

1	Asynchrone motor.....	2
1.1	Toepassingsgebied.....	2
1.2	Werkingsprincipe.....	2
1.3	Samenstelling.....	4
1.4	Het elektromagnetisch draaiveld.....	6
1.5	Slip van de asynchrone motor.....	7
1.6	Rotorfrequentie.....	7
1.7	Rotorspanningen.....	8
1.8	Koppelsnelheidskarakteristiek van een asynchrone Motor.....	9
1.8.1	De uitdrukking van het koppel van een asynchrone motor.....	9
1.8.2	Invloed van de arbeidsfactor op het koppel.....	10
1.8.3	Invloed van de rotorstroom op het koppel.....	11
1.8.4	Het koppel van een asynchrone motor in functie van de slip.....	11
1.8.5	Koppel bij stilstand.....	12
1.8.6	Koppel tijdens de aanloop.....	13
1.8.7	De koppelsnelheidskarakteristiek.....	13
1.8.8	Motor karakteristieken in de praktijk.....	16
1.8.9	Opdracht koppelkarakteristiek.....	20
1.8.10	Opdracht koppelkarakteristiek wals.....	21
1.8.11	Opdracht koppelkarakteristiek zuigerpomp of lift.....	21
1.9	Sleepringankermotoren.....	22
1.10	Kortsluitankermotoren.....	23
1.10.1	Enkelkooirotor.....	23
1.10.2	Dubbelkooirotor.....	23
1.10.3	Stroomverdringingsrotor.....	24
1.10.4	Conische rotor of schuifankermotor.....	25
1.11	Statorwikkelingen.....	26
1.12	Stromen bij ster-driehoekschakeling.....	29
1.13	Aanzetten van asynchrone motoren.....	30
1.13.1	Directe aanzet.....	30
1.13.2	Ster-driehoek-aanzet.....	30
1.13.3	Aanzet met verlaagde spanning.....	31
1.13.4	Aanzet met rotorweerstand.....	31
1.14	Vermogens in een driefazen inductiemotor.....	32
1.15	Rendement van een driefazen inductiemotor.....	32
1.16	Snelheidsregeling van driefazen inductiemotoren.....	32
1.16.1	Snelheidsregeling door wijziging van de slip.....	33
1.16.2	Snelheidsregeling door poolomschakeling.....	34
1.16.3	Snelheidsregeling door frequentieregeling.....	35
1.17	Elektrische remming van een asynchrone motor.....	37
1.17.1	Hypersynchrone afremming.....	37
1.17.2	Tegenstroomremming.....	38
1.17.3	Gelijkstroomremming van een asynchrone motor.....	39
1.17.4	De elektromagnetische poederrem.....	43
1.17.5	De gelijkstroombekrachtigde elektromagnetische platenrem.....	43
1.18	Elektrische beveiliging van inductiemotoren.....	45
1.18.1	Stromen tijdens bedrijf.....	45
1.18.2	Hoe beveiligen.....	45
1.18.3	Smeltveiligheden.....	45
1.18.4	Elektromagnetische maximumbeveiliging.....	46
1.18.5	Thermische maximumbeveiliging.....	46
1.18.6	Thermistorbeveiliging.....	46
1.18.7	Nulspanningsbeveiliging.....	47

# 1 Asynchrone motor.

Een asynchrone motor is een elektrische machine die driefazen wisselstroomenergie omzet in mechanische rotatie-energie.

## 1.1 Toepassingsgebied.

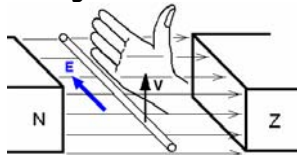
Daar de motor een eenvoudige constructie bezit, robuust is en goedkoop, wordt hij toegepast vanaf kleine tot zeer grote vermogens, in werktuigmachines, huishoudtoestellen, ...

Deze motor die in de praktijk zeer veel voorkomt, vraagt dan ook een zeer grondige studie.

## 1.2 Werkingsprincipe.

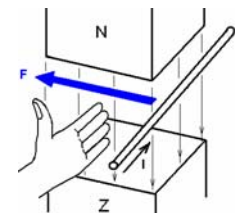
Als de statorwikkeling aangesloten wordt op een driefazen spanning, ontstaat een elektromagnetisch draaiveld, waarvan de krachtlijnen de rotor geleiders snijden. In de rotor geleiders worden spanningen geïnduceerd: vandaar ook de benaming inductiemotor. De inductiestromen, die ontstaan in de kortgesloten rotorketen ondervinden lorentzkrachten, waardoor een draaikoppel ontstaat in dezelfde zin van het draaiveld.

Veronderstellen we dat in de principetekening de statorflux naar links omdraait. In de stilstaande rotor geleider wordt dan een e.m.s. geïnduceerd, waarvan we de zin bepalen met de rechterhandregel



- de duim in de relatieve bewegingszin van de geleider houden
- de geleider beweegt in het magnetisch veld relatief gezien naar rechts

De inductiestroom ondervindt een Lorentzkracht, waarvan we de zin bepalen met de linkerhandregel



- De lorentzkracht geeft aan de rotor een draaizin, die dezelfde is als die van het magnetisch veld van de stator.

Zou de rotor evensnel draaien als het magnetisch veld van de stator (= synchroon), dan zouden de rotor geleiders niet meer door de statorflux gesneden worden: er zouden dan geen inductiestromen meer zijn, zodat ook geen lorentzkrachten meer kunnen ontstaan.

De rotor zal dan vertragen.

**De rotor draait bijgevolg niet synchroon (= asynchroon) met het statordraaiveld: vandaar de benaming asynchrone motor.**

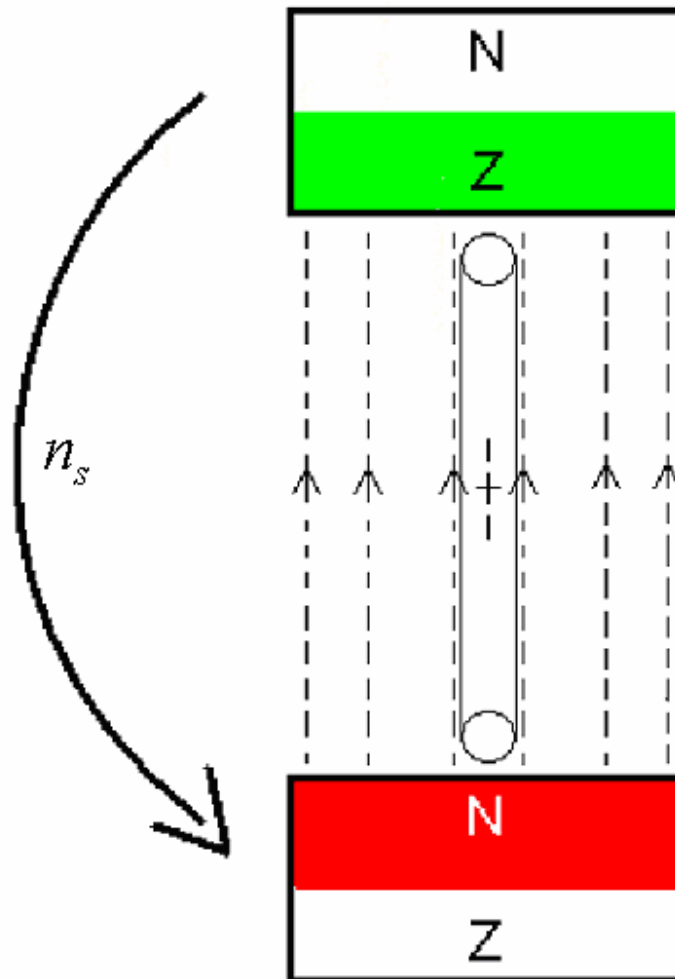
De rotor draait in dezelfde zin als het statordraaiveld, maar de snelheid van de rotor is kleiner dan de snelheid van het magnetisch draaiveld van de stator.

Duid de volgende grootheden aan op de onderstaande tekening =>

*vectoren*:  $\phi_s$  (flux stator),  $F$  (lorentzkracht),  $v_r$  (relatieve snelheid van de geleider t.o.v de veldlijnen)

*draaizin*:  $n_r$  (draaisnelheid rotor)

Duid ook de zin van de opgewekte spanning in de rotor geleiders aan met een kruisje of een punt.

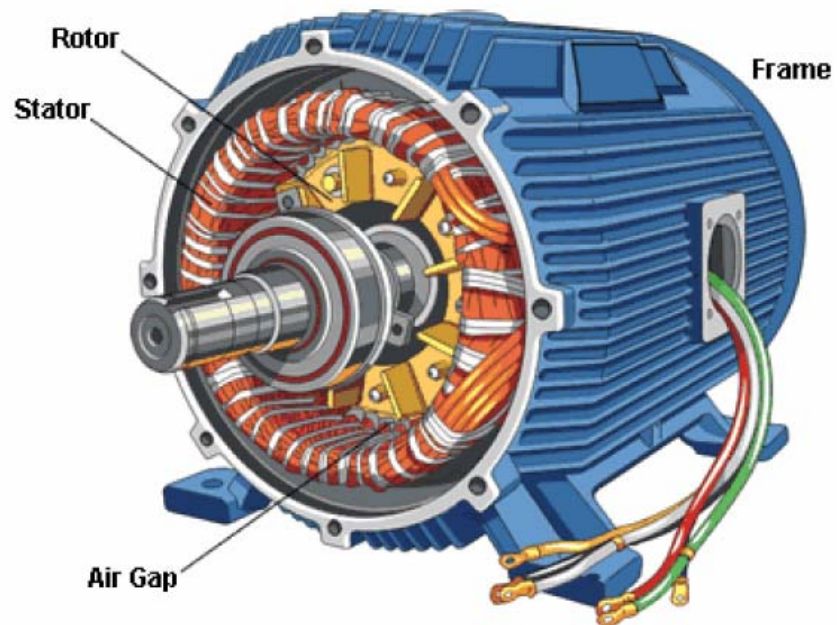
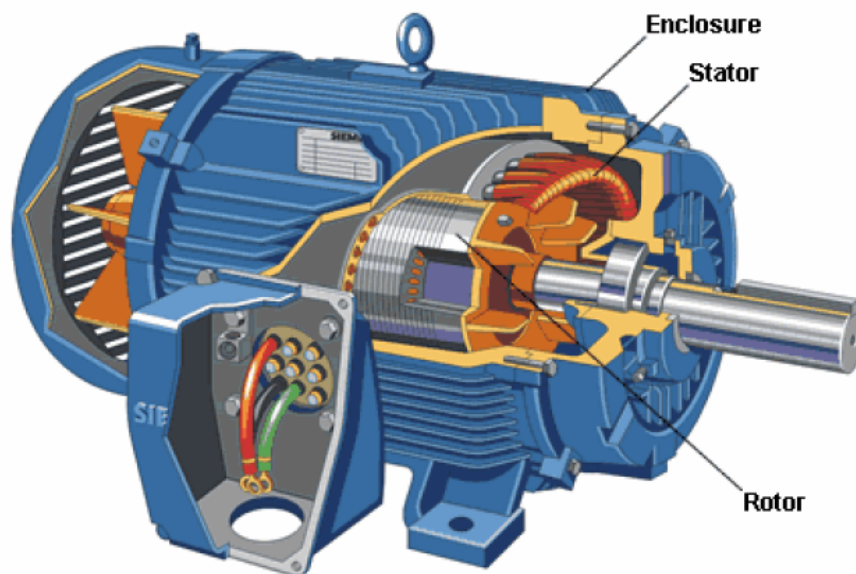


### 1.3 Samenstelling.

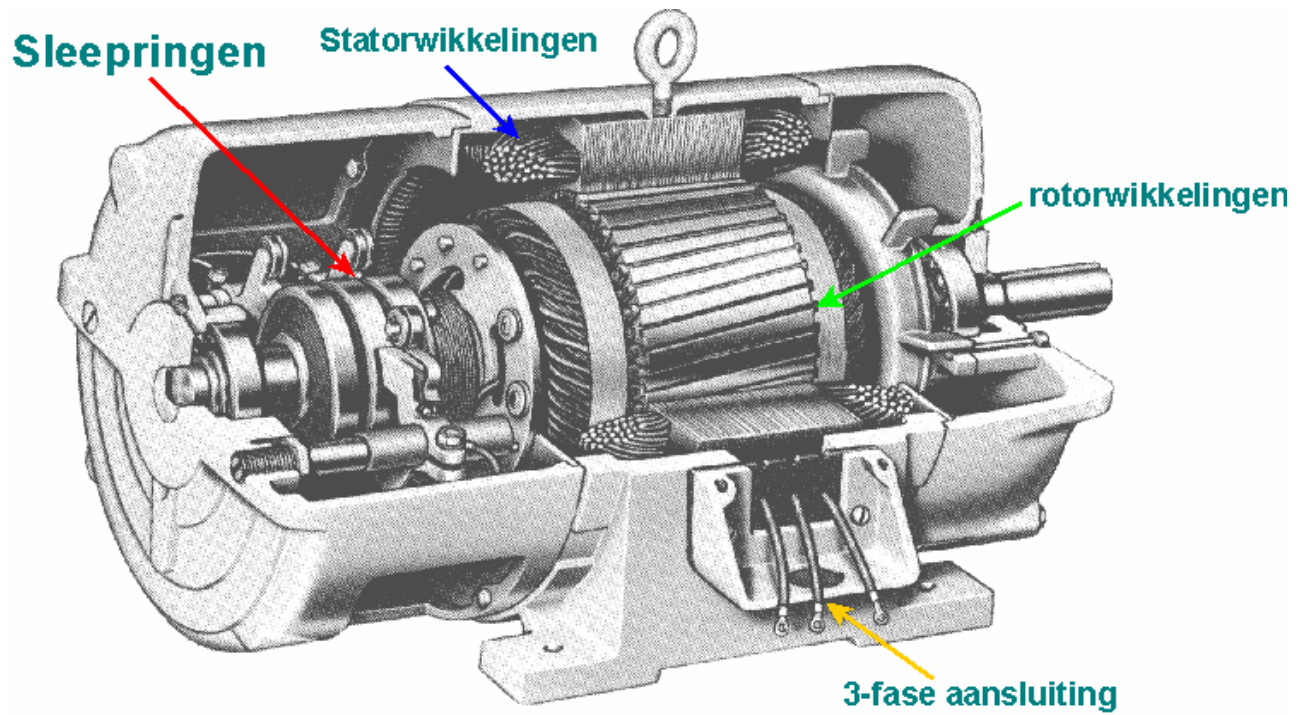
Een driefazen inductiemotor bestaat uit een stator- en een rotorgedeelte.  
De stator zelf is samengesteld uit een gelamelleerde elektromagnetische keten van Si-staal voorzien van gleuven, waarin een driefazen statorwikkeling is aangebracht. Het statorhuis is meestal voorzien van koelribben.

De rotor wordt uitgevoerd als:

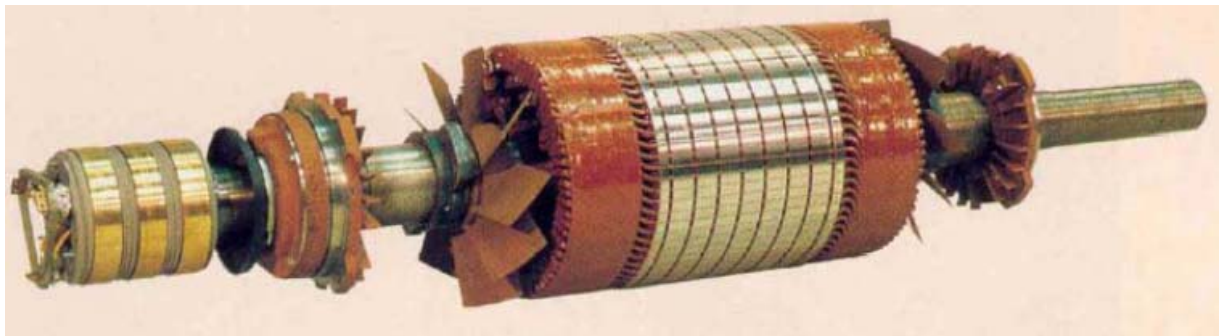
- kooirotor, waarbij de rotorstaven rechtstreeks zijn kortgesloten door kortsluitringen



- bewikkelde rotor, waarbij de wikkelingen via sleepringen en borstels door regelbare weerstanden worden kortgesloten.



Rotor

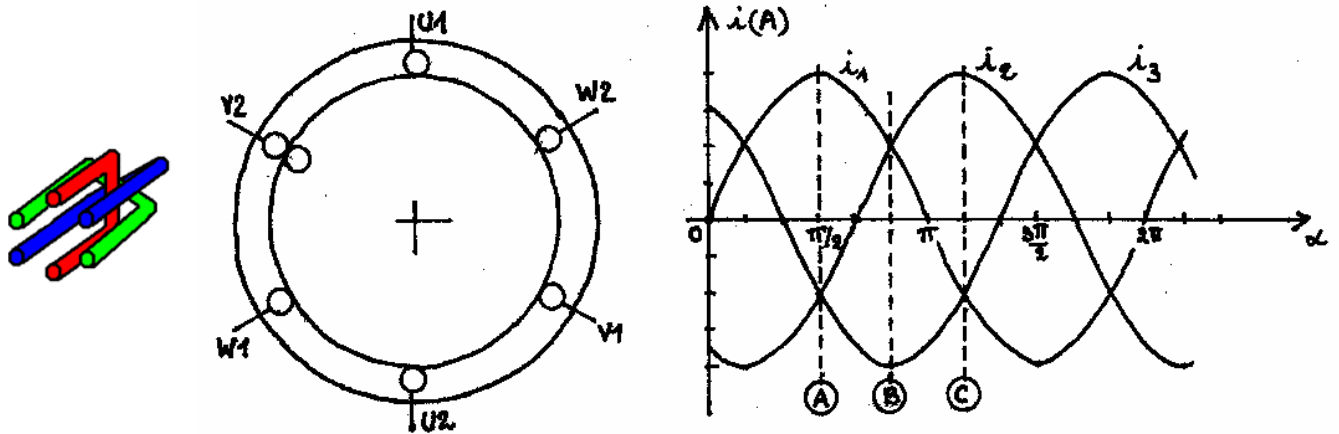


### 1.4 Het elektromagnetisch draaiveld.

Een cirkelvormig magnetisch draaiveld met constante rotatiesnelheid kan bekomen worden door een driefazen stroom in een driefazen wikkeling te sturen.

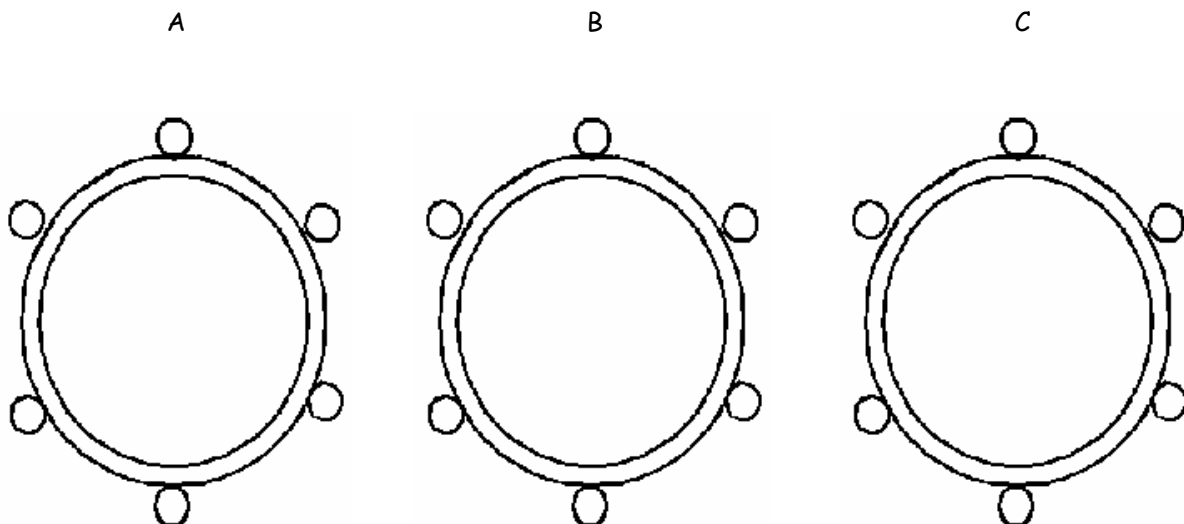
Om dit aan te tonen stellen we een tweepolige driefazen statorwikkeling voor.

We sturen een driefazen stroom in de driefazen wikkeling, zodanig dat bij een positieve stroom in de voorstelling, hij binnentreedt (x) aan de ingangen U1, V1 en W1 van de spoelen.



Op bepaalde ogenblikken (A, B en C) berekenen we de ogenblikkelijke waarden van de stromen en de grootte van de fluxen  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  en  $\phi_3$ .

Dan construeren we deze fluxen met de juiste zin en bep. vervolgens de resulterende fluxvector  $\phi$ .



We stellen vast dat de fluxvector in waarde evengroot blijft, doch telkens over een bepaalde hoek (60°) gedraaid is ten opzichte van de vorige fluxvector.

**Als een driefazen stroom in een stilstaande driefazen wikkeling wordt gestuurd ontstaat een draaiend elektro-magnetisch veld, dat gelijk is aan 1.5 maal de maximum flux per faze en ronddraait met een constante draaisnelheid.**

Tussen de draaisnelheid van het statorveld en de toegepaste frequentie bestaat het volgend verband (zie wisselstroom-generatoren):

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} \quad (1)$$

Men noemt de statorvelddraaisnelheid  $n_s$  ook de synchrone draaisnelheid.

De draaizin van het magnetisch veld wordt bepaald door de opeenvolging van de fazestromen in de statorwikkeling en kan bijgevolg gewijzigd worden door de zin van de fazestroom in een van de spoelen te wijzigen.

### 1.5 Slip van de asynchrone motor.

De snelheid van de rotor hangt af van de mechanische belasting en is steeds kleiner dan de synchrone snelheid ( $n_r < n_s$ ). We zeggen dat de rotor slipt ten opzichte van het statorveld. De afwijking in snelheid noemen we de **absolute slip** en is het verschil tussen de synchrone snelheid en de rotorsnelheid ( $n = n_s - n_r$ ).

De **relatieve slip**  $s$  is de verhouding van deze afwijking  $n$  ten opzichte van de synchrone snelheid

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2)$$

Bij stilstand van de rotor is de slip 100 % ( $s = 1$ ), terwijl bij synchrone snelheid de slip 0 % ( $s = 0$ ) is.

### 1.6 Rotorfrequentie

Ais de rotor draait met een eenparige snelheid  $n_r$ , zal het draaiveld de rotor geleiders snijden met een relatieve snelheid  $n = n_s - n_r$ , zodat de rotorfrequentie kan afgeleid worden uit:

$$f_r = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{p \cdot (n_s - n_r)}{60} = \frac{p \cdot n_s}{60} \cdot \frac{(n_s - n_r)}{n_s} = f_s \cdot s \quad (3)$$

De rotorfrequentie is dus evenredig met de slip. Bij stilstand van de rotor is de rotorfrequentie  $f_r = f_s = 50$  Hz, terwijl bij synchrone snelheid  $f_r = 0$ .

Hieruit volgt dat de slip ook invloed uitoefent op de rotorinductantie, daar deze afhankelijk is van de rotorfrequentie:

$$X_r = 2\pi \cdot f_r \cdot L_r = 2\pi \cdot f_s \cdot s \cdot L_r = s \cdot X_{rst} \quad (4)$$

waarin  $X_{rst}$  de rotorinductantie bij stilstand voorstelt.

Zo zal eveneens de faseverschuiving  $\beta_r$ , die ook afhankelijk is van de rotorfrequentie, veranderen met de slip:

$$\operatorname{tg}(\beta_r) = \frac{X_r}{R_r} = \frac{s \cdot X_{rst}}{R_r} = s \cdot \operatorname{tg}(\beta_{rst}) \quad (5)$$

### 1.7 Rotorspanningen

De effectieve waarde van de ems per spoel van de statorwikkeling is (zie wisselstroomgeneratoren):

$$U_f \approx E_s = k_s \cdot f_s \cdot \phi_m \cdot N_s \quad (6)$$

De geïnduceerde ems in de rotorwikkeling van de asynchrone motor volgt uit:

$$E_r = k_r \cdot f_r \cdot \phi_m \cdot N_r = k_r \cdot s \cdot f_s \cdot \phi_m \cdot N_r \quad (7)$$

Bij stilstand ( $f_r = f_s$ ) is de geïnduceerde ems van de rotor  $E_{rst}$  en wordt de laatste uitdrukking:

$$E_{rst} = k_r \cdot f_s \cdot \phi_m \cdot N_r \quad (8)$$

Combinatie van de laatste twee uitdrukkingen geeft voor de rotorspanning:

$$E_r = s \cdot E_{rst} \quad (7)$$

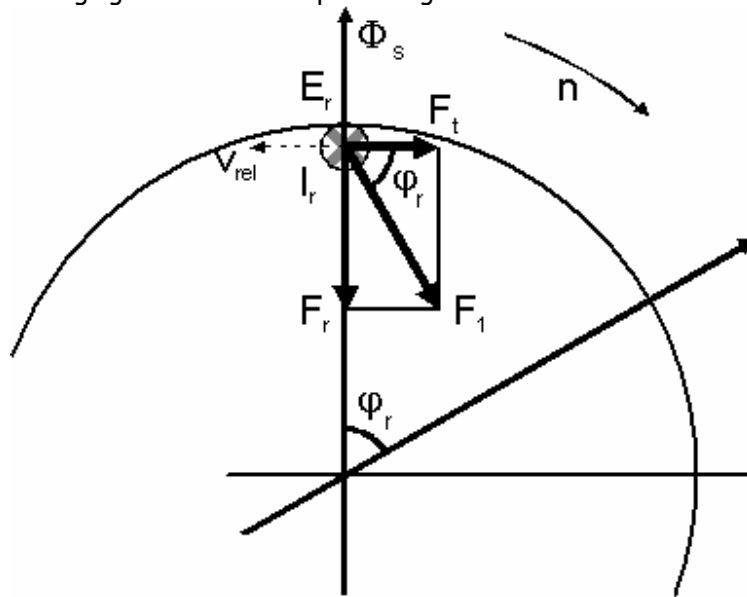
De geïnduceerde rotorspanning in een spoel van de rotorwikkeling is dus eveneens recht evenredig met de slip.



## 1.8 Koppelsnelheidskarakteristiek van een asynchrone Motor

### 1.8.1 De uitdrukking van het koppel van een asynchrone motor

Veronderstel dat een bepaalde rotorleider, wordt gesneden door de statorflux  $\Phi_s$  met een snelheid  $n = n_s - n_r$  (tr/min) en de draaiing zoals aangegeven in de tekening (naar rechts). Met behulp van de regel van de rechterhand vinden we dan de zin van de inductiespanning  $E_r$  terug in de rotorleider. Hiervoor bepalen we de relatieve bewegingszin van de geleider ( $v_{rel}$  naar links) en vinden dan voor de zin van de spanning een kruisje terug. De inductiespanning  $E_r$  in de geleider is maximaal omdat de bewegingszin loodrecht op het magnetisch veld staat.



Door de faseverschuiving  $\varphi_r$  zal de rotorstroom  $I_r$  pas maximaal en in dezelfde zin zijn, als de statorflux  $\Phi_s$  over deze hoek verder gedraaid is ten opzichte van de rotor. De lorentzkracht  $F_1$  op de rotorleider bepalen we met de regel van de linkerhand: hiertoe moet de kracht loodrecht getekend worden ten opzichte van de statorflux  $\Phi_s$  die over een hoek  $\varphi_r$  is verder gedraaid. De grootte van de lorentzkracht wordt bepaald met de uitdrukking:

$$F_1 = B \cdot I_r \cdot l \quad (1) \quad \text{waarin: } B = \frac{\phi_s}{A} \quad (2)$$

Ontbinden we nu de kracht  $F_1$  in een radiale component  $F_r$  en een tangentiale component  $F_t$ , waarvoor de groottes kunnen berekend worden met behulp van de krachtendriehoek:

$$F_r = F_1 \cdot \sin \varphi_r \quad \text{en} \quad F_t = F_1 \cdot \cos \varphi_r \quad (3)$$

De radiale component  $F_r$  loopt door het draaipunt van de rotor en levert geen werkend moment op. De tangentiale component  $F_t$  daarentegen is raaklijng en heeft een arm die gelijk is aan de straal van de rotor, zodat deze kracht een moment oplevert met als uitdrukking:

$$M_1 = F_t \cdot r \quad (4)$$

Het globaal draaikoppel  $T$  door de rotor ontwikkeld vinden we door het moment van één Lorentzkracht te vermenigvuldigen met het aantal werkzame geleiders aanwezig in de rotor:

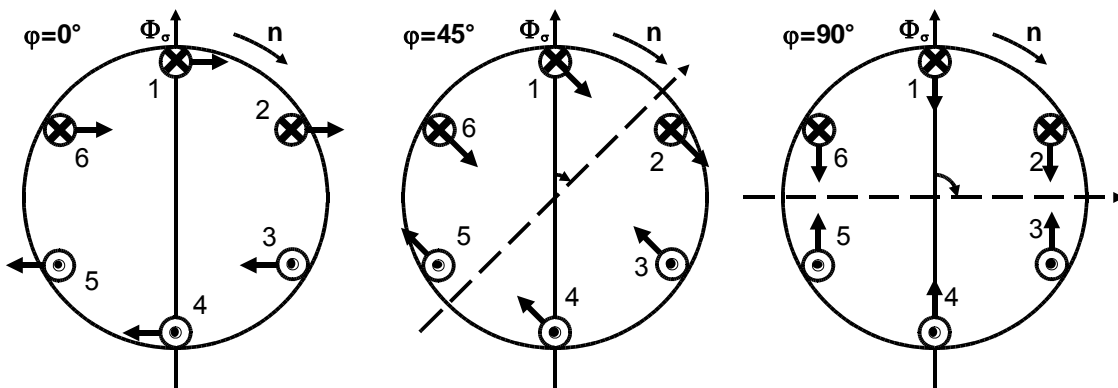
$$T = z \cdot M_1 \quad (5)$$

Door substitutie van de verschillende uitdrukkingen 1 tot en met 5 wordt het draaikoppel van de asynchrone motor gegeven door de uitdrukking:

$$T = k \cdot \Phi_s \cdot I_r \cdot \cos \varphi_r$$

### 1.8.2 Invloed van de arbeidsfactor op het koppel

In de volgende figuren zijn de rotors voorgesteld met een zestal rotorstaven. De optredende lorentzkrachten zijn getekend ingeval de faseverschuivingen  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  en  $90^\circ$  bedragen.



- Als de faseverschuiving  $0^\circ$  bedraagt dan leveren de geleiders krachten op die allemaal een positief koppel opleveren in de draaizin van de statorflux. Dit levert een maximaal koppel op, terwijl eveneens de arbeidsfactor van de rotorketen 1 is.

- Is daarentegen de faseverschuiving  $90^\circ$ , dan leveren de rotorgeleiders krachten op zodanig dat de positief werkende koppels volledig worden opgeheven door de negatief werkende koppels. Het resulterend koppel is bijgevolg nul, alsook de arbeidsfactor van de rotorketen.

- Bij een faseverschuiving van  $45^\circ$ , zijn er minder tegenwerkende momenten en meer die meewerkend zijn, zodat het draaikoppel iets meer dan 70% bedraagt van het maximum koppel dat normaal bij een faseverschuiving van  $0^\circ$  wordt gevormd. Dit getal wordt eveneens gevonden door de arbeidsfactor van de rotorketen te berekenen, namelijk  $\cos 45^\circ = 0,707$ . Uit de impedantiedriehoek is de arbeidsfactor:

$$\cos \varphi_r = \frac{R_r}{Z_r} \quad (6)$$

**Een toenemende arbeidsfactor in de rotor van de asynchrone motor, dus een afnemende faseverschuiving  $\varphi_r$ , heeft een positieve invloed op de grootte van het koppel door de rotor geproduceerd.**

### 1.8.3 Invloed van de rotorstroom op het koppel.

De rotorstromen bepalen eveneens de grootte van de lorentzkrachten. Zelf is de rotorstroom  $I_r$  afhankelijk van de inductiespanning  $E_r$  en de impedantie  $Z_r$  van de rotor:

$$I_r = \frac{E_r}{Z_r} \quad (7)$$

**Een afnemende rotorstroom is dus nadelig voor de productie van het koppel van de asynchrone motor.**

### 1.8.4 Het koppel van een asynchrone motor in functie van de slip.

Substitueren we uitdrukkingen 6 en 7 in de formule van het koppel en voeren we de slipwaarde  $s$  in de uitdrukking in, dan kunnen we volgende afleiding maken:

$$\Rightarrow T = k \cdot \Phi_s \cdot I_r \cdot \cos \varphi_r = k \cdot \Phi_s \cdot \frac{E_r}{Z_r} \cdot \frac{R_r}{Z_r} = k \cdot \Phi_s \cdot \frac{s \cdot E_{rst} \cdot R_r}{Z_r^2}$$

$$\Leftrightarrow T = k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} \cdot \frac{s \cdot R_r}{R_r^2 + X_{Lr}^2} = k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} \cdot \frac{s \cdot R_r}{R_r^2 + (s \cdot X_{Lrst})^2}$$

Door teller en noemer te delen door  $s^2$  bekomen we de uiteindelijke formule:

$$T = k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} \cdot \frac{\frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{Lrst}^2}$$

Veronderstellen we een motor met de volgende gegevens:

rotorweerstand	$R_r$	4	$\Omega$	bij 50Hz
rotorinductantie bij stilstand	$X_{Lrst}$	16	$\Omega$	
rotorspanning bij stilstand	$E_{rst}$	96	V	
synchroon toerental	$n_s$	3000	tr/min	

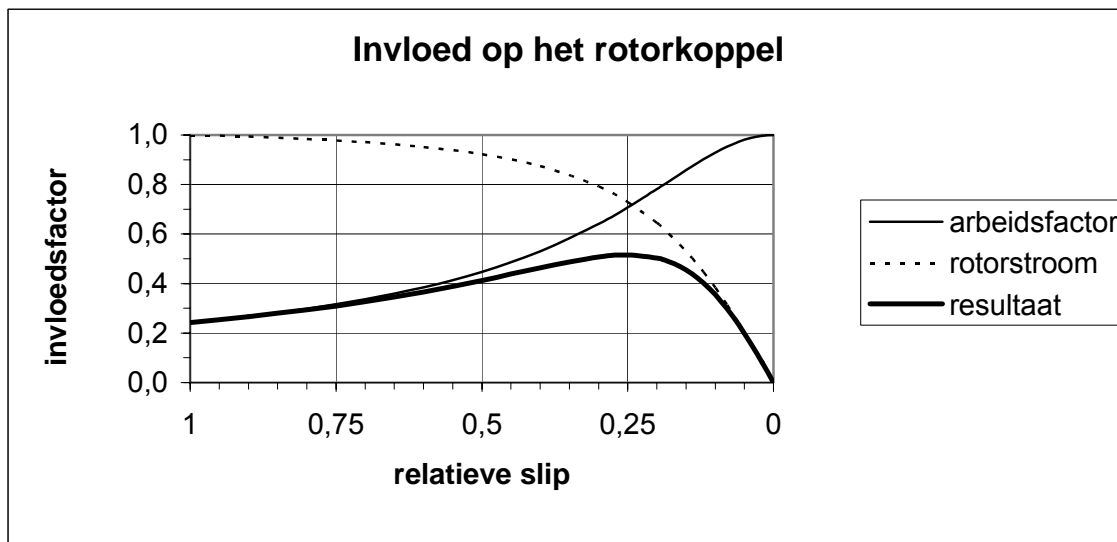
De berekeningen van de elektrische grootheden die van toepassing zijn op de rotor, worden uitgevoerd in functie van de slip  $s$  vanaf stilstand ( $s=1$ ) tot het synchroon toerental ( $s=0$ ). Slechts enkele slipwaarden worden uitgerekend om een beeld te bekomen hoe de verschillende grootheden veranderen in functie van de slip.

(Voor  $k$ , zowel als voor  $\Phi_s$  wordt de eenheid gekozen).

		stilstand			kip		vollast
relatieve slip	s	1	0,75	0,5	0,25	0,043	0
rotorsnelheid (tr/min)	$n_r$	0	750	1500	2250	2871	3000
frequentie (Hz)	$f_r$	50	37,5	25	12,5	2,15	0
rotorinductantie (ohm)	$X_{Lr}$	16	12	8	4	0,69	0
rotorimpedantie(ohm)	$Z_r$	16,5	12,6	8,9	5,7	4,1	4
faseverschuiving (°)	$\varphi_r$	76	72	63	45	9,8	0
rotorspanning (V)	$E_r$	96	72	48	24	4,1	0
rotorstroom (A)	$I_r$	5,8	5,7	5,4	4,2	1,02	0
invloed arbeidsfactor	$k_1 = \cos\varphi_r$	0,24	0,32	0,45	0,71	0,99	1
invloed van rotorstroom	$k_2 = I_r/I_{rst}$	1	0,98	0,92	0,73	0,17	0
resulterende invloed	$k_1, k_2$	0,24	0,31	0,41	0,52	0,17	0
relatief koppel	$T/T_{nom}$	1,41	1,80	2,40	3	1	0

### 1.8.5 Koppel bij stilstand

Bij een slipwaarde  $s=1$  (stilstand) is de rotorfrequentie  $f_r$  50 Hz (en dus maximaal). Daardoor is de rotorinductantie  $X_{Lr}$  maximaal en de faseverschuiving  $\varphi_r$  relatief groot. De rotor keten bezit een lage arbeidsfactor. Er wordt een **zwak aanzetkoppel** ontwikkeld, ondanks het feit dat bij stilstand grote rotorstromen vloeien, vele malen groter dan normaal.



### 1.8.6 Koppel tijdens de aanloop

Enerzijds zal naarmate de rotor aanloopt, de faseverschuiving  $\varphi_r$  afnemen, zodat de arbeidsfactor van de rotorketen zal toenemen en waardoor het koppel bij de aanloop zal vergroten. Anderzijds zal bij toenemende rotorsnelheid de inductiespanning  $E_r$  in de rotorketen afnemen, waardoor de rotorstromen  $I_r$  eveneens zullen dalen. Door de dalende rotorstroom zal het koppel bij de aanloop eveneens afnemen.

Beide verschijnselen - toenemende arbeidsfactor en afnemende rotorstroom - hebben duidelijk op het aanloopkoppel een tegengestelde invloed. De volgende figuur geeft een beeld weer van deze invloeden.

Zo zal bij de aanloop vanuit stilstand de toenemende arbeidsfactor meer invloed uitoefenen dan de dalende rotorstroom, zodat resulterend het koppel zal toenemen.

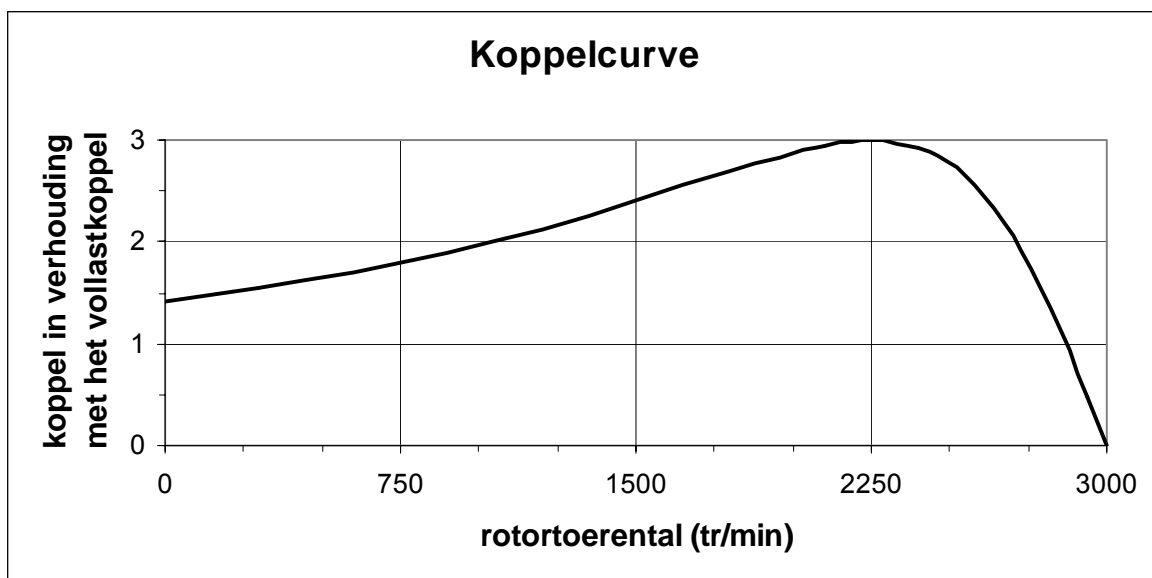
Bij een bepaalde snelheid zal het kippunt bereikt worden, waar beide invloeden zich even sterk laten voelen. Het koppel in dit kippunt is maximaal.

Voor snelheden voorbij het kippunt is de invloed van de toenemende arbeidsfactor van minder invloed dan de dalende rotorstroom, zodat het aanloopkoppel zal afnemen.

Tenslotte zal bij synchrone snelheid het koppel nul geworden zijn omdat er nu geen inductiestromen meer voorkomen in de rotorketen.

### 1.8.7 De koppelsnelheidskarakteristiek

De aanloopcurve van een inductiemotor bezit dus een typische vorm, zoals in de volgende grafiek wordt afgebeeld.



De koppelcurve vertoont enkele bijzondere punten:

#### Het nominaal koppel $T_{nom}$

De nominale waarden van een motor zijn deze waarden waarvoor de motor ontworpen is. De waarden komen voor op het kenplaatje van de motor. Het nominaal koppel  $T_{nom}$  is dus het koppel bij vollast. Het vollastkoppel wordt in de grafiek weergegeven door de horizontale 1-lijn. Het snijpunt van deze lijn met de koppelcurve is het vollastpunt. De rotorsnelheid ligt daar duidelijk beneden het synchroon toerental.

#### Het aanzetkoppel $T_a$

Het aanzetkoppel  $T_a$  is het koppel dat de motor levert als de rotor nog stilstaat. Dit koppel moet groter zijn dan het nominaal koppel  $T_{nom}$ , om de motor onder vollast te laten aanlopen. Het overschot aan koppel noemt men het versnellingskoppel en is het verschil tussen geleverd koppel van de motor en lastkoppel van de aangesloten belasting. Het versnellingskoppel wordt aangewend om de rotor te versnellen, dus op snelheid te brengen. De aanlooperperiode van de motor is des te kleiner, naarmate dit koppel groter is.

#### Het maximum koppel $T_m$

Tijdens de aanloop vanuit stilstand verkrijgt de motor bij een bepaalde snelheid een maximum koppel  $T_m$ . De aanloopcurve vertoont bij dat toerental een kippunt. De slipwaarde die bij dit punt behoort noemen we de kipslip  $s_k$  en het maximaal koppel wordt ook wel eens aangeduid met kippkoppel  $T_k$ .

De slip waarbij het koppel maximum is vinden we door de afgeleide functie van de uitdrukking van het koppel naar  $(R_r/s)$  gelijk te stellen aan nul:

$$\Rightarrow \left[ \left( \frac{R_r}{s} \right)^2 + X_{Lrst}^2 \right] \cdot D \left( \frac{R_r}{s} \right) - \left( \frac{R_r}{s} \right) \cdot D \left[ \left( \frac{R_r}{s} \right)^2 + X_{Lrst}^2 \right] = 0$$

$$\Leftrightarrow \left[ \left( \frac{R_r}{s} \right)^2 + X_{Lrst}^2 \right] \cdot 1 - \left( \frac{R_r}{s} \right) \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{R_r}{s} \right) + 0 \right] = 0$$

$$\Leftrightarrow \left[ \left( \frac{R_r}{s} \right)^2 + X_{Lrst}^2 \right] - 2 \cdot \left( \frac{R_r}{s} \right)^2 = 0$$

$$\Leftrightarrow X_{Lrst}^2 = \left( \frac{R_r}{s} \right)^2 \quad \Leftrightarrow X_{Lrst} = \frac{R_r}{s}$$

De kipslip  $s_k$  heeft bijgevolg als uitdrukking:

$$s_k = \frac{R_r}{X_{Lrst}}$$

Uit de impedantiedriehoek vinden we voor de tangens van de faseverschuiving  $\varphi_k$ :

$$\Rightarrow \operatorname{tg}\varphi_k = \frac{X_{Lr}}{R_r} = \frac{s_k \cdot X_{Lrst}}{R_r} = 1 \quad \Rightarrow \boxed{\varphi_k = 45^\circ}$$

Door de voorlaatste uitdrukking in te vullen in de uitdrukking van het koppel, vinden we de grootte van het maximum koppel of kippkoppel:

$$\Rightarrow T = k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} \cdot \frac{\frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{Lrst}^2}$$

$$\Leftrightarrow T_k = k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} \cdot \frac{X_{Lrst}}{X_{Lrst}^2 + X_{Lrst}^2} = k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} \cdot \frac{1}{2 \cdot X_{Lrst}}$$

$$\boxed{T_k = \frac{k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst}}{2 \cdot X_{Lrst}}}$$

**Voor het kippunt kunnen volgende regels opgesteld worden:**

- De faseverschuiving  $\varphi_k$  voor het maximum koppel bedraagt altijd  $45^\circ$ .
- Het maximum koppel  $T_k$  is onafhankelijk van de rotorweerstand  $R_r$ , zodat weerstanden kunnen bijgeschakeld worden zonder het maximum koppel te beïnvloeden.
- De slip  $s_k$  waarbij het maximum koppel  $T_k$  kan bekomen worden, kan verplaatst worden naar links door weerstanden bij te schakelen. Het kippunt kan dus verplaatst worden naar stilstand.

**Deze eigenschappen worden toegepast bij:**

- Asynchrone motoren met bewikkelde rotor, waar via sleepringen en borstels weerstanden in de rotorketen kunnen toegevoegd worden.

Asynchrone motoren met dubbelkooirotor, waarbij de startkooi het maximum koppel ontwikkeld bij stilstand en de bedrijfskooi het koppel levert als de motor op toeren is gekomen.

Asynchrone motoren met stroomverdringing, waarbij door verandering van de rotorfrequentie tijdens de aanloop automatisch invloed wordt uitgeoefend op zowel rotorweerstand als rotorinductantie.

## 1.8.8 Motorkarakteristieken in de praktijk.

### 1.8.8.1 Werkpunt.

Bij de keuze van een motor dien je onder andere rekening te houden met de aard en de grootte van de belasting. Indien je koppel-rotatiefrequentiekarakteristiek van de aan te drijven machine projecteert op die van de aandrijvende motor, dan moet het werkpunt  $p$ , dit is het snijpunt van beide curven, zo kort mogelijk bij het punt  $c$  (nominaal koppel en nominale snelheid van de motor) gelegen zijn en het punt  $p$  moet onder het punt  $c$  gelegen zijn.

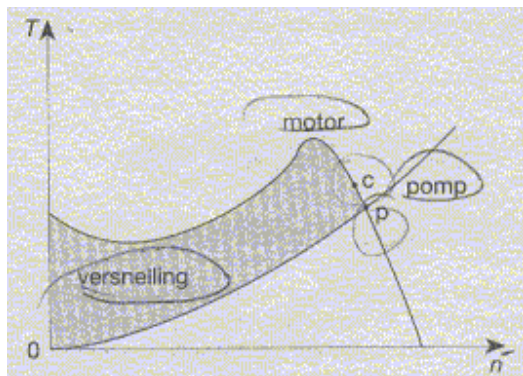


Fig. belastingslijn van een centrifugaalpompe.

Bovendien moet het gedeelte van de belastingscurve dat voor het werkpunt  $p$  gelegen is, steeds onder de motorcurve gelegen zijn. Is dit niet het geval dan zal er op die momenten geen versnelling meer zijn, waardoor de stationaire toestand bekomen wordt bij een te lage snelheid in het niet-stabiele gebied. Omdat de motor kan versnellen moet het motor koppel groter zijn dan het belastingskoppel. Het verschil tussen beide curven is een maat voor het versnellingskoppel.

Bij een aantal toepassingen is het losbreek koppel veel groter dan het koppel bij nominale snelheid. Wanneer het start koppel van de motor kleiner is dan het losbreek koppel zal de motor niet starten.

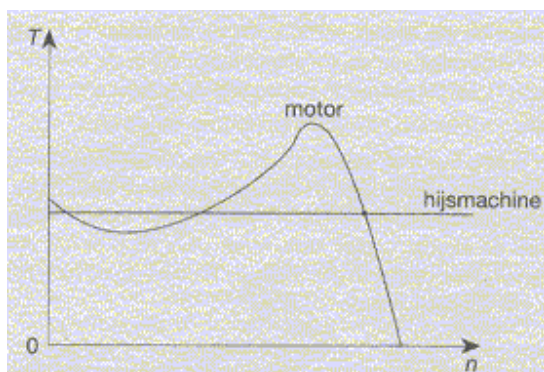


Fig. belastingslijn van een hijsmachine.

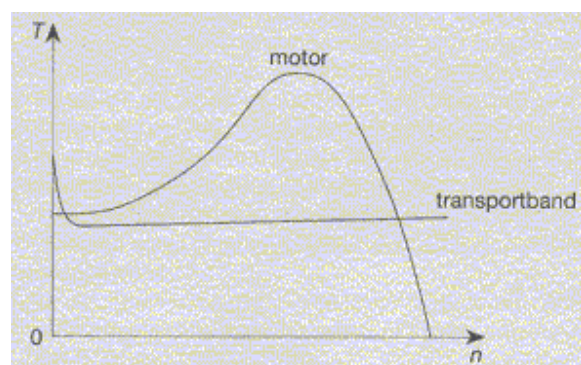


Fig. belastingslijn van een transportband.



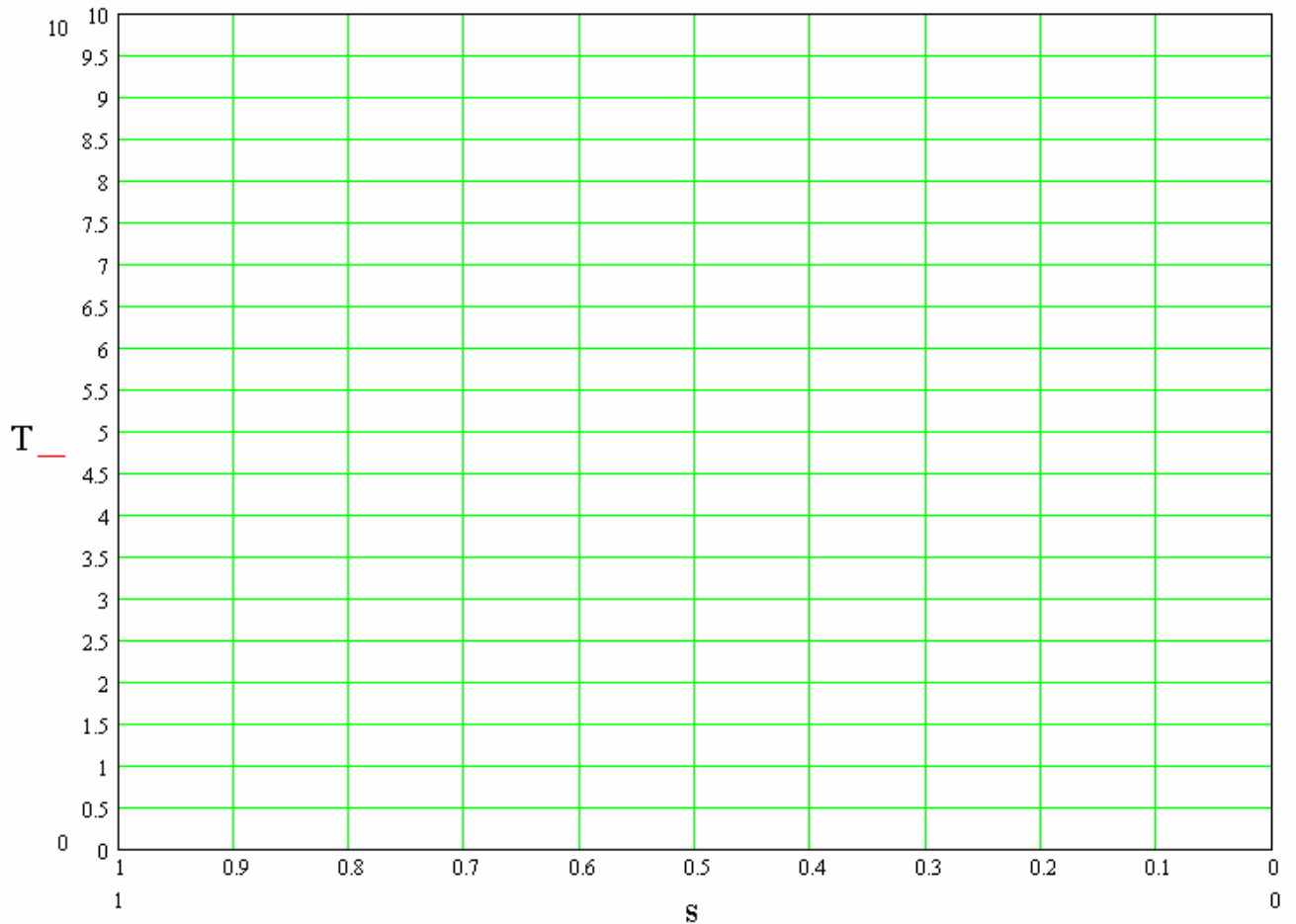
Naam:

We gaan de koppelkarakteristiek van onze motor simuleren met volgende functie ( $T=f(s)$ ).

$$\Rightarrow T = k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} \cdot \frac{\frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{Lrst}^2} \quad \text{met} \quad \begin{aligned} k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} &= 96 \text{ (V}^2\text{s)} \\ R_r &= 4\Omega \\ X_{Lrst} &= 16\Omega \end{aligned}$$

Deze functie stelt een ASM motor in ster voor. Als we hem in driehoek schakelen kunnen we dit simuleren door de volgende parameters met drie te vermenigvuldigen  $k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} = 96 \text{ (V}^2\text{s)}$ .

Teken de koppelkarakteristiek in ster en driehoek over op het volgende rooster.



We gaan nu een belasting aanleggen aan onze voorgaande motor (zie vorige pagina).  
 Het koppel van een centrifugaalpompe kunnen we als volgt beschrijven.

$$\left\{ \begin{array}{l} T = k_{pomp} \cdot \omega^2 \\ k_{pomp} = 0.00001 \\ \omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \end{array} \right\} \Rightarrow T = 0.00001 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \right)^2$$

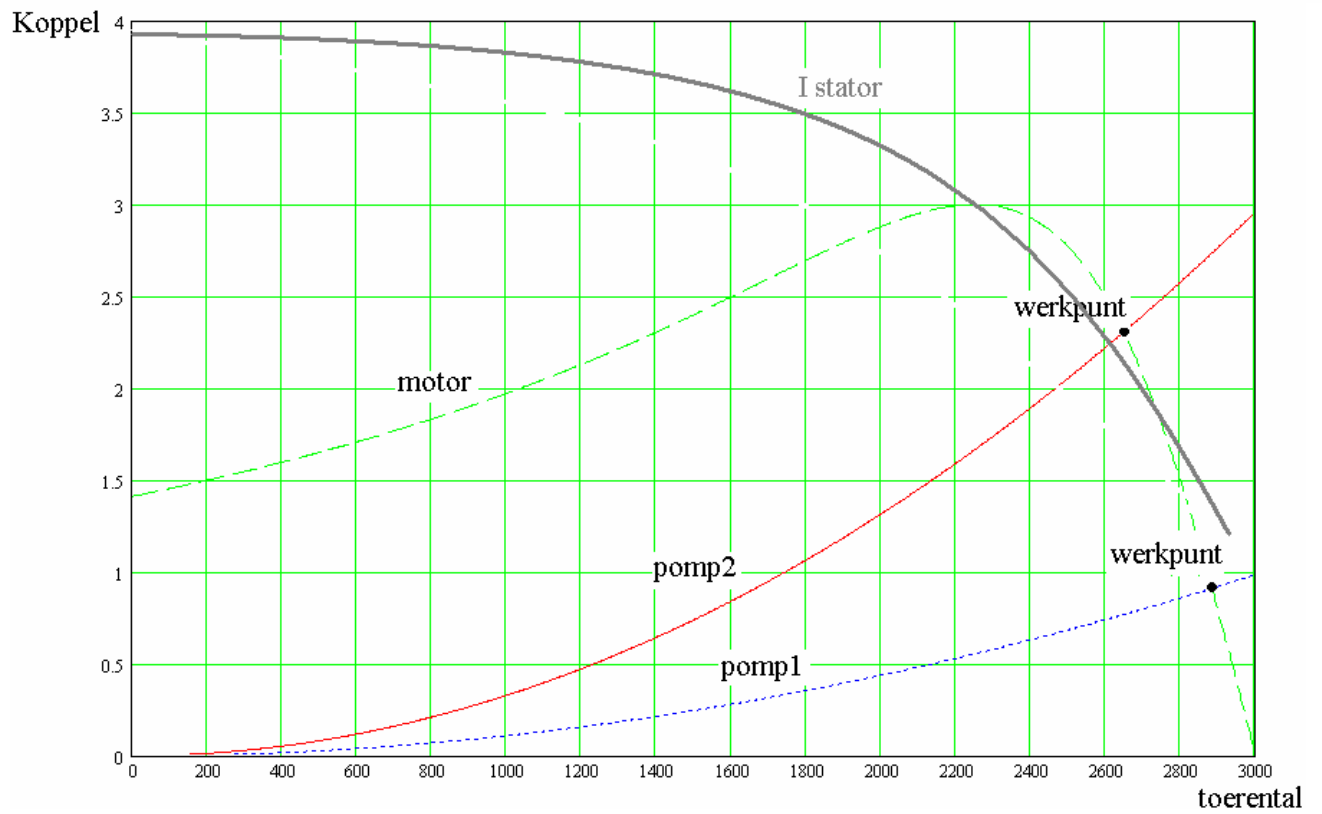
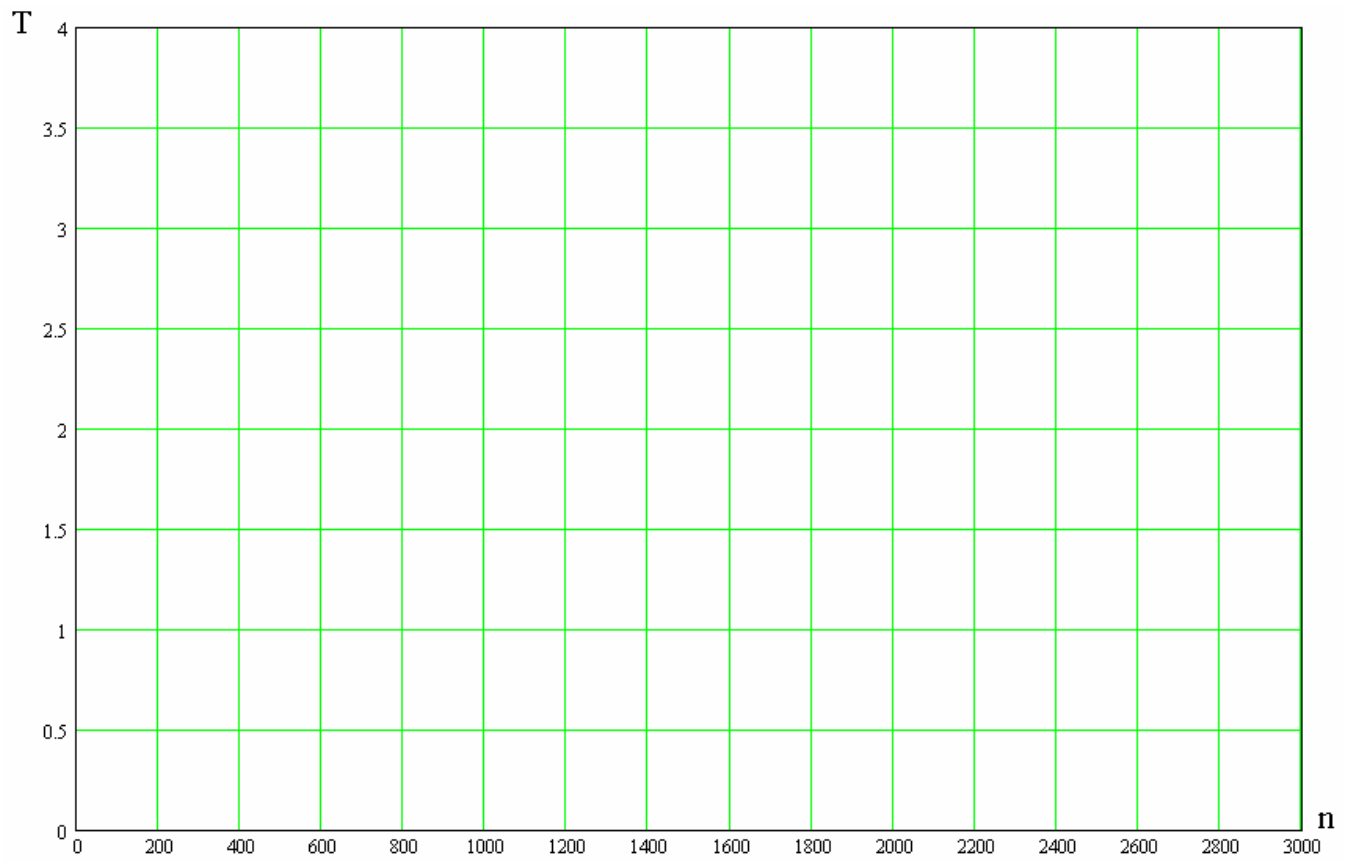
Om de twee grafieken over elkaar te tekenen gaan we de slip van de motor uit drukken in functie van het toerental. We weten dat :

$$\left\{ \begin{array}{l} T = k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} \cdot \frac{\frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{Lrst}^2} \\ s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \\ n_s = 3000 \text{ omw/min} \end{array} \right\} \Rightarrow T = k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} \cdot \frac{\frac{R_r}{3000 - n_r}}{\left(\frac{R_r}{3000 - n_r}\right)^2 + X_{Lrst}^2}$$

Teken nu de koppelkarakteristiek van de motor in ster en de koppelkarakteristiek van de pomp.  
 Bepaal het werkpunt van de pomp.  $T_{\text{werkpunt}} = \dots\dots\dots$  en  $n_{\text{werkpunt}} = \dots\dots\dots$   
 Mag je deze motor gebruiken voor deze pomp.  
 Leg uit.

Stel de vloeistof in de pomp wordt dikker. De constante van de pomp wordt  $k_{pomp} = 0.00003$ .  
 Teken de koppelkarakteristiek van deze pomp opnieuw.  
 Bepaal het werkpunt van de pomp.  $T_{\text{werkpunt}} = \dots\dots\dots$  en  $n_{\text{werkpunt}} = \dots\dots\dots$   
 Mag je deze motor gebruiken voor deze pomp.  
 Leg uit.





Naam:

### 1.8.9 Opdracht koppelkarakteristiek

Het koppel van een motor wordt beschreven door volgende functie:

$$\Rightarrow T = k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} \cdot \frac{\frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{Lrst}^2} \quad \text{met} \quad \begin{aligned} k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} &= 96 \text{ (V}^2\text{s)} \\ R_r &= 4\Omega \\ X_{Lrst} &= 16\Omega \end{aligned}$$

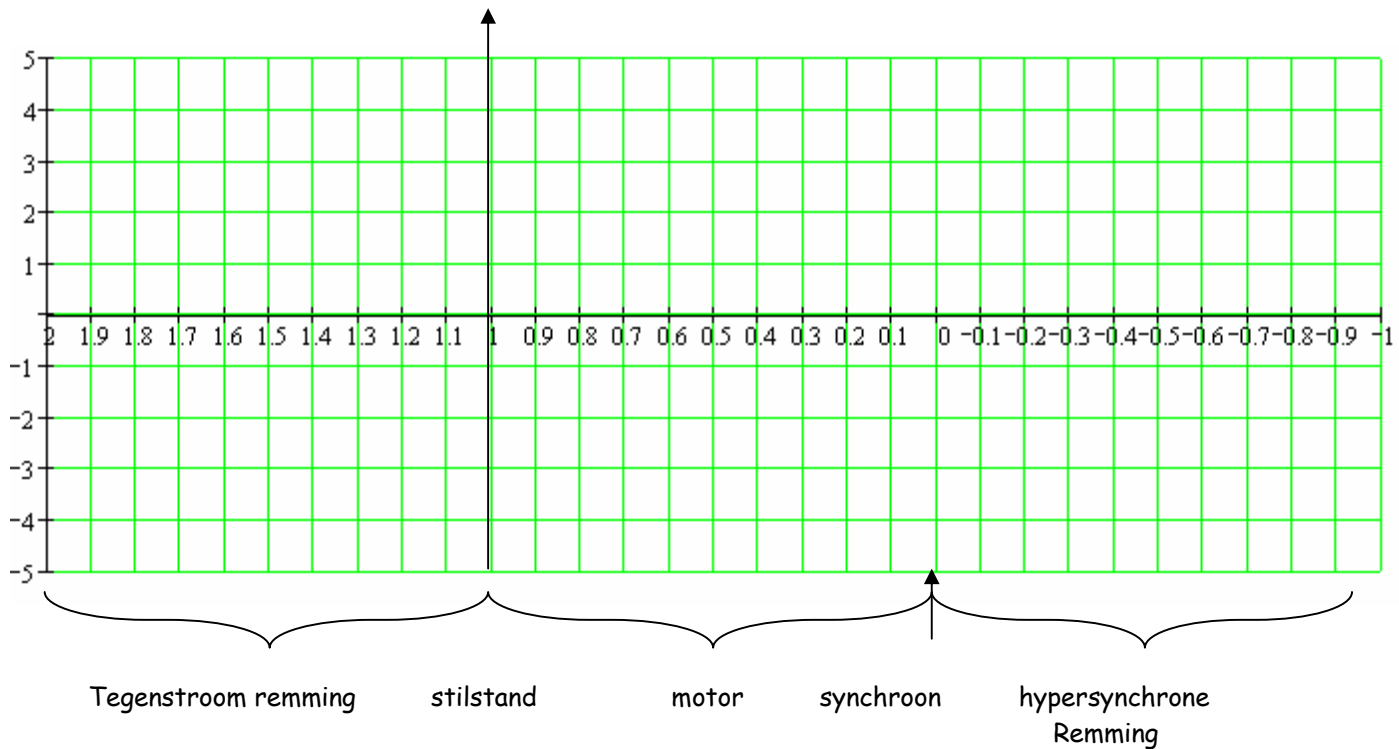
- 1) Teken de grafiek van deze motor voor een slip van 2 tot -1 en bereken  $s_k$  en  $T_k$ .
- 2) Teken de grafiek van deze motor voor een slip van 2 tot -1 als  $R_r = 8\Omega$  en bereken  $s_k$  en  $T_k$ .
- 3) Bepaal  $R_r = \dots\dots\Omega$  zodat het koppel maximaal is bij  $s=1$  en bereken  $T_k$ .  
Teken de grafiek van deze motor voor een slip van 2 tot -1.
- 4) Teken de grafiek van deze motor opnieuw wanneer  $k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst}$  3 maal groter is en  $R_r = 4\Omega$ .

$R_r = 4\Omega$ $s_k = \dots\dots\dots$ $T_k = \dots\dots\dots$			$R_r = 8\Omega$ $s_k = \dots\dots\dots$ $T_k = \dots\dots\dots$		$R_r = \dots\dots\dots\Omega$ $s_k = \dots\dots\dots$ $T_k = \dots\dots\dots$		$k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} = 3 \cdot 96 \text{ (V}^2\text{s)}$ $R_r = 4\Omega$ $X_{Lrst} = 16\Omega$
s	$\frac{R_r}{s}$	T	$\frac{R_r}{s}$	T	$\frac{R_r}{s}$	T	T
-1							Enkel voor s (0 tot 1)
-0.8							
-0.6							
-0.4							
-0.2							
0							
0.1							
0.2							
0.3							
0.4							
0.5							Enkel voor s (0 tot 1)
0.6							
0.7							
0.8							
0.9							
1							
1.2							
1.4							
1.6							
1.8							
2							



Naam:

Teken de vier grafieken in een verschillende kleuren.

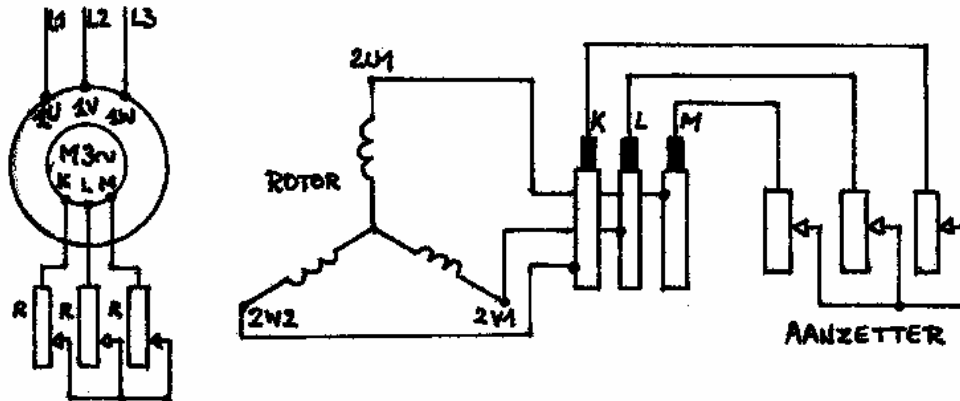


1.8.10 Opdracht koppelkarakteristiek wals

1.8.11 Opdracht koppelkarakteristiek zuigerpomp of lift

## 1.9 Sleepringkermotoren

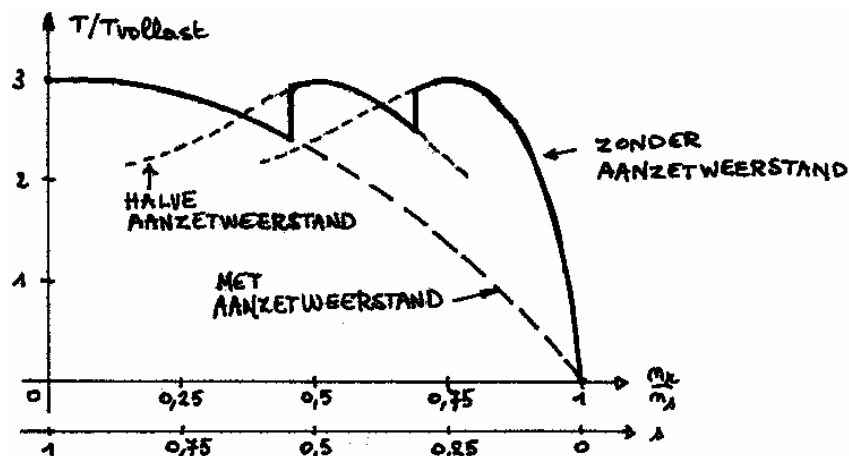
Deze motoren bezitten een bewikkelde rotor. De driefazige rotorwikkeling met evenveel polen als de statorwikkeling is in ster geschakeld en de uiteinden verbonden met sleepringen, geplaatst op de rotoras. Op de sleepringen wrijven koolborstels, waarlangs de rotorwikkeling aangesloten wordt op een driefazige regelbare weerstand, die gebruikt wordt als aanzetter.



Door deze aanzetter kan de koppel-snelheid-karakteristiek ingrijpend gewijzigd worden. Immers uit de formule (...) blijkt dat door toepassing van externe rotorweerstand de slip (of rotorsnelheid) waarbij het maximum koppel  $T_m$  optreedt kan gewijzigd worden, zonder dat de bijgeschakelde weerstand de waarde van dat maximum verandert. Men kan zelfs bij stilstand ( $s_k = 1$ ) deze maximum waarde verkrijgen. De benodigde aanzetweerstand kan dan berekend worden uit de formule (...):

$$1 = \frac{R_r + R_{az}}{X_{Lrst}} \Rightarrow R_{az} = X_{Lrst} - R_r$$

Door nu gedurende de aanloop, de weerstand in trappen uit te schakelen, kan men overgaan op andere koppelcurven en bereikt men tijdens de aanloop een hoog koppel. De aanloopstroom blijft dan praktisch constant gedurende de ganse aanloop.

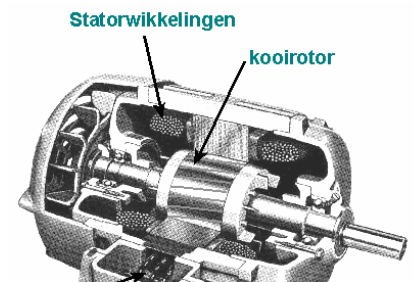


De sleepringankermotor wordt vooral gebruikt bij grote vermogens, waar grote eisen gesteld wordt aan de aandrijving: zachte aanloop, aanloopstroombeperving, hoog aanloopkoppel. (vb. Torenkranen). De sleepringankermotor wordt vaak voorzien van een inrichting, die na de aanzetperiode de borstels opheft van de sleepringen en de sleepringen kortsluit.

Sleepringen en borstels worden overbodig als de aanzetter zich bevindt op de rotor, waar hij tijdens de aanloop uitgeschakeld wordt door een centrifugaalschakelaar. De bediening wordt eenvoudiger, maar de motor mag niet gebruikt worden in toepassingen met veelvuldige aanloop of waar overbelasting kan optreden.

### 1.10 Kortsluitankermotoren

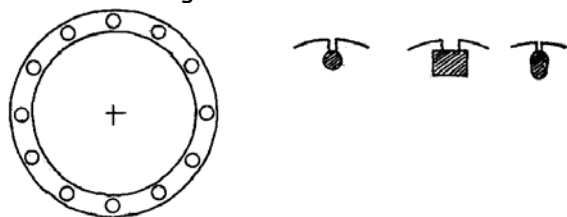
Kortsluitankermotoren worden uitgevoerd als kooirotor en worden slechts voor beperkte vermogens toegepast. De kooirotor bestaat in verschillende uitvoeringsvormen, waarbij de constructie veel eenvoudiger is dan de bewikkelde rotor.



#### 1.10.1 Enkelkooirotor

De rotor bestaat uit een gelamelleerde cilindervormige Si-stalen kern, aan de omtrek voorzien van gleuven. In de gleuven worden ongeïsoleerde staven aangebracht van koper, aluminium, messing of brons, die aan beide uiteinden met elkaar verbonden zijn door kortsluitringen.

Bij kleine motoren wordt de kooi in zijn geheel aangebracht door spuitgieten of centrifugaalgieten van aluminium. De rotorstaven worden uitgevoerd met verschillende vormen.



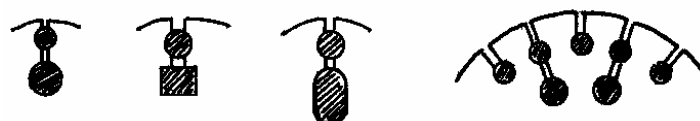
Een nadeel van de enkelkooirotor is dat de rotorweerstand niet van buitenaf kan gewijzigd worden, waardoor het aanzetkoppel klein is, terwijl de aanzetstroom toch zeer groot is.

Een voordeel van de kooirotor is dat het aantal polen van de rotor zich automatisch aanpast aan het aantal polen van de statorwikkeling.

De lamellen van de rotor worden schuin geplaatst hier door krijgen we geen pulserende aandrijving meer.

#### 1.10.2 Dubbelkooirotor

In de rotor worden twee concentrische kooien aangebracht, kortgesloten aan weerszijden met ringen. Men dimensioneert de rotorweerstand zo dat de buitenkooi een grotere weerstand bezit dan de binnenkooi. Dit bekomt men door voor de buitenkooi een materiaal toe te passen met een hogere resistiviteit dan voor de binnenkooi (mangaan-brons in plaats van koper) en/of de sectie van de buitenkooi kleiner uit te voeren dan die van de binnenkooi. Tussen beide kooien is een smalle luchtspleet aangebracht, zodat de inductantie van de binnenkooi groter is dan van de buitenkooi.

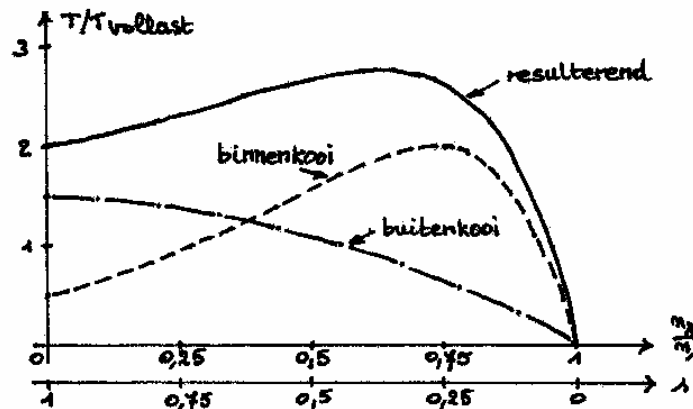


### De werking is als volgt:

- Bij de aanzet, als de rotor nog stilstaat, is de rotorfrequentie  $f_r$  gelijk aan de frequentie  $f$  van de toegepaste spanning. Omdat de reactantie  $X_{rst}$  van de binnenkooi groot is, zal de fazeverschuiving  $\beta_r$  ook groot zijn, zodat het ontwikkelde koppel van de binnenkooi klein is.

Door het feit dat de buitenkooi een kleine reactantie  $X_{rst}$  bezit, is de fazeverschuiving  $\beta_r$  niet groot, waardoor de buitenkooi een groot koppel ontwikkelt bij de aanzet.

De buitenkooi noemt men daarom de aanloopkooi.



- Na de aanloop, bij normale snelheid, spelen de reactanties  $X_r$  praktisch geen rol meer, omdat de rotorfrequentie  $f_r$  dan heel klein is.

Vermits de resistantie  $R_r$  van de binnenkooi veel kleiner is dan van de buitenkooi, zullen in de binnenkooi de grootste stromen vloeien, en bijgevolg praktisch het gehele koppel leveren.

De binnenkooi noemt men de bedrijfskooi.

Het resulterend koppel  $T$  van de kooiankerrotor is de som van de koppels van de aanloop- en bedrijfskooi.

De dubbelkooirotor levert dus een groter aanzetkoppel bij een kleinere aanzetstroom.

Door in te spelen op de vorm van de groef, soort materiaal van de kooi en de afmetingen, verkrijgt men een grote verscheidenheid aan koppel-snelheid-karakteristieken elk voor een specifieke toepassing, zoals voor intermitterend bedrijf, hoge overbelastbaarheid, hoog aanloopkoppel, ...

### 1.10.3 Stroomverdringingsrotor

De rotoren zijn uitgevoerd met diepe gleuven in de kern, voorzien van rechthoekige of trapeziumvormige rotorstaven.

Bij het aanzetten, is de reactantie  $X_{rst}$  beneden in de staven het grootst. De stroom wordt dus naar boven verdrongen, waardoor de stroomdichtheid in de rotorstaven groter is aan de omtrek dan beneden. Alzo verkleint de nuttig gebruikte sectie, waardoor de effectieve weerstand toeneemt.

Het koppel is dus groter. Bij normale snelheid werkt deze motor zoals een motor met enkelkooirotor





#### 1.10.4 Conische rotor of schuifankermotor.

De schuifankermotor is in zijn principiële functieopbouw een asynchroonmotor, waarvan de rotor en de statorboring geen cilindrische maar een conische vorm hebben. Door een axiaal werkende veer wordt de rotor in de rusttoestand in de richting van het wijde deel van de conus gedrukt, zodat de luchtspleet tussen stator en rotor groot is. De rotor is verder uitgevoerd met een remschijf, die in deze positie contact heeft met een wrijvingsvlak van het huis. Dit betekent dat de rem ingevallen is. Wordt de motor nu ingeschakeld, dan trekt het zich opbouwende magnetische veld de rotor in de conus. De rem licht en de motor loopt tegelijkertijd aan. Het hoofdkenmerk van een schuifankermotor is dus het activeren van de rem zonder een stuurcircuit. Afhankelijk van de toepassing kan dit voor- of nadelen bieden. Een voordeel is het vervallen van het externe remstuurcircuit en de gedwongen werking van de rem bij uitval van de motorklemspanning.

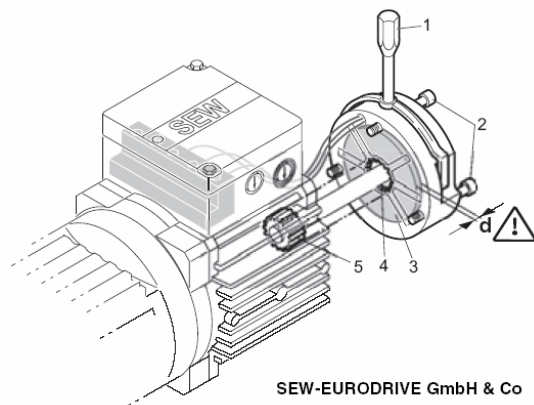


fig. gelijkstroombekrachtigde elektromagnetische platenrem

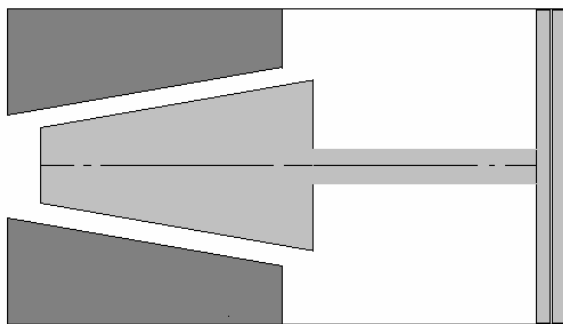


fig. schuifankermotor in rust

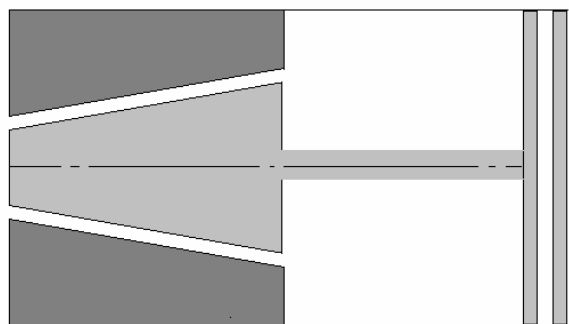
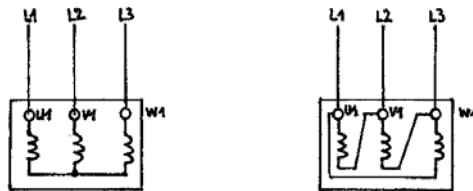


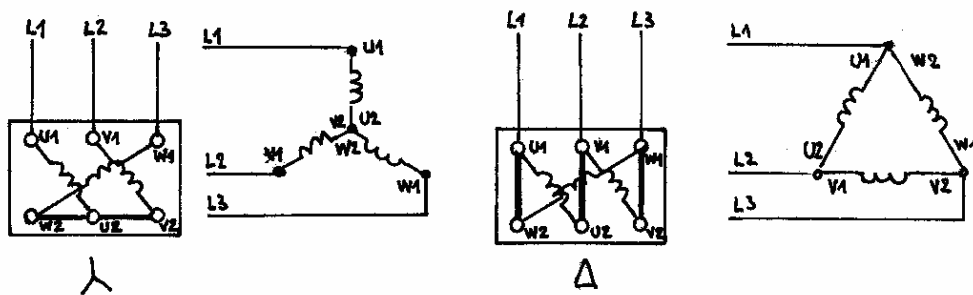
fig. schuifankermotor bekrachtigd

### 1.11 Statorwikkelingen

De statorwikkeling ontwikkelt het noodzakelijke draaiveld en wordt aangesloten op de klemmen van het klemmenbord. Voor motoren die enkel geschikt zijn voor één spanning is inwendig reeds de ster- of de driehoekschakeling van de statorwikkeling verwezenlijkt. Het kentypeplaatje vermeld dan de spanningswaarde en de schakelwijze.

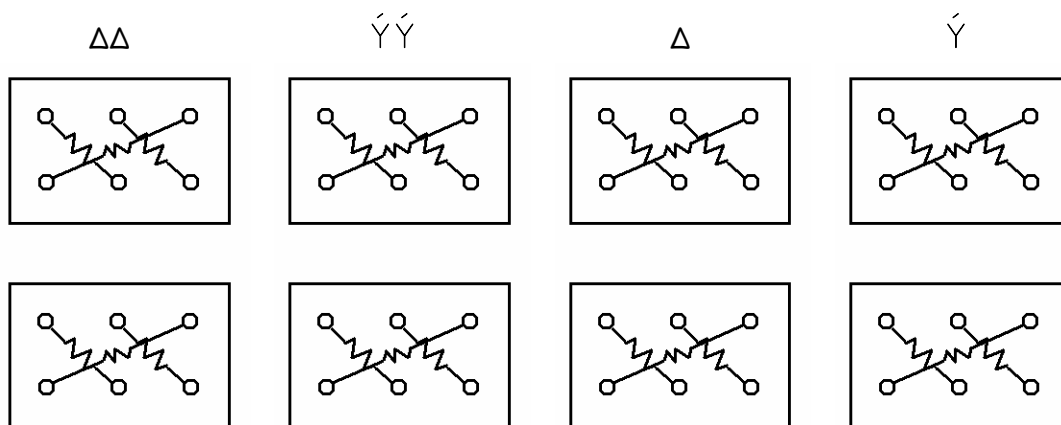


Het meest gebruikte type motor is deze geschikt voor twee netspanningen. De spoelen van de statorwikkeling moeten in dit geval uitwendig doorverbonden worden in ster voor de spanning  $\sqrt{3} \cdot U_{\text{fase motor}}$  en in driehoek voor de spanning  $U_{\text{fase motor}}$ .



Motoren die geschikt zijn voor meer dan 2 spanningen hebben een statorwikkeling bestaande uit 6 spoelen verdeeld over 2 klemmenborden. In dit geval kunnen de spoelen per 2 in serie of in parallel geschakeld worden, en kan de ster of driehoekschakeling toegepast worden:

- $U_{\text{fase motor}}$  voor dubbeldriehoek.
- $2 \cdot U_{\text{fase motor}}$  voor driehoek.
- $\sqrt{3} \cdot U_{\text{fase motor}}$  voor dubbelster.
- $2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{fase motor}}$  voor ster.



$\Delta\Delta$

$\acute{Y}\acute{Y}$

$\Delta$

$\acute{Y}$

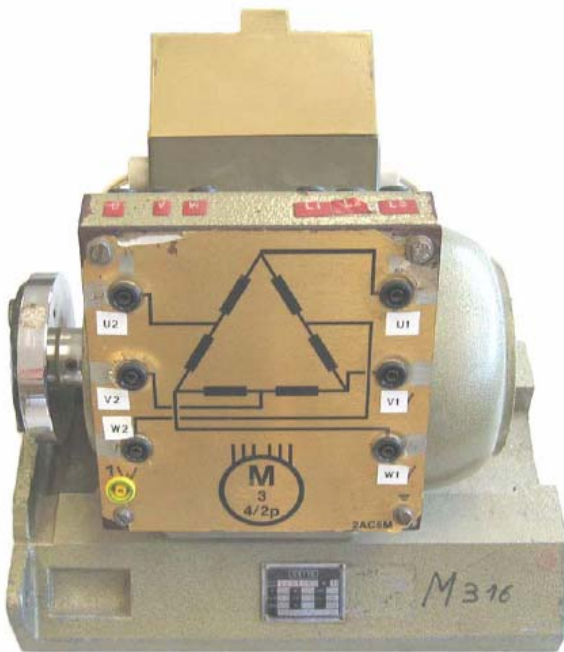
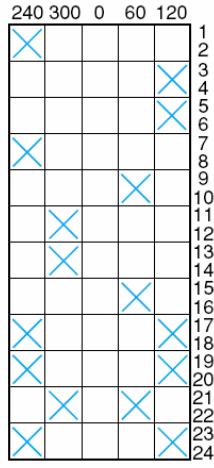
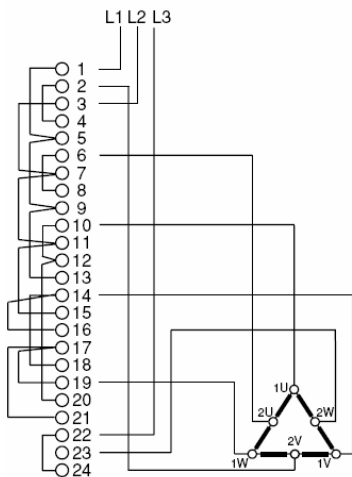


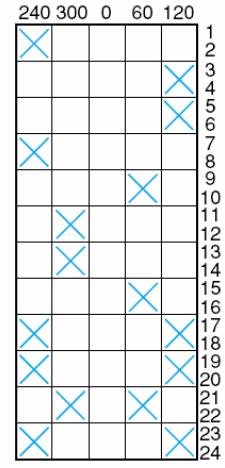
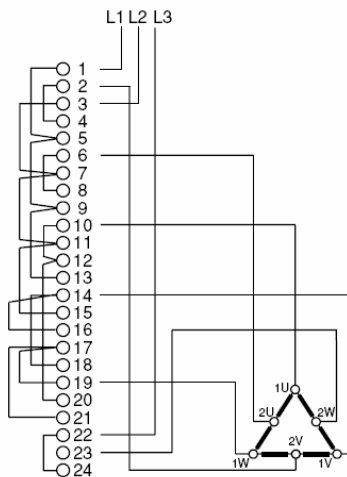
fig. Dahlander motor

Enkele voorbeelden van nokkenschakelaars waarin verschillende opstellingen worden gemaakt.  
 Kleur de schema's volgens de vier standen van de nokkenschakelaar

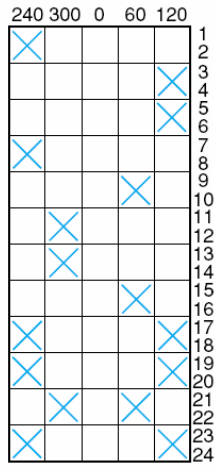
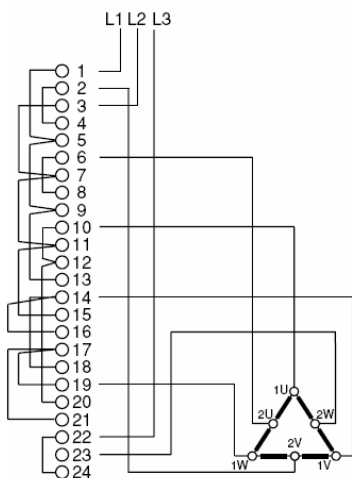
240



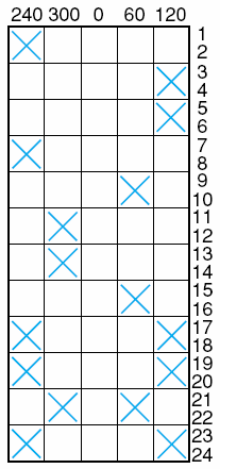
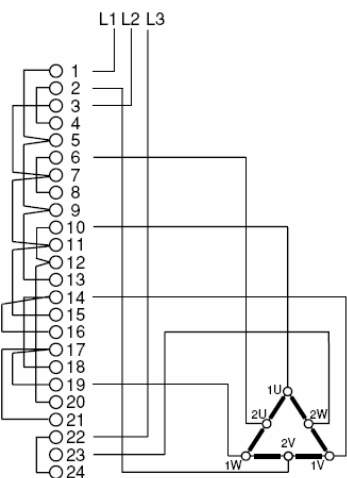
300



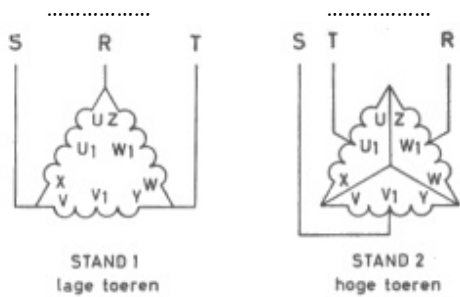
60



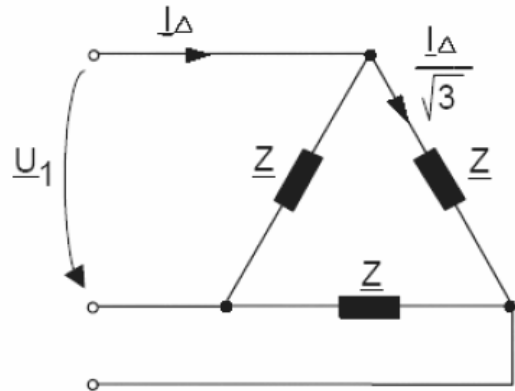
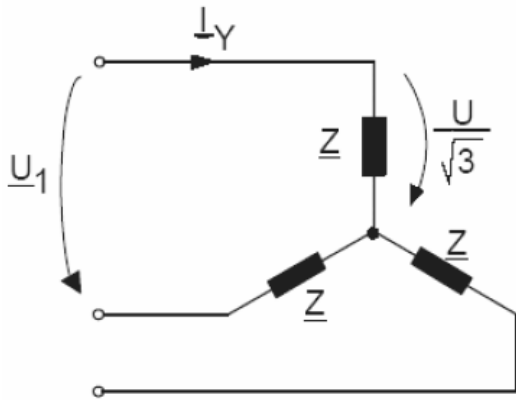
120



Welke stand komt overeen met onderstaande opstellingen.



**1.12 Stroom bij ster-driehoekschakeling.**



### 1.13 Aanzetten van asynchrone motoren

De aanzetstroom is steeds groter dan de nominale stroom bij vollast. De aanloopstroom veroorzaakt bij een lange aanlooptijd of bij een grote aanzetfrequentie een ontoelaatbare temperatuurstijging van de motorwikkelingen, terwijl de grote inschakelstroomstoot grote dynamische krachten teweegbrengt in de motor. Om beschadiging van de motor te voorkomen en een te grote spanningsdaling in het net te voorkomen moet de aanzetstroom beperkt worden. De maximum stroom  $I_{max}$  wordt bepaald door een verhoudingsfactor  $k$ :

$$I_{max} = k \cdot I_{nom}$$

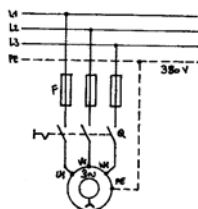
De verhoudingsfactor  $k$  wordt kleiner naarmate het nominaal vermogen groter wordt, en wordt gegeven in de volgende tabel:

Opgenomen nominaal vermogen in kW	$k = \frac{I_{max}}{I_{nom}}$
< 3	6
< 4	3
< 10	2
> 10	1.5

#### 1.13.1 Directe aanzet

Het direct aanzetten van driefazen asynchrone motoren wordt toegepast bij motoren met kortgesloten rotorwikkelingen en bij kooianker motoren. De aanzetstroom varieert van 2 tot 7 keer de nominale stroom en is afhankelijk van het motorvermogen en van het toerental van de motor. Het aanzetkoppel ligt tussen 1.4 en 2.4 keer het nominaal koppel.

Deze methode van aanzetten heeft wel enkele nadelen die het toepassingsgebied beperken:



- de grote aanloopstroom veroorzaakt een ontoelaatbare spanningsdaling in het voedend net;
- het grote aanloopkoppel geeft een bruske versnelling van de aangedreven machine.

Deze methode wordt dus enkel toegepast voor motoren met klein vermogen (< 1.5 kW). De driefazen statorwikkeling kan hierbij ofwel in ster ofwel in driehoek geschakeld worden, naargelang de netspanning en de maximum spanning van de motorspoelen.

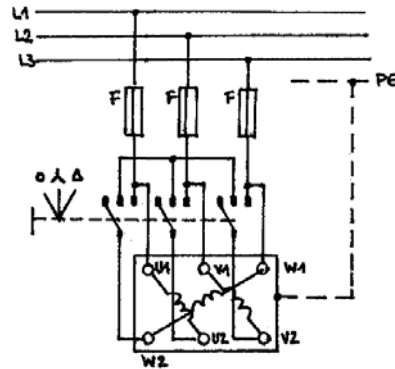
#### 1.13.2 Ster-driehoek-aanzet

Bij deze aanzetmethode wordt de statorwikkeling eerst in ster en na een bepaald tijdsinterval in driehoek aangesloten op het net. Het tijdsinterval is zo gekozen, dat de omschakeling enkel kan gebeuren als de motor op toeren is gekomen.

Deze methode kan alleen toegepast worden bij motoren die normaal in driehoek moeten werken, dit wil zeggen dat de spanningswaarden van de motor aangepast moeten zijn aan de netspanning.

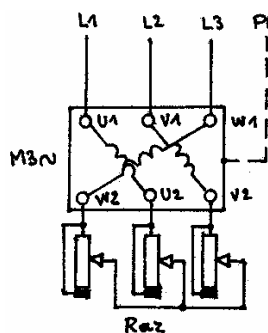
De aanzetstroom (alsook het vermogen en het aanzetkoppel) in ster zijn 3 maal kleiner dan bij rechtstreekse aanzet van deze motor in driehoek.

Voor het aanzetten maakt men gebruik van een ster-driehoek-schakelaar. Ster-driehoek-schakelaars kunnen gewoon uitgevoerd zijn, maar ook speciaal, zoals bijvoorbeeld met ingebouwde veiligheden of weerstanden die in tussenstanden de stroomstoten en overgangverschijnselen opvangen. In automatische schakelkasten gebeurt de omschakeling met behulp van contactoren of magneetschakelaars, die bediend worden met behulp van een hulprelaiskring of een programmeerbare logische controle-eenheid.



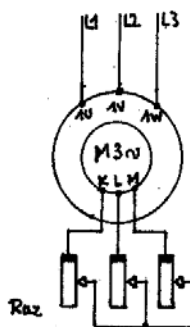
### 1.13.3 Aanzet met verlaagde spanning

Verlaging van de spanning op de statorwinding van een kooiankermotor die alleen in ster kan worden geschakeld, leidt ook tot evenredig lagere aanloopstromen tijdens de aanzet. Het aanloopkoppel daarentegen neemt kwadratisch af met de aangelegde spanning, waardoor de motor meestal onbelast moet worden aanzet. De statorwinding, die normaal in ster is geschakeld, wordt via aanzetweerstand op het net aangesloten. Tijdens de aanzetperiode worden de aanzetweerstand geleidelijk uitgeschakeld met behulp van een kruk- of walsschakelaar.



Door de vermogenverliezen die in de weerstanden optreden, tijdens de aanzetperiode, wordt het rendement ongunstig beïnvloed. Daarom worden ook wel driefazige aanzettransfo's gebruikt, die gewoonlijk als autotransfo zijn uitgevoerd.

### 1.13.4 Aanzet met rotorweerstand



Deze methode is alleen toepasselijk voor motoren met een bewikkelde rotor, dus sleepringmotoren. Met behulp van de aanzetweerstand in de rotor, kan men zowel een hoog aanzetkoppel bekomen, als de aanloopstroom beperken. Tijdens de aanzetperiode, worden de aanzetweerstand geleidelijk in trappen uitgeschakeld (kruk- of walsschakelaar).

### 1.14 Vermogens in een driefazen inductiemotor

Het toegevoerd vermogen is het elektrisch vermogen dat aan de statorwikkeling wordt toegevoerd:

$$P_t = P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Het nuttig vermogen  $P_n$  van de motor is het mechanisch vermogen dat op de as van de motor vrijkomt en wordt berekend met een formule uit de mechanica:

$$P_n = P_{as} = T \cdot \omega = T \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

### 1.15 Rendement van een driefazen inductiemotor

Het totaal rendement van een driefazen inductiemotor is de verhouding van het nuttig mechanisch vermogen tot het toegevoerd elektrisch vermogen:

$$\eta = \frac{P_n}{P_t}$$

Het rendement van een inductiemotor kan berekend worden als de verliezen gekend zijn; deze verliezen kunnen bepaald worden uit proeven, zoals bijvoorbeeld de nullastproef. Een andere methode is het bepalen van het rendement bij een bepaalde belasting aan de hand van de remgenerator (zie cursus laboratorium: bepalen van het rendement van een driefazen sleep-ring-anker motor m.b.v. de remgenerator).

### 1.16 Snelheidsregeling van driefazen inductiemotoren

Door formule  $n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$  in formule  $s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$  in te vullen kunnen we hieruit het toerental  $n_r$  afleiden van de driefazen motor:

Uit deze uitdrukking is het zonder meer duidelijk dat het toerental van de driefazen motor afhankelijk is van:

- .....
- .....
- .....

Snelheidsregeling moet dus gebeuren door op een van deze factoren in te werken.



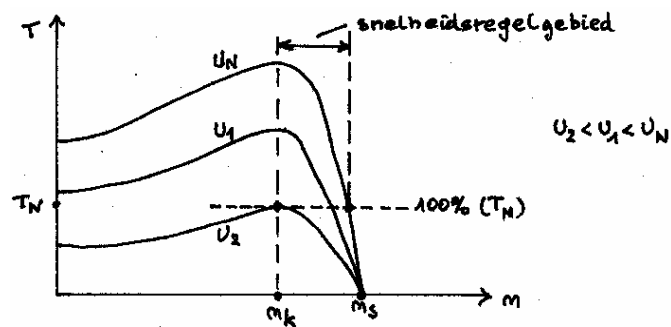
### 1.16.1 Snelheidsregeling door wijziging van de slip

De slip kan gewijzigd worden door verandering van de netspanning of van de rotorspanning.

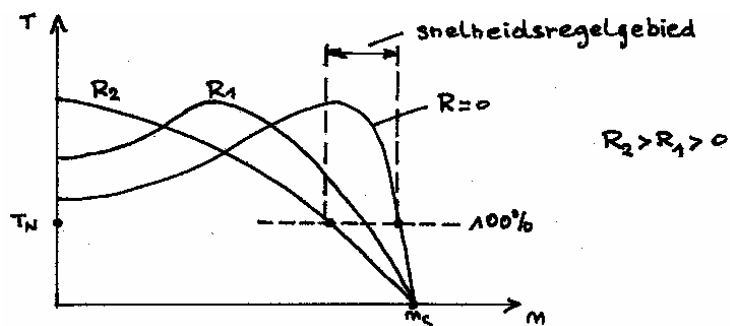
Verandering van de netspanning kan verwezenlijkt worden met behulp van:

- statorweerstand;
- een autotransfo met verschillende aftakkingen;
- elektronische thyristorvoeding met impulsbreedtemodulatie.

Bij deze regelingen verkleint het koppel kwadratisch met de statorspanning, waardoor de slip toeneemt en dus de snelheid vermindert.



Verandering van de rotorspanning kan alleen toegepast worden bij sleepringmotoren met behulp van rotorweerstand voor continu bedrijf. Door het vergroten van de weerstanden, zal de slip vergroten waardoor snelheidsvermindering mogelijk is.



Beide methodes zijn economisch niet rendabel, daar zowel grote jouleverliezen in rotor en stator optreden (temperatuurstijging) als in de regelweerstand zelf.

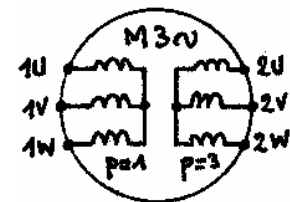
## 1.16.2 Snelheidsregeling door poolomschakeling

Bij deze motoren wordt een ander toerental ingesteld door verandering van het aantal polen in de motor. Immers het synchron toerental is volgens formule (1) omgekeerd evenredig met het aantal polen.

Poolomschakelbare motoren worden gebruikt in die toepassingen waar discontinue snelheidsvariëaties vereist worden met aanzienlijke verschillen in snelheid (voorbeeld heffen van lasten). Bij pool - omschakelbare motoren met bewikkelde rotor moet de poolomschakeling zowel in de stator als in de rotor plaatsvinden, terwijl bij kooiankermotoren de rotor zich automatisch aanpast aan het aantal polen van de stator. Poolomschakeling kan op 2 manieren bekomen worden:

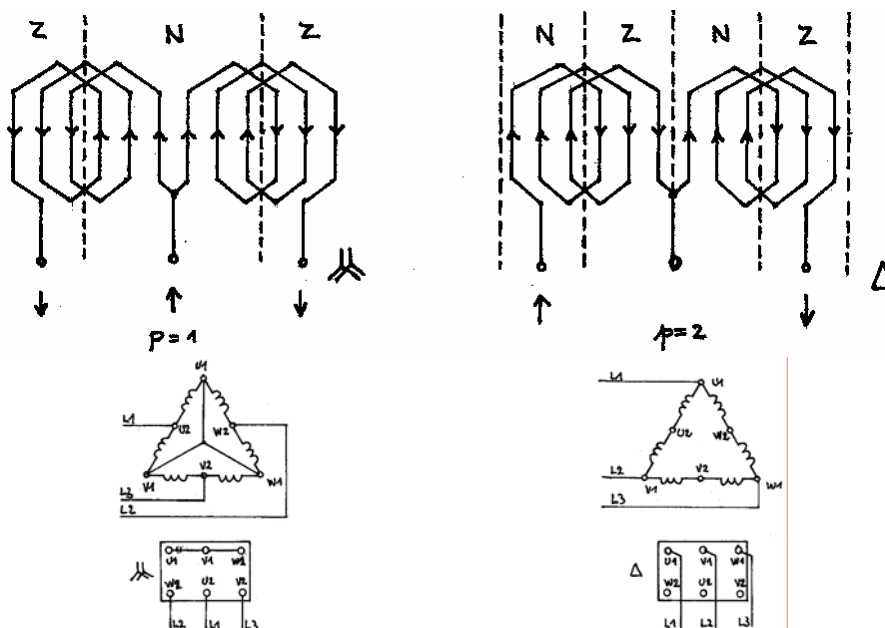
- met gescheiden wikkelingen;
- met een dahlanderwikkeling;

Bij poolomschakelbare motoren met gescheiden wikkelingen, zorgt iedere wikkeling voor een ander polenpaar en dus ook voor een andere toerental. Tijdens de werking is dus slechts een van de wikkelingen in gebruik. De wikkelingen zijn (meestal) in ster geschakeld. De verhouding van beide toerentallen is willekeurig (1/2, 1/3, ...).



De dahlanderwikkeling is slechts een wikkeling, waarbij het aantal polen kan gewijzigd worden door de verschillende wikkelhelften in serie (driehoek) of parallel (dubbelster) te schakelen. De verhouding van de toerentallen is steeds 1/2.

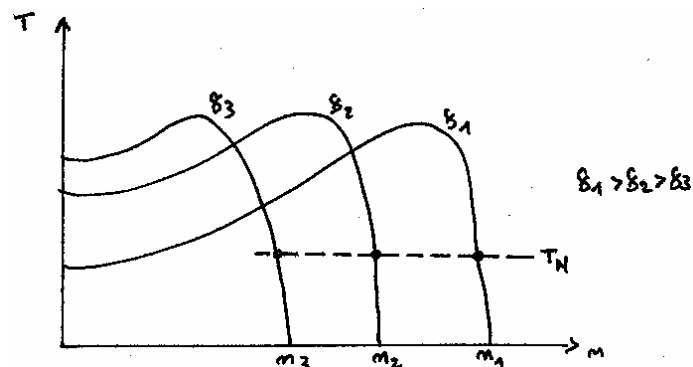
Poolomschakeling is mogelijk door de stroomzin in een wikkelhelft om te keren, waardoor het aantal polen halveert. Het wikkelschema toont dit voor een van de 3 spoelen van de dahlanderwikkeling. Belangrijk is hoe de faze-opeenvolging is bij het aansluiten van de driehoek (lage snelheid) en de dubbelster (hoge snelheid). Dahlandermotoren worden uitgevoerd of wel met gelijk koppel, ofwel met kwadratisch koppel bij beide snelheden.



Poolomschakelbare motoren kunnen ook met meer dan twee snelheden gebouwd worden, door een combinatie van gescheiden en dahlanderwikkelingen toe te passen. Voor vier snelheden past men dan 2 gescheiden dahlanderwikkelingen toe.

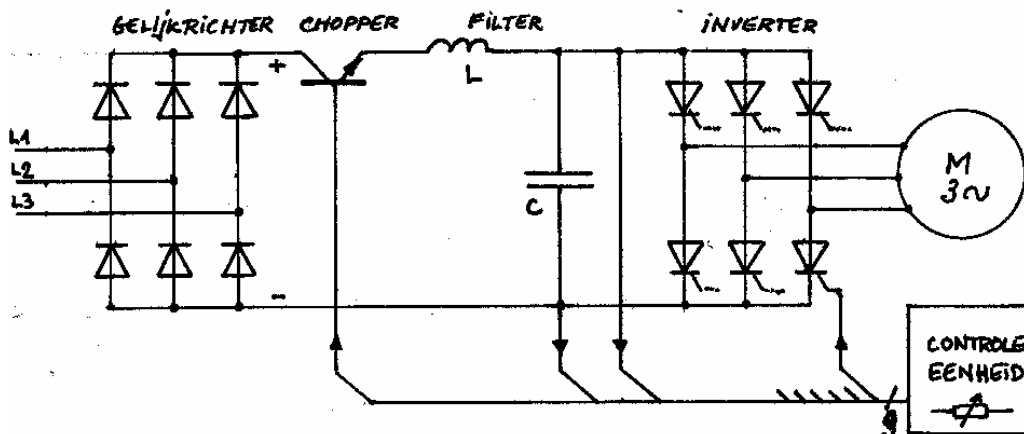
### 1.16.3 Snelheidsregeling door frequentieregeling

Door het veranderen van de frequentie ontstaat eveneens een verandering van de rotatiesnelheid van de motor. Hierbij moet eveneens de waarde van de toegepaste spanning op de statorwinding veranderen, wil men de flux in de motor constant houden, hetgeen overigens blijkt uit formule (6). Dus wil men de snelheid verhogen, dan zal en de frequentie en de toegepaste spanning verhoogd moeten worden.

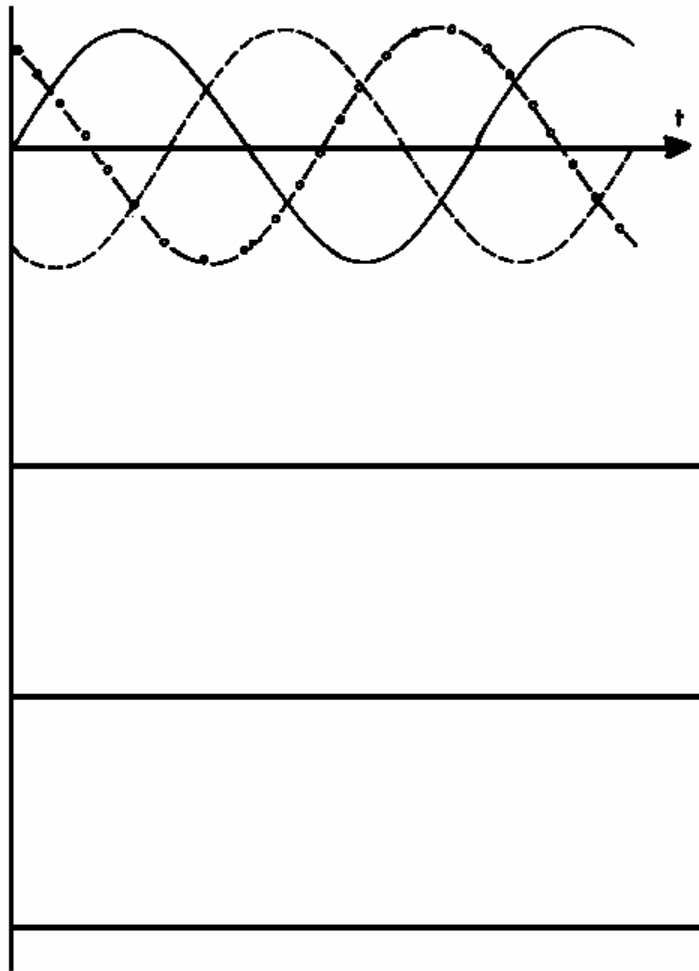


Men past zogenaamde frequentie-omvormers toe:

- een gelijkrichter zet de wisselstroom van het net om tot een pulserende gelijkstroom;
- een chopper schakelt de gelijkstroom voortdurend in en uit zodat een instelbare gelijkspanning ontstaat, die gefilterd wordt met een smoorspoel en een afvlakcondensator;
- een inverter zet de gelijkstroom om in wisselstroom met een veranderlijke frequentie;
- een controle- en regeleenheid regelt de chopfunctie, en levert de ontsteekpuls van de thyristoren van de inverter.



Een frequentieregeling is een verliesvrije regeling, waarbij de snelheid ook boven de normale synchrone snelheid kan geregeld worden.



### 1.17 Elektrische remming van een asynchrone motor

Een asynchrone motor kan op verschillende wijzen geremd worden:

Door de asynchrone motor zelf:

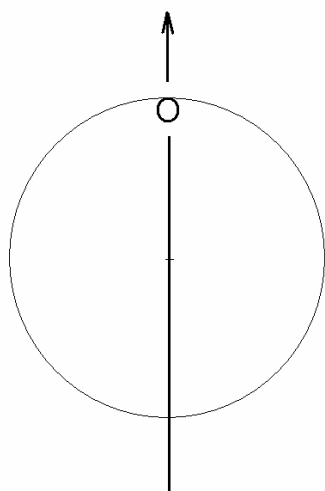
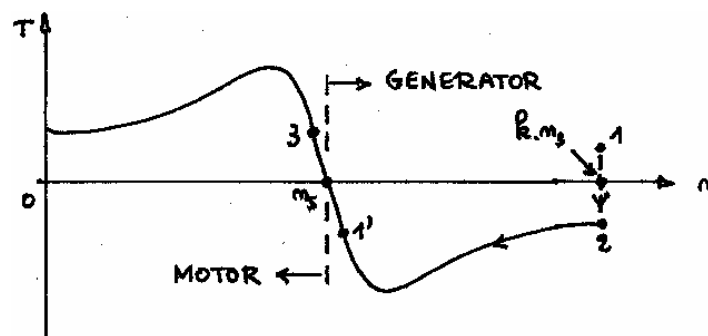
- hypersynchrone afremming;
- tegenstroomremming;
- gelijkstroomremming;

Door een bij te plaatsen remsysteem

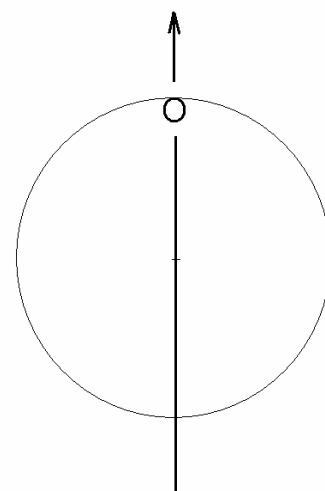
- de elektromagnetische rem;
- de elektromagnetische poederrem;

#### 1.17.1 Hypersynchrone afremming

Hypersynchrone afremming komt voor bij hijswerktuigen tijdens het strijken (dalen) van de last. De asynchrone motor verkrijgt dan een snelheid die hoger is dan de synchrone snelheid. De lorentzkrachten op de rotorleiders draaien om van zin en oefenen op het werktuig een tegenwerkend koppel uit, dat in evenwicht is met het drijvend koppel van de last, waardoor de last een constante daalsnelheid verkrijgt. De machine werkt nu als asynchrone generator die de potentiële energie van de dalende last in de vorm van elektrische energie terugstuurt naar het net.



Normale

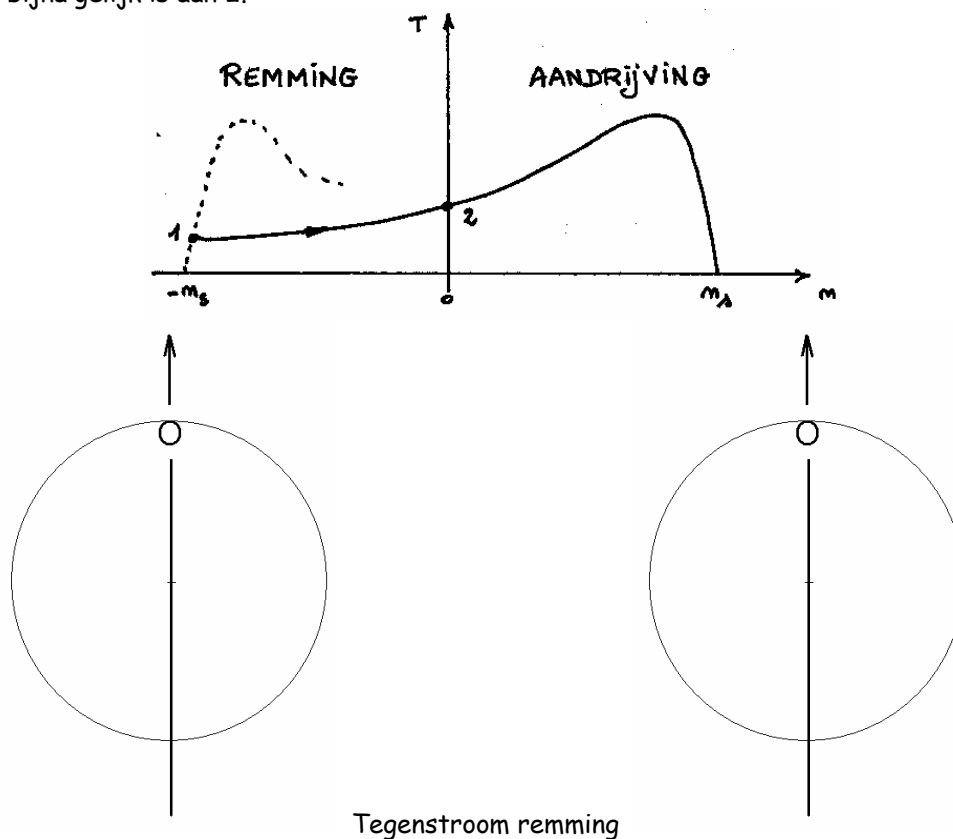


Hypersynchrone afremming

Bij poolomschakelbare motoren kan ook hypersynchrone afremming bekomen worden door over te schakelen naar een hoger pool tal, zodat een lagere synchrone snelheid ontstaat. De machine zal nu ook weer werken als asynchrone generator totdat de draaisnelheid van de rotor iets onder de nieuwe synchrone snelheid gekomen is.

### 1.17.2 Tegenstroomremming

Tegenstroomremming wordt bekomen door twee lijndraden om te wisselen. De draaizijn van het magnetisch veld keert om en is nu tegengesteld aan de draaizijn van de motor, zodat de slip in waarde bijna gelijk is aan 2.

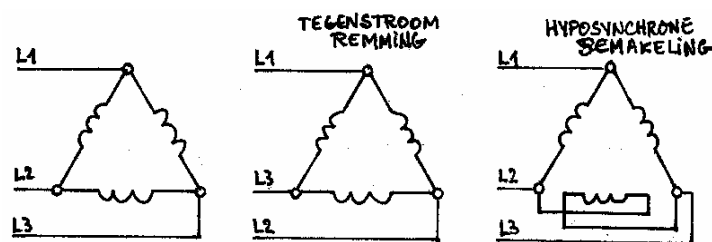


Normale

Tegenstroom remming

Het remkoppel is klein, daar de fazeverschuiving  $\beta$ r groot is.

De rotorspanning  $E_r$  is ongeveer 2 keer zo groot als bij stilstand. De stromen bereiken zeer grote waarden, zodat de stromen beperkt moeten worden door het opnemen van weerstanden in de statorketen van de kooiankermotor of in de rotor van de sleepringankermotor. De stromen tijdens het remmen kunnen ook verkleind worden door de motor tijdens het remmen in ster te schakelen. Als de motor tot stilstand gekomen is, wordt het net afgeschakeld, anders zou de motor in de andere draaizin beginnen te draaien. Afschakeling is mogelijk door meting van de snelheid met een tachogenerator. Om geen onderbreking van de voeding te krijgen, bij de overschakeling naar het remmen, past men de hyposynchrone schakelwijze toe: hier verwisselt men de aansluitingen van een van de spoelen van de statorwikkeling.



### 1.17.3 Gelijkstroomremming van een asynchrone motor.

Gelijkstroomremming wordt bekomen door na het afschakelen van de motor van het net, een gelijkstroom in de statorwikkeling van de motor te sturen (20 à 24 V). Er ontstaat aldus een stilstaand magnetisch veld (zie fig. 1).

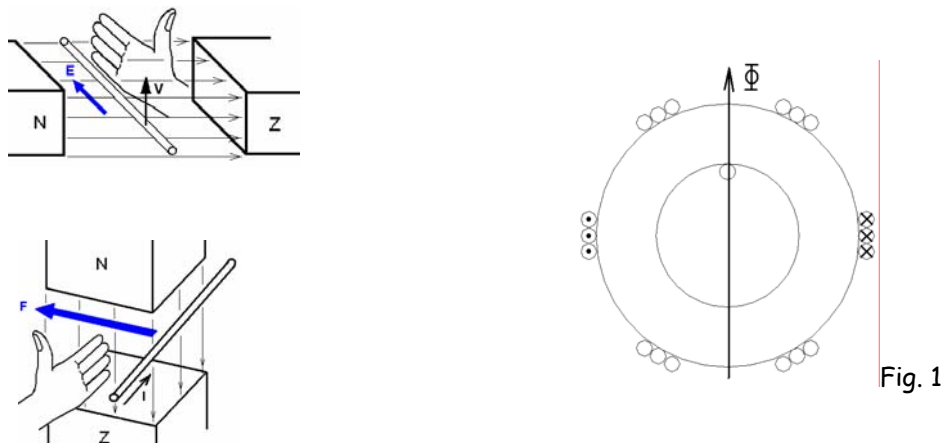


Fig. 1

Wanneer de rotor draait krijgen we een bewegende geleider in een magnetisch veld. Hieruit volgt dat in de geleider een e.m.s opgewekt wordt. Doordat de rotor kortgesloten is krijgen we een stroomvoerende geleider in een magnetisch veld. Op de geleider ontstaat de Lorentz-kracht (fig. 2).

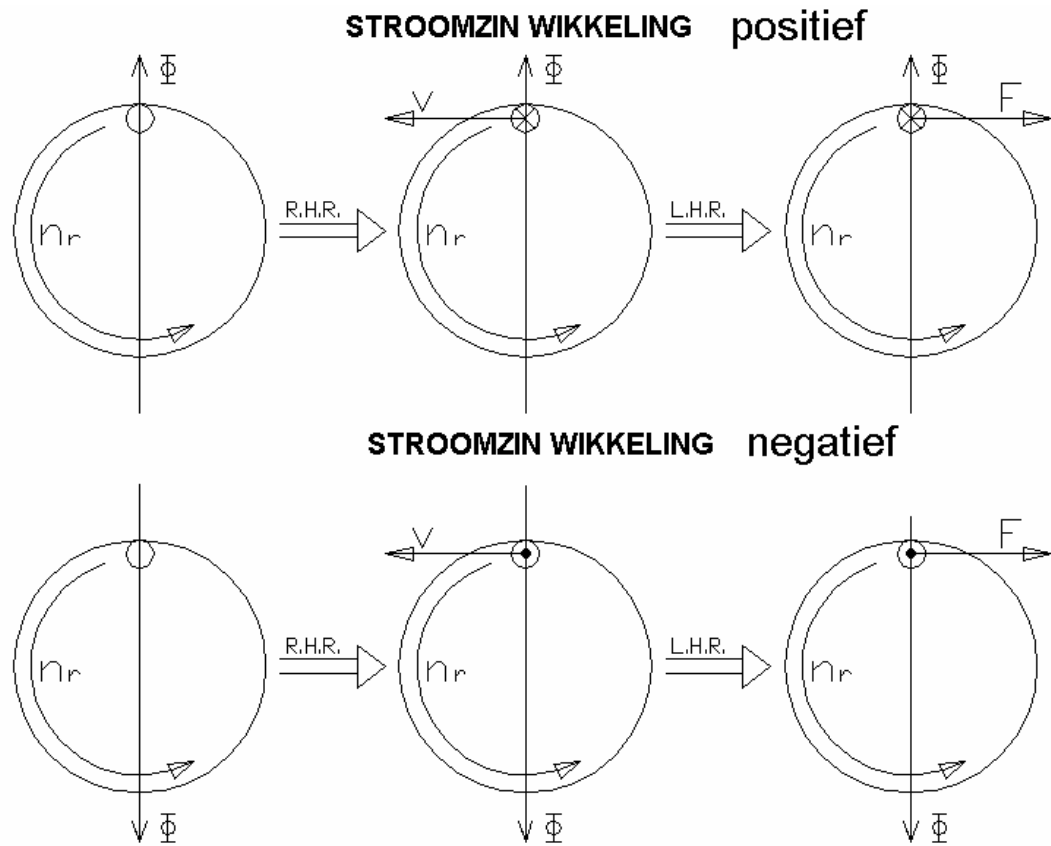


Fig.2

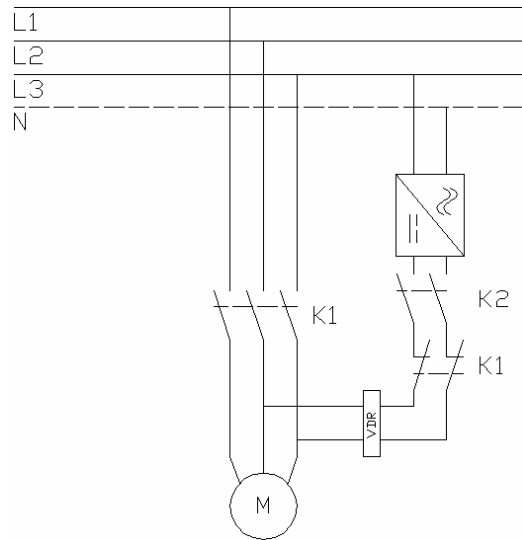
We zien dat de Lorentz-kracht de beweging tegenwerkt (remming). De zin van het magnetisch veld speelt geen rol (zie fig. 2 stroomzin wikkeling 1 en 2). Hierdoor mogen we de zin van de aangelegde gelijkspanning over de statorwikkeling vrij kiezen.

De grootte van de Lorentz-kracht  $F = B.l.I$  ( $B$  = inductie =  $\Phi/A$ ,  $l$  = lengte geleider,  $I$  = stroom door de geleider).

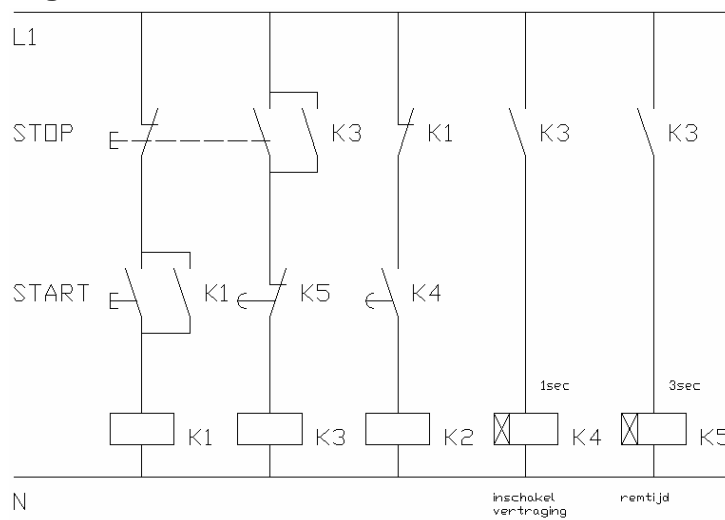
Door de gelijkspanning op de statorwikkeling te regelen bekommen we een regelbaar magnetisch veld en ook een regelbaar remkoppel.



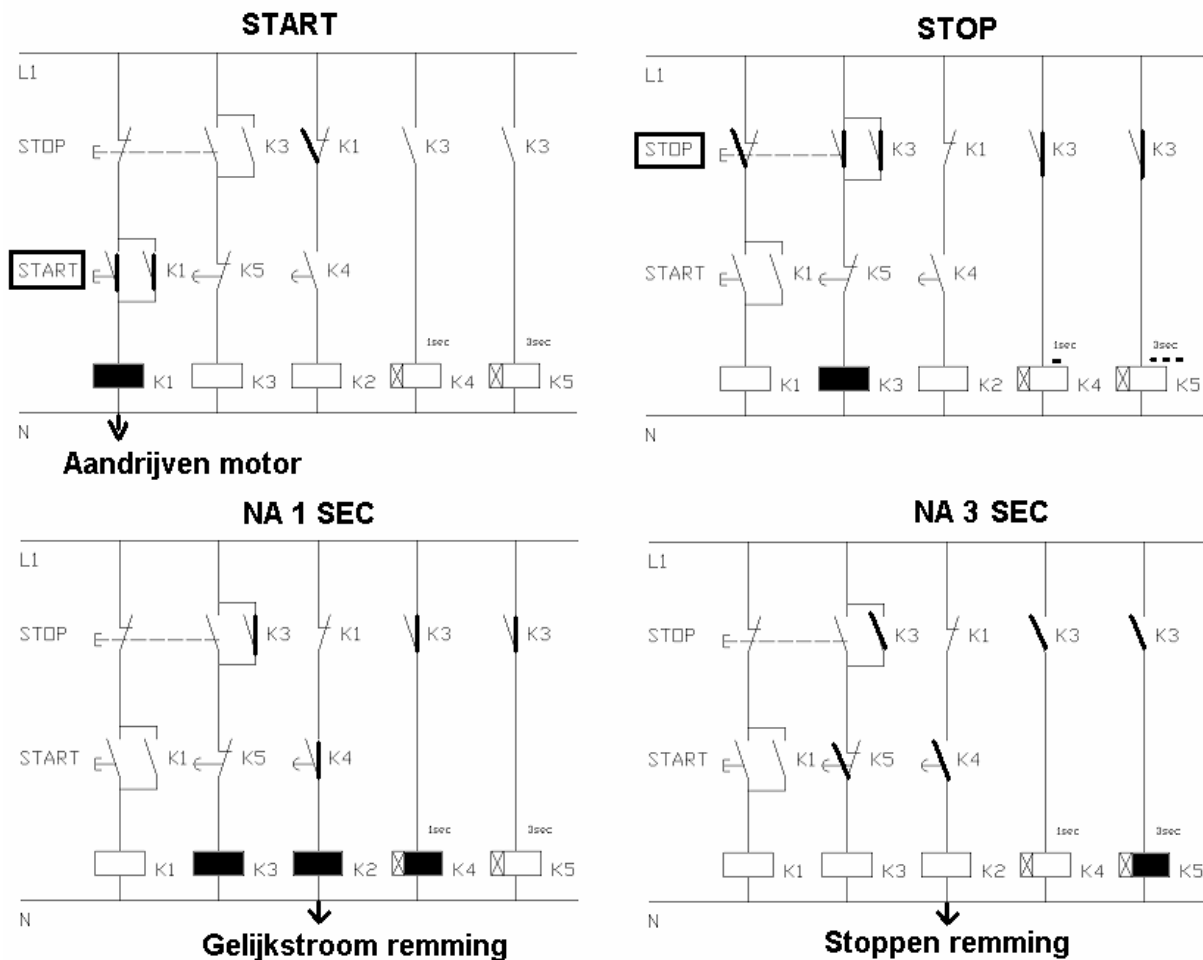
### 1.17.3.1 Vermogenkring



### 1.17.3.2 Sturing

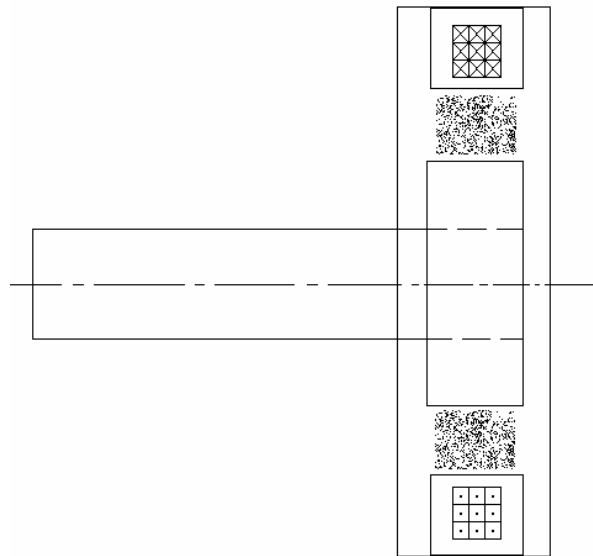


### 1.17.3.3 Werking sturing

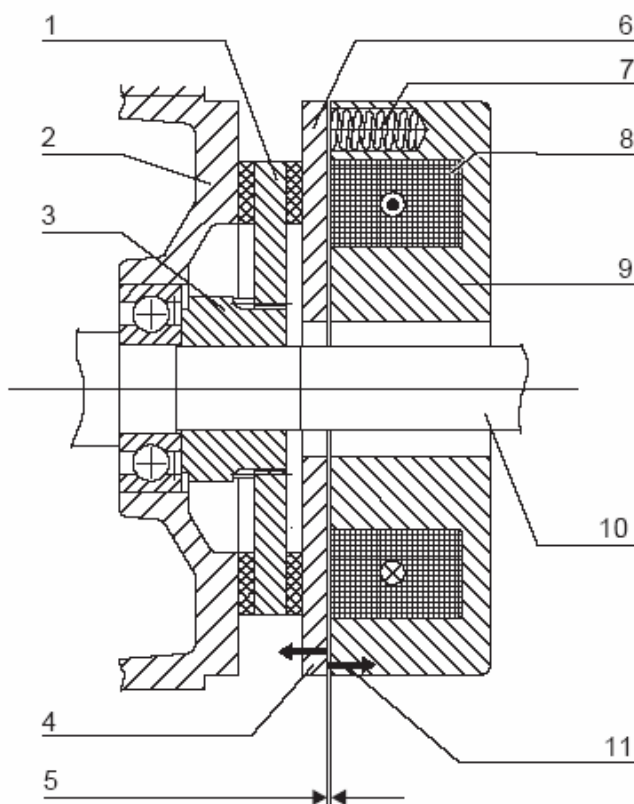


Opmerking : wanneer we een gelijkspanning over een spoel plaatsen kunnen we dit bekijken als een wisselspanning met frequentie = 0 we weten dat  $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 0$  Hieruit volgt dat we enkele de weerstand R hebben in de impedatiedriehoek. Er kan dus een grotere stroom gaan vloeien bij een gelijkspanning dan bij een wisselspanning. We moeten ervoor zorgen dat de stroom door de wikkeling onder de toegelaten norm blijft.

### 1.17.4 De elektromagnetische poederrem



### 1.17.5 De gelijkstroombevoerde elektromagnetische platenrem



- 1 remschijf
- 2 remlagerschild
- 3 meenemer
- 4 veerkracht
- 5 lichtspleet
- 6 ankerschijf
- 7 remveren
- 8 remspoel
- 9 spoelhuis
- 10 motoras
- 11 elektromagnetische kracht

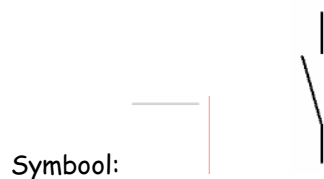
**SEW**  
**EURODRIVE**

Contactoren, scheiders, lastschakelaars en vermogenschakelaar.

### Vierpolige contactoren (relais)



Scheiders worden ook wel scheidingschakelaars genoemd. **Scheiders worden alleen op plaatsen gebruikt waar ze geen vermogen hoeven te verbreken.** Er ontstaan dan ook geen verbrekingsvlambogen. Een scheider heeft de functie om delen van een installatie spanningsloos te maken, bijv. een transformator, een railstelsel of een kabel.



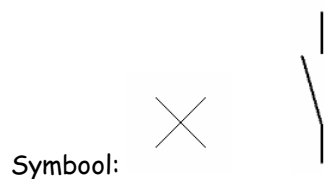
### Last(scheidings)chakelaars

Lastschakelaars zijn in staat om de stromen die bij normaal bedrijf optreden in en uit te schakelen. Eveneens kan op een overbelastings- of kortsluitstroom worden geschakeld. Lastschakelaars zijn echter **niet in staat om overbelastings- en kortsluitstromen te onderbreken.**



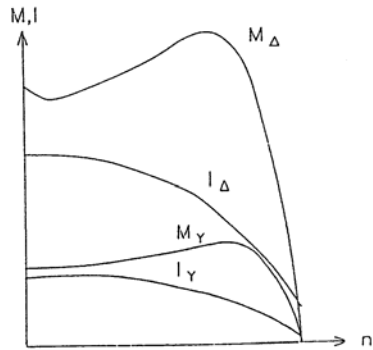
### Vermogenschakelaars

**Vermogenschakelaars zijn schakelaars die in staat zijn om zowel de normaal optredende stromen als de bij storing, overbelasting of kortsluiting optredende stromen in en uit te schakelen.** Dat gebeurt automatisch als bijvoorbeeld een hoogspanningslijn door de bliksem wordt getroffen. In het traject waarin dat gebeurt zit aan beide zijden een vermogensschakelaar die uitschakelt tijdens de storing en daardoor meteen deze kortsluitstroom, zoals het heet, onderbreekt. Enkele seconden na de uitschakeling wordt er automatisch een 'wederinschakelbevel' aan beide schakelaars of aan één ervan gegeven. Is de storing in het circuit nog aanwezig dan volgt onmiddellijk een definitieve uitschakeling. Onder normaal optredende stromen vallen ook kleine inductieve en capacatieve stromen.



## 1.18 Elektrische beveiliging van inductiemotoren

### 1.18.1 Stromen tijdens bedrijf



### 1.18.2 Hoe beveiligen

Elektrische beveiliging heeft tot doel:

- voorkomen dat de motortemperatuur te hoog wordt, zodat geen gevaar bestaat voor verbranding van de wikkelingen;
- het snel afschakelen van de motor bij kortsluiting;
- het inschakelen beletten bij ontbrekende of ontoereikende spanning.

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 wordt verkort;
- onderbreking van een lijndraad, zodat slechts een lijnspanning aanwezig is voor het functioneren van de motor, waardoor de fazestroom in 2 (of 3) spoelen te hoog wordt;
- te lage netspanning;
- geblokkeerde motor;

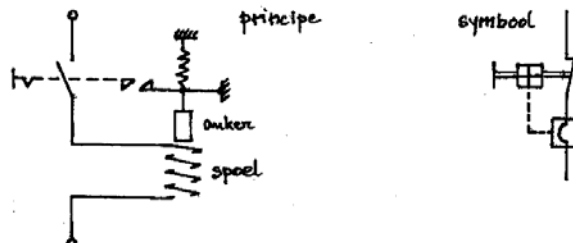
Beveiligingen die voor de asynchrone motoren gebruikt worden zijn de smeltveiligheden, de thermische en de elektromagnetische maximumbeveiliging, de nulspanningsbeveiliging en de elektronische thermistorbeveiliging.

### 1.18.3 Smeltveiligheden

Smeltveiligheden maken gebruik van een smeltdraad aangebracht in een kamer, al dan niet gevuld met fijn kwartzand, van de smeltpatroon. Optredende kortsluitstromen zullen door jouleffect het draadje laten doorsmelten. Smeltveiligheden moeten bij asynchrone motoren overgedimensioneerd worden, omwille van de hoge aanzetstromen, zodat ze niet reageren tegen overstromen in normaal bedrijf. Er wordt dus nog een bijkomende beveiliging geplaatst, die moet reageren op overstromen.

### 1.18.4 Elektromagnetische maximumbeveiliging

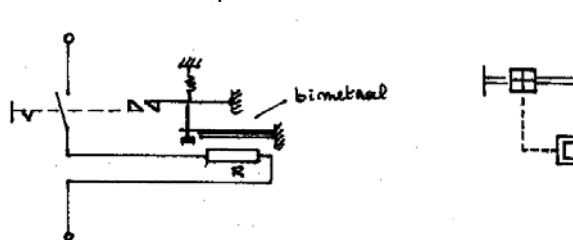
De beveiliging bestaat uit een beweegbaar ankertje, dat in een magneetspoel is opgesteld. Als de stroom in de stroomspoel een bepaalde waarde overschrijdt, zal het ankertje aangetrokken worden, waardoor een stift het schakelmechanisme bedient en de schakelaar opent.



De aantrekwaarde is  $\pm 10$  keer de nominale stroomsterkte  $I_{nom}$  en schakelt bijgevolg optredende kortsluitstromen uit.

### 1.18.5 Thermische maximumbeveiliging

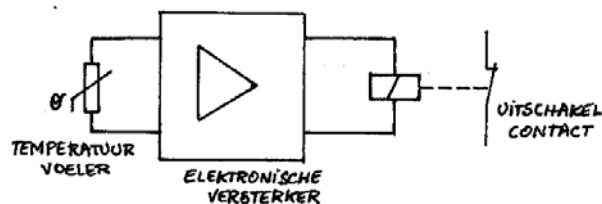
Deze beveiliging wordt gebruikt als bescherming tegen overstromen. Het voornaamste onderdeel is het bimetaal. Het is een strip bestaande uit 2 op mekaar gewalste metaalstroken met verschillende lineaire uitzettingscoefficient. De stroom die door het verwarmingselement van het bimetaal vloeit, zal het bimetaal opwarmen, zodat het bimetaal gaat krom trekken. Bij een overstroom van lange duur zal het bimetaal een uitschakelmechanisme bedienen, die de stroom rechtstreeks zal onderbreken, of onrechtstreeks via een hulpcontact.



Installatie-automaten zijn motorbeveiligingen die zowel een elektromagnetische als een thermische maximumbeveiliging combineren. Zij beveiligen de motor dus zowel tegen kortsluiting als tegen overstromen van langere duur.

### 1.18.6 Thermistorbeveiliging

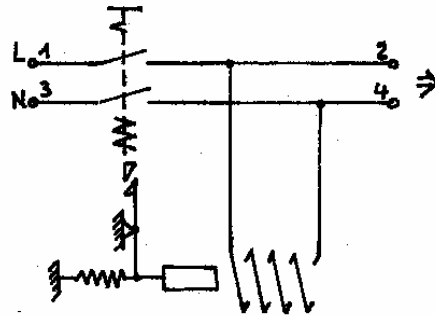
Het is een thermische maximumbeveiliging voor de bewaking van de temperatuur. De thermistor is een temperatuursgevoelige weerstand met Positieve TemperatuursCoefficient, waarbij de weerstand groter wordt met stijgende temperatuur. De thermistor wordt aangesloten op een elektronische schakeling die instaat voor de uitschakeling van de stroom via een relais als de afschakel-temperatuur bereikt wordt.



### 1.18.7 Nulspanningsbeveiliging

De beveiliging bevat een stroomspoel, dat slechts stroom voert als de schakelaar gesloten wordt. Hierdoor wordt een ankertje aangetrokken, dat het schakelmechanisme vergrendelt.

Als de spanning wegvalt of ontoereikend wordt, dan wordt het ankertje losgelaten, waardoor de schakelaar geopend wordt. Bij het terug opkomen van de spanning, blijft de stroomspoel stroomloos. Nulspanningsbeveiligingen zijn niet nodig indien de motor bediend wordt met contactoren.



## ASYNCHRONE MOTOREN

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

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

$$f_r = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{p \cdot (n_s - n_r)}{60} = \frac{p \cdot n_s}{60} \cdot \frac{(n_s - n_r)}{n_s} = f \cdot s$$

$$X_r = 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot L_r = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot s \cdot L_r = s \cdot X_{rst}$$

$$\operatorname{tg}(\beta_r) = \frac{X_r}{R_r} = \frac{s \cdot X_{rst}}{R_r} = s \cdot \operatorname{tg}(\beta_{rst})$$

$$U_f \approx E_s = k_s \cdot f \cdot \phi_m \cdot N_s$$

$$E_r = k_r \cdot f_r \cdot \phi_m \cdot N_r = k_r \cdot s \cdot f \cdot \phi_m \cdot N_r$$

$$E_{rst} = k_r \cdot f \cdot \phi_m \cdot N_r$$

$$E_r = s \cdot E_{rst}$$

$$F_1 = B \cdot I_r \cdot l$$

$$B = \frac{\phi_s}{A}$$

$$F_r = F_1 \cdot \sin \varphi_r$$

$$F_t = F_1 \cdot \cos \varphi_r$$

$$M_1 = F_t \cdot r$$

$$T = z \cdot M_1$$

$$T = k \cdot \Phi_s \cdot I_r \cdot \cos \varphi_r$$

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

$$I_r = \frac{E_r}{Z_r}$$

$$T = k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst} \cdot \frac{\frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{Lrst}^2}$$

$$s_k = \frac{R_r}{X_{Lrst}}$$

$$\varphi_k = 45^\circ$$

$$T_k = \frac{k \cdot \Phi_s \cdot E_{rst}}{2 \cdot X_{Lrst}}$$

$$1 = \frac{R_r + R_{az}}{X_{Lrst}} \Rightarrow R_{az} = X_{Lrst} - R_r$$

$$I_{\max} = k \cdot I_{\text{nom}}$$

Opgenomen nominaal vermogen in kW	$k = \frac{I_{\max}}{I_{\text{nom}}}$
< 3	6
< 4	3
< 10	2
> 10	1.5