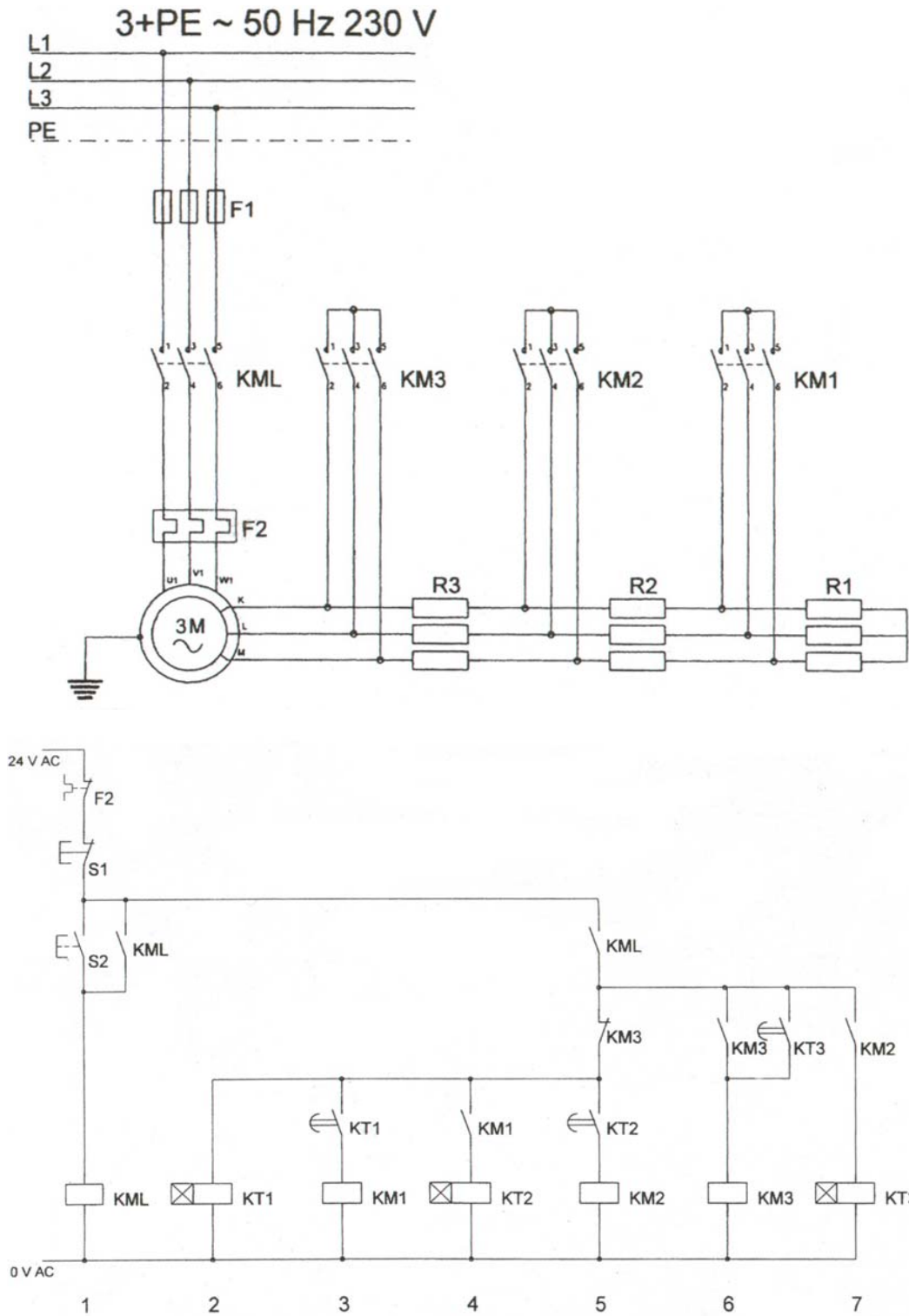
De driehoekscontactor mag pas sluiten als de stercontactor geopend is. Omdat de motorwikkelingen sterk inductief zijn, leidt dit tot een stroomstoot. Deze stroomstoot is wel kort maar kan, afhankelijk van het motortype toch groot zijn. De overgangstijd van ster naar driehoek is bijgevolg zeer belangrijk. Gewoonlijk is een speciale "timer" ingebouwd om een tussentijd van 30 tot 50 ms in te bouwen tussen het openen van de ster- en het sluiten van de driehoekscontactor. Dit laat toe eventuele vonken te doven gedurende het omschakelen. De 2 contactoren zijn zo verbonden dat ze nooit samen kunnen gesloten worden.



Ster-driehoek schakeling

12.3. Aanloop met rotorweerstand (bij sleepringankermotor)

Zoals reeds eerder vermeld, gedraagt een motor zich bij het aanlopen als een transformator met kortgesloten secundaire (= rotorstaven of wikkelingen). Wanneer we nu beschikken over een motor met bewikkelde rotor met sleepringen, dan kunnen we de kortsluitstromen in de rotor beperken bij het opstarten door uitwendige weerstanden bij in serie met de rotorwikkelingen te schakelen via sleepringen en borstels. Dus door het begrenzen van de rotorstroom, wordt ook de statorstroom begrensd.

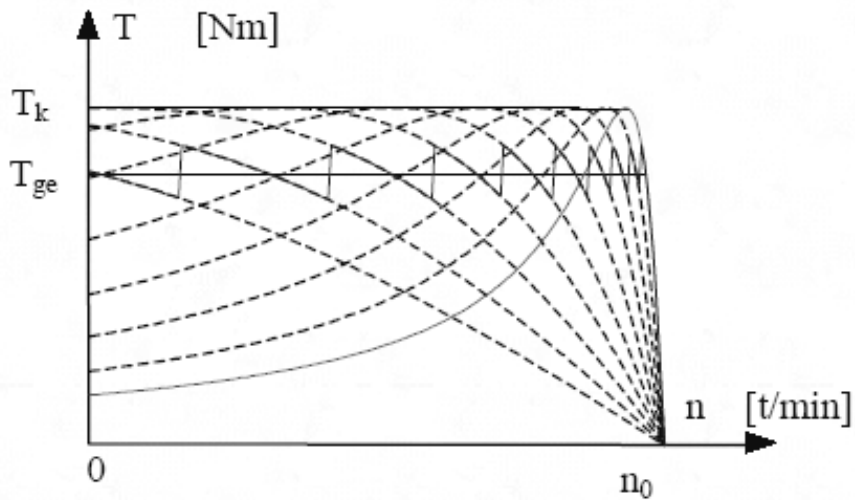


Door het bijschakelen van weerstanden verschuift het kippunt naar links op de koppeltoerentekarakteristiek, waardoor het aanloopkoppel stijgt (de grootte van het maximumkoppel verandert niet).

Tijdens het aanlopen worden de weerstanden geleidelijk uitgeschakeld, waardoor het gemiddelde koppel van de motor ongeveer constant blijft (verticale lijn op onderstaande figuur).

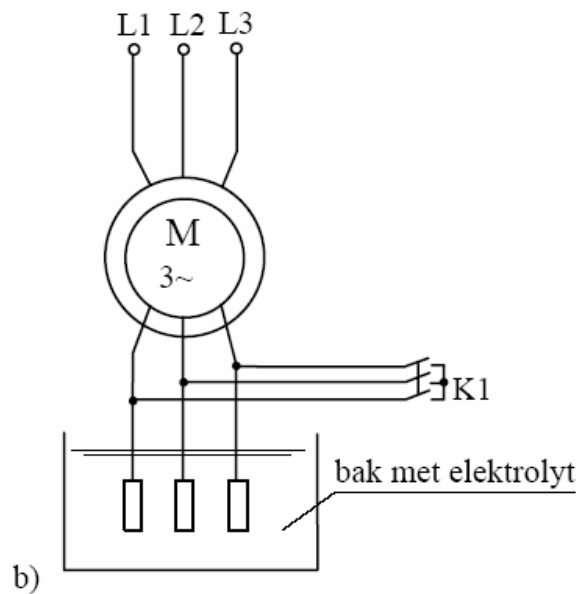
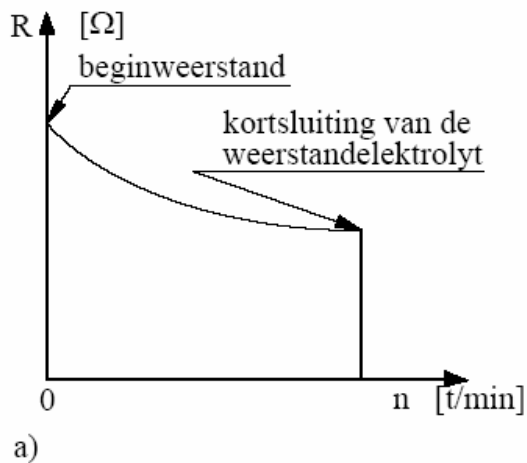
In tegenstelling tot de aanloop met verlaagde spanning, blijft hier de spanning aangesloten aan de statorwindingen, zodat het aanloopkoppel niet verlaagt (maar zelfs zal stijgen).

Een nadeel is echter het gevaar dat de motor kan gestart worden terwijl de aanzetweerstand nog uitstaat. Het gevolg hiervan is een zeer bruuske start en bijgevolg grote stroomstoten op het net. Dit kan vermeden worden door een aangepaste contactorschakeling of door gebruik van een PLC.



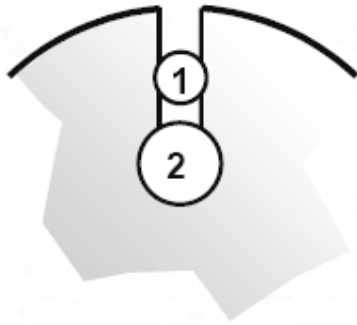
Opmerking:

Bij grotere sleefringmotoren wordt dikwijls een vloeibare aanloopweerstand toegepast. Deze weerstand bestaat uit een metalen bak die met een elektrolyt gevuld is. De elektrodes die in dit elektrolyt gedompeld zijn worden met de rotorklemmen verbonden. De weerstand van het elektrolyt, die stroomafhankelijk is, wordt kleiner als de rotorstroom daalt, dus als het toerental toeneemt. Eenmaal de rotor op snelheid, worden de elektroden kortgesloten door K1.



12.4. Dubbelkooirotor

De dubbelkooirotor bevat 2 afzonderlijke kooien:



1 Buitenste kooi, bovenkooi of startkooi

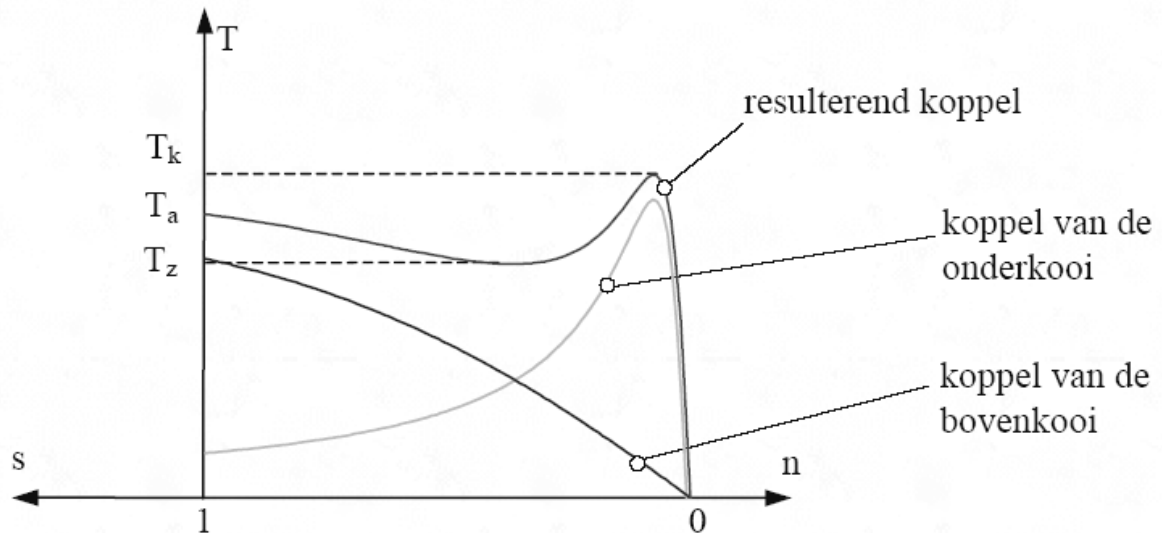
2 Binnenste kooi, onderkooi of bedrijfskooi

- De buitenkooi bevat dunne staven die aan de omtrek gelegen zijn van het rotorstaal.
- De binnenkooi bestaat uit dikke staven die dieper in het rotorstaal liggen.

Daarom is de ohmse weerstand van de buitenkooi groter dan die van de binnenkooi. De inductiviteit van de buitenkooi is echter kleiner dan deze van de binnenkooi.

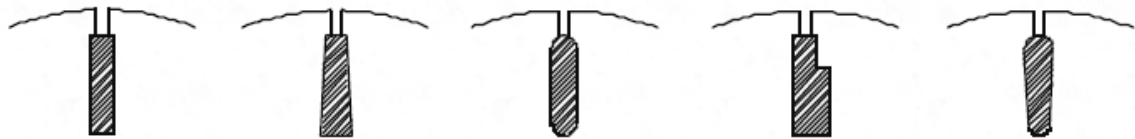
Overzicht:

Bij het aanzetten	In bedrijf
de rotorfrequentie f_r en de rotorspanning E_r maximaal	De rotorfrequentie f_r en rotorspanning E_r zijn klein
<u>Binnenkooi:</u> X_r en dus Z_r zijn groot, waardoor I_r en $\cos\varphi_r$ klein zijn. Het opgenomen elektrisch vermogen is klein en daardoor ook het afgeleverd nuttig mechanisch vermogen.	<u>Binnenkooi:</u> Z_r wordt merkkelijk kleiner omdat de daling van X_r het meest invloed heeft. I_r wordt groot, ondanks de daling van E_r . Ook de arbeidsfactor wordt groot. Het opgenomen vermogen en dus ook het nuttig vermogen worden groot.
<u>Buitenkooi:</u> X_r en dus Z_r zijn kleiner. Daaruit volgt dat I_r en de $\cos\varphi$ groter zijn, dus ook P_t en P_n	<u>Buitenkooi:</u> Z_r verandert weinig, omdat de daling van $X_r(f_r)$ weinig invloed heeft. I_r wordt dus zeer klein omdat E_r daalt. Vandaar dat P_e en ook P_n sterk dalen.
We besluiten dus dat de buitenkooi het aanzetkoppel levert en daarom ook aanzetkooi genoemd wordt.	We besluiten dat de binnenkooi het bedrijfskoppel levert en daarom ook de bedrijfskooi genoemd wordt.



Deze motoren hebben dus een groter aanlooppkoppel en een kleinere aanloopstroom dan motoren met één kooi. Ze zijn echter duurder in uitvoering.

Andere uitvoering: motoren steunend op stroomverdringing (bij motoren van groot vermogen) :

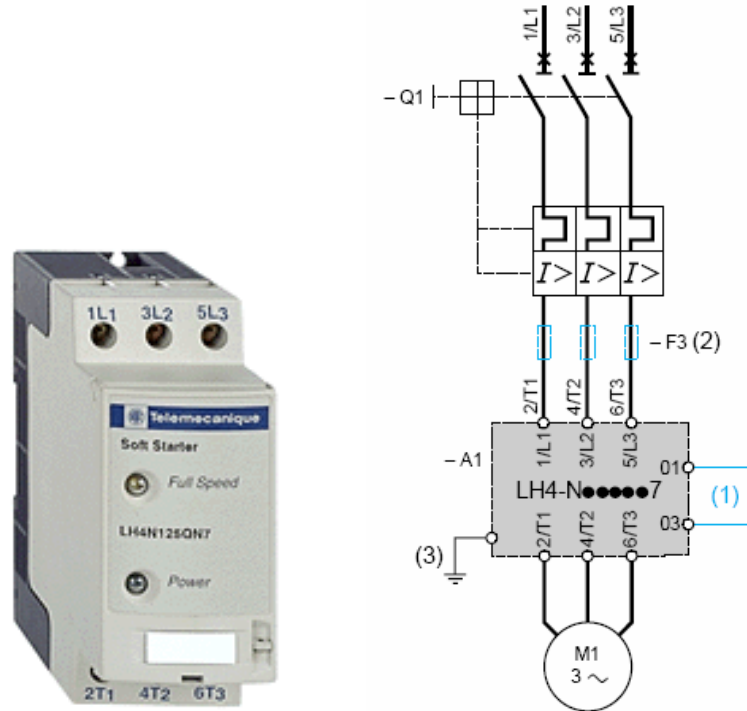


Bij dit type motor is er maar één kooi die gevormd wordt door smalle koperstroken ofwel trapeziumvormige staven die diep in het rotorstaal doordringen. De gleuven hebben dus een grote hoogte/breedte verhouding en kunnen beschouwd worden als een oneindig aantal kooien boven elkaar.

Bij het starten hebben de dieper gelegen delen een grotere lekductantie, waardoor de stroom naar boven toe verdrongen wordt. Omdat alleen het bovenste deel van de staven gebruikt wordt is de weerstand groter zodat $\cos\varphi_r$ daalt en een groter koppel mogelijk is.

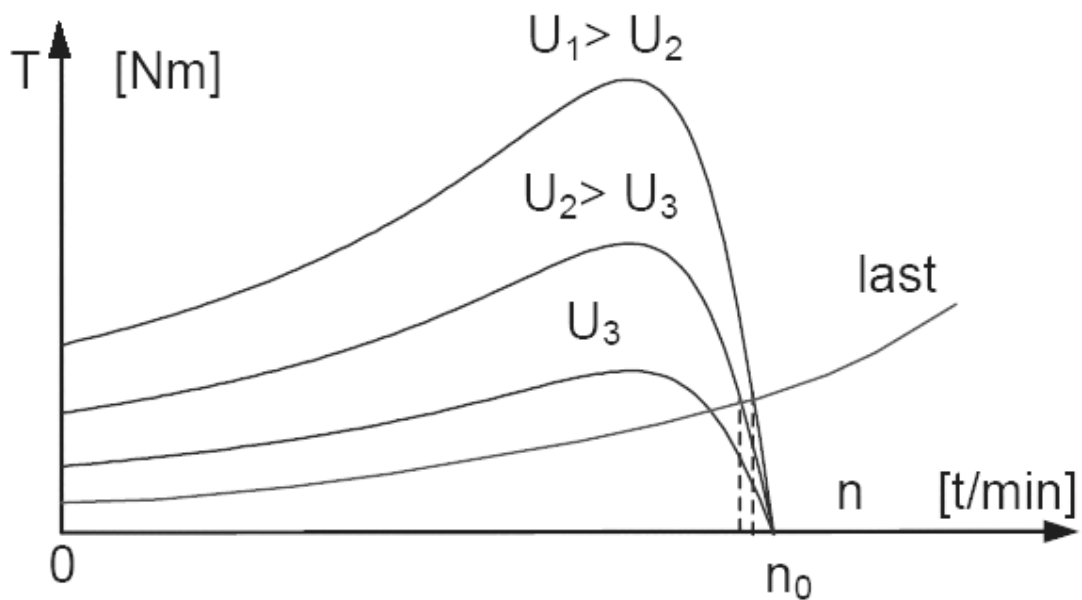
In bedrijfstoestand vloeit, ten gevolge van de frequentiedaling (en dus kleinere inductantie) , de stroom ook in het dieper gelegen koper.

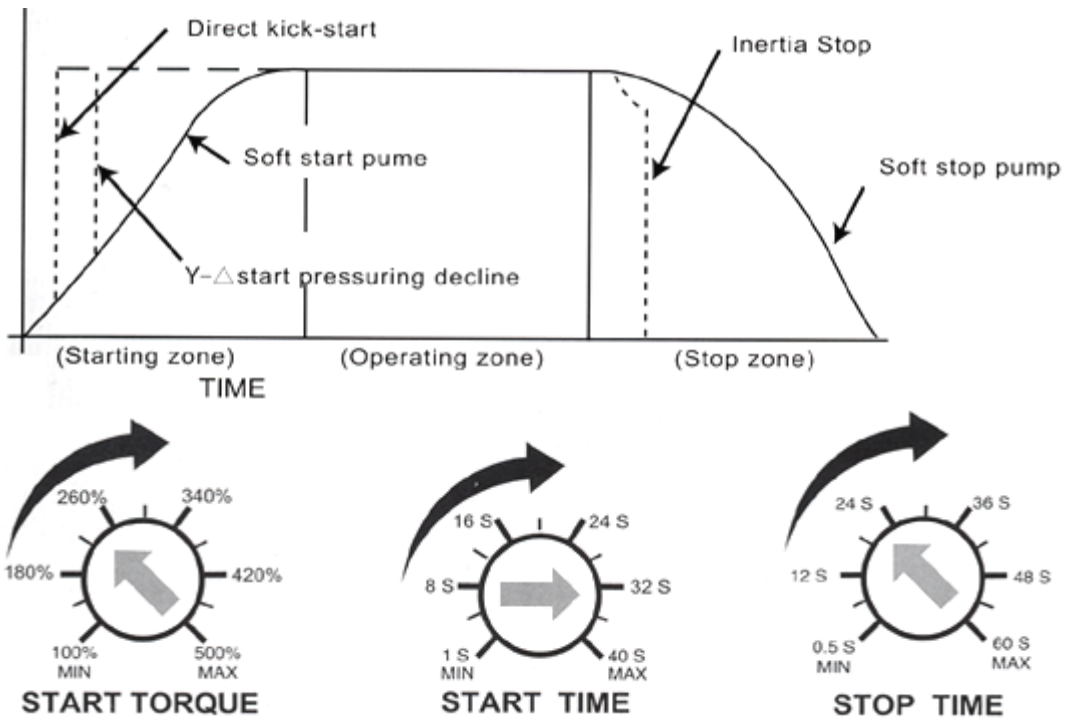
Deze kooi werkt dus eigenlijk als een automatische dubbelkooirotor.

12.5. Aanloop met softstarter

De foto links van een kleine softstarter (uit het labo) is de grijze kader in het rechtse schema.

De softstarter heeft als doel de stroompieken bij het aanlopen te beperken tot een ingestelde toelaatbare waarde. Die beperking kan worden gerealiseerd door het regelen van de spanning via elektronische vermogencomponenten (dus ook het koppel wijzigt).





Men zal de motor laten aanlopen bij verlaagde beginspanning (kleiner koppel) om vervolgens de spanning te verhogen volgens een hellingstijd die instelbaar is door de gebruiker in functie van het soort belasting. De softstarter levert bij het aanzetten dus een koppel dat langzaam toeneemt tot het nominale koppel.

Ook bij het stoppen (uitlopen) van de motor kan het koppel worden gecontroleerd, wat belangrijk is voor bepaalde toepassingen (vb. transportbanden, roltrappen, ...)

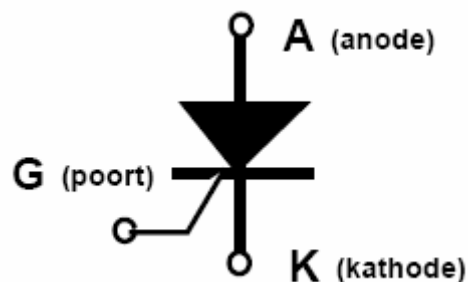
Door gebruik te maken van deze elektronische schakeling, voorkomt men plotse spanningspieken op het net die kunnen leiden tot piekstromen en piekkoppels. Men is nagenoeg in staat een ideale aanloop te realiseren.

De schakeling wordt gerealiseerd door gebruik te maken van 2 antiparallel geschakelde thyristoren in elke lijndraad: één thyristor dient om het positieve sinusdeel af te snijden, de andere voor het negatieve sinusdeel.

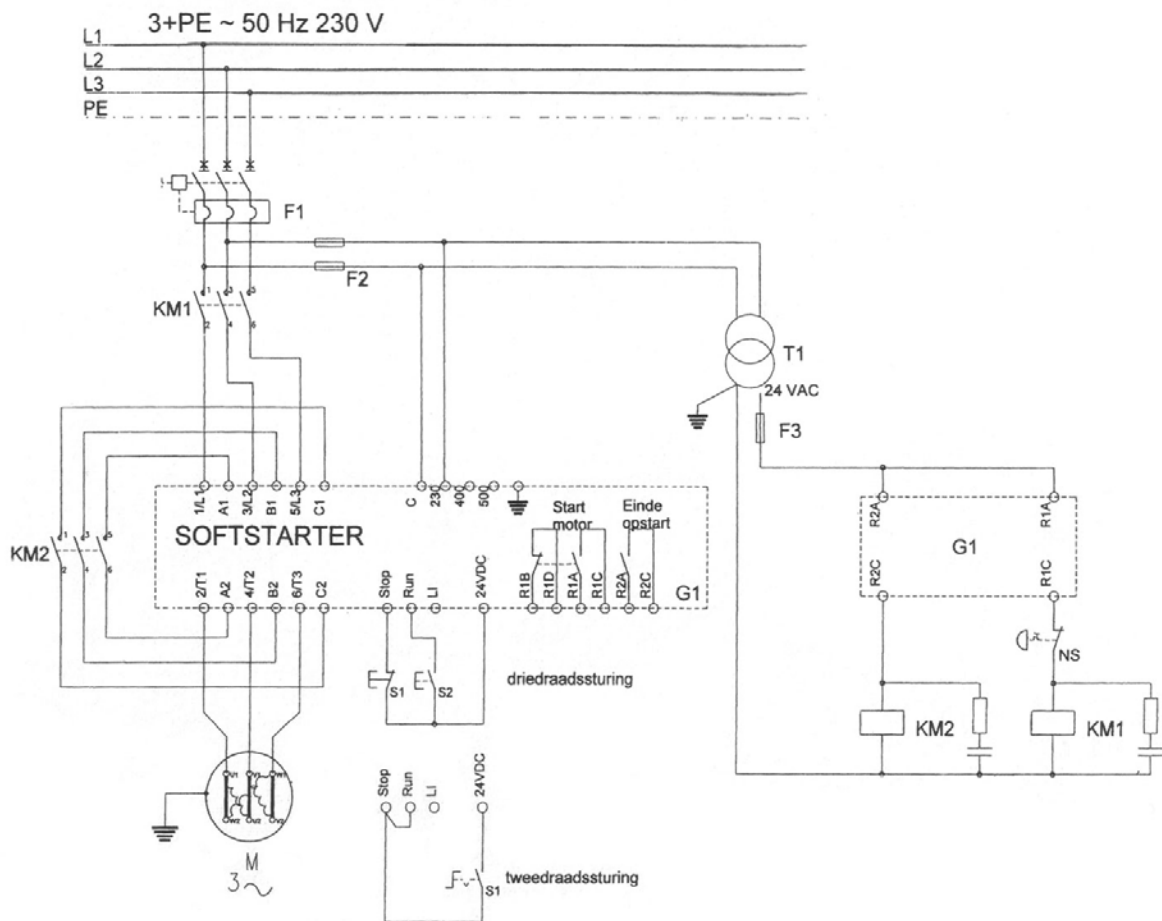
Door wijziging van de stuurhoek (of ontsteekhoek) van elke thyristor is het mogelijk de startspanning en daardoor ook de startstroom en het koppel te regelen. Dit alles gebeurt bij een constante frequentie van 50 Hz.

De voedingsspanning wordt geleidelijk opgedreven om een versnellingshelling aan te houden waarbij de startstroom onder de toelaatbare waarde blijft. Afhankelijk van de combinatie stroom en hellingstijd kan de beste versnellingshelling berekend worden. Dit gebeurt automatisch in een microprocessor of microcontroller.

Opmerking:



- Werking van een thyristor: een thyristor is een diode met nog een derde aansluiting (gate). Wanneer we de thyristor in sperzin aansluiten (anode aan -, kathode aan de +), dan gedraagt de thyristor zich als een diode. Wordt de thyristor in doorlaatzin aangesloten (anode aan de +, kathode aan de - : **KNAP**), dan zal de thyristor toch niet in geleiding treden: de thyristor is nog in blokkeertoestand. Om een thyristor die in doorlaatzin is aangesloten in geleiding te brengen, moet de gate op een voldoende positief potentiaal ten opzichte van de kathode aangesloten worden. Als de stroom door de thyristor (van anode naar kathode) voldoende groot is, blijft de thyristor ook in geleiding als de gatestroom nul wordt. Hij treedt terug in blokkeertoestand als zijn stroom beneden een bepaalde waarde (=houdstroom) daalt. Het terug in blokkeertoestand brengen, noem je het doven van een thyristor.
- De driefasevoeding naar de softstarter wordt enkel beveiligd met een magnetische beveiliging, omdat de beveiliging tegen overbelasting intern in de softstarter wordt geregeld (via een elektronische beveiliging)



12.6. Aanloop met frequentieregelaar

Met behulp van een frequentieregelaar kan net zoals bij een softstarter de aanloop- en uitlooptijden van een motor worden ingesteld.

Maar een frequentieregelaar heeft veel meer mogelijkheden dan een softstarter. Hij wordt namelijk ook gebruikt om de snelheid van de motor te regelen.

Later in dit hoofdstuk zal de frequentieregelaar dan ook uitgebreid aan bod komen.

13. Snelheidsregeling bij asynchrone motoren

13.1. Formule

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}, \text{ dus} \quad n_r = (1 - s) \times n_s = (1 - s) \times \frac{f}{p}$$

Het toerental van de motor n_r kan dus verandert worden door wijziging van aantal poolparen, slip en frequentie.

13.2. Wijzigen van de poolparen (poolomschakelbare motor)

Het toerental van het draaiveld wordt bepaald door het aantal poolparen van de stator $\left(n_s = \frac{f}{p} \right)$:

In een tweepolige motor bedraagt de omloopsnelheid van het draaiveld 3000 tr/min als de frequentie 50 Hz is. Bij een vierpolige motor is het toerental van het draaiveld 1500 tr/min. Motoren kunnen voor 2 verschillende aantallen poolparen gebouwd worden (dus 2 verschillende toerentallen).

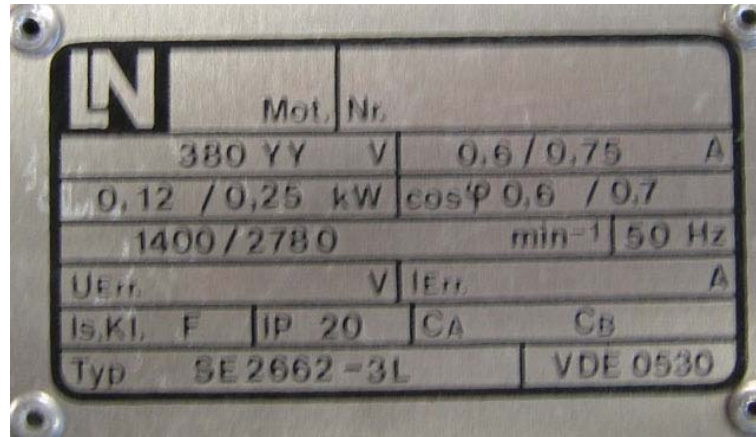
Dit gebeurt door :

- ✓ de statorwikkeling op een speciale manier in de groeven te leggen (dahlandermotor)
- ✓ twee gescheiden 3fase-wikkelingen te plaatsen in de stator.

In motoren met meer dan 2 snelheden worden deze 2 manieren van wikkelen gecombineerd.

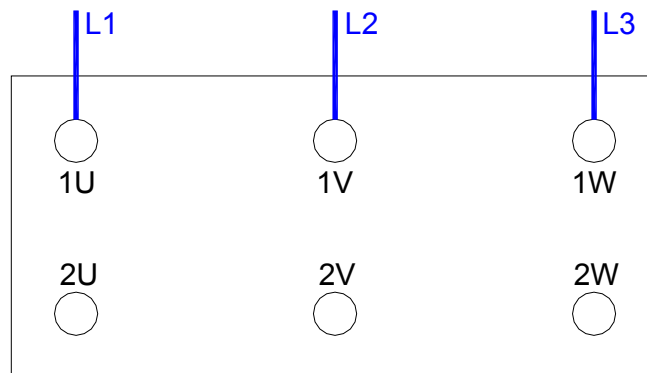
13.2.1. Motor met gescheiden wikkelingen



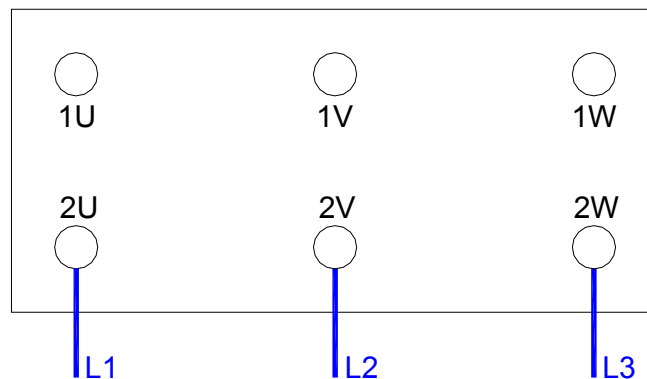


De motor bevat 2 afzonderlijke, driefasige wikkelingen (voor 2 toerentallen) met een verschillend aantal polen: er worden altijd slechts 3 van de 6 wikkelingen gebruikt.

In het labo zijn de 2 driefasige wikkelingen reeds inwendig in ster geschakeld en de beginpunten naar buiten gebracht: wanneer we L1, L2 en L3 aansluiten op 1U, 1V en 1W zal de motor ronddraaien met een klein toerenta (1400 min⁻¹).

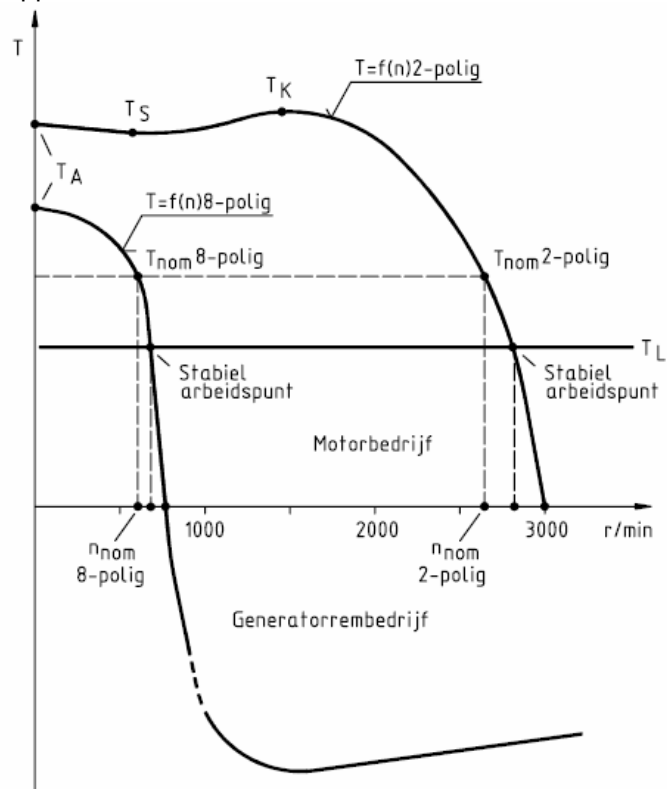


Sluiten we de lijnspanning aan op 2U, 2V en 2W zal de motor snel ronddraaien (2780 min⁻¹).



- Dus de eerste driefasige wikkeling heeft $p_1 = 1$ poolpaar en zorgt voor een toerentaldraaiveld $n_s = \frac{f}{p_1} = 1500 \text{ min}^{-1}$.
- Een tweede driefasige wikkeling heeft $p_2 = 2$ poolparen en zorgt voor een toerentaldraaiveld $n_s = \frac{f}{p_2} = 3000 \text{ min}^{-1}$.

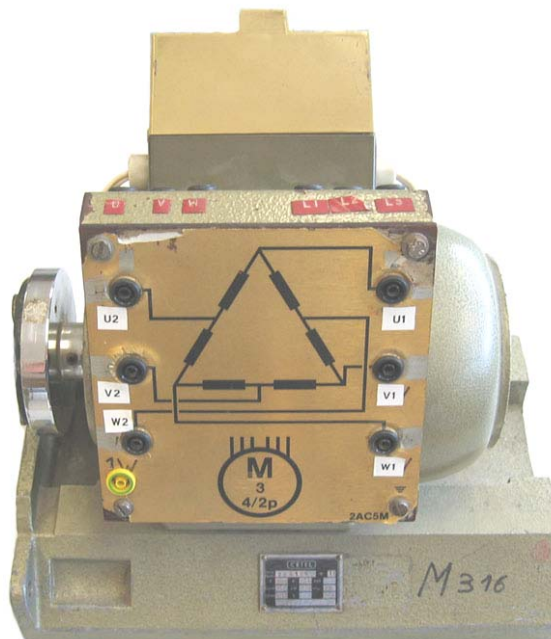
Voorbeeld van een koppel-toerentalkarakteristiek:

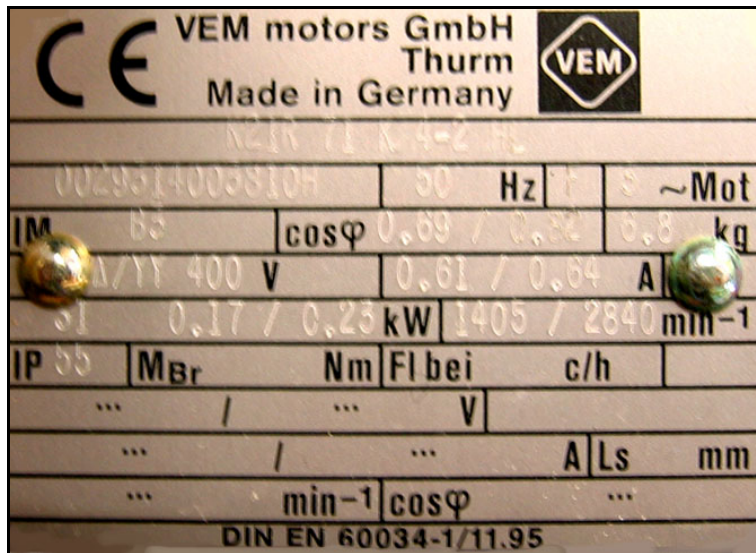


Bij het omschakelen van deze motor van de 2-polige naar de 8-polige wikkeling, werkt de motor gedurende korte tijd vanwege het oversynchrone toerental als generator.

Het nadeel van deze motor is dat er slechts 3 van de 6 statorwikkelingen worden gebruikt. Dit resulteert in een slechte benutting van het koper.

13.2.2. Dahlander motor

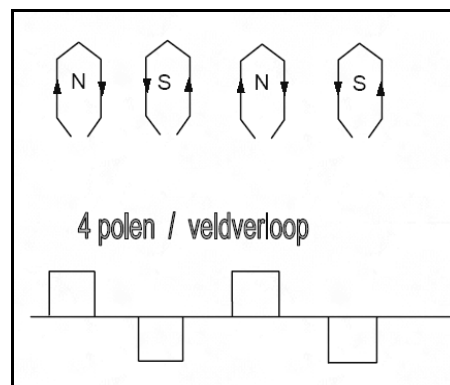
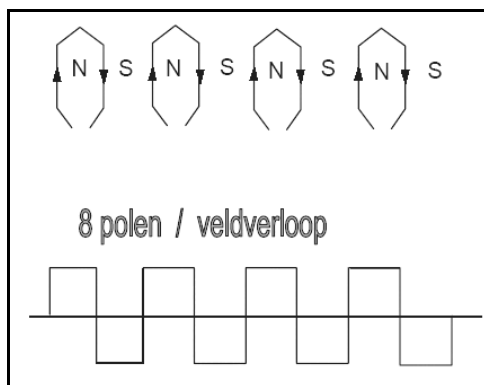




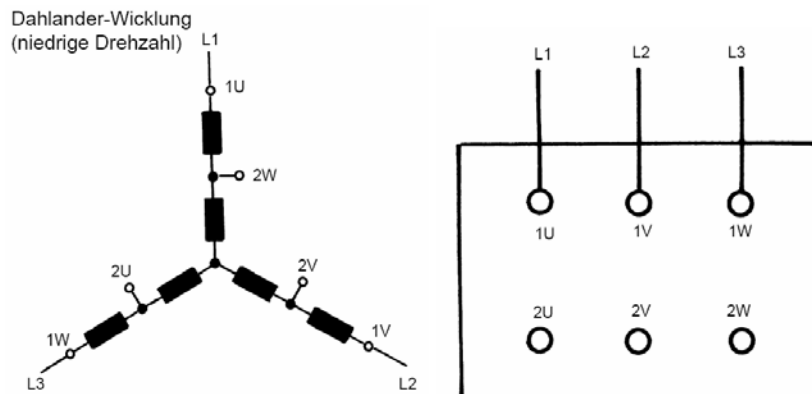
Dahlander: was een zweeds ingenieur die in 1897 deze eenvoudige en bekende eenwikkelschakeling uitdacht.

Het principe van deze schakeling is als volgt:

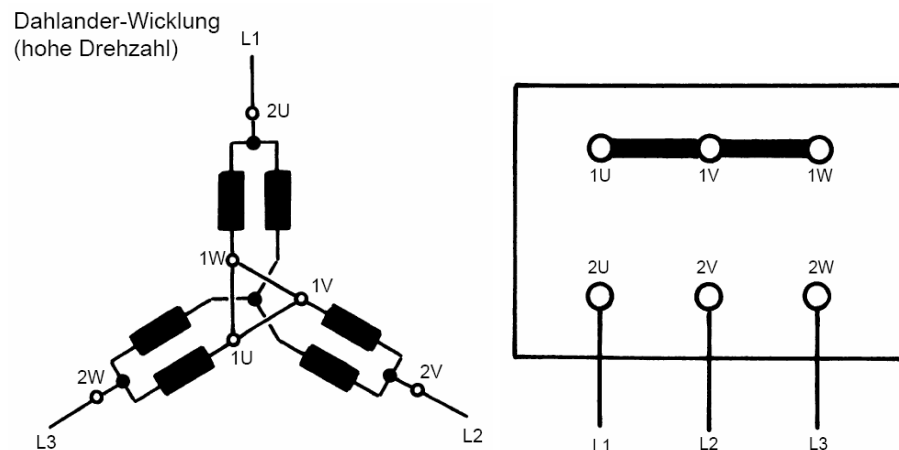
Als men 2 spoelen of spoelengroepen, die op eenzelfde afstand van elkaar gelegen zijn, in dezelfde zin met een stroom voedt, dan wekt iedere spoel of spoelengroep een flux met dezelfde polariteit op. Het aantal polen is gelijk aan tweemaal het aantal spoelengroepen. Keert men nu in de tweede en in de vierde spoelengroep de stroomrichting om, dan verandert de richting van de flux in deze spoelengroepen. Uit het veldverloop merkt men dat het aantal polen op de helft is teruggevallen. Dus het toerental van de motor is ook gehalveerd.



Aansluiting voor een laag toerental:



Aansluiting voor een hoog toerental:



Het voordeel van dit systeem is de goede benutting van het koper: alle wikkelingen worden immers in beide gevallen gebruikt. Het nadeel is dat het grootste toerental het dubbele is van het kleinste.

Opmerking:

- ✓ Er zijn heel wat verschillende mogelijke dahlanderschakelingen. Bepaalde schakelingen kunnen een constant motorkoppel leveren, andere een constant vermogen en nog andere zorgen voor een variabel koppel.
- ✓ Deze motor is slechts geschikt voor één spanning.

13.3. Wijzigen van de slip

13.3.1. Regelen van de statorspanning

Het toerental van asynchrone motoren kan geregeld worden door de voedingsspanning te wijzigen, zonder de frequentie te veranderen. Dit kan omdat het koppel van de motor kwadratisch met de spanning omlaag gaat.

Nadeel is dat het jouleverlies in de rotor (welke afhankelijk is van de slip) zal toenemen omdat de slip wijzigt.

13.3.2. Regelen van de rotorweerstand (rotorsturing) bij sleepringankermotoren

Door bijschakelen van ohmse weerstanden in de rotorkring bij een sleepringmotor: het toerental van de motor daalt door het toenemende vermogenverlies in de rotor.

In de onderstaande figuur zijn de motorcurven en het tegenwerkend koppel (lastkoppel) voorgesteld. Door de rotorweerstand te vergroten van R_1 naar R_3 vertraagd de motor en verandert het werkingpunt van P_1 naar P_3 . Dit gebeurt niet ogenblikkelijk: bij het veranderen van de rotorweerstand naar de waarde R_3 blijft de snelheid in eerste instantie gelijk aan n_1 en gaat men over naar werkingpunt P_4 . Hier is het tegenwerkend koppel groter dan het motorkoppel zodat de motor vertraagt en het werkingpunt zich verplaatst op de motorcurve naar een punt P_5 . In dit punt is het motorkoppel groter dan het tegenwerkend koppel. De motorsnelheid neemt weer toe en het werkingpunt verplaatst zich bijvoorbeeld naar P_6 . Na een paar slingeringen stelt zich een evenwicht in: het punt P_3 met snelheid n_3 .

Verklaring: Bij het inschakelen van weerstanden, zal aanvankelijk de rotorstroom dalen en daardoor ook het opgenomen elektrisch rotorvermogen. Hierdoor zal ook het afgeleverde mechanisch vermogen kleiner zijn. Als in de vergelijking $P_n = 2 \times \pi \times n_r \times T_n$ het vermogen kleiner wordt, zal bij een constante belasting ($T=\text{constant}$) het toerental dalen.

Door de daling van het toerental snijden de veldlijnen van het draaiveld meer geleiders van de rotorwikkeling, waardoor de opgewekte spanning stijgt in de rotor. Door deze grotere emk stijgt de rotorstroom opnieuw tot zijn vroegere waarde. Anderzijds is door het dalen van het toerental het afgeleverd mechanisch vermogen gedaald. Het verschil tussen het mechanisch vermogen, voor en na de snelheidsaanpassing, is het vermogen dat door joule-effect tot warmte in de regelweerstand werd omgevormd.

Ook de statorstroom en de arbeidsfactor zijn weinig gewijzigd. Dit heeft tot gevolg dat het opgenomen vermogen uit het net bijna niet verandert.

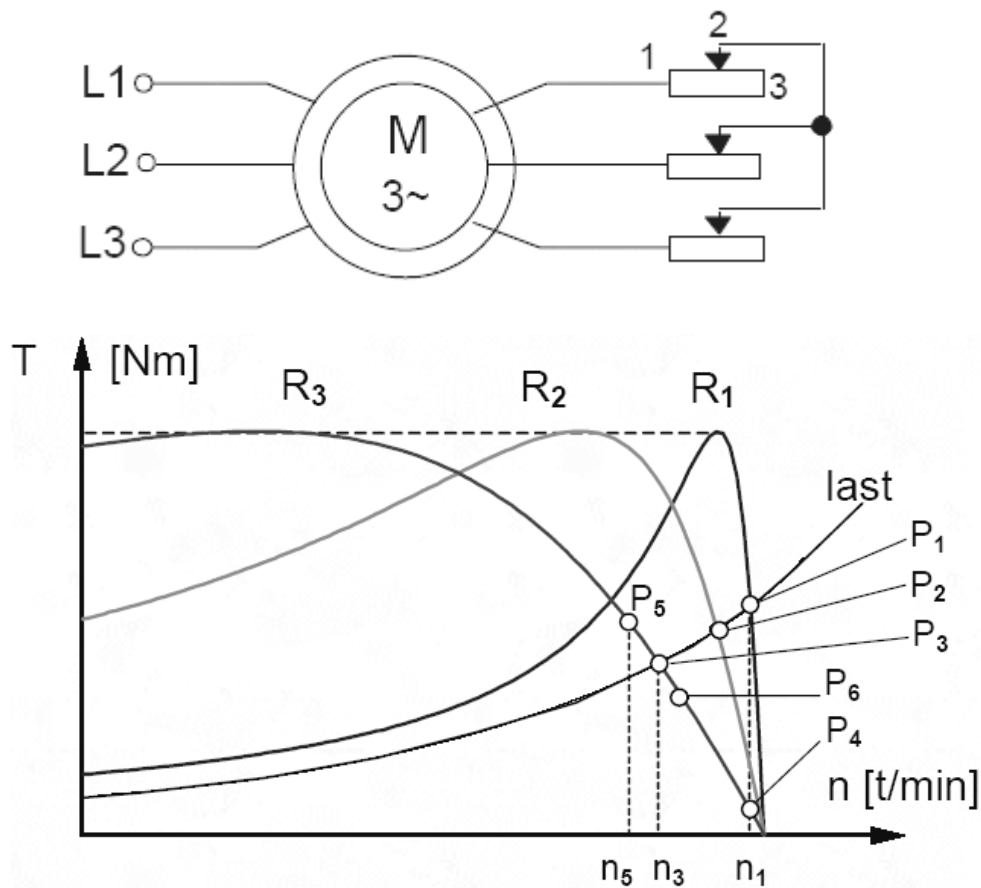


Fig 1

Nadeel van deze snelheidsregeling is de rendementsdaling door het vermogenverlies in de regelweerstand. Daarom zal men in de praktijk de snelheid met deze methode niet onder de 70% van de normale snelheid verminderen.

13.4. Wijzigen van de frequentie

13.4.1. Voorbeelden

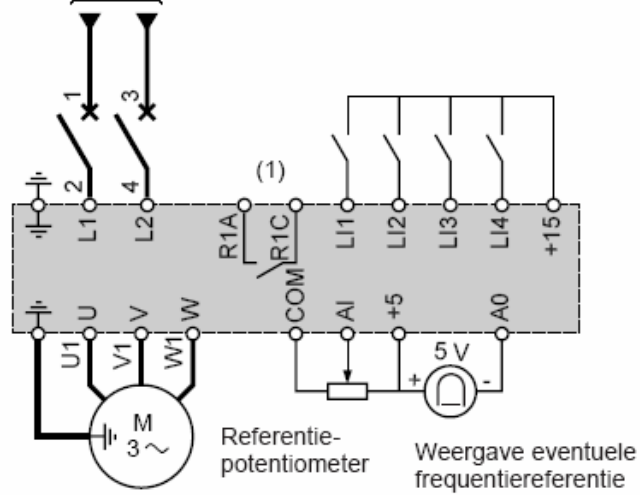
Voorbeeld van een kleine enkelfasige frequentie-omvormer: Altivar-08 voor motoren van 180 tot 750 watt:



ATV-08HU●●●●

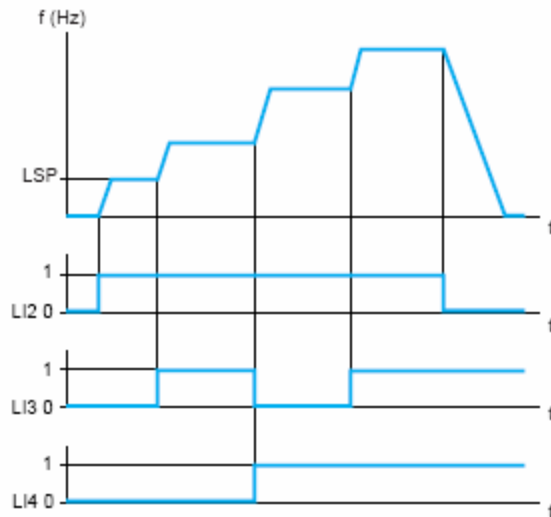
ATV-08HU●●●● en ATV-08PU●●●●

200...240 V 50/60 Hz



- ✓ (1):contact van het statusmeldingsrelais, om op afstand de toestand van de regelaar te signaleren, deze schakelaar is namelijk open in geval van een fout of uitschakeling.
- ✓ L11: rechtsom
- ✓ L12: linksom
- ✓ L13/L14: 4 voorkeuzesnelheden:
 - Snelheid 1: L13=0, L14=0
 - Snelheid 2: L13=1, L14=0
 - Snelheid 3: L13=0, L14=1
 - Snelheid 4: L13=1, L14=1

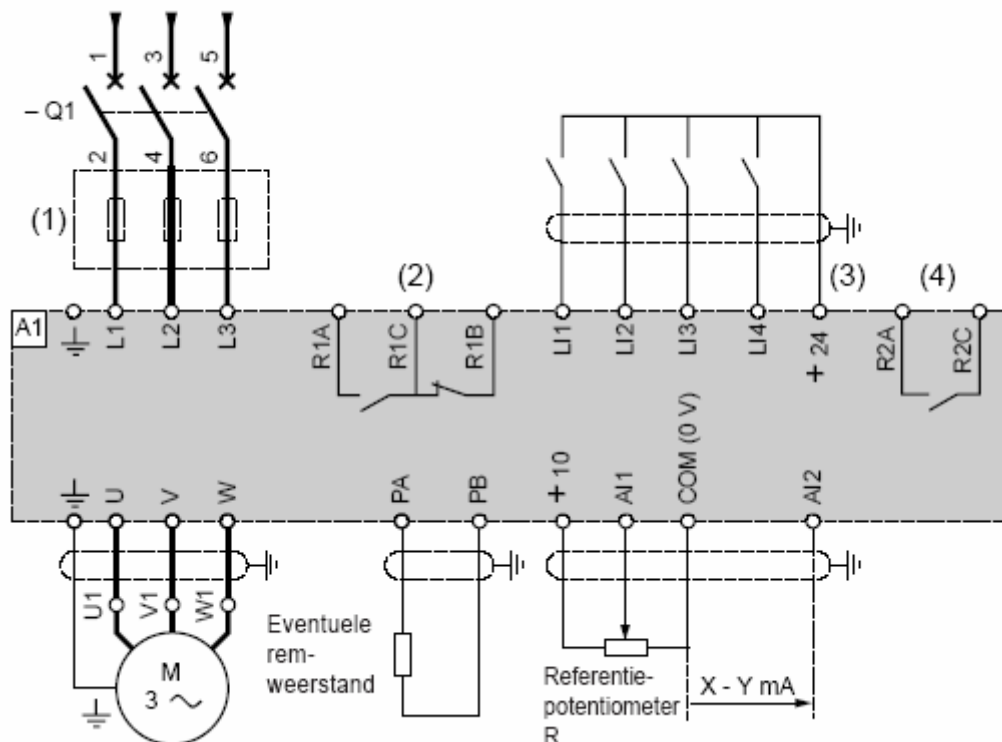
Voorbeeld van een toepassing met 4 snelheden (in dezelfde richting):



Voorbeeld van een grotere frequentieomvormer met driefasen voeding: altivar 58 voor motoren tot 75 kW:



ATV-58HU18M2



- ✓ (1): eventuele lijninductantie
- ✓ (2): contacten van het statusmeldingsrelais om op afstand de status van de regelaar te melden
- ✓ (3): +24 V intern: bij gebruik van een externe bron, de 0 V van deze verbinden met klem COM, klem +24V van de regelaar niet gebruiken, en de gemeenschappelijke van de ingangen L1 aansluiten op de +24 V van de externe voeding.
- ✓ (4): Opnieuw toe te wijzen relais R2

13.4.2. Werking

Om de snelheid te regelen kan men ook ingrijpen op de voedingsfrequentie. Door deze variabel te maken, wijzigt het toerental van de machine. Het net levert een spanning met een constante frequentie van 50 Hz, zodat vermogenelektronica nodig is om de machine een frequentie aan te bieden die continu instelbaar is tussen 0 Hz en enkele honderden Hz. Men gaat ervan uit dat er een systeem bestaat dat een wisselspanning met vaste spanning en vaste frequentie omzet in een spanning met regelbare frequentie en grootte.

Verhouding tussen spanning en frequentie:

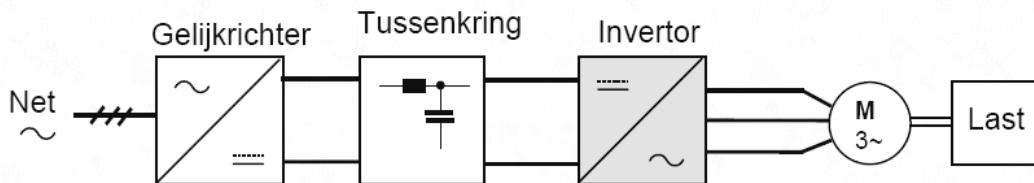
De snelheid van een inductiemachine kan dus geregeld worden door de frequentie van de aangelegde spanning te wijzigen met frequentieomvormers. We hebben reeds volgende formule afgeleid:

$$\rightarrow U = 4,44 \times N \times f \times \phi$$

De omvormer zorgt ervoor dat de spanning evenredig met de frequentie wijzigt, zodat de flux en dus ook het koppel constant blijft.

13.4.3. Onderdelen van een frequentie-omvormer

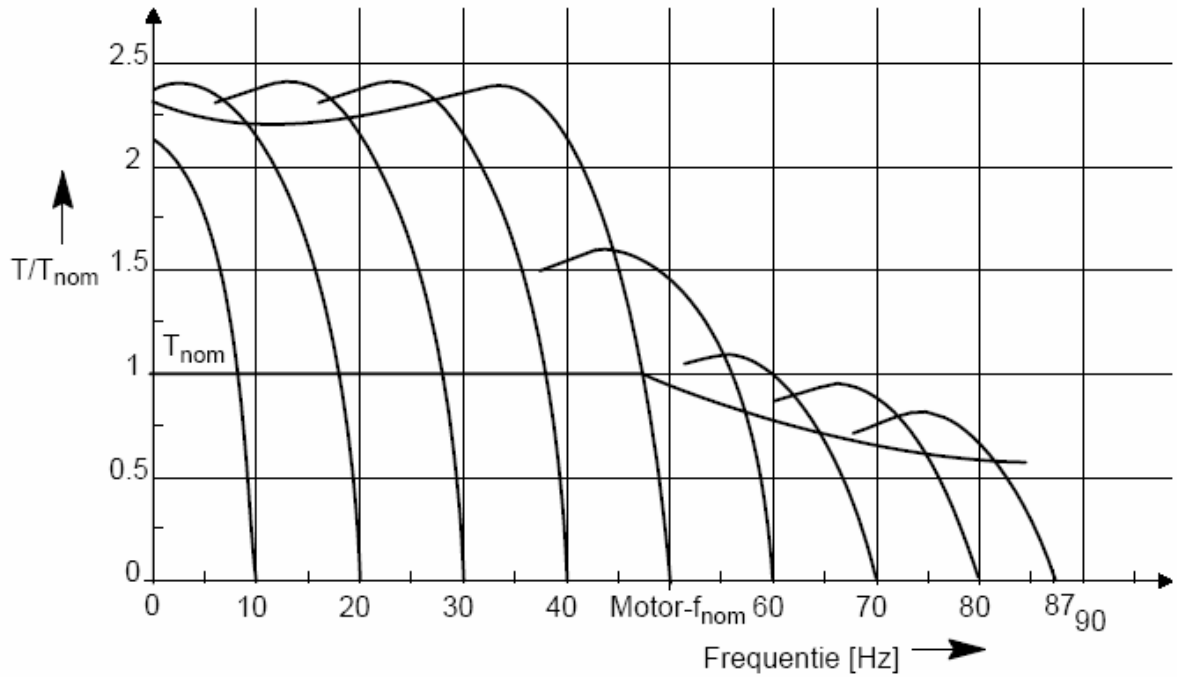
De frequentieregelaar bestaat uit 3 delen:



- **De gelijkrichtingskring:**
In deze kring wordt de aangelegde wisselspanning gelijkgericht, meestal door middel van 6 dioden. Achter de kring krijgen we een pulserende gelijkspanning. Tussen het voedende net en de gelijkrichting bevindt zich een filter om de vervuiling op het net te beperken.
- **De tussenkring:**
De tussenkring bestaat uit een condensator in parallel met de gelijkrichter indien het gaat om een spanningstussenkring. Bij een stroomtussenkring wordt de parallelcondensator vervangen door een spoel in serie met de gelijkrichter.
- **De wisselrichtingskring (invertor) :**
Deze heeft tot doel de afgevlakte gelijkspanning om te zetten in een regelbare wisselspanning met variabele spanning en frequentie. Het principe dat hiervoor meestal wordt toegepast is pulsbreedtemodulatie (PWM). De zes transistoren kunnen worden voorgesteld als aparte schakelaars. Door het sturen van die schakelaars (transistoren) kan men de breedte van de pulsen en het aantal regelen waardoor we een regelbare frequentie en spanning op de uitgangsklemmen van de frequentieomvormer verkrijgen.
De dioden die parallel geschakeld zijn over de transistoren hebben de functie van vrijlooptiode en beschermen de transistoren tegen hoge inductiespanningen afkomstig van de motor.

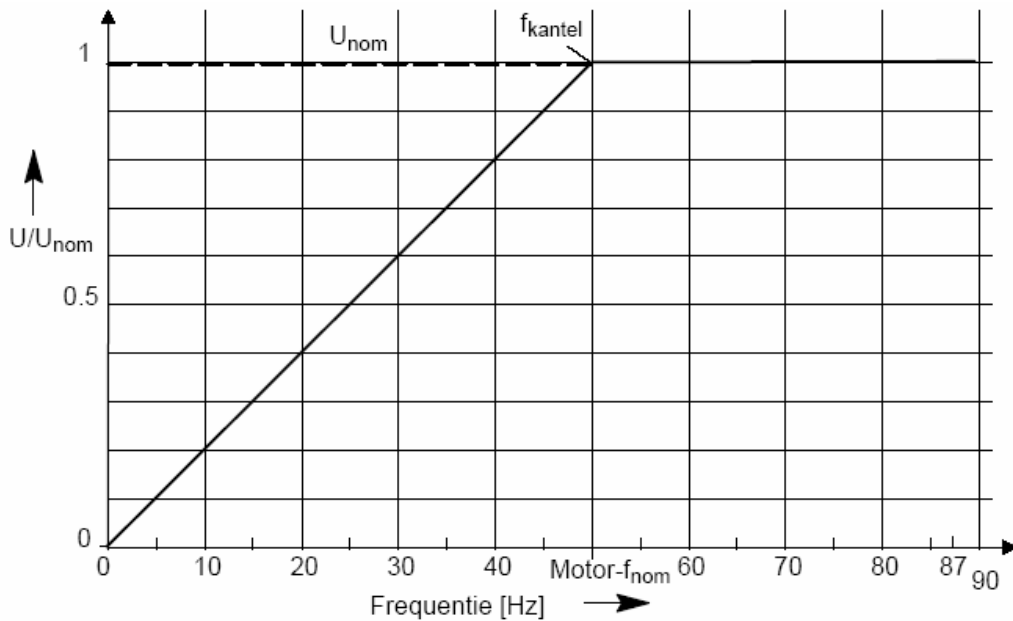
13.4.4. Pulsbreedtemodulatie

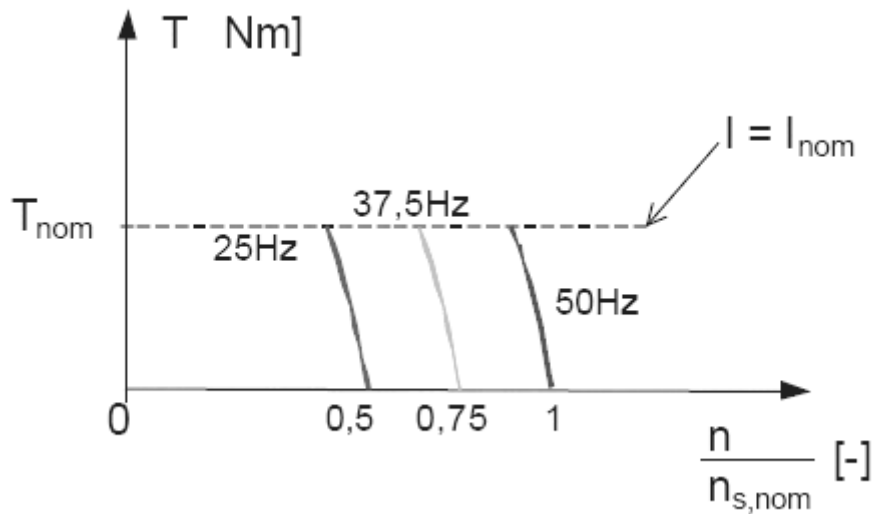
13.4.5. Koppel-toerentalkarakteristiek



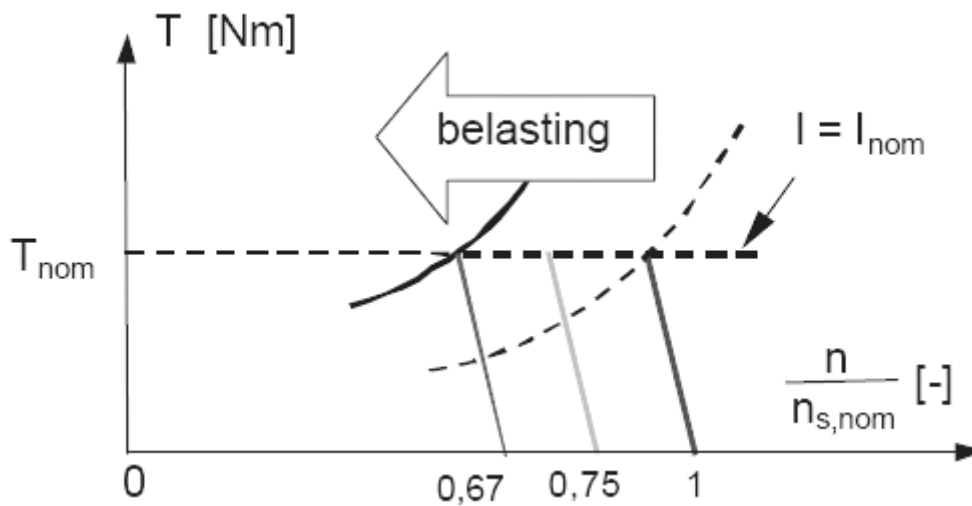
Op de bovenstaand figuur is het verloop weergegeven van de koppel-toerenkarakteristiek bij verschillende frequenties: door de frequentie te verhogen schuift de karakteristiek op naar rechts.

Indien men de motor wil aansturen met een frequentie hoger dan de nominale frequentie, dan kan men deze constante spannings-frequentieverhouding niet handhaven door de spanningsbegrenzing. De isolatie wordt berekend voor een maximale spanning, gelijk aan de nominale spanning. Indien de spanning hoger is dan deze nominale waarde is er een gevaar voor isolatiedoorslag. In het frequentiegebied boven de nominale frequentie wordt de spanning op zijn nominale waarde vast gehouden terwijl de frequentie verder kan stijgen. Daardoor wordt de flux kleiner dan de nominale flux: de machine werkt in het gebied van *veldverzwakking*. In dit gebied wordt er gewerkt met een constant vermogen.



13.4.6. Stroombegrenzing

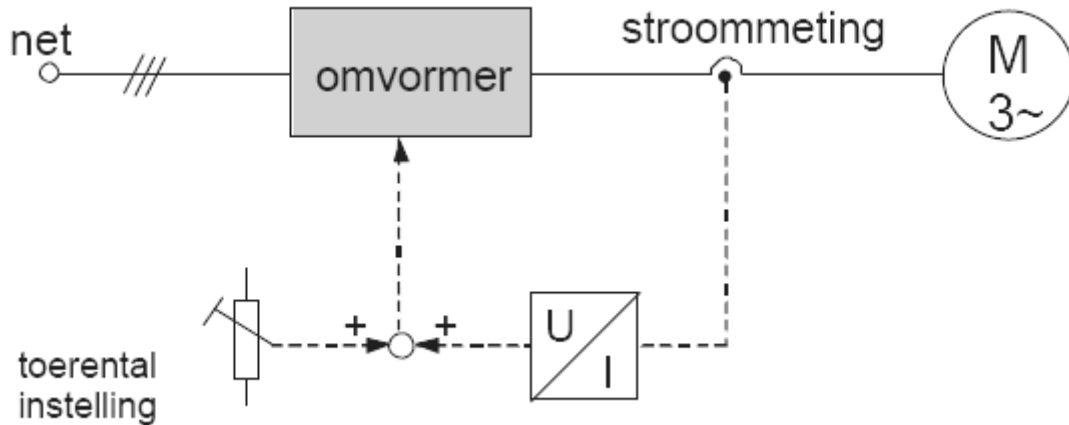
De door de frequentieomvormer geleverde stroom wordt begrensd op de nominale motorstroom. Daarmee wordt zowel de motor als de frequentieomvormer beveiligd. De stroombegrenzing heeft gevolgen. Veronderstel dat de stroombegrenzing van de omvormer is ingesteld op de nominale stroom van de motor. Indien de motor zwaarder belast wordt en de motorstroom hoger dan zijn nominale waarde wil stijgen, wordt de motorstroom afgeknepen. Dit gebeurt door de frequentie en de spanning van de omvormer te laten dalen. Als de belasting te groot is, zal de motor dus vertragen. De curve schuift op naar links. Een nieuw werkingpunt vindt men waar het belastingskoppel gelijk wordt aan het nominaal motorkoppel. Valt de belasting bij afnemende snelheid niet terug onder T_{nom} dan verschuift de kromme zo ver naar links tot de motor stilstaat. Het volle koppel blijft echter gehandhaafd en de motor komt op zijn oorspronkelijke snelheid terug zodra het belastingskoppel weer onder T_{nom} komt.



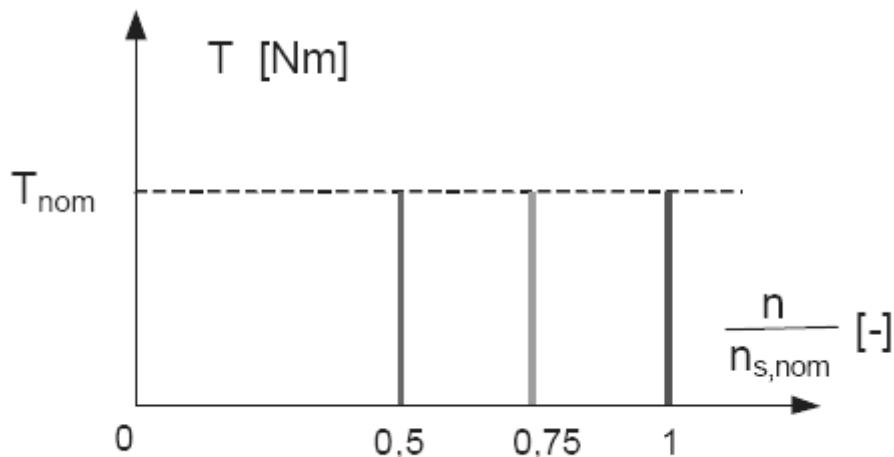
figuur a

13.4.7. Slipcompensatie

Naast de slipcompensatie bezitten veel frequentie-omvormers een slipcompensatie. Daardoor wordt het toerental minder afhankelijk van de motorbelasting. Ook bij frequentiesturing neemt de slip van de inductiemotor toe bij stijgende belasting. Is een constante snelheid gewenst, dan moet een terugkoppeling voorzien worden.

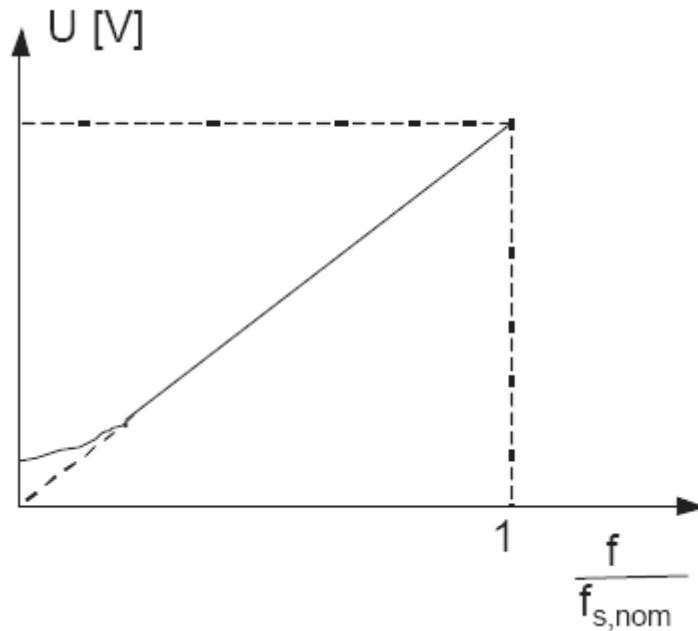


Men zou het toerental kunnen meten, en in functie van deze waarde de frequentie licht laten toenemen bij stijgende last. Een eenvoudigere oplossing is het meten van de motorstroom in de omvormer. Deze stijgt bij stijgende last. Het ingestelde toerental blijft ongeveer constant indien de frequentie –instelwaarde bij toenemende belasting wordt verhoogd. Deze regelprocedure noemt men slipcompensatie. De koppel toerental karakteristiek van figuur a wordt gewijzigd.. Bij een ideale compensatie staan de verschillende curven loodrecht op de horizontale as.



13.4.8. Statorweerstandcompensatie

Bij lage frequenties speelt de statorweerstand R_s een grote rol omdat de invloed van de inductantie X_s daalt (door de dalende frequentie). Om het ohms spanningsverlies te compenseren wordt een verhoogde spanning aangelegd tijdens de start en bij laag toerental. Omdat de stroom tijdens de aanloop afhankelijk is van de motorgrootte, wordt deze spanningsverhoging regelbaar uitgevoerd. Deze instelling noemt men statorweerstandcompensatie of spanningsboost. Wordt de startspanning te hoog, dan gaat het blikpakket van de motor in verzadiging.



13.4.9. Veldverzwakking

Frequentie-omvormers kunnen meestal het dubbele van de netfrequentie leveren. De spanning aan de uitgaande klemmen van de frequentie-omvormer is beperkt door de netspanning. Bovendien mag aan de motor nooit een hogere dan de nominale spanning gelegd worden, omdat dit de isolatie beschadigt. De spanning bij een frequentie tussen de nominale en twee maal de nominale frequentie krijgt dus een vaste waarde (namelijk de nominale spanning). Hieruit volgt dat de verhouding spanning/frequentie afneemt bij werking boven de nominale snelheid van de machine. De flux is lager dan de gemiddelde, vandaar de benaming veldverzwakking.

Opmerking: Men noemt dit vaak oversynchroon bedrijf, maar dit is een foutieve aanduiding, vermits bij veranderende voedingsfrequentie ook het synchroon toerental van de machine wijzigt. Zolang de inductiespanning werkt als motor, draait ze trager dan het synchroon toerental, vermits bij gelijk welke frequentie, de motor nooit de nieuwe synchrone snelheid kan bereiken.

Als de spanning niet meer evenredig stijgt met de frequentie, verzwakt het veld. Dit heeft tot gevolg dat bij toenemende frequentie het motorkoppel daalt wanneer de motor boven zijn nominaal toerental draait en de motorstroom gelijk is aan de nominale stroom. Het aan de motor geleverde vermogen is dan

$$\rightarrow P_t = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$$

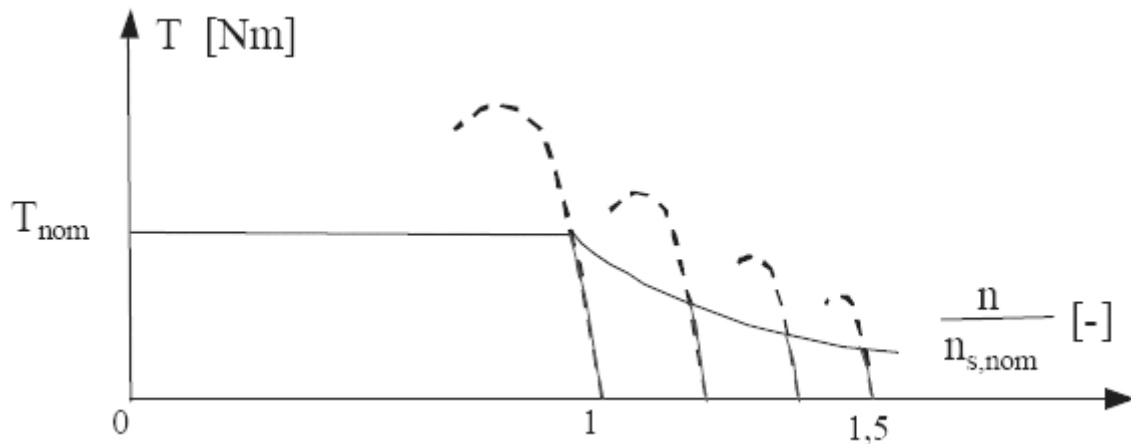
Bij toerentallen hoger dan het nominaal toerental zijn U en I constant en gelijk aan de nominale waarden. P is dus constant als de arbeidsfactor constant blijft. Het mechanisch vermogen is:

$$\rightarrow P_{as} = T_n \times \omega_r$$

Mits verwaarlozen van de verliezen is P_{as} gelijk aan P_t en constant. Daaruit volgt het motorkoppel:

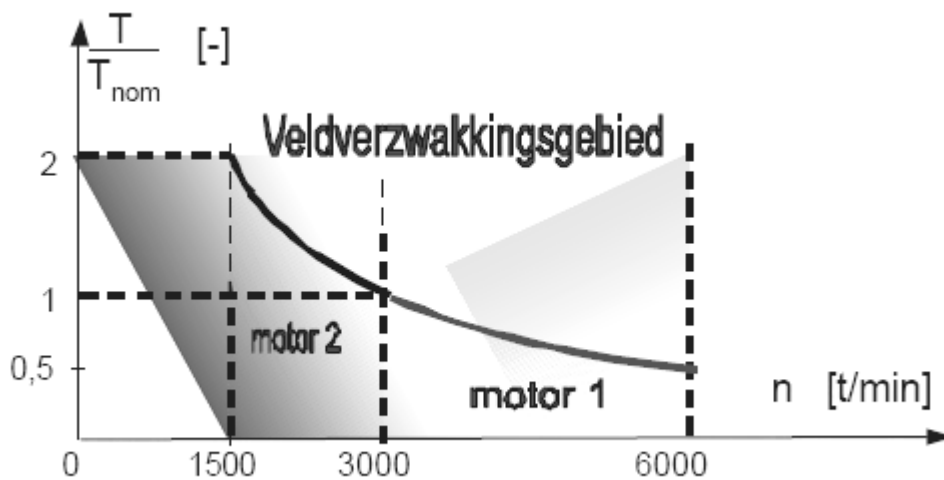
$$\rightarrow T_n = \frac{P_n}{\omega_r} \approx \frac{P_t}{\omega_r} = \frac{C}{n_r} \quad \text{met } C = \text{constante}$$

Vanaf de nominale snelheid, en dit tot aan de maximaal toelaatbare snelheid wordt de motorkarakteristiek een hyperbool. Het koppel is bij nominale snelheid gelijk aan het nominaal koppel. Bij het dubbele van de nominale snelheid is het koppel slechts de helft van het nominale koppel.



Het maximaal koppel of kippkoppel neemt in het veldverzwakkingsgebied af.
Deze veldverzwakking heeft verschillende voordelen:

- ✓ Het toerental van een bepaalde opstelling kan opgevoerd worden tot boven het nominaal toerental van de motor. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat bij veldverzwakking het koppel daalt, wat beperkingen met zich meebrengt in verband met de belasting.
- ✓ Indien een bepaalde toepassing een relatief hoog aanloopkoppel vraagt, terwijl het koppel nodig bij maximale snelheid eerder gering is, kan men een motor van eenzelfde vermogen, maar met een lager nominaal toerental kiezen. Het koppel in het gebied van stilstand tot nominaal toerental wordt groter, terwijl het gewenste maximale toerental bij een hogere frequentie kan worden gekozen. Er kan bijvoorbeeld een vierpolige motor (motor2) worden gekozen in plaats van een tweepolige motor (motor 1). Deze motor wordt tot aan het dubbele van zijn nominale snelheid aangewend (3000 tr/min).



- ✓ In installaties waarin constant vermogen wordt gevraagd, dus een laag koppel bij hoge snelheden (werktuigmachine) of een hoog koppel bij lage snelheden (wikkelmachines), kan het snelheidsbereik aanmerkelijk worden vergroot. De motorkeuze is hier belangrijk.

Bedrijf in veldverzwakking heeft ook nadelen: Een ventilator gebruikt veel meer energie bij hogere toerentalen. Indien de ventilator permanent op een hoger toerental dan het nominale motortoerental moet draaien, moet een grotere motor gebruikt worden. Ook de levensduur van de lagers moet met de motorfabrikant besproken worden, zeker indien een tweepolige motor tot 6000 t/min wordt opgevoerd.

13.4.10. Aansluiten van een frequentie-omvormer

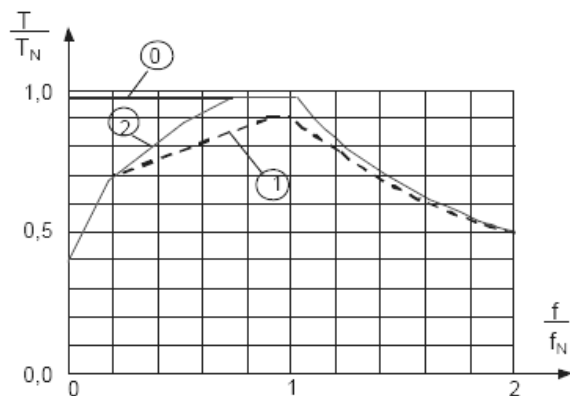
De klemmen voor de aansluiting van het net zijn uiteraard gemerkt met L1, L2 en L3. De klemmen voor aansluiting met de motor M1, M2 en M3. Vergeet vooral niet de aarding te verbinden aan de klem GND. Er zijn eveneens 3 klemmen aanwezig voor aansluiten van een potentiometer, waarmee de snelheid continu kan geregeld worden. Er zijn nog 2 klemmen voor de aansluiting van een regelbare spanning van 0 tot 10 V (analoge ingang) voor een snelheidsregeling: deze aansluiting is geschikt voor sturing uit een PLC of een microcontroller.

Verder zijn er nog aansluitingen om de draairichting in te stellen, 2 of meer vaste toerentallen in te stellen en extra start- en stop aansluitingen.

13.4.11. Motorbelasting, verliezen en koeling

Het gebruik van een frequentiesturing heeft gevolgen voor de capaciteit van een inductiemotor. Twee factoren spelen hierbij een rol:

- ✓ Bij lagere toerentallen neemt de eigen koeling af
- ✓ De uitgangsspanning van de frequentieomvormer is niet zuiver sinusoidaal, maar bevat hogere harmonischen. Ten gevolge van deze harmonischen produceert de motor meer verliezen.



- 0 onafhankelijke ventilator
- 1 lage schakelfrequentie in de omvormer
- 2 hoge schakelfrequentie in de omvormer, IGBT's

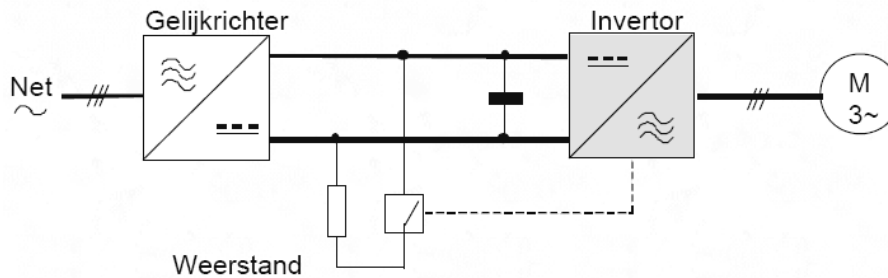
Indien de motor afzonderlijk wordt gekoeld, mag de motor het nominale koppel leveren tot aan het verzwakkingspunt. Een motor met eigen ventilator op de as, mag bij lage snelheden niet meer het nominale koppel leveren. De maximum waarde van het koppel hangt af van het type frequentieomvormer. Zo stelt curve 1 in de bovenstaande figuur de capaciteit voor van inductiemotoren (18,5 tot 1500 kW) met eigen ventilator gebruikt met een frequentiesturing met lage schakelfrequentie en veel harmonischen. Curve 2 stelt de capaciteit voor van een inductiemotor (2,2 tot 2 MW) in een aandrijving met een frequentie-omvormer met hoge schakelfrequentie en minder harmonischen.

13.4.12. Remmen met een frequentie-omvormer

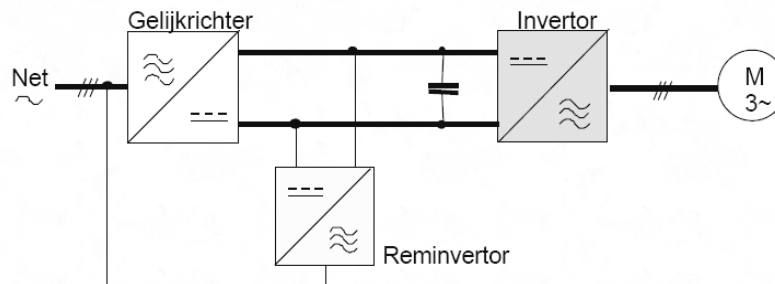
Indien de motorfrequentie daalt en het toerental door de mechanische traagheid behouden blijft, gaat de omvormer over naar generatorwerking (oversynchrone werking). Bij voeding met een frequentie-omvormer kan de opgewekte elektrische energie van de motor/generator niet terug in het wisselstroomnet vloeien. De gelijkrichter belet dit. De energie wordt in de condensator van de gelijkstroomtussenkring omgestapeld. Hierdoor verhoogt de spanning tot de condensator stuk gaat. Daarom moeten er voorzorgen genomen worden, die de remenergie op een andere manier verwerken.

Indien een krachtige remwerking gewenst wordt, kan een keuze gemaakt worden uit één van de volgende remschakelingen:

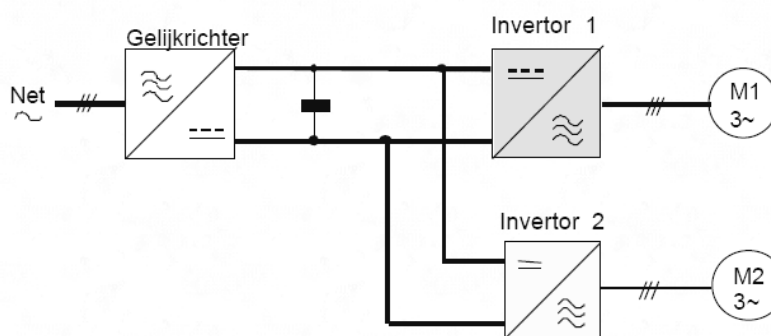
- De goedkoopste en de meest toegepaste oplossing is het plaatsen van remweerstand, parallel met de afvlakcondensator. Zij kunnen met een elektronische schakelaar ingeschakeld worden tijdens het rembedrijf. We spreken van weerstandremmen.



- Bij veelvuldig remmen ontstaat er op deze wijze te veel energieverlies. De diodegelijkrichter wordt door een gestuurde gelijkrichter vervangen, of met een bijkomende inverter (wisselrichter) wordt de remenergie terug naar het net gestuurd, zoals in onderstaande figuur. Indien het teruggestuurde vermogen naar het net vrijwel gelijk is aan het in motormode geleverde vermogen, kan men de diodegelijkrichter vervangen door een gestuurde voor het volle vermogen.



- Een laatste oplossing bekommt men met een gemeenschappelijke gelijkstroomtussenkring waaraan meerdere invertoren gekoppeld worden. De remenergie van een motor wordt aangewend voor het voeden van andere motoren. Bij een totaal van bijvoorbeeld 6 motoren, kunnen er 2 remmen, terwijl 2 andere aanlopen en de overige 2 op nominale snelheid draaien. De bedrijfszekerheid van het ganze aandrijfsysteem neemt door deze oplossing toe.

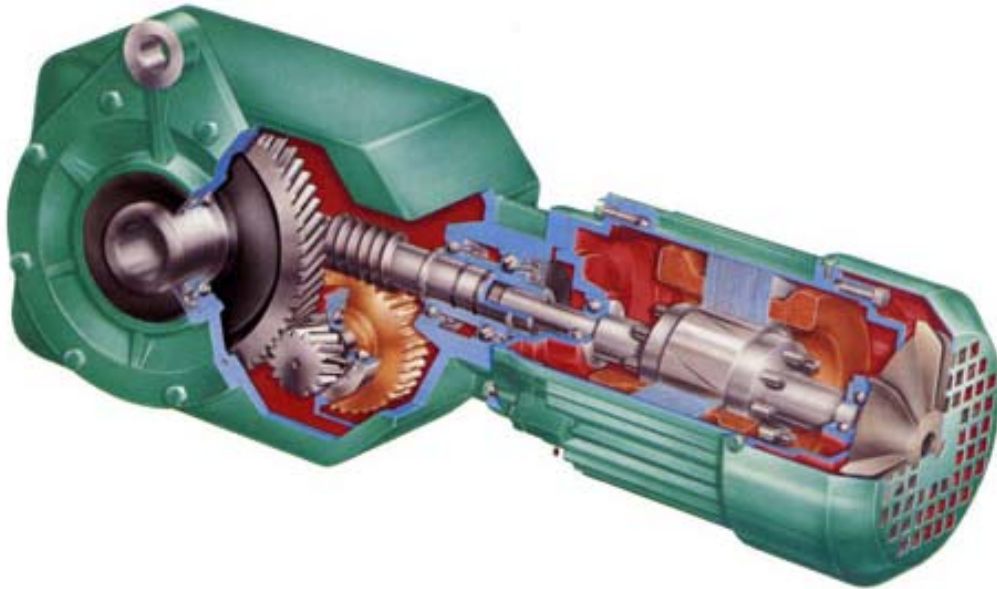


13.4.13. Omkeren van de draaizin met een frequentieomvormer

De draairichting van de motor kan worden omgekeerd zonder 2 fasen van de motor om te wisselen. Door het pulspatroon van de elektronische sturing in de inverter te wijzigen, keert de draaizin om. Het heeft geen zin 2 fasen in de voeding van de frequentie-omvormer te verwisselen, daar de wisselspanning toch eerst gelijkgericht wordt. Motoren aangesloten op een frequentie-omvormer kunnen veel vaker worden omgeschakeld dan deze direct aangesloten op het net, omdat tijdens het omkeren de stroom beperkt blijft tot de nominale stroom.

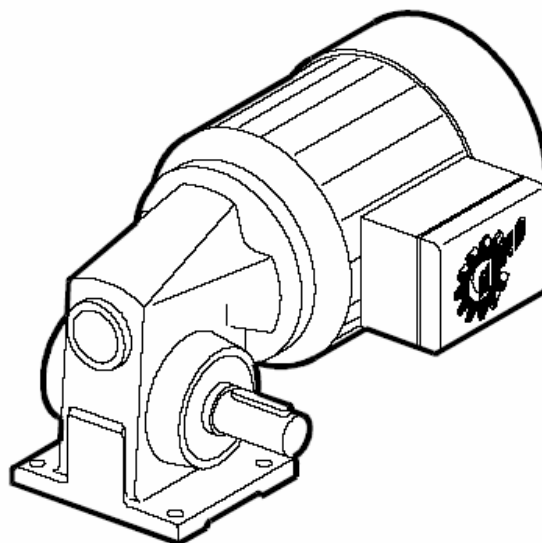
13.5. Motor met reductiekast (motorreductor)

Een motorreductor is de constructieve eenheid van een elektromotor en een reductiekast.



Motorreductoren worden aangeboden in diverse uitvoeringsvormen. Beschikbaar zijn:

- Tandwielkasten met een co-axiale ligging van de uitgaande ten opzichte van de ingaande motoras
- Vlakke tandwielkasten met een ligging van de uitgaande as die evenwijdig is aan die van de ingaande as.
- Kegelwiel-en wormwielkasten, waarbij de uitgaande as haaks geplaatst is op de ingaande as.



De keuze zijn vooral de plaatsruimte, bevestigingsmogelijkheden en de verbinding met het lastwerktuig van belang.

Afneembaar koppel aan de uitgaande as van de motorreductor:

$$\rightarrow T_a = \frac{9550 \times P_{nom} \times \eta}{n_a}$$

- ✓ T_a : koppel aan de uitgaande as in Nm
- ✓ P_{nom} : aandrijvend motorvermogen in kW
- ✓ n_a : uitgaande toerental aan de reductor in t/min
- ✓ η : rendement van de reductor

14. Remmen van de asynchrone motor

14.1. elektro-magnetisch remmen

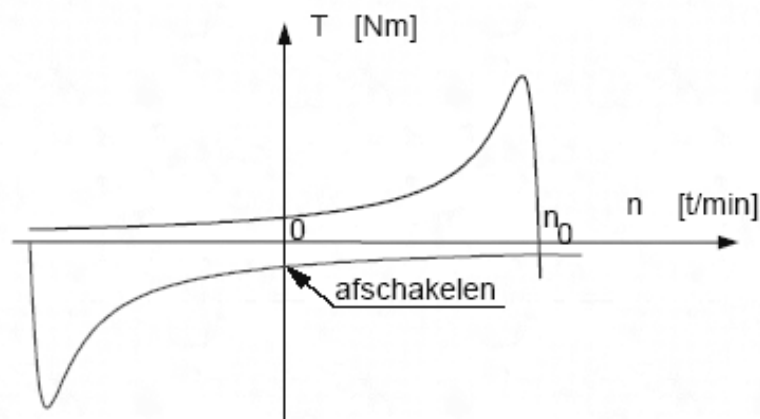
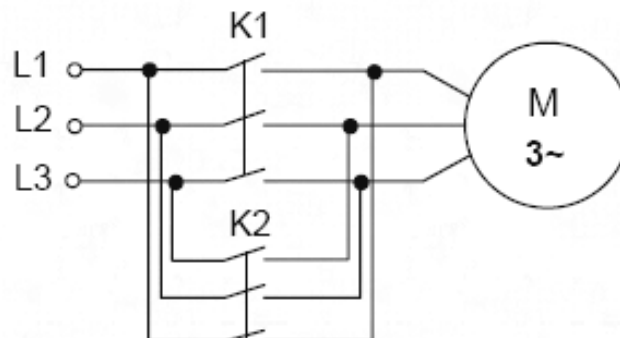
Wanneer de stator van een inductiemotor van het net geschakeld wordt, zal ten gevolge van de aanwezige kinetische energie de rotor nog een bepaalde tijd verder draaien. Om de rotor tot stilstand te brengen moet de kinetische energie omgevormd worden naar een andere energievorm. Bij mechanische remming wordt de bewegingsenergie omgezet in warmte-energie.

Het principe is net hetzelfde als bij het remmen van een fiets: door bekrachtigen van een remmagneet (trekken aan de rem) wordt een remschoen (remblokje) tegen de remtrommel (wiel) gedrukt.

14.2. Tegenstroomremmen

Een inductiemotor heeft in normale bedrijfstoestand een kleine slip (0,5-5%). Als men 2 lijndraden omwisselt, wordt de slip (2-s). Het koppel keert om en de motor wordt afgeremd. Bij het gebruik van deze remmethode moet er een "remwachter" geïnstalleerd worden, welke de motor van het net schakelt net als de motor stilstaat. Indien dit niet gebeurt loopt de motor in omgekeerde zin terug aan.

Door het omschakelen van het draaiveld ontstaat er in de rotor een spanning die ongeveer dubbel zo groot is als bij stilstand. De rotorstroom bereikt een zeer grote waarde, waardoor het warmteverlies ook groot is.



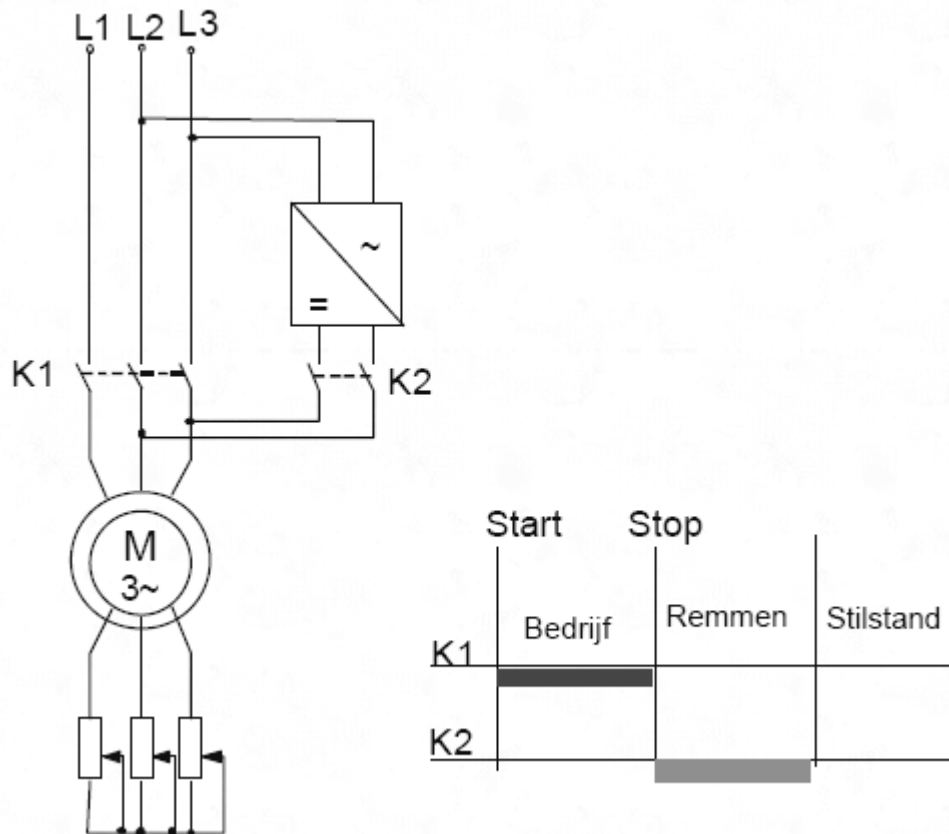
14.3. Elektromagnetische poederrem



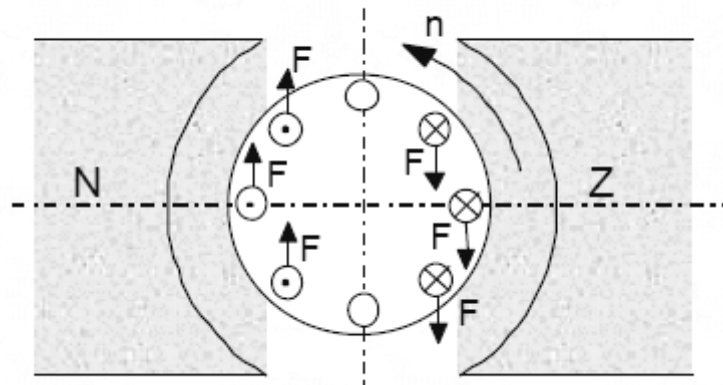
De poederrem bestaat uit een stator die stilstaat, met daarin een spoel en een rotor die gekoppeld is aan de as van de motor en hier dus mee ronddraait. De ruimte tussen de stator en de rotor is gevuld met een speciaal poeder, dat bijzondere magnetische en mechanische eigenschappen bezit: als in de spoel een gelijkstroom wordt gestuurd (door de stureenheid van de poederrem) ontstaat er een magnetisch veld, dat evenredig is met de stroomsterkte. Door dit magnetisch veld vormen de poederkorrels in de ruimte tussen stator en rotor kettingen die als het ware de ronddraaiende rotor aan de stilstaande stator verbinden. De sterkte van de poederkettingen of het remkoppel wordt bepaald door de sterkte van het magnetisch veld en dus door de waarde van de gelijkstroom in de spoel.

14.4. Gelijkstroomremmen

Hier worden de statorwindingen eerst van het voedende net afgeschakeld en vervolgens worden 2 aansluitklemmen verbonden met een lage gelijkspanning (tot 24 V). Door het aansluiten aan een gelijkstroomnet wordt het draaveld van de inductiemotor vervangen door een stilstaand gelijkstroomveld. In de rotor worden spanningen opgewekt die door het stilstaand gelijkstroomveld krachten ondervinden: de rotor wordt afgeremd.



Gelijkstroomremmen bij een sleepringmotor



Principe van gelijkstroomremmen

14.5. Remmen door oversynchrone werking (generatorisch remmen)

Als de rotor van een asynchrone machine wordt aangedreven met een snelheid die hoger is dan de synchrone snelheid, werkt de motor als generator en levert hij elektrische energie aan het net. Dit is mogelijk bij hijswerktuigen tijdens het dalen van de last.

Op dit ogenblik is de opgewekte emk groter dan de aangelegde spanning. Het gevolg is dat de opgewekte rotorstroom omkeert van zin, waardoor ook het koppel omkeert. Hierdoor zal de motor afremmen.

Merk op dat je zo enkel kan afremmen tot synchrone snelheid en niet tot stilstand.

15. Koelen van de motor

De verliezen die ontstaan in het elektrisch actief deel van een inductiemotor moeten afgevoerd worden naar de omgeving, vermits de opwarming de toegelaten grenzen van de gebruikte isolatiematerialen van de wikkelingen niet mag overschrijden. Om een hoge levensduur van de machine te verzekeren is het noodzakelijk de gepaste koeling te kiezen in functie van de grootte van de machine.

In de motorbouw onderscheidt men drie wijzen van koeling, afhankelijk van de grootte van de machine, de constructie en wijze van gebruik:

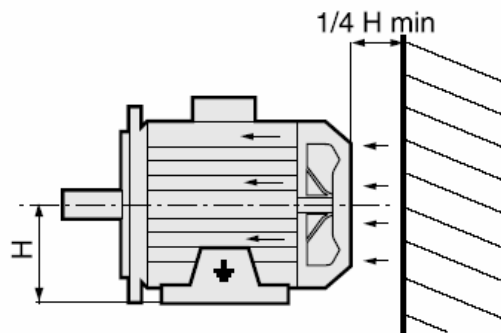
15.1. Luchtkoeling

15.2. Gaskoeling: wordt bijna niet toegepast

15.3. Waterkoeling

De koelwijze wordt benoemd volgens de IC-code (international cooling) van norm IEC34.6

Voorbeeld. → I C 4 (A) 1 (A) 1 = IC411, dit houdt in dat de motor van buitenaf gekoeld wordt door circulerende lucht. Een ventilator achter de motor zorgt voor de koeling. De lucht wordt aangezogen via het rooster van de waaierkap (die dient ter bescherming tegen rechtstreekse aanraking met de ventilator) en wordt langs de ribben van het huis geblazen, zodat de temperatuur bij elke draairichting constant blijft



Installeer de motor op een plaats die voldoende geventileerd is. De lucht moet vrij kunnen toegevoerd en afgevoerd kunnen worden over minstens $\frac{1}{4}$ van de ashoogte. Als het rooster van de waaierkap verstopt is, verstoort dat de goede werking van de motor.

16. Beveiligen van asynchrone motor

Abnormale stijging van de temperatuur van de motor heeft als oorzaken:

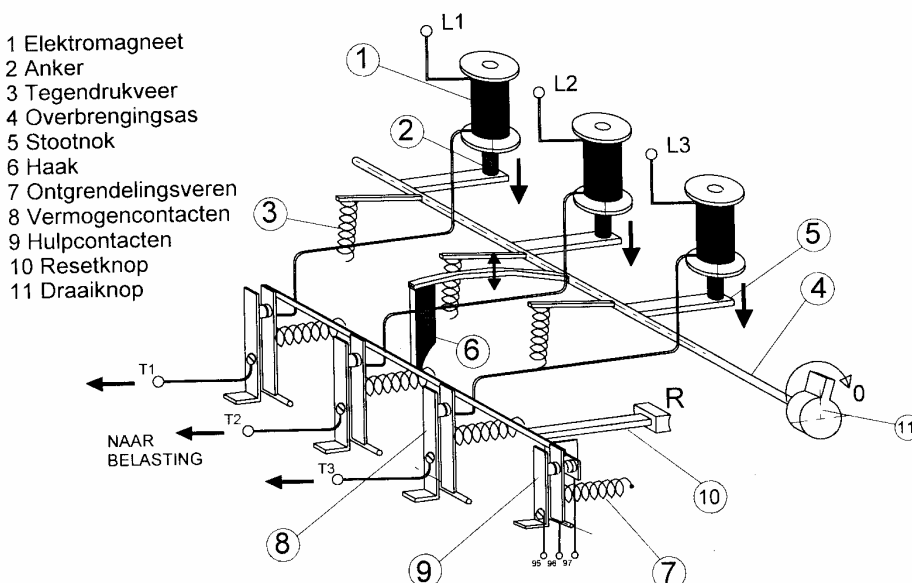
- Overbelasting: een toenemende belasting vereist grotere stromen, die na een bepaalde tijd overschrijding van de grenstemperatuur veroorzaken, waardoor de levensduur van de motor verkort.
- Onderbreken van een lijndraad
- Té lage netspanning
- Geblokkeerde motor

○ = geen beveiliging ◐ = beperkte beveiliging ● = volledige beveiliging	Stroomafhankelijke beveiliging		Temperatuurafhankelijke beveiliging	
	Smeltveiligheid	Motorbeveiligingsschakelaar	PTC-temperatuurvoelers (TF)	Bimetaalschakelaars (TH)
Overbelasting tot 200 % I_N	○	●	●	●
Zware aanloop, omkering	○	◐	●	◐
Schakelfrequentie tot 30 c/h	○	◐	●	●
Blokking	◐	◐	◐	◐
1-fase-loop	○	◐	●	●
Spanningsafwijking	○	●	●	●
Frequentieafwijking	○	●	●	●
Ontoereikende motorkoeling	○	○	●	●
Lagerschade	○	○	●	●

16.1. Beveiliging tegen kortsluiting

Voor het beveiligen tegen kortsluiting gebruikt men smeltveiligheden, elektromagnetische maximumbeveiligingsystemen of vermogensautomaten.

Magnetische overstroombeveiliging:

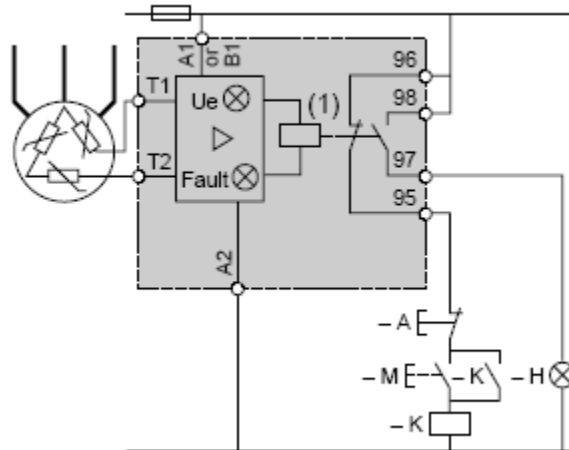


16.2. Beveiliging tegen overbelasting

Het beveiligen tegen overstroom gebeurt door rechtstreekse of onrechtstreekse controle van de temperatuur van de motorwikkelingen.

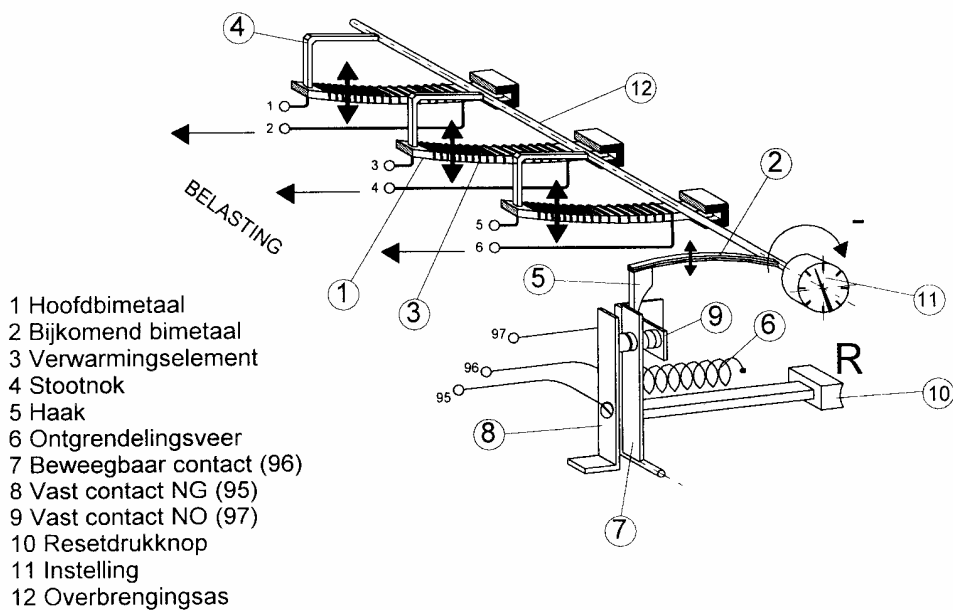
16.2.1. Rechtstreekse methode

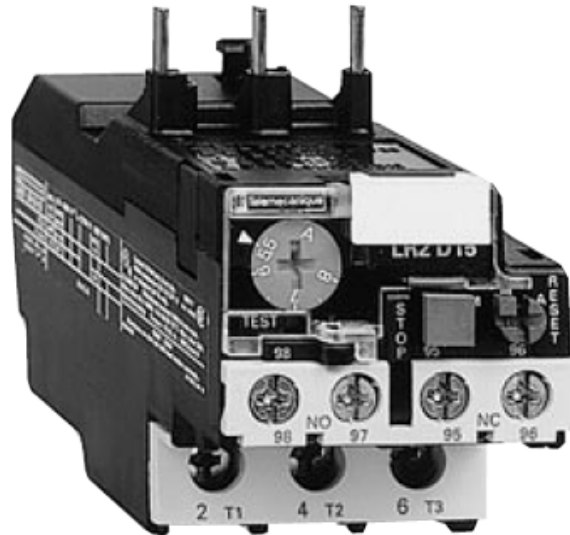
Hier wordt de temperatuur in de wikkelingen bewaakt met een thermistorbeveiliging: hier worden er 3 temperatuursafhankelijke weerstanden (die tussen de spoelen zijn aangebracht) onderling in serie verbonden en aangesloten op een thermistorrelais.



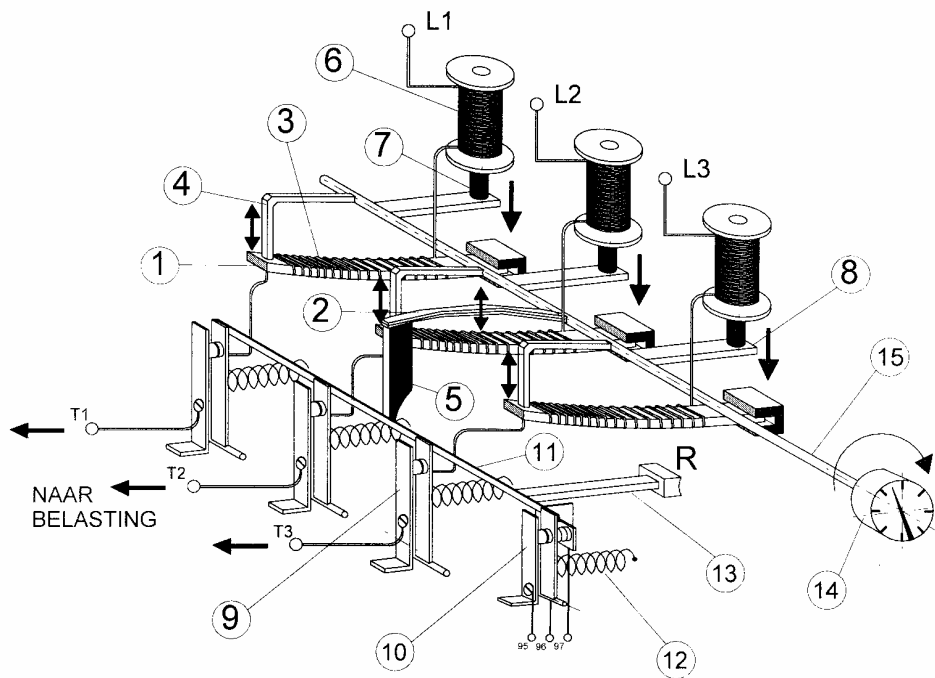
16.2.2. Onrechtstreekse methode

Met behulp van een bimetaal wordt de temperatuur bewaakt: bij hoge stromen zal het bimetaal opwarmen, vervormen en zo een uitschakelmechanisme in werking stellen.



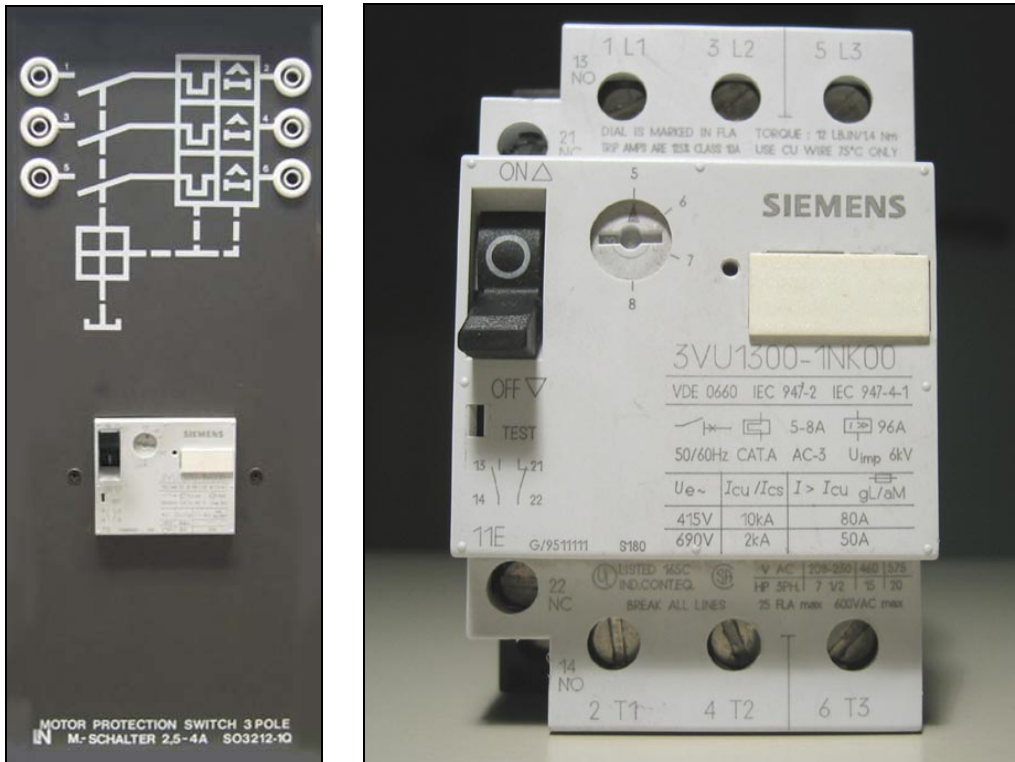


16.3. Beveiliging tegen overbelasting EN kortsluiting



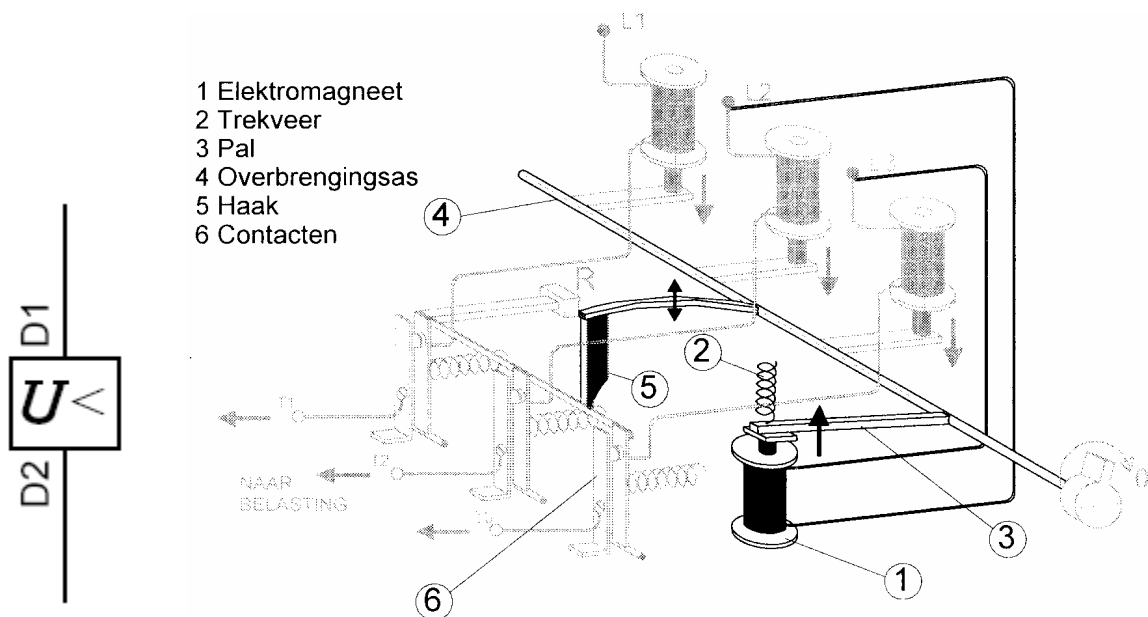
- 1 Hoofdbimetaal
- 2 Bijkomend bimetaal
- 3 Verwarmingselement
- 4 Stootnok thermische beveiliging
- 5 Haak
- 6 Elektromagneet
- 7 Anker
- 8 Stootnok magnetische beveiliging
- 9 Vermogencontacten
- 10 Hulpcontacten
- 11 Overbrenging
- 12 Ontgrendelingsveer
- 13 Resetdrukknop
- 14 Instelling thermische beveiliging
- 15 Overbrengingsas

Deze beveiliging is een combinatie van het thermisch en magnetisch overstromrelais.

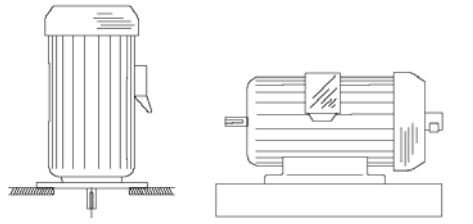


16.4. Nulspanningsbeveiliging of minimumspanningsbeveiliging

Dergelijke beveiligingsschakelaars verbreken de verbinding met het voedingsnet als de netspanning onder een bepaald niveau of volledig is weggefallen. Zo wordt vermeden dat een installatie ongecontroleerd opnieuw in werking zou treden als de spanning terugkeert.



17. Bouwwormen



Met bouwwormen van de elektrische motor bedoelt men de wijze waarop de motor is voorzien van bevestigingsvoeten of –flenzen en de manier waarop de motor moet worden bevestigd om normaal te kunnen werken

Om de bouwwormen te definiëren worden 2 codes gebruikt:

- ✓ IEC-code I: voorbeeld: IM B3 → de letter stelt de opstelling van de motoras voor (B=horizontaal; V=verticaal) en het cijfer duidt op de manier waarop de motor horizontaal of verticaal bevestigd wordt.

B3 	B6 	B7
B8 	V5 	V6
B5 	V1 	V15
B35 	V3 	V36
B65 	B75 	B85

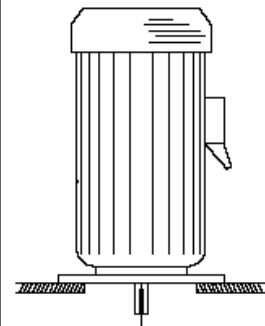
- ✓ IEC-code II: voorbeeld: IM 1001 → het eerste cijfer geeft weer of het een motor is met voeten, een flens, De 2 middelste cijfers geven de montagepositie weer en het laatste cijfer zegt iets over het type asuiteinde.

De meest voorkomende uitvoeringsvormen:

- Verticale as
- Horizontaal bevestigingsvlak
- 2 lagerschilden
- 1 asuiteinde aan de flenszijde onderaan
- Bevestiging door flens met gaten in het onderste lagerschild



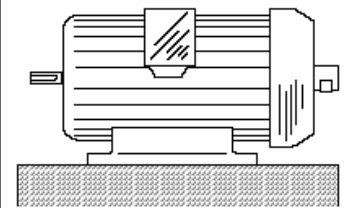
V1



- Horizontale as
- Horizontaal bevestigingsvlak
- 2 lagerschilden
- 1 asuiteinde
- Bevestigingspoten aan het huis



B3



18. Bedrijfsklassen

Het nominale vermogen staat altijd in verhouding tot een bedrijfsklasse en een inschakelduur. Normaal wordt een kooiankermotor qua prestaties gebaseerd op een langdurig bedrijf (S1), dit wil zeggen dat een gebruik wordt verondersteld met een constante belasting, waarbij de duur voldoende is om de temperatuur van de motor te laten stijgen tot zijn stabiele eindwaarde.

S2 is een kortstondig bedrijf, dat wil zeggen een bedrijf met een constante belasting voor een beperkte, vastgelegde tijdsduur met een aansluitende pauze waarin afkoeling plaats vindt tot de omgevingstemperatuur weer bereikt wordt.

Intermitterend bedrijf (S3) impliceert dat het lastbedrijf bestaat uit een reeks gelijksoortige lastspelen, elk gevormd door een periode van constante belasting en een periode van stilstand. De aanloopstroom mag hierbij het opwarmingsproces niet wezenlijk beïnvloeden.

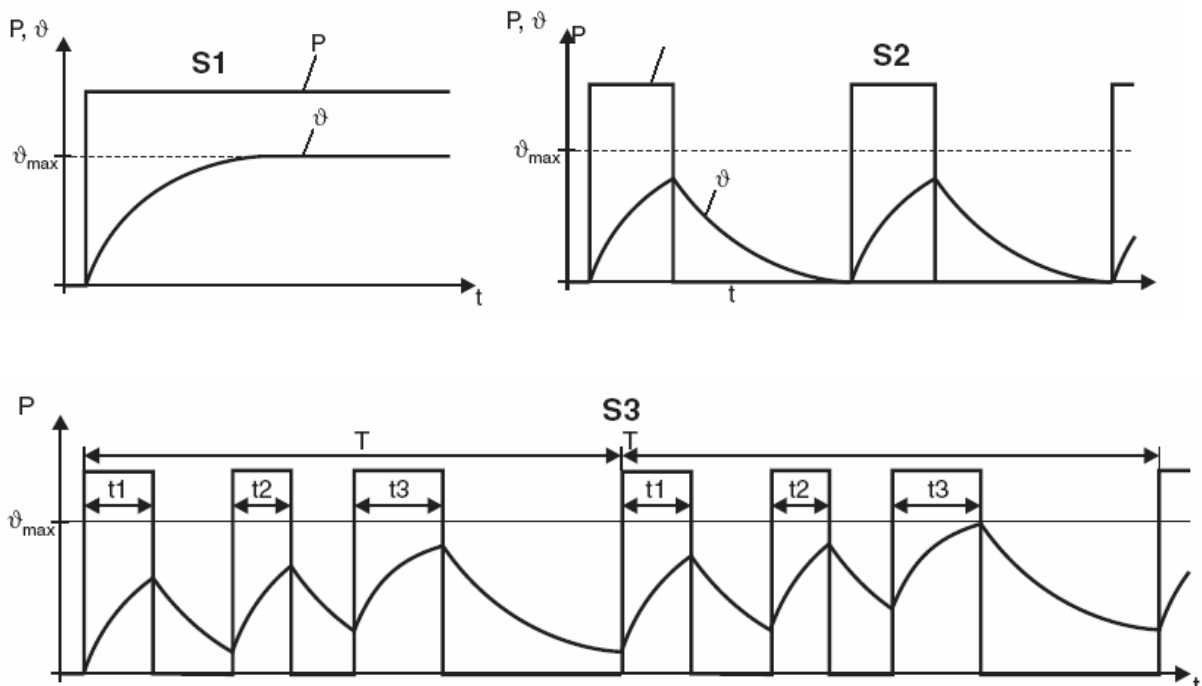
Intermitterend bedrijf met aanloop kenmerkt bedrijfsklasse S4, gekenmerkt door relatieve inschakelduur en het aantal schakelingen per uur.

Verder zijn er nog bedrijfsklassen S5-S8 met gedeeltelijk analoge eisen als S1-S4.

Opmerking:

Is de motor gemaakt voor 100 % inschakelduur en is slechts een lage inschakelduur nodig, dan kan het motorvermogen volgens de volgende tabel verhoogd worden.

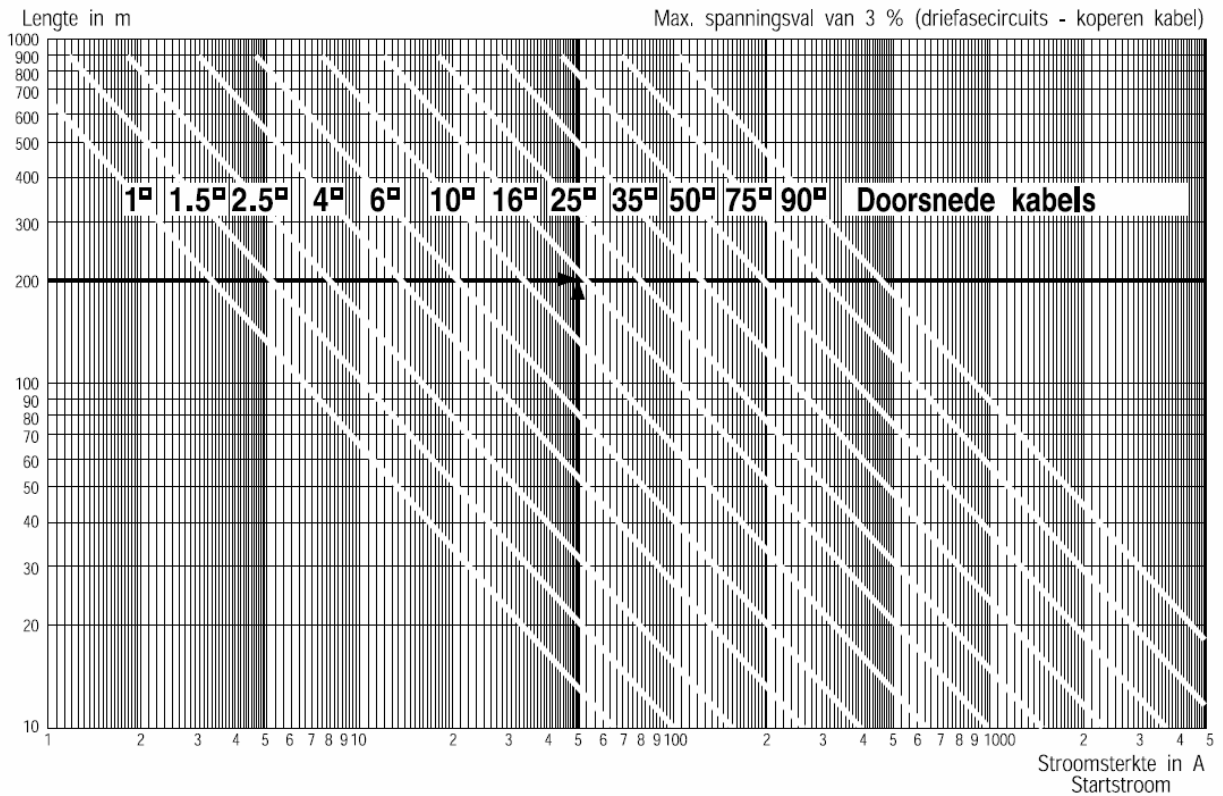
Bedrijfs-soort	Verklaring
S1	Continubedrijf: bedrijf met constante last, de motor bereikt de thermische evenwichtstoestand
S2	Kortstondig bedrijf: bedrijf met constante last voor een begrenste, vastgestelde tijd en aansluitende pauze. In de pauze bereikt de motor weer de omgevingstemperatuur.
S3	Intermitterend bedrijf: zonder invloed van het inschakelproces op de verwarming. Gekenmerkt door een reeks identieke schakelingen, bestaand uit een periode met constante last en een pauze. Beschreven door de "Relatieve inschakelduur (ID)" in %.
S4...S10	Intermitterend bedrijf: met invloed van het inschakelproces op de verwarming. Gekenmerkt door een reeks identieke schakelingen, bestaand uit een periode met constante last en een pauze. Beschreven door de "Relatieve inschakelduur (ID)" in % en het aantal schakelingen per uur.



19. Montage en onderhoud

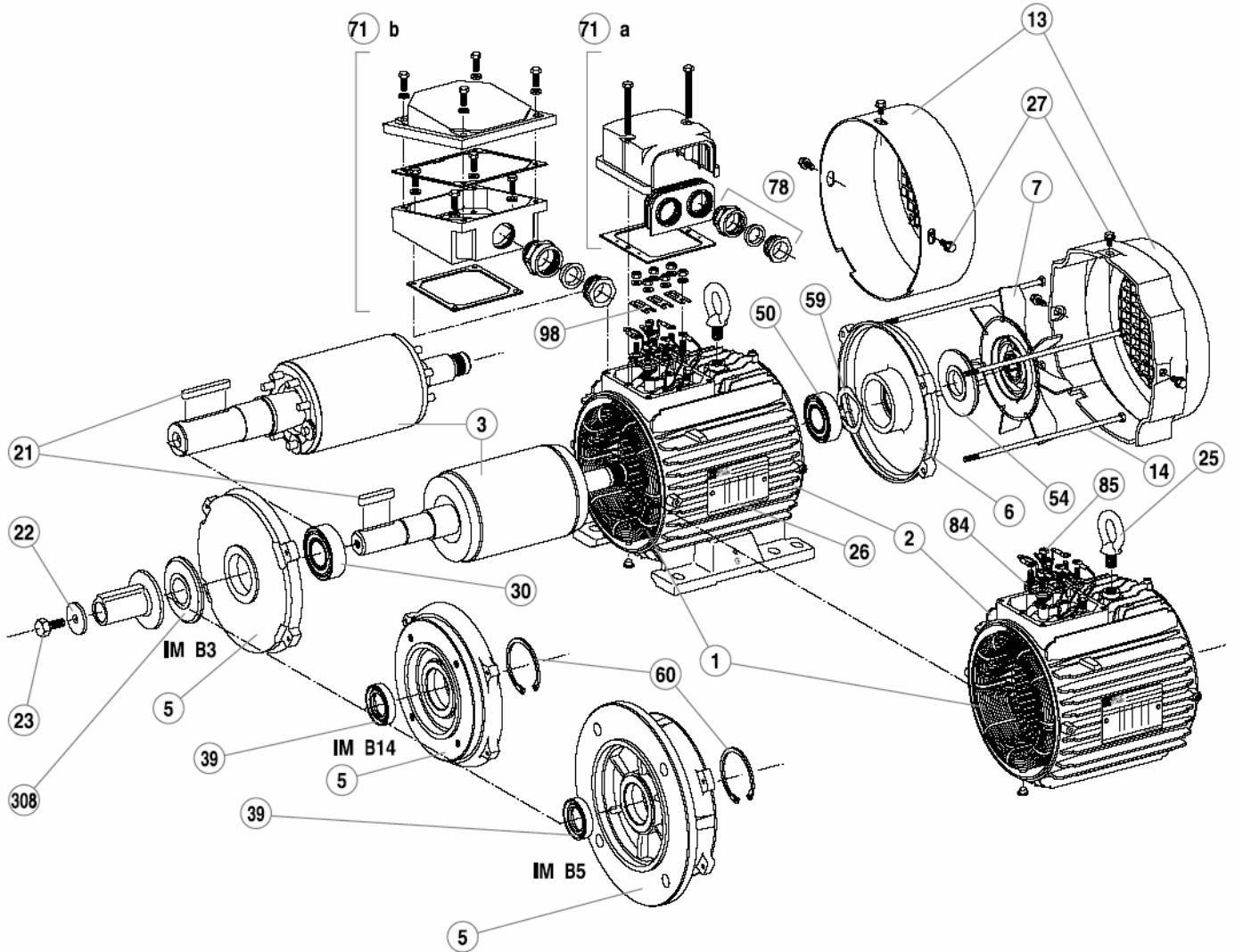
19.1. Doorsnede van de voedingskabels

Hoe meer stroom er door de kabels loopt, hoe groter de spanningsval. Daarom wordt de waarde van de aanloopstroom berekend om te weten of de kabel geschikt is voor de toepassing. Aangezien het belangrijkste criterium het aanloopkoppel (of de starttijd is), moet de spanningsval beperkt worden tot 3 % (wat overeenkomt met een daling van het koppel van 6 tot 8 %) . Aan de hand van onderstaand nomogram kunt u bepalen welke kabels u nodig hebt voor een spanningsval tot max. 3 % afhankelijk van de lengte van de bedrading en de stroomsterkte bij het starten.



20. Storingen

Probleem	Mogelijke oorzaak	Oplossing	
Abnormaal geluid	Afkomstig van motor of aangedreven machine?	De motor loskoppelen van de aangedreven machine en de motor alleen testen	
Motor maakt lawaai	Mechanische oorzaak: Als het lawaai blijft voortduren na onderbreking van de stroom		
	- trillingen	- Controleren of de spie in overeenstemming is met het soort balancering (zie § 2.3)	
	- lagers defect	- De lagers vervangen	
	- mechanische wrijving: koeling, koppeling	- Controleren	
	Elektrische oorzaak: als het lawaai ophoudt na onderbreking van de stroom	- De voeding aan de klemmen van de motor controleren	
	- normale spanning en 3 evenwichtige fasen	- Controleren of het klemmenbord goed aangesloten is en of de klemmen goed vastzitten	
	- abnormale spanning	- De voedingslijn controleren	
	- fasen niet in evenwicht	- De weerstand van de wikkelingen controleren	
	Abnormale verhitting van de motor	- koeling defect	- De omgeving controleren - De waaierkap en de koelribben reinigen - De montage van de koeling op de as controleren
		- verkeerde voedingsspanning	- Controleren
- strips verkeerd geschakeld		- Controleren	
- overbelasting		- De werkelijk ingaande stroom vergelijken met die op het typeplaatje van de motor	
- fasesluiting		- De elektrische continuïteit van de wikkelingen en/of de installatie controleren	
- fasen niet in evenwicht		- De weerstand van de wikkelingen controleren	
Motor start niet		Onbelast - mechanische blokkering - voedingslijn onderbroken	Spanning uitgeschakeld: - De vrije rotatie van de as met de hand controleren - De zekeringen, elektrische beveiligingen en de starter controleren
	Belast - fasen niet in evenwicht	Spanning uitgeschakeld: - De draairichting (volgorde van de fasen) controleren - De wrijving en de slijtage van de lagers controleren - De elektronische beveiliging controleren	
	Sleepringmotor - opening in rotorcircuit	- De rotor aansluiten op de starter	



LS 56 tot LS 160 MP/LR

Nr.	Benaming	Nr.	Benaming	Nr.	Benaming
1	Gewikkelde stator	22	Ring aseinde	59	Golfkring
2	Huis	23	Bout aseinde	60	Circlip
3	Rotor	25	Hijsoog	71 a	Plastic klemmenkast (≤ AH 112)
5	Lagerschild vooraan	26	Typeplaatje	71 b	Metalen klemmenkast
6	Lagerschild achteraan	27	Bevestigingsbout waaierkap	78	Wartel
7	Ventilator	30	Lager vooraan	84	Klemmenbord
13	Waaierkap	39	Afdichting vooraan	85	Bout klemmenbord
14	Trekstangen	50	Lager achteraan	98	Aansluitingsstrippen
21	Spie aseinde	54	Afdichting achteraan	308	Labyrintafdichting