

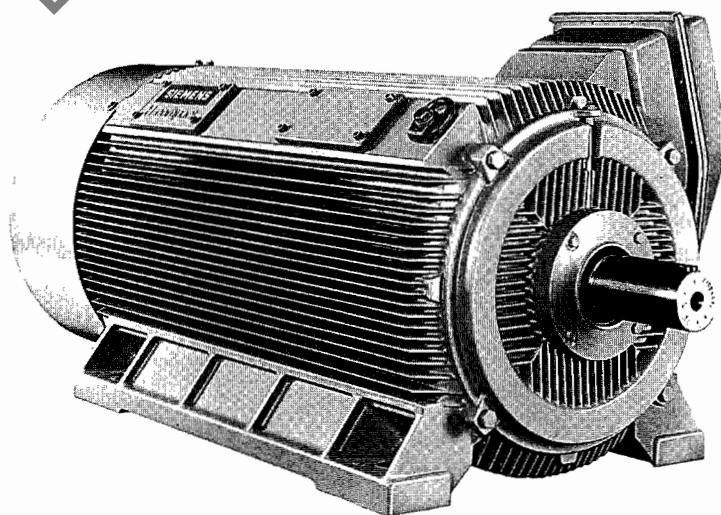
# Driefasige inductiemotoren (asynchrone motoren)

## Wegwijzer

In leereenheid 1 behandelden we de synchrone generatoren, die het genereren van wisselspanning beogen; leereenheid 2 behandelde de studie van de transformatoren. Transformatoren hebben tot doel de ter beschikking staande elektrische energie onder de gewenste spanningswaarde te krijgen. Bij de voorgaande studie werd duidelijk hoe elektrische spanning opgewekt wordt en op welke manier de elektrische energie ter beschikking van de gebruiker (distributie) kan worden gesteld. Het geheel (generator-transformator) kunnen we als de 'voeding' beschouwen.

In de volgende leereenheden bestuderen we de gebruikers die elektrische energie opnieuw omzetten in de gewenste vorm van energie. Aangezien dit leerboek de studie van elektrische machines op het oog heeft, zullen de besproken gebruikers op de eerste plaats motoren zijn. Omwille van hun karakteristieke eigenschappen zijn motoren bij uitstek geschikt om in bedrijfsomstandigheden werktuigmachines aan te drijven. Naar gelang van de aan te drijven werktuigmachines zullen we later de juiste keuze van motor moeten maken, zodanig dat de aanloop in de meest gunstige omstandigheden kan gebeuren en dit zowel voor het aangedreven werktuig als voor het voedende net (stroomstoten).

Deze leereenheid omvat enkel de studie van de driefasige inductiemotor. Deze motor, die in de praktijk veel voorkomt, vraagt een grondige studie. Om de bestudeerde theoretische begrippen uit de voorgaande leereenheid goed te laten renderen, verklaren we de werking van de inductiemotor op basis van de transformatorwerking. Op deze manier zal het opstellen en gebruiken van de equivalente keten en het vectordiagram van een inductiemotor minder moeilijkheden veroorzaken. De inductiemotor of asynchrone motor bezit een relatief klein aanloopkoppel, maar de aanzetstroom is groot (tot ca. 8 maal de nominale stroomsterkte). We zullen in deze leereenheid middelen zoeken om deze minder goede gebruikseigenschappen te verbeteren. Dit loont zeker de moeite, aangezien het een motor is die constructief eenvoudig, weinig kwetsbaar en goedkoop is.



### 3.1 Beknopte omschrijving

#### Doelstellingen

- De functie van de samenstellende onderdelen van een asynchrone motor omschrijven.
- De principewerking toelichten.

#### Samenstelling

De voornaamste onderdelen van de asynchrone motor (fig. 134a) zijn voorgesteld in fig. 134b. We onderscheiden de hoofdonderdelen: de *stator* met bijbehorende statorwikkeling en statorhuis; de *rotor* uitgevoerd als kooirotor of bewikkelde rotor.

De rotor wordt gedragen door de rotoras met de aseinden. De legerschilden met de legers dragen de rotor.

Op de rotoras wordt de ventilator en eventueel een balanceerring geplaatst. Het statorhuis wordt meestal uitgevoerd met koelribben.

Ten slotte is er nog de aansluitkast met aansluitklemmen voor netaansluiting. In sommige gevallen zijn er bijkomende klemmen voorzien voor uitvoering van speciale verbindingen of aansluiting van een aanzetter bij motoren met bewikkelde rotor.

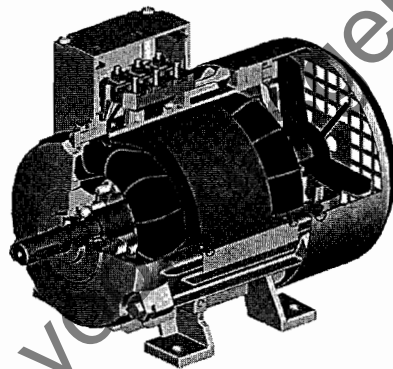


fig. 134a

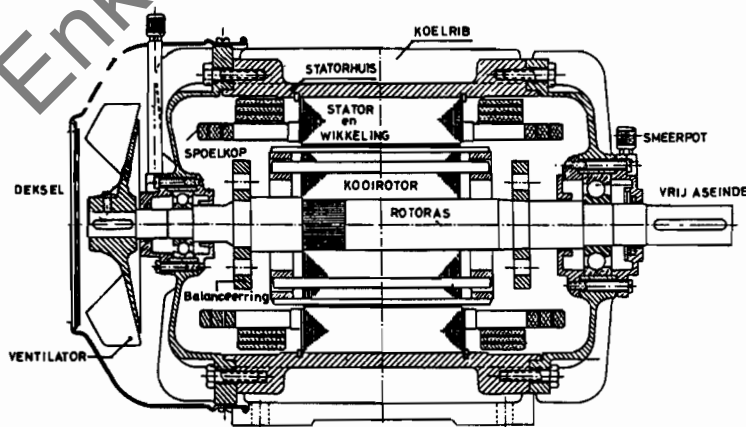


fig. 134b

De stator (fig. 135) bevat een driefasewikkeling zoals beschreven bij de synchrone generator. Hij wordt op een driefasenet aangesloten.

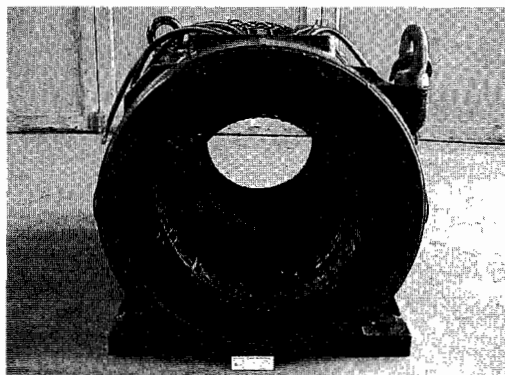


fig. 135

De rotor afgebeeld in fig. 136a is bewikkeld. De rotor afgebeeld in fig. 136b is een kortgesloten kooi. Beide rotoren worden niet op het net aangesloten.

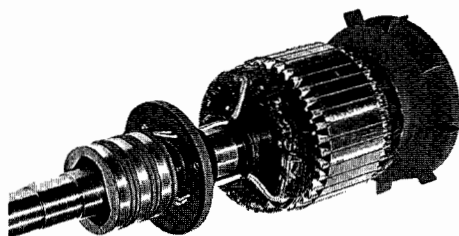


fig. 136a

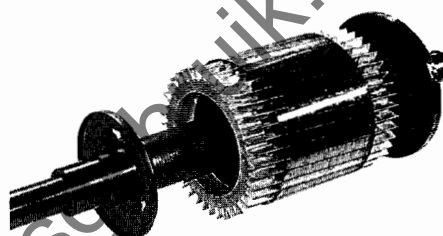


fig. 136b

De legerschilden die tegen de stator bevestigd worden, dragen de rotor (fig. 137).

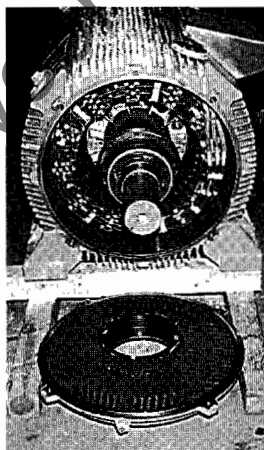


fig. 137

### Principewerking

Er ontstaat een draaiend magnetisch veld met rotatiefrequentie  $n_s = p \cdot n$  ( $s^{-1}$ ) bij aansluiting van een driefasenet op de driefasige statorwikkeling. Dit draaiend veld veroorzaakt in de kortgesloten rotorwikkeling (kooi) inductiestromen die zich tegen hun ontstaansoorzaak verzetten door in de zin van het draaiveld mee te draaien.

### 3.2 Draaiveld

#### Doelstellingen

- Het begrip *draaiveld* definiëren.
- De verschillende manieren toelichten waarop een draaiveld kan ontstaan.
- Door middel van figuren het ontstaan van een magnetisch draaiveld illustreren en de formule voor het bepalen van de rotatiefrequentie van dit stator-draaiveld afleiden.

#### 3.2.1 Definiëring

Een draaiveld is een magnetisch veld met constante rotatiefrequentie.

#### 3.2.2 Ontstaan van een draaiveld

Een draaiveld kan verkregen worden door:

- 1 het ronddraaien van een magneet (rotor) met constante rotatiefrequentie. We kunnen het draaiveld voorstellen door een draaiende vector (fig. 138)

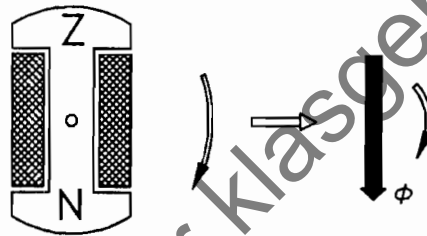


fig. 138

- 2 het sturen van een driefasestroom door een driefasewikkeling.  
Dit levert ons een cirkelvormig draaiveld op. Om dit aan te tonen, maken we gebruik van een stator waarin een elementaire tweepolige driefasewikkeling is aangebracht (fig. 139a). We sturen nu een driefasestroom door deze wikkeling en volgen op welbepaalde tijdstippen hoe het verloop is van de veldlijnen rond de wikkelingen (fig. 139b). We bepalen aldus de richting en zin van het magnetische veld waaruit we de polariteit van de polen kunnen bepalen.

Wij stellen vooraf dat bij positieve spanningen de stroomzin eveneens positief is en dat hij binnentreedt aan de spoelingangen  $U_1$ ,  $V_1$  of  $W_1$ .

Uitvoering  
driefasestatorwikkeling

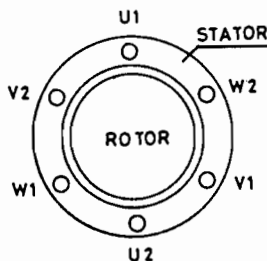


fig. 139a

Verloop van de driefasestroom in de tijd

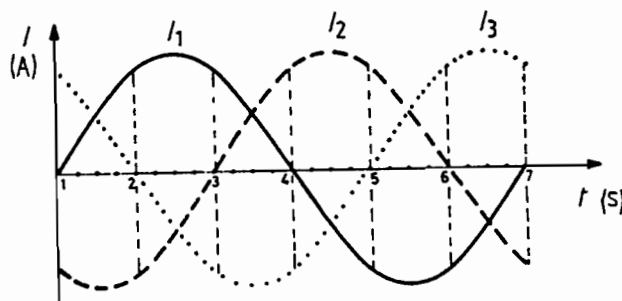
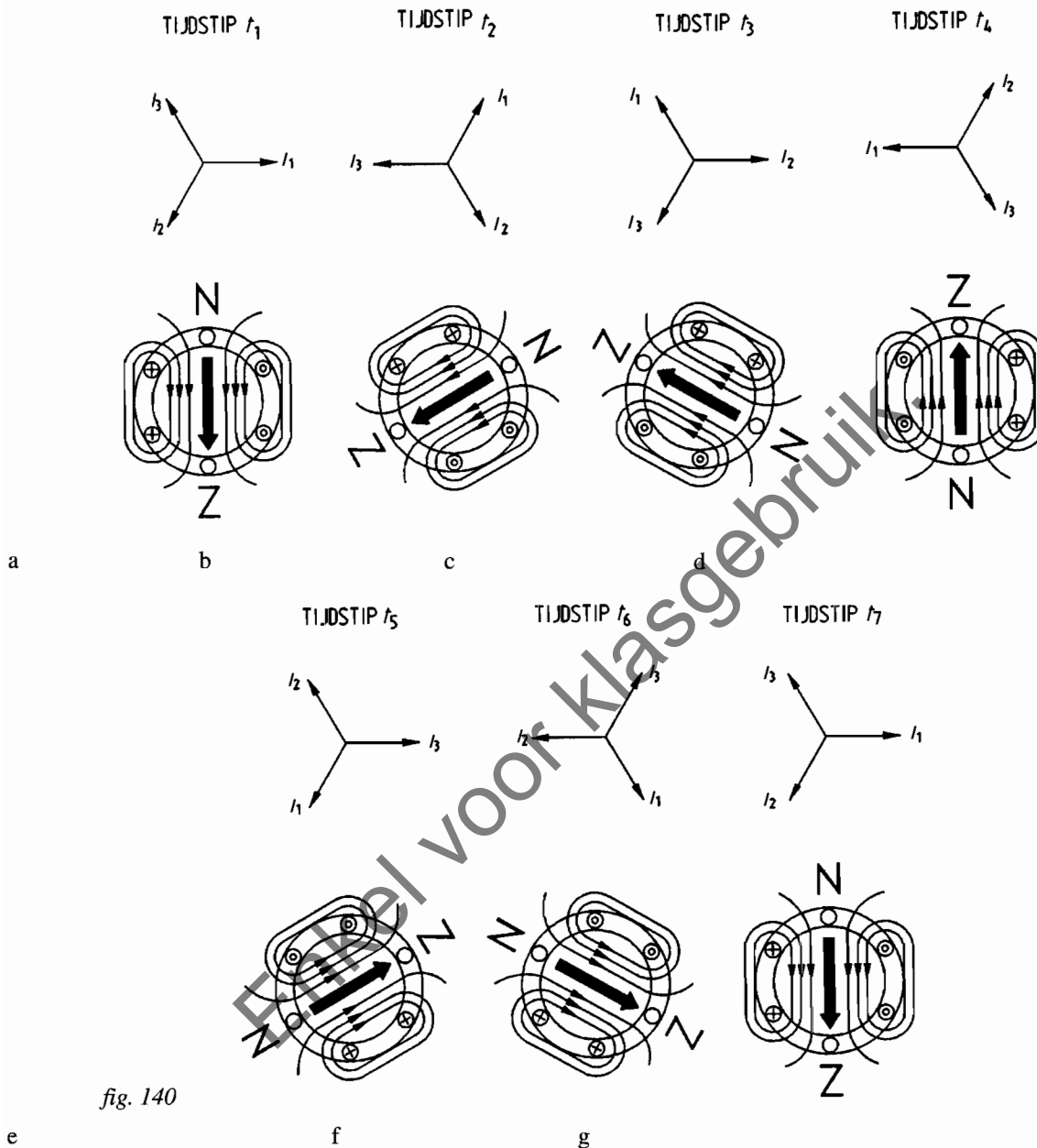


fig. 139b

We bepalen op elk tijdstip (nl. 1, 2, 3 ... 7) (fig. 140a ... g) de ogenblikkelijke waarden van de stromen en houden hierbij rekening met hun polariteit. Nadien tekenen we de veldlijnen rond de wikkelingen en bepalen aldus het resulterende magnetische veld met zijn N-pool en Z-pool (vanuit de stator gezien).



De figuren tonen aan dat de noord- en zuidpool één omwenteling per periode maken. De rotatiefrequentie van het statordraaiveld ( $n_s$ ) in de luchtspleet bij deze tweepolige driefasewikkeling is dus

$$n_s = f$$

met

$n_s$ : rotatiefrequentie van het draaiveld (in  $s^{-1}$ )

$f$ : netfrequentie (in  $s^{-1}$  of Hz)

Men kan gemakkelijk aantonen dat bij een vierpolige driefasewikkeling slechts een halve omwenteling van het magnetische veld per periode uitgevoerd wordt, bij een zespolige driefasewikkeling  $1/3$  omwenteling en bij een  $2p$ -polige driefasewikkeling  $\frac{1}{p}$  omwenteling.

De rotatiefrequentie van het draaiveld kan dus worden uitgedrukt met behulp van de volgende formule:

$$n_s = \frac{f}{p} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

met

$p$ : aantal poolparen

Deze formule geeft het verband tussen poolpaartal, frequentie en draaiveldrotatiefrequentie. Deze draaiveldrotatiefrequentie noemt men ook nog *synchrone rotatiefrequentie*  $n_s$ .

De volgende tabel geeft bij frequentie 50 Hz de verschillende rotatiefrequenties bij verschillende poolpaartallen.

| $p$                             | 1    | 2    | 3               | 4               | 5   | 6              |
|---------------------------------|------|------|-----------------|-----------------|-----|----------------|
| $n_s \text{ (s}^{-1}\text{)}$   | 50   | 25   | $16\frac{2}{3}$ | $12\frac{1}{2}$ | 10  | $8\frac{1}{3}$ |
| $n_s \text{ (min}^{-1}\text{)}$ | 3000 | 1500 | 1000            | 750             | 600 | 500            |

*Toelichting*

*Tweefasespanning*

Het aansluiten van een tweefasespanning op een tweefasewikkeling veroorzaakt eveneens een draaiveld. Dit geval bespreken we uitvoerig bij de eenfasige asynchrone inductiemotoren (leereenheid 5).

### 3.3 Invloed van een draaiveld op een rotorwikkeling

#### Doelstellingen

- De invloed van het statordraaiveld op een open rotorketen toelichten en het verband met de transformatorwerking aantonen.
- De invloed van de luchtspleet op de magnetisatiestroom van een inductiemotor toelichten.
- De verschijnselen uitleggen die ontstaan als een geblokkeerde rotor, aangesloten op weerstanden, zich in het draaiveld bevindt.
- De verschijnselen uitleggen die ontstaan als een vrijgelaten rotor, aangesloten op weerstanden, zich in het draaiveld bevindt.
- Verklaren waarom de rotor nooit de synchrone snelheid kan bereiken.
- Het begrip *slip* toelichten.

We plaatsen binnen de driefasige stator (met draaiveld) een rotor die eveneens een driefasewikkeling bevat met hetzelfde aantal polen als de stator (fig. 141).

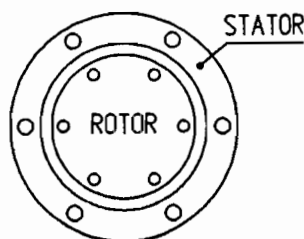


fig. 141

We beschouwen achtereenvolgens de gevallen:

- 1 bewikkelde open rotorketen (fig. 142a);
- 2 geblokkeerde rotor met rotorwikkeling aangesloten op weerstanden (fig. 142b);
- 3 vrijgelaten rotor met rotorwikkeling aangesloten op weerstanden.

### 3.3.1 Bewikkelde open rotorketen

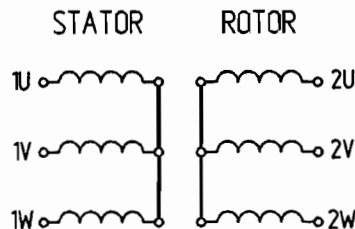


fig. 142a

Men kan onmiddellijk de overeenkomst vaststellen met een driefasetransformator. De motor werkt principieel als een transformator op nullast: de stator fungeert als primaire, de rotor als secundaire.

Bij het aanleggen van een driefasespanning op de statorwikkeling ( $E_s$ ) wordt in elke fase van de rotor een spanning  $E_{r0}$  opgewekt. Deze spanning ontstaat door het veranderende magnetische veld en heeft als frequentie  $f_{r0} = f_s$  (frequentie van het statornet).

De transformatieverhouding  $k = \frac{E_s}{E_{r0}}$  of  $E_{r0} = \frac{E_s}{k}$

met

$k$  : transformatieverhouding van de motor

$E_{r0}$  : rotorspanning per fase

$E_s$  : statorspanning per fase

De zin van de opgewekte (geïnduceerde) spanning bepaalt men met behulp van de regel van de rechterhand.

Omdat er geen rotorstroom kan ontstaan (open rotorwikkeling) kunnen er ook geen krachten uitgeoefend worden op de rotorgeleiders, de rotor blijft stilstaan. Volgens de wet van Biot-Savart kan slechts een motorkoppel ontwikkeld worden als een stroomvoerende geleider (rotorstroom) zich in een magnetisch veld bevindt (draaiveld).

#### Toelichting

##### Invloed van de luchtspleet

Er is wel een groot verschil met de transformator. Waar bij een transformator de luchtspleet als praktisch onbestaand moet worden beschouwd, is dit niet het geval bij de motor. De reluctantie van de magnetische keten is hier groot, zodat ook de magnetiseringsstroom  $I_m$  veel groter wordt. De hiermee gepaard gaande nullaststroom  $I_0$  bereikt waarden die oplopen tot 20 à 50 % van de vollaststroom. Bij een transformator bedraagt dit slechts enkele percenten.

### 3.3.2 Geblokkeerde rotor met rotorwikkeling aangesloten op weerstanden

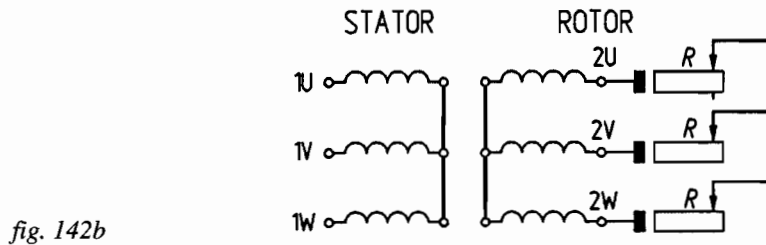


fig. 142b

De geïnduceerde spanning  $E_{r0}$  veroorzaakt een stroom  $I_{r0}$  in de rotorwikkeling. Dit heeft enkele belangrijke gevolgen:

- 1 Het statordraaiveld oefent op de rotor geleiders, doorlopen door de stroom, een koppel uit dat de rotor probeert te doen draaien in de zin van het draaiveld. De draaizin is te bepalen met de regel van de linkerhand.
- 2 De geïnduceerde stroom is een driefasestroom. Die doet op zijn beurt een rotordraaiveld ontstaan met dezelfde zin als die van de stator en met dezelfde rotatiefrequentie (de rotorfrequentie is immers gelijk aan de statorfrequentie). Volgens de wet van Lenz zal het rotordraaiveld dit statordraaiveld tegenwerken, het statordraaiveld heeft de neiging om te verzwakken. Omdat het totale magnetische veld constant moet blijven (transformatorwerking) wegens de constant veronderstelde netspanning en frequentie, wordt uit het net een supplementaire stroom opgeslorpt die het magnetische veld op zijn oorspronkelijke waarde houdt (te vergelijken met de primaire belastingsstroom  $I_1$  bij de transformator).

### 3.3.3 Vrijgelaten rotor met rotorwikkeling aangesloten op weerstanden

De rotor loopt aan onder invloed van de ontstane lorentzkrachten (koppels) in dezelfde zin als het statordraaiveld (wet van Lenz). Naarmate de rotor versnelt, vermindert de relatieve snelheid van het statordraaiveld t.o.v. de rotor. Als gevolg hiervan vermindert de geïnduceerde spanning  $E_r$  in de rotor geleiders, evenals de frequentie  $f_r$  van de rotorspanning.

De rotor kan echter nooit zo snel draaien als het statordraaiveld. Als dit wel het geval zou zijn, zouden de rotor geleiders geen veldlijnen meer snijden: de geïnduceerde spanning, de geïnduceerde stroom en bijgevolg ook het resulterende koppel zouden nul worden. Anders gezegd: een inductiemotor kan nooit de rotatiefrequentie van het statorveld (synchrone snelheid) bereiken; vandaar de benaming *asynchrone motor*. Men zegt ook: de rotor *slipt* t.o.v. het statordraaiveld.

## 3.4 Slip

### Doelstellingen

- Het verband tussen slip en rotatiefrequentie toelichten.
- De elektrische rotorgrootheden die van de slip afhankelijk zijn, opsommen en het verband met de slip weergeven.

### Verband tussen slip en rotatiefrequentie

De mate van het slippen wordt uitgedrukt in de z.g. *slipfactor*  $s$ . De *absolute slip* heeft als waarde



$$s_a = n_s - n_r$$

De *relatieve slip* of *slipfactor* geeft de relatieve afwijking van de rotorrotatiefrequentie t.o.v. de rotatiefrequentie van het statordraaiveld of de *synchrone rotatiefrequentie*:

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

Daaruit volgt dat  $n_r = n_s (1 - s)$ .

De slip  $s$  wordt meestal in percenten uitgedrukt.

*Voorbeeld:* een driefasige inductiemotor met tweepolig uitgevoerde statorwikkeling heeft een rotatiefrequentie van  $2880 \text{ min}^{-1}$  of  $48 \text{ s}^{-1}$ . De daarbijbehorende rotatiefrequentie van het statordraaiveld  $n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$  of  $50 \text{ s}^{-1}$ .

De procentuele slip bedraagt dan:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100 = \frac{50 - 48}{50} \cdot 100 = 4\%$$

of 
$$s = \frac{3000 - 2880}{3000} \cdot 100 = 4\%$$

Bij stilstand van de rotor is  $s = 1$  of  $100\%$ .

Bij synchrone snelheid is  $s = 0$ .

*Slipafhankelijke rotorgrootheden*

– **Grootte van de geïnduceerde rotorspanning  $E_r$**

Omdat de grootte van de geïnduceerde spanning afhankelijk is van de relatieve snelheid van de rotor t.o.v. de rotatiefrequentie van het statordraaiveld kunnen we stellen dat:

$$E_r = s \cdot E_{r0}$$

met  $E_{r0}$  de geïnduceerde spanning bij geblokkeerde rotor.

– **Frequentie van de rotorstromen  $f_r$**

Omdat de frequentie van de geïnduceerde rotorspanning afhankelijk is van de relatieve snelheid van de rotor t.o.v. de rotatiefrequentie van het statordraaiveld is het vanzelfsprekend dat de frequentie van de rotorstromen ( $f_r$ ) eveneens afhankelijk is van de slip.

De frequentie van de rotorstromen:

$$f_r = s \cdot f_s$$

met

$f_s$  : de frequentie van het voedende net

$f_r$  : de frequentie van de rotorstromen

– **Inductieve reactantie van de rotor  $X_r$**

De inductieve reactantie van de rotor wordt mede bepaald door de rotorfrequentie ( $f_r$ ) en is bijgevolg ook slipafhankelijk.

$$X_r = \omega_r \cdot L = 2 \pi f_r \cdot L$$

met

$$f_r = s \cdot f_s$$

is

$$X_r = 2 \pi f_s \cdot s \cdot L = s \cdot \omega_s \cdot L = s \cdot X_{r0}$$

met

$X_{r0}$ : de inductieve reactantie van de rotor bij netfrequentie (stilstand)

$L$ : de lekinductantie van de rotor

– **Faseverschuivingshoek tussen rotorstroom en rotorspanning  $\varphi_r$**

Aangezien de inductieve reactantie van de rotor ( $X_r$ ) slipafhankelijk is, is ook de faseverschuiving tussen rotorstroom en rotorspanning slipafhankelijk.

$$\operatorname{tg} \varphi_r = \frac{X_r}{R_r} = \frac{s \cdot X_{r0}}{R_r} = s \cdot \operatorname{tg} \varphi_{r0}$$

De hoek  $\varphi_r$  is ook de verschuivingshoek tussen rotorstroom en statordraaiveld.

– **Ontwikkeld koppel**

Het ontwikkelde koppel hangt af van de verschuivingshoek tussen rotorstroom en statordraaiveld. Rotorstroom en statordraaiveld kunnen nooit op hetzelfde tijdstip maximaal zijn. De grootte van het ontwikkelde koppel is dus slipafhankelijk.

### 3.5 Elektrisch vervangschema van de driefasige asynchrone inductiemotor (equivalente keten)

**Doelstellingen**

- Het elektrische vervangschema van een asynchrone motor samenstellen en de herkomst van de samenstellende componenten toelichten.
- Uit het elektrische vervangschema de voornaamste karakteristieken van de inductiemotor afleiden.

*Samenstellen van de equivalente keten*

Omdat we in de principewerking van de driefasige asynchrone inductiemotor de transformatorwerking herkennen, vertrekken we voor het opstellen van de equivalente keten van de equivalente keten van de transformator.

De statorwikkeling speelt hier immers de rol van de primaire, de rotor speelt de rol van secundaire. Beide wikkelingen zijn gekoppeld door de magnetische flux die hier in de

vorm van een draaiveld aanwezig is. De verhouding  $\frac{E_s}{E_r} = k$  is de transformatieverhouding van de motor. Een weergave van een *mogelijke equivalente keten* zien we in fig. 143a.

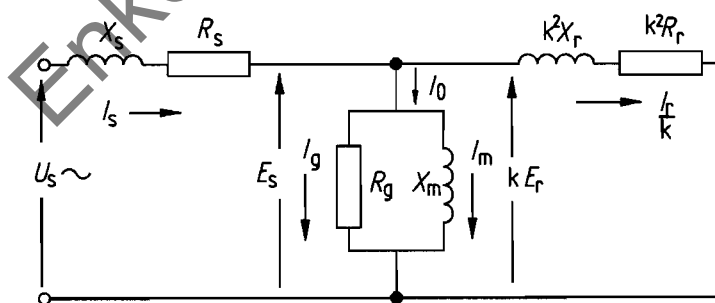


fig. 143a

$R_s$  en  $X_s$  zijn de gelijkstroomweerstand en de lekreactantie van de stator,  $X_m$  de reactantie doorlopen door de magnetiserende stroom ( $I_m$ ) en  $R_g$  de weerstand die de magnetische verliezen vertegenwoordigt.

$R_r$  en  $X_r$  zijn de gelijkstroomweerstand en de reactantie van de rotorwikkeling per fase.

Om de berekeningen eenvoudiger weer te geven stellen we in wat volgt de transformatieverhouding van de motor  $k = 1$ . De equivalente keten van fig. 143a wordt dan weergegeven zoals in fig. 143b.

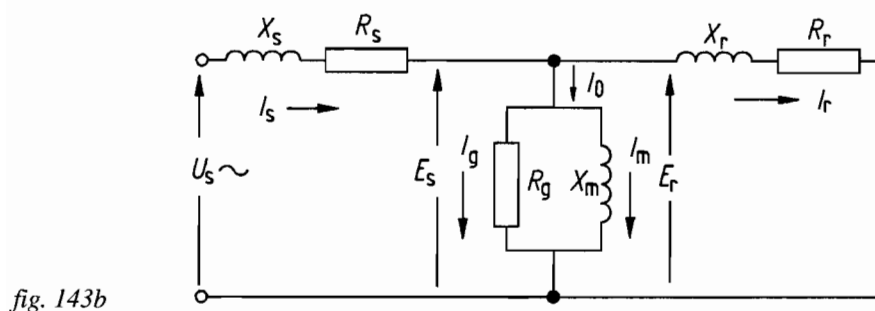


fig. 143b

De rotorstroom (per fase)  $I_r = \frac{E_r}{\sqrt{R_r^2 + X_r^2}} = s \cdot \frac{E_{r0}}{\sqrt{R_r^2 + (s \cdot X_{r0})^2}}$

Door omvorming van de formule (teller en noemer delen door  $s$ ) krijgen we de volgende vorm:

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

Met het oog op het samenstellen van de equivalente keten is de interpretatie van deze formule als volgt:

- De rotor gedraagt zich als een serieschakeling van een constante reactantie ( $X_{r0}$ ) en een veranderlijke gelijkstroomweerstand  $\frac{R_r}{s}$  aangesloten op een constante spanning  $E_{r0}$  (rotorspanning geïnduceerd bij geblokkeerde rotor).

Deze interpretatie levert ons de equivalente keten van fig. 144 op.

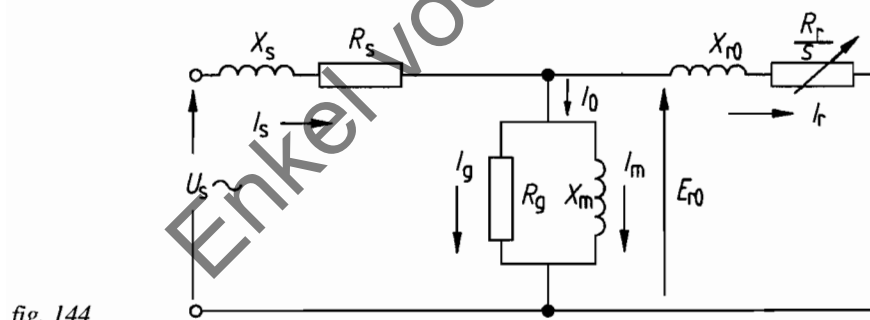


fig. 144

We beklemtonen dat dit schema het resultaat is van wiskundige omvormingen en bijgevolg niet meer overeenstemt met de fysische realiteit.

#### Analyse van het rotorvermogen

Het totale actieve vermogen door de rotor omgezet is volgens de keten van fig. 144 gelijk aan:

$$P_{\text{rotor}} = \frac{R_r}{s} \cdot I_r^2 \quad (\text{W})$$

Dit rotorvermogen is samengesteld uit enerzijds een jouleverlies  $P_{jr} = R_r \cdot I_r^2$  en anderzijds uit het mechanisch vermogen ( $P_{as}$ ) dat beschikbaar komt op de as van de motor. (In deze berekening verwaarlozen we de ijzerverliezen in de rotor omdat de rotorfrequentie  $f_r = s \cdot f_s$  zeer klein is bij normale werking.)

Het vermogen ( $P_{as}$ ) dat op de as van de motor beschikbaar komt, is gelijk aan:

$$P_{as} = P_{rotor} - P_{jr} = \frac{R_r}{s} \cdot I_r^2 - R_r \cdot I_r^2 = R_r \cdot I_r^2 \cdot \left( \frac{1-s}{s} \right)$$

Beide actieve vermogens afzonderlijk voorstellen in de equivalente keten is nu mogelijk door twee weerstanden in serie te schakelen waarvan de ene weerstand ( $R_r$ ) het rotorjoulieverlies vertegenwoordigt en de andere weerstand

$$R_r \cdot \left( \frac{1-s}{s} \right)$$

die het vermogen vertegenwoordigt dat beschikbaar komt op de as van de motor .

In fig. 145a is de uiteindelijke equivalente keten weergegeven.

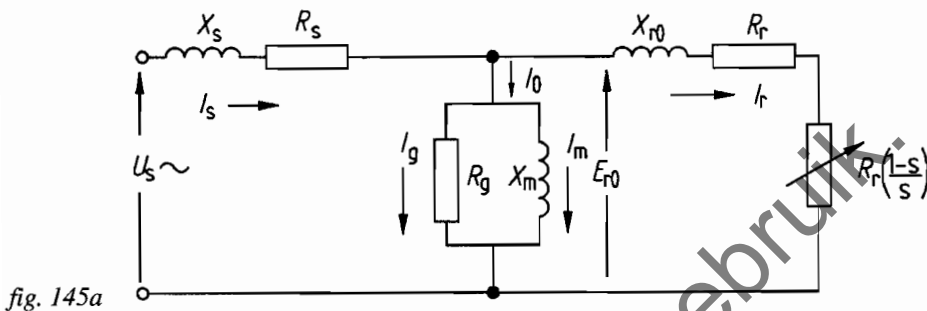


fig. 145a

Omdat de transformatieverhouding meestal niet gelijk is aan de eenheid ( $k \neq 1$ ), moeten we de grootheden van de equivalente keten van fig. 145a aanpassen zoals weergegeven in fig. 145b.

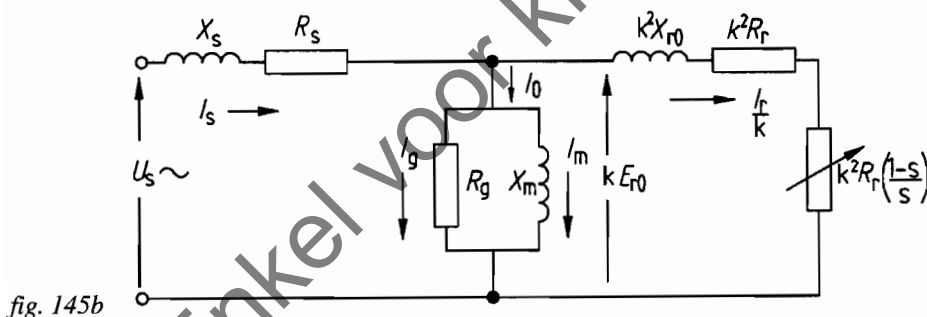


fig. 145b

#### Praktisch gebruik van de equivalente keten

Uit de equivalente keten kunnen we de voornaamste grootheden (per fase beschouwd) van de asynchrone motor bepalen.

- Het uit het net opgenomen schijnbare vermogen van de motor is:

$$S = U_s \cdot I_s \quad (\text{VA})$$

- De respectieve verliezen die optreden in de stator bedragen:

- jouleverlies (koperverlies)  $P_{js} = R_s \cdot I_s^2$

- ijzerverlies  $P_{Fe} = \frac{E_s^2}{R_g}$

- Het elektrisch actieve vermogen dat door de stator effectief wordt overgedragen naar de rotor bedraagt:

$$P_{\text{rotor}} = \frac{R_r}{s} \cdot I_r^2 \quad (\text{W})$$

- In de rotor treedt ook nog een jouleverlies op met waarde  $P_{jr} = R_r \cdot I_r^2$ .
- Het rotorjoule-effect is een deel van het elektrische vermogen door de stator overgedragen op de rotor. Overeenkomstig het rotorvermogen bedraagt het rotorjouleverlies

$$P_{jr} = R_r \cdot I_r^2 = s \cdot \frac{R_r}{s} \cdot I_r^2 = s \cdot P_r$$

- Het elektrisch actieve vermogen (elektromechanisch vermogen) van de rotor bedraagt

$$R_r \cdot \left( \frac{1-s}{s} \right) \cdot I_r^2 = P_r \cdot (1-s)$$

Dit vermogen komt op de motoras ter beschikking.

- Het nuttige over te brengen vermogen van de motor krijgt men ten slotte door het nuttige elektrische rotorvermogen te verminderen met de mechanische verliezen die optreden in de motor.

### 3.6 Koppel-slipkarakteristiek

#### Doelstellingen

- Aan de hand van het vereenvoudigde elektrische vervangschema de formule van het koppel  $T$  overeenkomstig de slip  $s$  afleiden.
- Het grafische verloop  $T = f(s)$  van een inductiemotor toelichten.
- De waarde van het kippkoppel en de slip waarbij het kippkoppel optreedt wiskundig bepalen.
- De invloed van de statorspanning op de waarde van het koppel toelichten.

#### Verband tussen koppel ( $T$ ) en slip ( $s$ )

Met het gebruik van een vereenvoudigd elektrisch vervangschema van een motor (eenfasig beschouwd) is het mogelijk op een voldoende nauwkeurige manier de onderscheiden grootheden van een driefasige inductiemotor te berekenen.

Ter vereenvoudiging verwaarlozen we de gelijkstroomweerstand ( $R_s$ ) en de lekreactantie ( $X_s$ ) van de statorwikkeling. Eveneens stellen we de transformatieverhouding ( $k$ ) van de motor gelijk aan de eenheid. De equivalente keten die we nu krijgen, is voorgesteld in fig. 146.

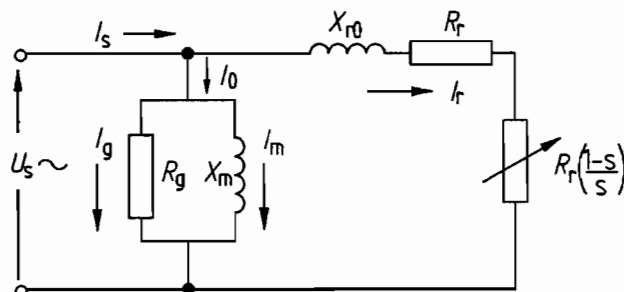


fig. 146

- Het overgedragen elektrische vermogen aan de driefasige rotor

$$P_r = 3 \cdot \frac{R_r}{s} \cdot I_r^2$$

- Het optredende rotorjoule-effect

$$P_{jr} = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2 = s \cdot P_r$$

- Het overblijvende elektrische vermogen noemen we het *elektromechanische* vermogen. Het is gelijk aan:

$$\begin{aligned} P_{em} &= P_r - P_{jr} \\ &= 3 \cdot \frac{R_r}{s} \cdot I_r^2 - 3 \cdot R_r \cdot I_r^2 = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right) \\ &= 3 R_r \cdot I_r^2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \text{ (W)} \end{aligned}$$

Vullen we in deze laatste formule de eerder gevonden waarde  $I_r = \frac{U_s}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{r0})^2}}$

dan wordt het elektromechanische vermogen:

$$\begin{aligned} P_{em} &= 3 R_r \cdot \frac{U_s^2}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{r0}^2} \cdot \frac{1-s}{s} \\ &= \frac{3 R_r \cdot U_s^2 (1-s)}{\frac{R_r^2}{s} + s \cdot X_{r0}^2} \quad (1) \end{aligned}$$

Uit de mechanica weten we dat het elektromechanische vermogen ook nog uitgedrukt kan worden met de volgende formule:

$$P_{em} = T \cdot \omega_r = T \cdot 2\pi \cdot n_r = T \cdot 2\pi \cdot n_s (1-s) \quad (2)$$

Uit de gelijkheid (1) = (2) volgt:

$$T = 3 \cdot \frac{U_s^2}{2\pi \cdot n_s} \cdot \frac{s \cdot R_r}{R_r^2 + s^2 \cdot X_{r0}^2} \quad (3)$$

of

$$T = k \cdot \frac{U_s^2 \cdot R_r \cdot s}{R_r^2 + s^2 \cdot X_{r0}^2} \quad \text{(Nm)} \quad (4)$$

met

$$k = \frac{3}{2\pi \cdot n_s}$$

( $k$  groepeerde de constante termen van de vergelijking.)

Grafisch verloop  $T = f(s)$

Het koppel  $T$  kan grafisch als volgt voorgesteld worden zoals in fig. 147.

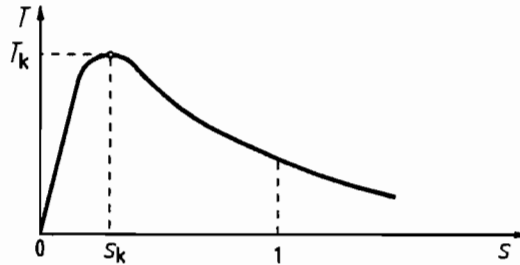


fig. 147

De grafiek  $T = f(s)$  toont een maximumwaarde  $T_k$  van het koppel (ook *kipkoppel* genoemd). De waarde van dit maximumkoppel evenals de waarde van de slip waarbij dit koppel optreedt, kunnen wiskundig gevonden worden.

Door gebruik te maken van hogere wiskunde kan men deze formules afleiden:

$$T_k = k \cdot \frac{1}{2X_{r0}} \quad (5)$$

$$s_k = \frac{R_r}{X_{r0}} \quad (6)$$

met

$$k = \frac{3 \cdot U_s^2}{2\pi \cdot n_s}$$

Uit formule (6) vindt men

$$X_{r0} = \frac{R_r}{s_k}$$

Ingevoerd in formule (5) geeft dit:

$$T_k = k \cdot \frac{1}{2X_{r0}} = k \cdot \frac{s_k}{2R_r} \quad (\text{Nm})$$

De interpretatie van de formules 3, 5 en 6 is zeer belangrijk:

- 1 Uit formule (3) blijkt dat het koppel evenredig is met het kwadraat van de aangelegde spanning.
- 2 Uit formule (5) volgt dat het maximumkoppel  $T_k$  onafhankelijk is van de gelijkstroomweerstand van de rotor  $R_r$ , m.a.w. men kan in de rotorketen gelijkstroomweerstand bijvoegen zonder de waarde van  $T_k$  te beïnvloeden.
- 3 Uit formule (6) volgt dat de slip waarbij het maximumkoppel optreedt, gewijzigd kan worden door de rotorweerstand  $R_r$  te veranderen (bijvoegen van weerstanden in de rotorketen). Door aangepaste keuze van de uiteindelijke waarde van  $R_r$  kan men krijgen dat het maximumkoppel optreedt bij  $s = 1$ , d.w.z. bij het aanlopen van de motor. Tijdens het op snelheid komen van de motor kan men verder, door wijziging van de rotorweerstand, het maximumkoppel behouden gedurende de hele aanlooperperiode (zie verder 3.9.2a).

#### Toelichting

##### Statorlekreactantie

Men kan ook aantonen dat, wanneer rekening wordt gehouden met de statorreactantie  $X_s$ , de formules worden:

$$T_k = k \cdot \frac{1}{2(X_s + X_{r0})} \quad (7)$$

$$s_k = \frac{R_r}{X_s + X_{r0}} \quad (8)$$

*Praktisch gebruik van de grafiek  $T = f(s)$*

Bij deze grafiek tekenen we ook het verloop van een weerstandbiedend koppel  $T_w$ , afkomstig van de belasting (fig. 148).

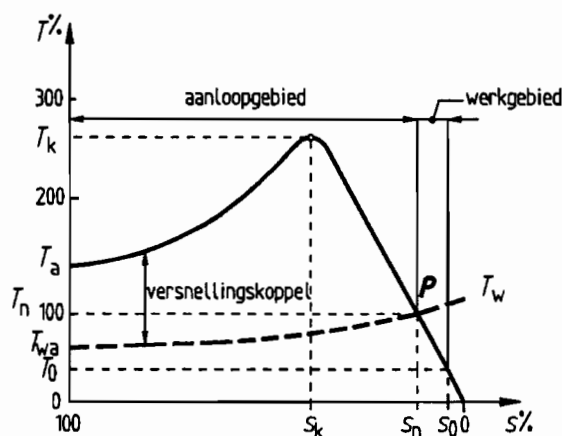


fig. 148

Belangrijke punten hierbij aangeduid zijn:

- $T_a$  : aanlooppkoppel
- $T_{wa}$  : weerstandbiedend koppel bij aanloop
- $T - T_w$  : versnellingskoppel
- $T_k$  : kipkoppel
- $s_k$  : slip waarbij het kipkoppel optreedt
- $T_n$  : koppel bij nominaal bedrijf (100 %)
- $s_n$  : slip bij nominale belasting
- $T_0$  : nullastkoppel
- $s_0$  : nullastslip

Op te merken valt dat om de motor te doen aanlopen en versnellen het aandrijvende koppel ( $T$ ) steeds groter moet zijn dan het weerstandskoppel ( $T_w$ ).

Het nuttige werkgebied van de motor strekt zich slechts uit over een klein slipgebied, nl. tussen 0 en 8 %. In dit gebied verloopt de grafiek praktisch lineair. Bij veranderende belasting verandert de rotatiefrequentie maar weinig. Het gedrag van de asynchrone motor is hierdoor vergelijkbaar met dat van een gelijkstroomshuntmotor. De rotatiefrequentie bij nullast zal de synchrone snelheid van het statordraaiveld benaderen, echter nooit bereiken.

*Toegevoegde fysische verklaring van de koppel-slipkarakteristiek*

**Doelstelling**

- Het verloop van de koppelkromme fysisch verklaren.

In wat voorafgaat, werd de werking van de asynchrone motor verklaard uitgaande van de transformatorwerking. Omwille van de duidelijkheid gingen we ervan uit dat de rotor eveneens een driefasewikkeling bevat, met eenzelfde aantal polen als bij de statorwikkeling. Een groot voordeel van de bewikkelde rotor is dat men een toegevoegde weerstand in de rotorketen kan bijschakelen om het maximumkoppel bij een andere slipwaarde te krijgen.

Om de fysische werking enigszins toe te lichten, gaan we uit van een kooirotor, bestaande uit staven die aan beide einden via een ring kortgesloten zijn (fig. 149).



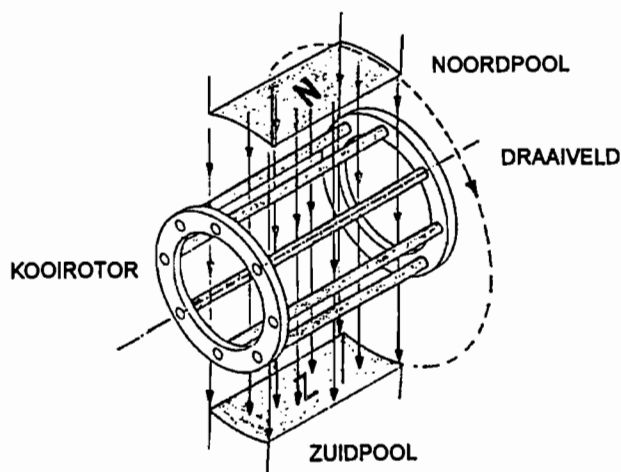


fig. 149

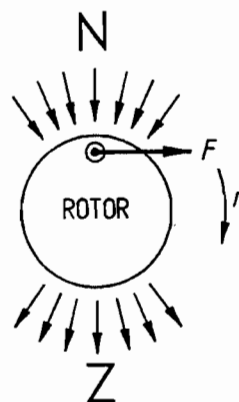


fig. 150

In fig. 150 stellen we één geleider voor die zich in het statordraaiveld bevindt. Bij stilstand van de rotor (geblokkeerde rotor) worden er in de geleider spanningen gegenereerd. Op het moment dat de statorflux maximaal is, zal ook de gegenereerde spanning in de rotor maximaal zijn. De rotor geleiders hebben een gelijkstroomweerstand  $R_r$  en een coëfficiënt van zelfinductie  $L$  waardoor de rotorstroom naaijt op de rotorspanning en dus ook op de statorflux:

$$\tan \varphi = \frac{\omega \cdot L}{R}$$

Op de rotor geleider ontstaat een lorentzkracht  $F = B \cdot l \cdot I_r$  in de zin van het statordraaiveld. Zolang de rotor niet draait, is de frequentie van de rotorstroom gelijk aan de frequentie van de statorstroom en  $X_r = 2 \pi \cdot f_s \cdot L$  is dan maximaal. De faseverschuiving tussen rotorstroom en statorflux zal dus ook maximaal zijn. Het aanzetkoppel zal slechts maximaal zijn als de rotorstroom in fase is met de statorflux. Bij snelheid 0 is dit dus zeker niet het geval. Deze vaststelling is de oorzaak van het kleine aanzetkoppel. Om een krachtig aanzetkoppel te krijgen moet de verschuiving tussen rotorstroom en rotorspanning (statordraaiveld) zo klein mogelijk zijn.

Zodra we de rotor vrijlaten (deblokken), zal hij versnellen. Gevolg daarvan is dat de rotorfrequentie en de faseverschuiving kleiner worden. De rotorstroom komt geleidelijk aan meer in fase met het statordraaiveld, waardoor er een gunstig effect is op het toenemende aanloopkoppel. Naarmate de rotatiefrequentie stijgt, vermindert echter ook de opgewekte spanning in de rotor omdat de rotatiefrequentie waarmee het statordraaiveld de rotor geleiders snijdt, afneemt. Dit zal dan op zijn beurt de stromen in de rotorkooi doen afnemen. Dit verschijnsel doet dan weer het aanloopkoppel verminderen. Beide verschijnselen (afname van  $\varphi$  en  $I_r$ ) hebben op het aanlooppunt een tegengestelde invloed.

Dit verklaart waarom het koppel bij een zekere snelheid een maximumwaarde bereikt. Als de rotor de rotatiefrequentie van het draaiveld zou evenaren, kunnen geen stromen vloeien en wordt het aandrijfkoppel nul.

### 3.7 Vectordiagram

#### Doelstellingen

- Het vectordiagram van een inductiemotor bij nullast toelichten.
- Uit het vectordiagram van een belaste motor het vereenvoudigde vectordiagram afleiden.
- Het cirkeldiagram van een inductiemotor opstellen.
- De nullastproef en de kortsluitproef in verband met het opstellen van het cirkeldiagram uitleggen.
- De equivalente weerstand en de reactantie van een inductiemotor bepalen.
- Het praktische nut van het vereenvoudigde cirkeldiagram verklaren.
- Het verloop van het motorvermogen en het motorkoppel voor verschillende slipwaarden ( $s < 1$ ;  $s = 1$ ;  $s > 1$  en  $s$  negatief) toelichten d.m.v. een cirkeldiagram.

#### 3.7.1 Nullastvectordiagram

We maken gebruik van het vectordiagram van een transformator bij nullast. Bij nullast is de rotatiefrequentie van de rotor bijna gelijk aan de synchrone snelheid. We nemen hier aan dat de rotor synchroon draait ( $s = 0$ ).

Aangezien  $E_r = s \cdot E_{r0}$ , is in dit geval  $E_r = 0$ .

Het vectordiagram wordt als volgt voorgesteld (fig. 151).

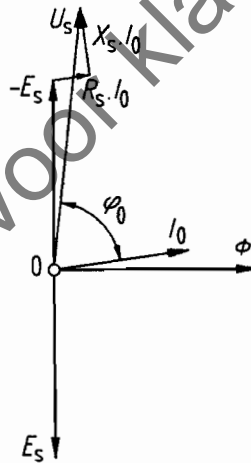


fig. 151

Zoals te verwachten was, is de arbeidsfactor  $\cos \varphi_0$  bij nullast zeer klein.

#### 3.7.2 Vectordiagram van een belaste motor

##### a Vectordiagram

We maken gebruik van het vectordiagram van een belaste transformator.

Vermits  $s$  klein is, is ook de rotorespanning  $E_r = s \cdot E_{r0}$  klein.

De rotorstroom  $I_r$  is daarentegen groot omdat de impedantie van de rotor zeer klein is.

$$I'_s = \frac{I_r}{k}$$

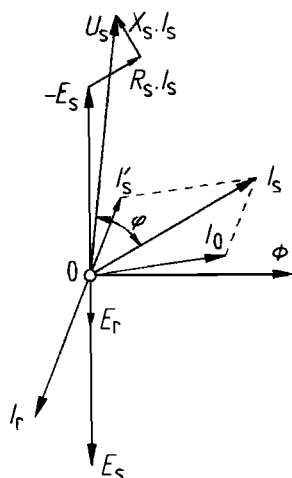


fig. 152

We stellen vast (fig. 152) dat de arbeidsfactor  $\cos \varphi$  beter wordt bij toenemende belasting.

#### b Vereenvoudigd vectordiagram

In feite interesseert ons vooral de spanning  $U_s$  en de stroom  $I_s$  van de stator. Bij verwaarlozing van de ohmse en inductieve spanningsvallen in de stator en rotor krijgt men het onderstaande vectordiagram (fig. 153). Hierbij is  $I'_s$  de stroomcomponent van de statorstroom, veroorzaakt door de toenemende mechanische belasting van de motor.

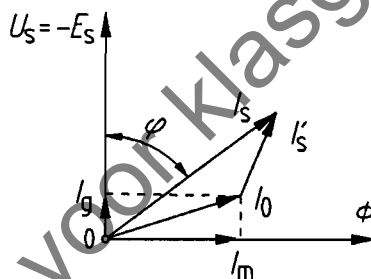


fig. 153

### 3.7.3 Cirkeldiagram

#### a Constructie

We toonden aan dat de equivalente keten van een inductiemotor kan worden beschouwd als de equivalente keten van een transformator waarvan de secundaire elementen bestaan uit een constante reactantie  $X_{r0}$  en een veranderlijke belastingsweerstand  $\frac{R_r}{s}$ .

Wiskundig kan men bewijzen dat de meetkundige plaats van het eindpunt van de statorstroomvector  $I_s$  bij veranderlijke slip  $s$  evolueert langs de cirkelomtrek. We verwaarlozen hierbij de statorimpedantie (fig. 154).

Enkele punten van deze cirkelomtrek kunnen proefondervindelijk bepaald worden:

- een punt a horend bij nullastbedrijf;
- een punt b horend bij vollastbedrijf;
- een punt c horend bij bedrijf met geblokkeerde rotor: kortsluitproef.

Deze drie punten volstaan om de cirkelomtrek te tekenen. Strikt genomen volstaan twee punten, aangezien de ligging van de middellijn gekend is. Het verkregen diagram noemt men *cirkeldiagram* van de stator.

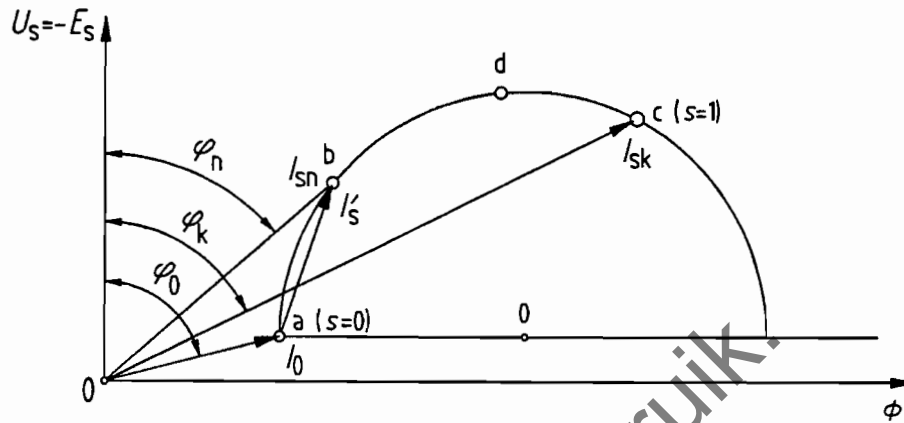


fig. 154

De nullastproef en de kortsluitproef volstaan om de plaats van de cirkelomtrek te bepalen, want het middelpunt van de cirkel ligt op de rechte die evenwijdig met  $\phi$  door punt a ( $s = 0$ ) loopt.

#### Nullastproef

Hierbij wordt de inductiemotor aangesloten op de nominale spanning. We meten het opgenomen vermogen  $P_0$ , de spanning  $U_{Ls}$  en de opgenomen stroomsterkte  $I_{L0}$ .

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{Ls} \cdot I_{L0}} \Rightarrow \varphi_0$$

We hebben nu voldoende gegevens ( $I_0$  en  $\varphi_0$ ) om het eerste punt a te bepalen:  
De jouleverliezen van de statorwikkeling

$$P_{js} = 3 \cdot R_s \cdot I_0^2$$

De opgenomen wrijvings- en ijzerverliezen

$$P_{mech} + P_{sFe} = P_0 - 3 \cdot R_s \cdot I_0^2$$

We verwaarlozen de ijzer- en jouleverliezen in de rotor omdat de rotorstroom ( $I_r$ ) en de frequentie van de rotorstroom zeer klein zijn bij nullast.

Uit de nullastproef kunnen we eveneens de waarden van  $R_g$  en  $X_m$  van de equivalente keten bepalen.

$$R_g = \frac{U_s}{I_g} = \frac{U_s}{I_0 \cdot \cos \varphi_0}$$

$$X_m = \frac{U_s}{I_m} = \frac{U_s}{I_0 \cdot \sin \varphi_0}$$

### Kortsluitproef

Bij de kortsluitproef is de rotor geblokkeerd en de stator wordt op verminderde spanning ( $U_k$ ) aangesloten. De waarde van de aangesloten spanning wordt zodanig geregeld tot de nominale stroomwaarde in de statorwikkeling bereikt wordt. We meten in deze omstandigheden het opgenomen actieve vermogen, de stroom en de spanning. De kortsluitspanning bij asynchrone motoren schommelt naar gelang van het vermogen en de karakteristieken van de machines. De waarde ervan schommelt tussen 12 en 30 % van de nominale statorspanning. Uit deze vaststelling blijkt dat de stroomsterkte bij het aanzetten groot is en ongeveer 3- tot 8-maal de nominale stroomsterkte kan bedragen.

$$\text{Vermits} \quad P_k = \sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_{sk} \cdot \cos \varphi_k$$

$$\text{is} \quad \cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_{sk}}$$

We kennen de waarde van  $I_{sk}$  en  $\varphi_k$  en dus kunnen we punt c van de cirkelomtrek bepalen (fig. 154). Van de cirkel kennen we de middellijn (ao) evenals punten a en c op de omtrek. We kunnen nu de cirkelomtrek tekenen. Bij het belasten van de motor zal het werkpunt b zich over de omtrek naar rechts verplaatsen.

### Toelichting

#### Equivalentente weerstand en reactantie van een inductiemotor

De kortsluitproef wordt toegepast bij verlaagde spanning. Dit brengt mee dat we de ijzerverliezen mogen verwaarlozen. In dit geval gaat het opgenomen vermogen naar het jouleverlies in de stator- en rotorwikkeling. Uit deze meting kunnen we dan een equivalente weerstandswaarde afleiden die de totale jouleverliezen in stator en rotor vertegenwoordigt:

$$R_e = \frac{P_j}{3 \cdot I^2}$$

$$\text{De equivalente impedantie } Z_e = \frac{U}{I}$$

$$\text{en de equivalente reactantie } X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2}.$$

Met deze equivalente elementen kunnen we een equivalente keten opstellen volgens fig. 155.

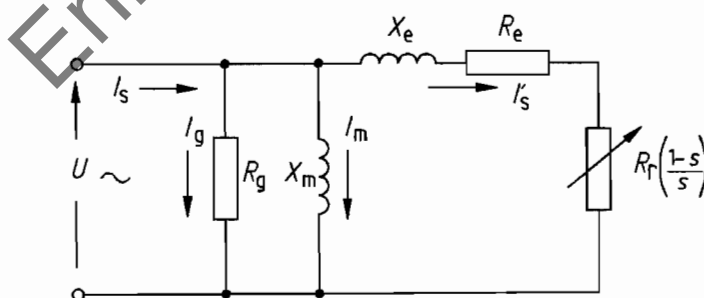


fig. 155

De statorgrootheden die we in het theoretische vervangschema verwaarloosd hadden, zijn nu geïntegreerd in de elementen  $R_e$  en  $X_e$ . Deze benadering geeft in de meeste toepassingen voldoende nauwkeurige resultaten.

#### b Het vereenvoudigde cirkeldiagram

Bij het vereenvoudigde cirkeldiagram wordt de nullaststroom  $90^\circ$  naijlend op de statorspanning getekend. We stellen dus  $I_m = I_0$ . Het cirkeldiagram ziet er dan uit als op fig. 156:

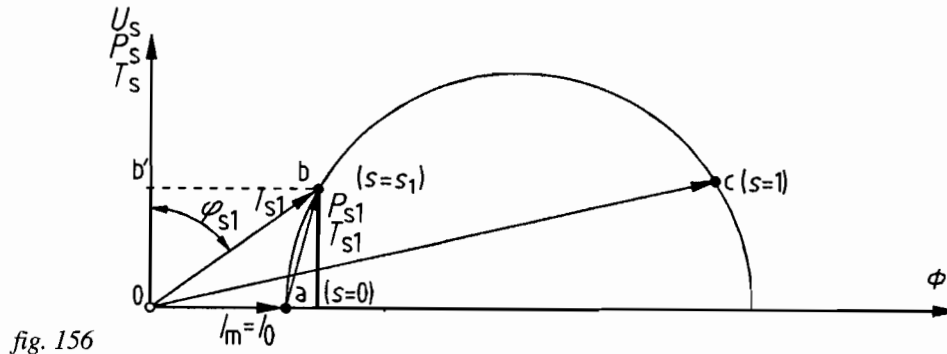


fig. 156

Bij normale werking van de motor verplaatst het uiteinde van de statorstroomvector zich tussen de punten a ( $s = 0$ ) en c ( $s = 1$ ). Het opgenomen vermogen en het koppel van de motor worden, op verschillende schalen, weergegeven door de projectie van  $I_s$  op de  $U_s$ -as. Dit volgt uit

$$P_{s1} = U_{s1} \cdot I_{s1} \cdot \cos \varphi_{s1} = U_{s1} \cdot ob' = k \cdot ob'$$

en  $T = k \cdot P_{s1}$

De loodrechte afstand van het werkpunt op de cirkel tot de  $\phi$ -as is recht evenredig met het opgenomen actieve vermogen  $P_{s1}$  en het ontwikkelde koppel  $T$ .

#### c Uitbreiding vereenvoudigd cirkeldiagram

Op het cirkeldiagram is het mogelijk nog meer grootheden te bepalen en verschijnselen te verklaren. Ter illustratie lichten we aan de hand van fig. 157 een en ander toe.

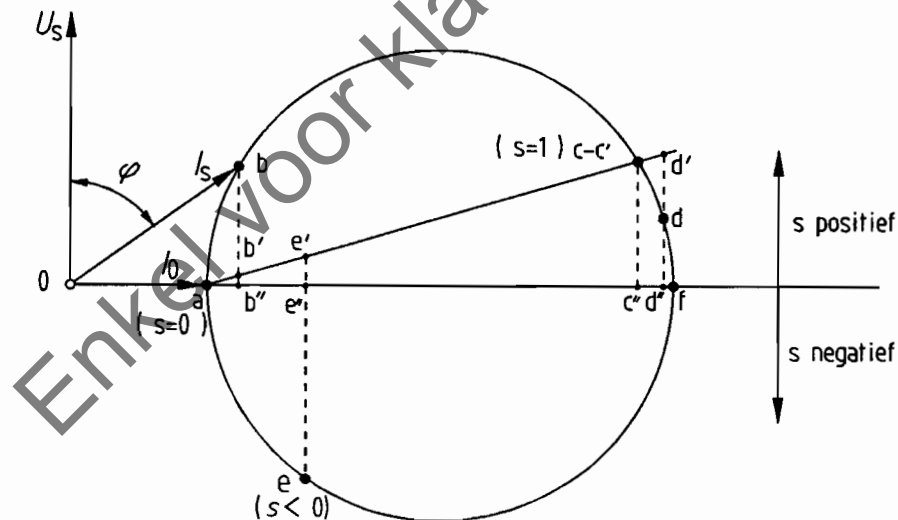


fig. 157

Wanneer de motor wordt belast, zal het werkpunt zich over de cirkelomtrek verplaatsen van a naar c.

Stelt men het toegevoerde elektrische vermogen aan de motor gelijk aan  $P_i$  en het geleverde vermogen aan  $P_{as} = P_n$ , dan kan men het volgende stellen:

#### 1 Vermogen en koppel binnen het gebied $s = 0$ en $s < 1$

*Lijnstuk bb'*: het uit het net opgenomen vermogen (op bepaalde schaal) is tevens het toegevoerde elektrische vermogen  $P_i$ . Op een andere schaal stelt *bb'* eveneens het uitgeoefende draaimoment  $T$  voor.

*Lijnstuk bb'*: het as- of nuttig vermogen van de motor (op schaal)  $P_n$ .

2 *Vermogen en koppel bij slip  $s = 1$  (stilstand)*

Het werkpunt valt samen met punt c: er wordt door het net een vermogen  $P_0$  toegevoerd, maar het asvermogen is nul. Dat is logisch, want de motor draait niet. Het lijnstuk cc'' stelt op schaal het aanloopkoppel  $T_a$  voor.

3 *Vermogen en koppel voor waarden  $s > 1$ , bijvoorbeeld werkpunt in d*

Dit kan enkel wanneer men de draaiende motor in de andere draaizin aandrijft (gebied  $c \rightarrow f$ ).

*Lijnstuk dd'*: het aan de as afgegeven vermogen is negatief, de motor neemt mechanisch vermogen op via de as. Het net levert vermogen dd'' (op schaal) aan de motor.

Deze werking komt overeen met tegenstroomremmen.

Het totale opgeslorpte vermogen wordt in de rotor omgezet in warmte (jouleverlies).

4 *Vermogen en koppel voor waarden  $s < 0$*

Het gedeelte van de cirkel onder de middellijn komt overeen met generatorwerking. De slip  $s$  is dan altijd negatief, d.w.z. de rotatiefrequentie van de rotor is groter dan de synchrone rotatiefrequentie van het statordraaiveld  $n_s$ . Het opgenomen vermogen uit het net, bv. bij werkpunt e: ee'' is negatief; het net ontvangt vermogen. Het asvermogen e'e is eveneens negatief, d.w.z. de motoras wordt aangedreven. In dit geval neemt de motor mechanisch vermogen op en zet dit vermogen om in elektrische energie die teruggestuurd wordt in het net.

Het cirkeldiagram geeft nog meer mogelijkheden om allerlei grootheden af te leiden. Dit vraagt echter een diepgaande studie die hier niet vereist is, omwille van het minder praktisch nut.

### 3.8 Vermogen en rendement

#### Doelstellingen

- De deelverliezen in de stator en rotor definiëren.
- De formule voor het berekenen van het rendement overeenkomstig het toegevoerde vermogen en de optredende deelverliezen bepalen.

#### 3.8.1 Statorvermogens (fig. 158)

Het totale toegevoerde actieve elektrische vermogen bedraagt

$$P_t = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

Het statorkoperverlies bedraagt

$$P_{js} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2$$

Het statorijzerverlies ten gevolge van wervelstromen en hysteresisverliezen stellen we gelijk aan  $P_{sFe}$ .

### 3.8.2 Rotorvermogens

Het vermogen

$$P_r = P_s - (P_{js} + P_{sFe})$$

is het vermogen door het draaiveld overgedragen op de rotor; men noemt dit ook *lucht-spleetvermogen*.

In de rotor treden de volgende verliezen op:

- het rotorkoperverlies met als waarde  $P_{jr} = 3 \cdot I_r^2 \cdot R_r$  of  $P_{jr} = s \cdot P_r$  (al bewezen);
- de rotorijzerverliezen  $P_{rFe}$ : deze verliezen zijn zeer klein en dikwijls verwaarloosbaar omdat de rotorfrequentie zeer klein is bij nominaal bedrijf;
- de mechanische verliezen  $P_{rmech}$ .

Het vermogen dat beschikbaar komt op de as van de motor is het nuttige vermogen:

$$P_{as} = P_n = P_r - (P_{jr} + P_{rFe} + P_{rmech})$$

### 3.8.3 Rendement

Het rendement kan men berekenen met de formule

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_n}{P_t} = \frac{P_t - P_v}{P_t} \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi - P_{js} - P_{sFe} - P_{jr} - P_{rFe} - P_{rmech}}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi} \end{aligned}$$



Schematisch is dit voorgesteld in fig. 158.

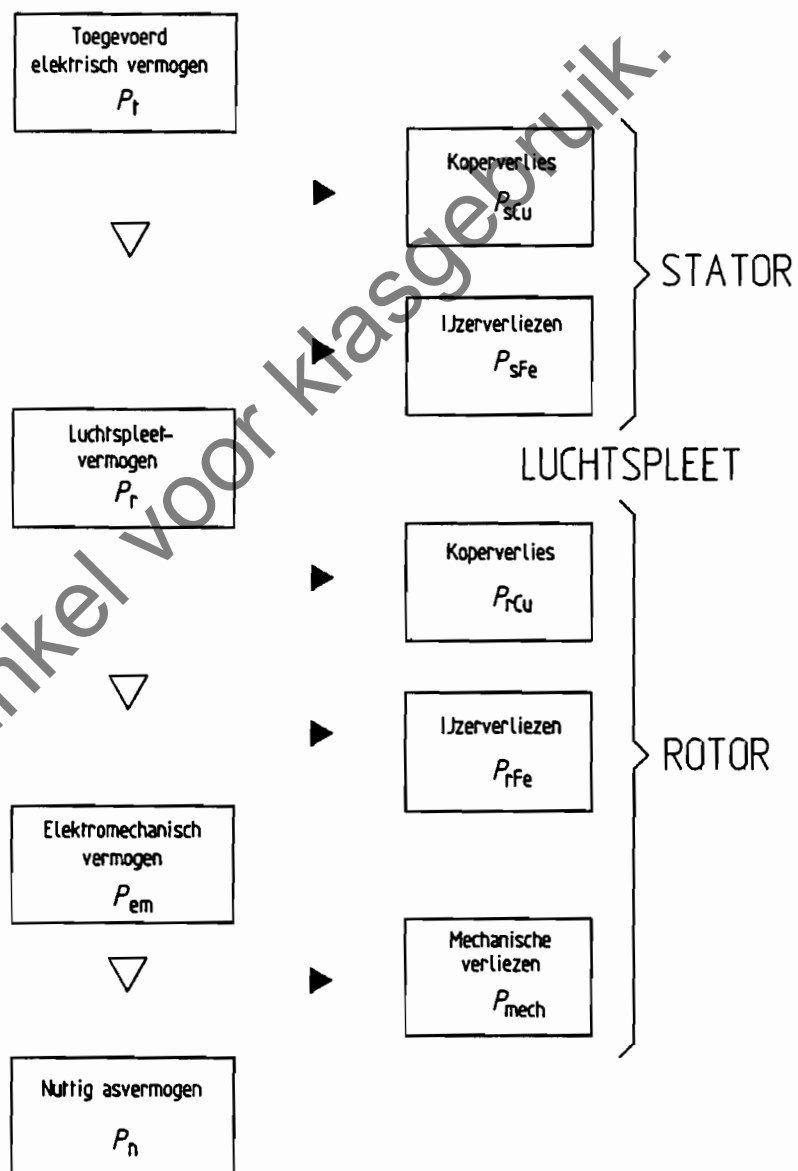
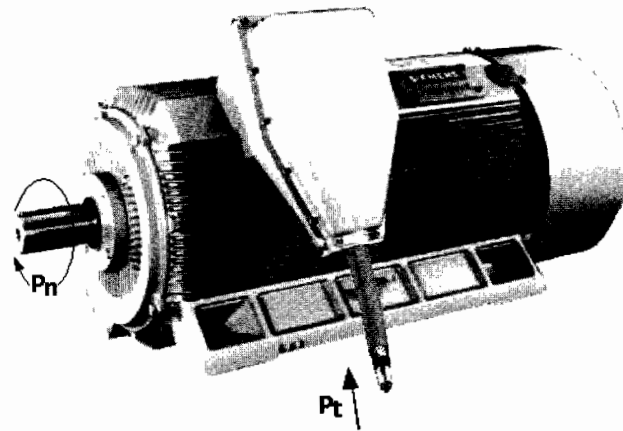


fig. 158

### 3.9 Types van driefasige inductiemotoren

Een driefasige asynchrone inductiemotor is gekenmerkt door:

- de statorspanningen die aansluiting op verschillende voedingsnetten moeten toelaten;
- het rotortype. We onderscheiden motoren met *kortsluitanker* (KA-motoren) en motoren met *bewikkelde rotor* (SA-motoren).

#### 3.9.1 Schakelen van de statorspoelen

##### Doelstelling

- De principeaansluiting van de statorspoelen bij verschillende netspanningen toelichten.

De stator vormt een gelamelleerd siliciumstalen geheel voorzien van gleuven waarin een of meer driefasewikkelingen (twee- of meerpolig) zijn aangebracht (fig. 159).

De statorwikkelingen ontwikkelen het noodzakelijke draaiveld en kunnen op verschillende manieren geschakeld worden. Naar gelang van de schakeling van de statorwikkelingen is het mogelijk de motor (stator) op een of meer netspanningen aan te sluiten. Om herschakelen mogelijk te maken worden de wikkeleinden van de statorspoelen aangesloten op klemmen in een of twee statorklemborden.

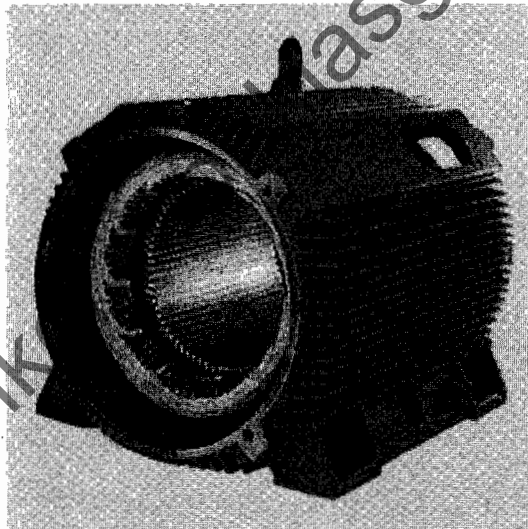


fig. 159

### Motoren geschikt voor één netspanning $U$

Bij deze motoren is de aangepaste schakeling van de statorwikkeling inwendig al verwezenlijkt. Enkel de aansluiting op de overeenstemmende spanning  $U$  moet nog gebeuren. Het betreft een ster (Y)- of driehoekschakeling ( $\Delta$ ) zoals op fig. 160 schematisch (met aanduiding van de naar buiten gebrachte wikkeleinden) is voorgesteld.

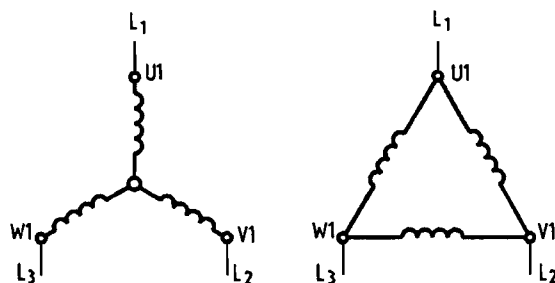


fig. 160

### Motoren geschikt voor twee netspanningen

Het meest gebruikte type is de motor geschikt voor de netspanning  $U$  (statorspoelen in driehoek) en  $\sqrt{3} \cdot U$  (statorspoelen in ster), bv. bij netspanning 220/380 V. De statorwikkelingen worden uitwendig langs het klembord in ster of driehoek geschakeld naar gelang van de waarde van de beschikbare netspanning. In fig. 161a, b, c, d en e is de schematische voorstelling samen met de aansluitwijze weergegeven.

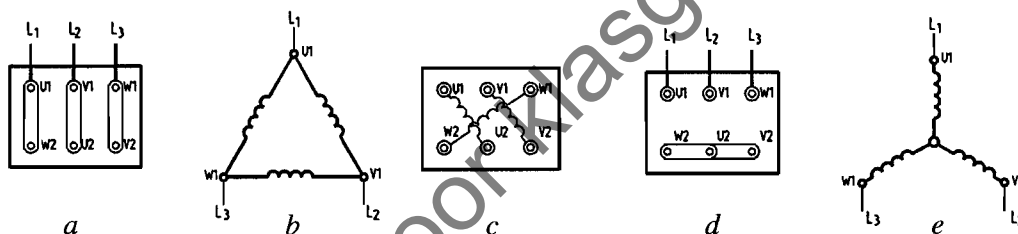


fig. 161

Minder gebruikelijke types zijn de motoren geschikt voor de netspanningen  $U$  (in dubbelster) en  $2U$  (in ster), de netspanningen  $U$  (in driehoek) en  $2U$  (eveneens in driehoek). Voor deze uitvoeringen is een dubbel klembord noodzakelijk. In fig. 162a, b, c en d is de schematische voorstelling weergegeven.

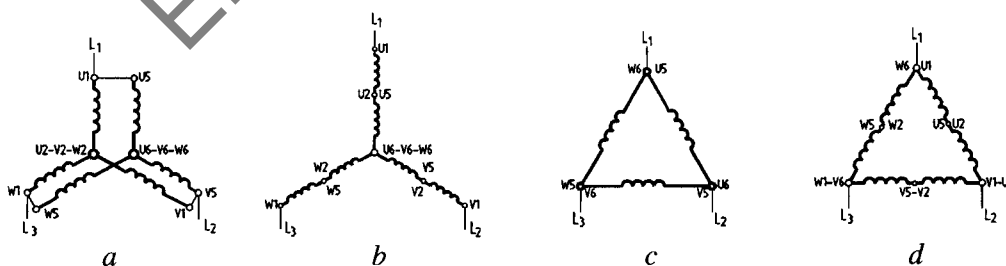


fig. 162

### Motoren geschikt voor meer spanningen

Een voorbeeld van een dergelijke motor is het type geschikt voor de netspanningen  $U$  (driehoek-parallel),  $\sqrt{3} \cdot U$  (dubbelster),  $2U$  (serie-driehoek) en  $\sqrt{3} \cdot 2U$  (serie-ster).

*Voorbeeld:* motor voor spanning 110/190/220/380 V. Ook hier is een dubbel statorklembord noodzakelijk. In fig. 163a, b, c en d is de schematische voorstelling weergegeven.

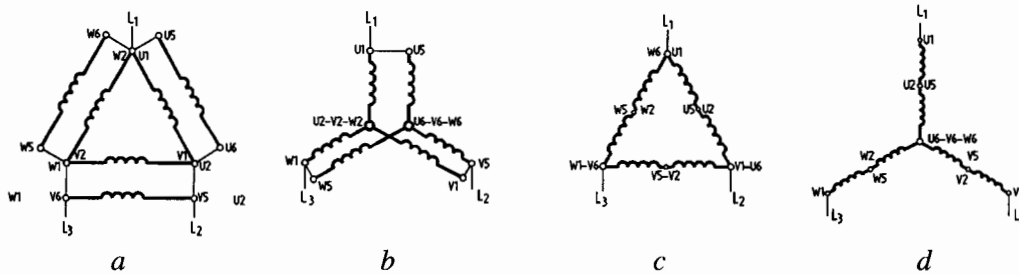


fig. 163

### 3.9.2 Motoren met kortsluitanker (KA-motoren)

Bij kortsluitanker onderscheiden we:

- het enkelkooirotortype;
- het stroomverdringingsrotortype.

#### Doelstellingen

- De samenstelling en werking van de enkelkooirotor van een inductiemotor verklaren.
- De samenstelling en werking van de stroomverdringingsrotor verklaren.
- De voordelen van de stroomverdringingsrotor t.o.v. de enkelkooirotor toelichten.

#### Enkelkooirotortype

Hier is de rotor gelamelleerd, cilindervormig uitgevoerd met siliciumstalen plaatjes met gelijkmatig langs de omtrek verdeelde gleuven waarin de rotorwikkeling (kooi) is aangebracht.

De rotorwikkeling bestaat uit een aantal niet-geïsoleerde koperen staven (eventueel messing, brons of aluminium) die allemaal aan beide uiteinden met elkaar verbonden zijn door kortsluitringen. Vandaar de gebruikelijke benamingen *kooimotor* of *kortsluitanker-motor*.

Bij kleine motoren wordt de rotorkooi in zijn geheel aangebracht door spuit- of centrifugaal gieten van aluminium. De rotorwikkeling vormt aldus een kortgesloten elektrische keten (fig. 164a).

In fig. 164b worden enkele gebruikelijke staafvormen afgebeeld.

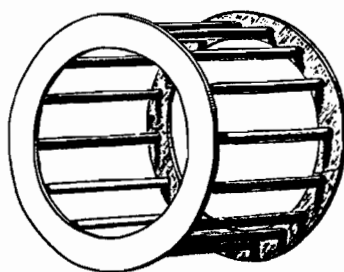


fig. 164a

Enkelkooi zonder blikpakket



fig. 164b

Staafvormen

Als belangrijke eigenschap kunnen we dus vermelden dat het aantal polen van de rotor zich automatisch aanpast aan het aantal polen van het statordraaiveld. Nadeel van dit type motor is wel dat men van buitenaf niet kan ingrijpen op de rotor om de gelijkstroomweerstand van de rotor te wijzigen.

### Stroomverdringingsrotortype

Onder stroomverdringing bij rotoren verstaat men het effect waardoor de stroomdichtheid in de rotor geleiders aan de buitenoppervlakte van de rotor groter is dan naar de rotorhartlijn toe. Stroomverdringing is hier het gevolg van het wijzigen van de inductieve reactantie  $X_r$  van de rotorwikkeling, door het veranderen van de frequentie van de rotorstroom (netfrequentie bij het aanlopen, verminderde frequentie bij het op snelheid komen van de motor) en het toepassen van speciale constructies van de rotorstaven.

Het stroomverdringingseffect wordt versterkt door:

- het uitvoeren van de rotorstaven als hoge, smalle of trapeziumvormig verlopende staven;
- verscheidene concentrische kooiwikkelingen (meestal twee) aan te brengen.

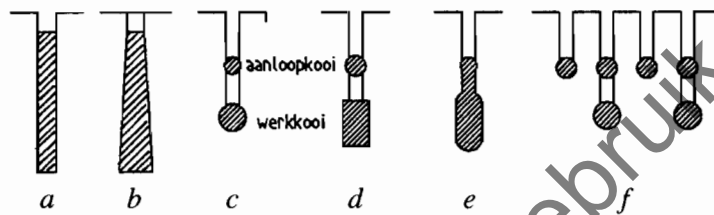
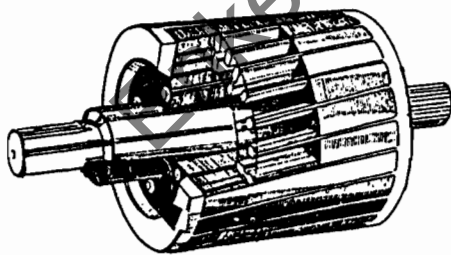


fig. 163

Het eerste type wordt vooral toegepast bij grote kortsluitankermotoren. De stroom bij het aanlopen wordt verdrongen naar de zijde die het dichtst bij het rotoroppervlak ligt. Bij aanloop is de frequentie van de rotorstroom immers gelijk aan de netfrequentie. Naar de buitenkant van de rotorstaaf neemt zijn gelijkstroomweerstand toe, maar vermindert zijn reactantie.

Bij het tweede type worden twee concentrische kooiwikkelingen aangebracht, waardoor deze op elektrisch gebied als in parallel geschakeld beschouwd kunnen worden (figuren 166a en 166b).



Kooirotor

fig. 166a

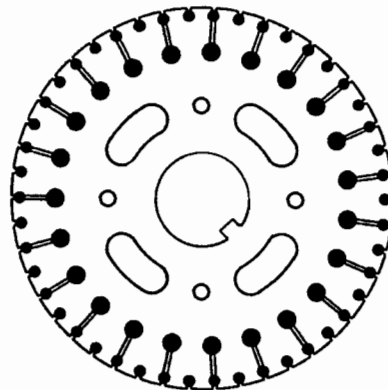


fig. 166b

Men dimensioneert de wikkelingen nu zo dat de doorsnede van de buitenkooi kleiner is dan die van de binnenkooi. De bedoeling hiervan is de gelijkstroomweerstand van de buitenkooi groter te maken dan die van de binnenkooi. Om dit effect te versterken, maakt men soms ook gebruik van kooimateriaal (voor de buitenste kooi) met geringere elektrische geleidbaarheid. Om daarenboven de coëfficiënt van zelfinductie van de buitenkooi te verminderen, wordt soms een luchtspleet tussen beide kooien aangebracht.

Door deze uitvoeringswijze worden de stromen tijdens de aanloop gedwongen overwegend door de buitenkooi te vloeien. Die buitenkooi heeft dan een hogere gelijkstroom-

weerstand en een kleinere reactantie. Daardoor ontstaat een versterkt aanloopkoppel; de verschuiving tussen rotorstroom en statordraaiveld wordt immers kleiner. Na de aanloop speelt de reactantie praktisch geen rol meer en vloeien de rotorstromen hoofdzakelijk door de binnenkooi met geringere gelijkstroomweerstand. Het rotorjouleverlies verkleint hierdoor in grote mate. Uit de werking begrijpt men waarom de buitenkooi de *aanloopkooi* en de binnenkooi de *arbeidskooi* wordt genoemd.

De invloed van respectievelijk binnenkooi en buitenkooi op het resulterende koppel van de motor volgt uit de grafiek van fig. 166c.

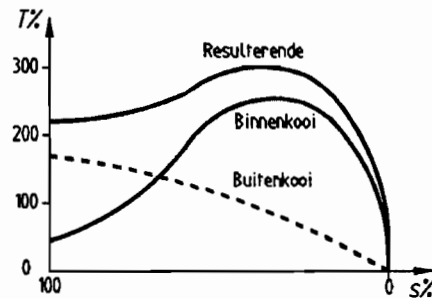


fig. 166c

Een bijkomend voordeel is dat de aanloopstroom wordt verminderd. Door de vorm van de groeven, de afmetingen en de materiaalsoort van de kooiwikkelingen is een grote verscheidenheid van koppel-slipgrafieken mogelijk. De figuren 167a t.e.m. d geven een idee van mogelijke grafieken  $T = f(s)$ .

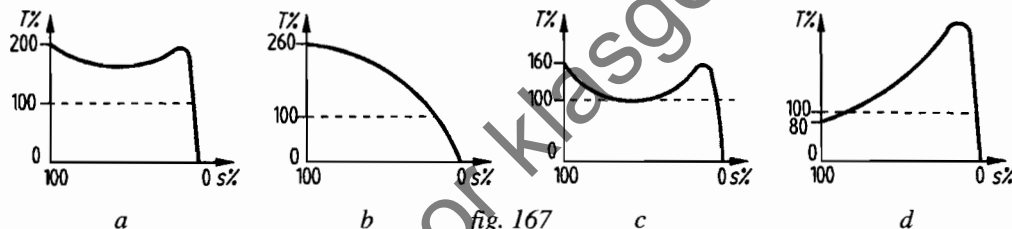


fig. 167

- fig. 167a: normale dubbelkooirotor
- fig. 167b: dubbelkooirotor voor intermitterend bedrijf, hoog aanloopkoppel (liften, kranen)
- fig. 167c: dubbelkooirotor met geringe aanloopstroom
- fig. 167d: laag aanloopkoppel, hoge overbelastbaarheid (centrifugaalpompen)

### 3.9.3 Motoren met bewikkelde rotoren

#### Doelstellingen

- De werking van de sleepringankermotor verklaren en daaruit zijn toepassingsgebied afleiden.
- De werking van de bewikkelde rotor zonder sleepringen en met aanzetweerstand verklaren.

#### a Sleepringankermotor

In tegenstelling tot kooiankermotoren bezitten sleepringankermotoren een bewikkelde rotor. De uiteinden van de driefaserotorwikkeling, twee- of meerpolig, zijn met sleepringen, geplaatst op de rotoras, verbonden (zes in totaal).

Om het aantal sleepringen tot drie te beperken wordt de rotorwikkeling inwendig in ster geschakeld zodat het aantal sleepringen tot drie wordt herleid. Op de sleepringen wrij-

ven koolborstels; langs deze koolborstels om wordt de rotorwikkeling aangesloten op regelbare weerstanden (fig. 168a, b, c).

fig. 168a

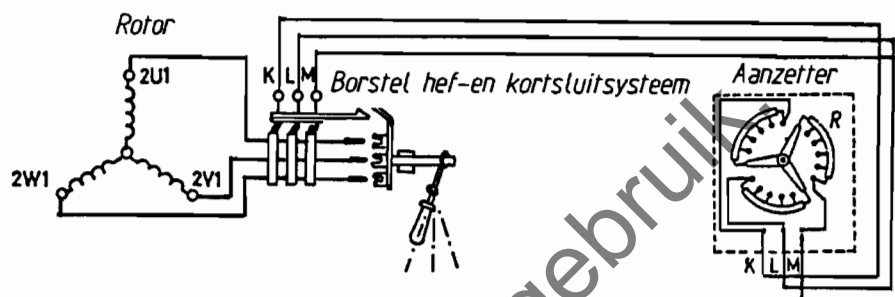
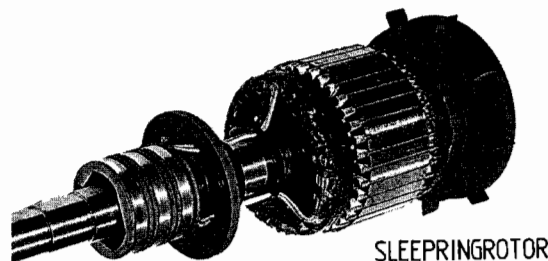


fig. 168b

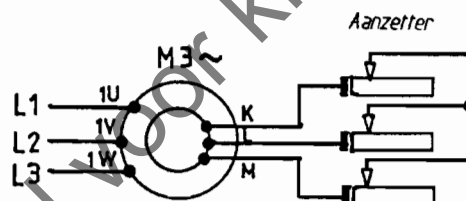


fig. 168c

De motor wordt daarenboven meestal voorzien van een borstelhef- en kortsluitinrichting omdat, na het uitschakelen van de aanzetter, de motor als gewone kooimotor (kortsluitmotor) werkt.

De stator is identiek met die van een kooiankermotor.

De rotoraanzetter biedt de volgende voordelen: men kan de koppelrotatiefrequentiegraafiek van de motor ingrijpend beïnvloeden; immers uit de al vroeger afgeleide formules

$$s_k = \frac{R_r}{X_r} \quad \text{en} \quad T_k = k \cdot \frac{1}{2X_{r0}}$$

blijkt dat men door aanpassing van de rotorweerstand (hier met behulp van de aanzetter) de slipwaarden kan wijzigen waarbij het maximumkoppel (kipkoppel) optreedt. Daardoor kan men zelfs op waarde  $s = 1$ , m.a.w. bij aanloop, deze maximale waarde krijgen. We merken op dat de gelijkstroomweerstand geen invloed heeft op de waarde van het kipkoppel.

Door nu, gedurende de aanloop, de weerstand in trappen (of op een continue manier) uit te schakelen, kan men overgaan op andere grafieken en bereikt men tijdens de totale aanlooperperiode een vrijwel constant koppel ( $\pm T_m$ ): zie fig. 169a en b.

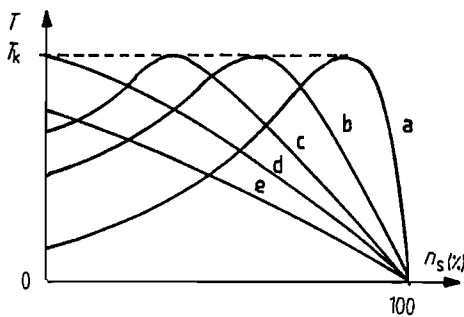


fig. 169a

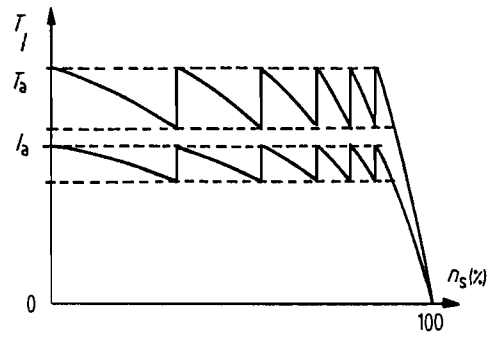


fig. 169b

Het trapsgewijze uitschakelen van de rotorweerstand houdt bovendien in dat de aanloopstroom tijdens die aanlooperperiode praktisch constant blijft. Later zal blijken dat, mits aangepaste aanzetter, ook binnen een beperkt gebied rotatiefrequentieregeling mogelijk wordt.

De sleeppringmotor wordt vooral gebruikt bij grote vermogens en daar waar hogere eisen gesteld worden aan de aandrijving (zachte aanloop, aanloopstroombeperving, hoog aanloopkoppel e.d.).

*b Bewikkelde rotor zonder sleepringen met aanzetweerstand (fig. 170)*

Om de nadelen van de sleepringen met bijbehorende onderdelen te omzeilen, wordt ook een motor vervaardigd met centrifugaalaanzetter. Op de rotor bevindt zich dan een driefasige aanzetweerstand, gekoppeld aan een centrifugaalschakelaar.

Tijdens het op snelheid komen wordt de aanzetter in verschillende trappen automatisch uitgeschakeld. De motor met centrifugaalaanzetter is eenvoudiger wat de bediening betreft. Het volstaat immers de schakelaar te sluiten die de motor met het net verbindt.

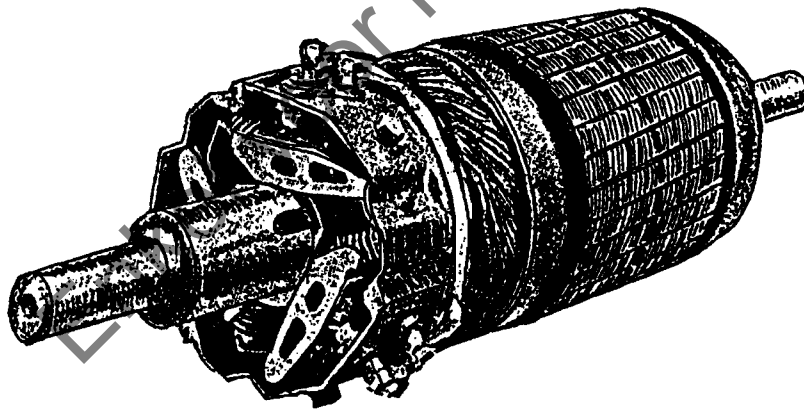


fig. 170

Dergelijke motoren kunnen niet worden gebruikt als de rotatiefrequentie van de machine moet worden geregeld. Omwille van de koeling van de aanzetweerstand zijn deze motoren niet geschikt voor veelvuldig aanlopen. Ook wordt het gebruik afgeraden als er kans op overbelasting is. In dit geval daalt de rotatiefrequentie en kan een deel van de weerstand ingeschakeld blijven. De weerstand loopt dan gevaar te verbranden.



### 3.10 Aanlopen van driefasige inductiemotoren

#### 3.10.1 Algemeenheden

##### Doelstelling

- De verschijnselen toelichten die optreden bij het aanlopen van motoren.

Het aanzetten van een motor geeft aanleiding tot twee toestandsveranderingen: een elektrische en een mechanische.

##### *Elektrische toestandsverandering*

Het *elektrische overgangsverschijnsel* wordt veroorzaakt door het verbinden van oorspronkelijk spanningsloze motorwikkelingen met het net. De motorwikkelingen vormen een driefasige keten met gelijkstroomweerstand en zelfinductie. Het gevolg ervan is het optreden van een grote inschakelstroom die vrijwel onmiddellijk zijn maximale waarde bereikt. De grootte van deze inschakelstroom wordt bepaald door de momentele waarde van de spanning bij het inschakelen. De waarde is het grootst wanneer de inschakeling plaatsheeft net even vóór de amplitudo van de spanning. Hieruit volgt dat bij driefasige machines het schakelmoment voor één fase steeds ongunstig is.

De inschakelstroomstoot is kort (ca. 0,03 s bij  $f = 50$  Hz); hij bedraagt maximaal 8-maal de nominale stroomsterkte van de motor.

##### *Mechanische toestandsverandering*

Het aanlopen heeft slechts plaats als het door de motor ontwikkelde koppel  $T_m$  groter is dan het weerstandsbiedende koppel  $T_w$ . Het momentoverschot  $T_m - T_w$  dient voor het versnellen van de massa's van de bewegende delen, waaronder ook de eigen rotor en de transmissiedelen (fig. 148). Tijdens het versnellen (mechanisch overgangsverschijnsel) is de stroom aanzienlijk groter dan bij nominaal bedrijf. De grootste waarde treedt op na de inschakelstroomstoot; ze bedraagt maximaal 5-maal de nominale motorstroom.

##### *Gevolgen*

Voor alle elektromotoren geldt dat de grote aanloopstroom aanzienlijke aanloopverliezen veroorzaakt die vooral bij een lange aanlooptijd en/of een grote aanzetfrequentie tot ontoelaatbare temperatuursstijging van de motorwikkelingen kan leiden.

De grote inschakelstroom kan daarenboven, bij directe inschakeling op het net, schadelijke mechanische krachten op de wikkelingen uitoefenen. Is bijvoorbeeld de inschakelstroom 8-maal  $I_n$ , dan zijn de elektrodynamische krachten op de spoelkoppes 64-maal zo groot als bij vollastbedrijf.

Verder weten we al dat het ontwikkelde motorkoppel evenredig is met het kwadraat van de aangelegde spanning (formule (3) van paragraaf 3.6).

Naar gelang van de toegelaten waarde van de aanloopstroom en het verlangde aanloopkoppel onderscheidt men verschillende aanzetmethoden.

### 3.10.2 Direct aanzetten van driefasige motoren

#### Doelstelling

- De kenmerken van directe motoraanloop opnoemen.

#### Kooiankermotoren of motoren met kortgesloten rotorwikkelingen

Bij het direct aanzetten van driefasige motoren wordt de motor direct op het net aangesloten. Deze aanzetmethode wordt toegepast bij asynchrone motoren met kortgesloten rotorwikkelingen en bij kooiankermotoren.

Kenmerken van de aanloop zijn een aanloopstroomsterkte variërend tussen 5- à 8-maal de nominale stroomsterkte en een aanzetkoppel ca. 1,5-maal het nominale koppel.

De directe manier van aanzetten heeft enkele *nadeln* die het toepassingsgebied beperken:

- ten opzichte van het voedende net: de grote aanloopstroom veroorzaakt soms een ontoelaatbare spanningsdaling op het net. Ook wordt het vereiste schijnbare vermogen veel groter.
- ten opzichte van het aangedreven werktuig: het versnellende koppel kan te groot worden (brutale aanzet).

Het toepassen van deze methode wordt enkel toegestaan als het motorvermogen niet te groot is (bv. maximaal 1 kW) of wanneer de drijfkracht geleverd wordt via een private transformatorpost. Fig. 171a en 171b geven het verloop van de stroom en het aanzetkoppel tijdens de aanloop.

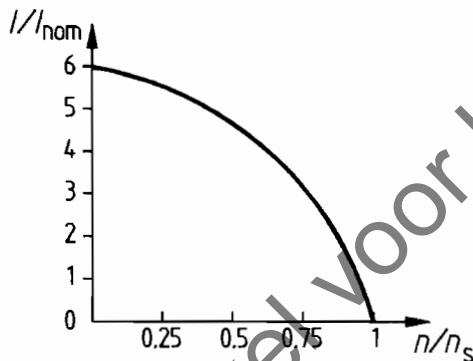


fig. 171a

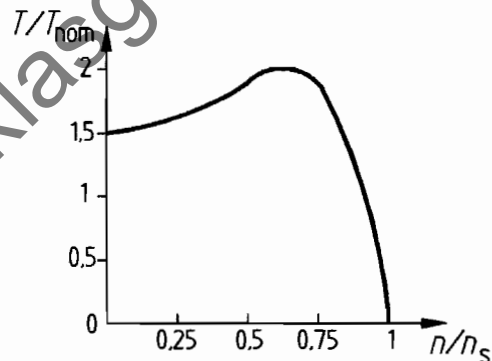


fig. 171b

#### Dubbelkooirotormotoren

Bij dubbelkooimotoren is er aanloopstroombeperking en is bovendien het aanloopkoppel gunstiger dan bij gewone kooimotoren. Deze motoren danken hun bijzondere eigenschappen aan het optreden van stroomverdringingseffect en verschil in eigenschappen van binnen- en buitenkooi. De koppelrotatiefrequentiegrafieken van fig. 172 en 173 verduidelijken de verschillen bij aanloop.

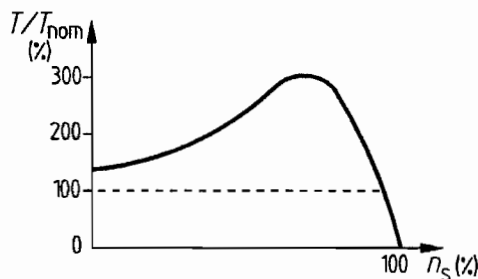


fig. 172

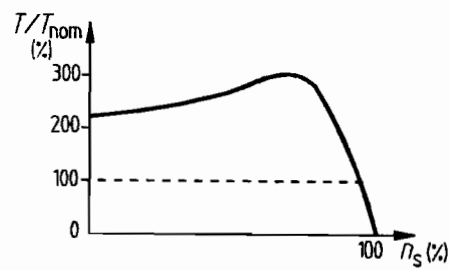


fig. 173

Meestal zijn alle kooimotoren geschikt voor twee netspanningen. Enkel de omschakeling van de staterspoulen moet gewijzigd worden. Bij gebruik is te onthouden dat de laagst vermelde spanning op de motor de maximale én minimale spanning is die op elke motorwikkeling mag en moet staan.

### 3.10.3 Aanzetten van driedfasige inductiemotoren met aanloopstroombeperking

#### Doelstellingen

- De onderscheiden methoden voor het aanzetten van driedfasige inductiemotoren met aanzetinrichting in de statorketen toelichten.
- Het aanzetten van driedfasige inductiemotoren met aanzetinrichting in de rotorketen toelichten.

Bij grotere vermogens wordt altijd aanloopstroombeperking toegepast. De aanloopstroom wordt hierbij beperkt tot bv. 1- à 2,5-maal de nominale motorstroom. De toegepaste systemen van aanzetstroombeperking zijn:

- a aanzetinrichtingen in de stator van de motoren (kooimotoren);
- b aanzetinrichtingen in de rotorketen (sleepingmotoren).

#### a Statoraanzetinrichtingen

Princiepelijk past men verlaging van statorwikkelingspanning toe. Omdat het koppel evenredig is met het kwadraat van de aangelegde spanning volgt hieruit dat het aanzetkoppel vermindert. In sommige gevallen kan dat leiden tot het verplicht onbelast aanlopen van motoren.

##### 1 Met aanzetweerstand in de statorketen

Koppelrotatiefrequentie karakteristiek  $T = f(n)$  (fig. 174)

Aangezien het aanloopkoppel evenredig is met het kwadraat van de spanning op de motorklemmen zal het koppel aanzienlijk verminderen. De motor zal meestal onbelast moeten aanlopen. De aanzetstroomsterkte zal in dezelfde mate als de spanning verminderen.

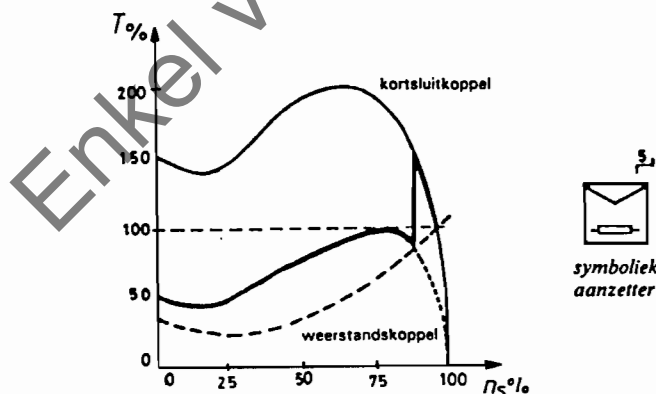


fig. 174

Dit aanzetsysteem veroorlooft een zekere afstelling van het motorkoppel in overeenstemming met het tegenwerkende koppel, evenwel op voorwaarde dat deze afstelling voorzien is bij de constructie van de aanzetter.

De fig. 175 en 176 stellen twee mogelijke uitvoeringen voor.

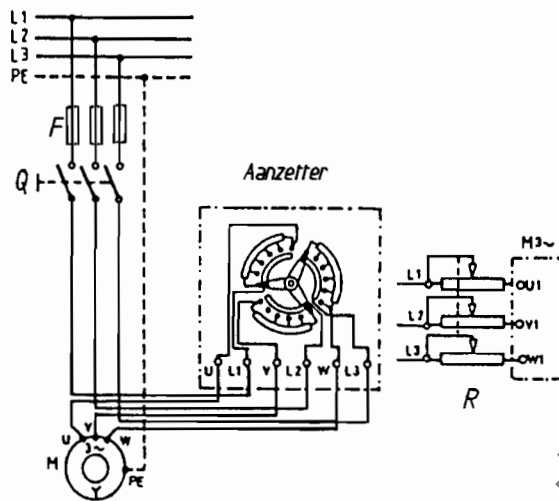


fig. 175

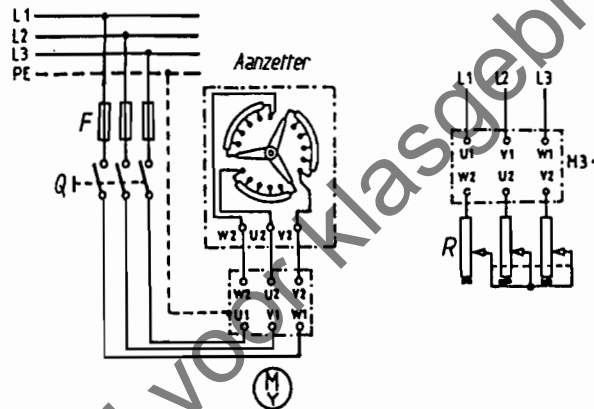


fig. 176

## 2 Met aanzettransformator

Deze methode wordt toegepast bij motoren aangesloten op hoge netspanningen. Hierbij wordt de motor tijdens de aanlooperperiode aangesloten op verminderde spanning, meestal op halve netspanning. De gebruikte transformator is van het type spaartransformator. De koppelrotatiefrequentiegrafiek is aangegeven in fig. 177.

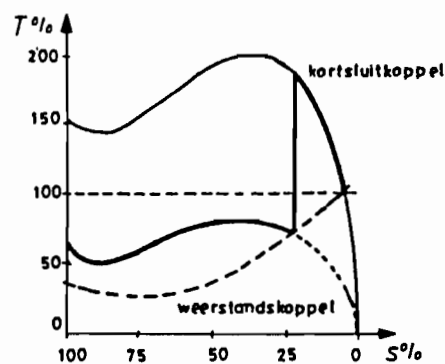


fig. 177

De stroompiek wordt hier sterk beperkt en het koppel is in verhouding tot het kwadraat van de aangelegde spanning. Het aanzetkoppel is normaal aangepast aan het tegenwerkende koppel van het aan te drijven werktuig. Tijdens de aanloop is er geringe aangroei van het koppel. Het is een duur systeem. Enkele voorbeelden van aansluitschema's vinden we in de fig. 178 en 179.

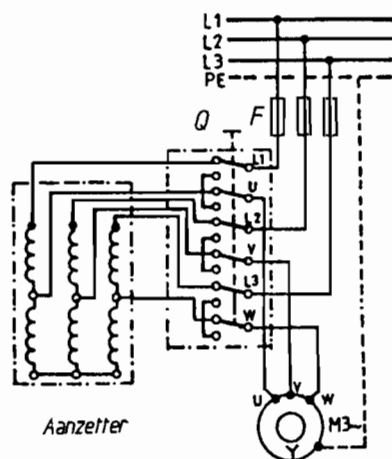


fig. 178

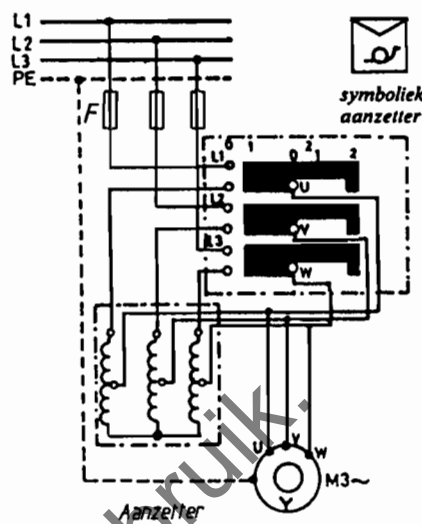


fig. 179

### 3 Met ster-driehoekaanzetter

Bij de aanzetmethode met ster-driehoekaanzetter worden de staterspellen eerst in ster, nadien in driehoek op het net aangesloten (fig. 161). Deze methode is enkel toepasselijk op motoren die normaal in driehoek moeten werken. Omschakeling van ster naar driehoek moet gebeuren wanneer de regimesnelheid praktisch is bereikt.

De lijnstromen bij respectievelijk ster- en driehoekschakeling bedragen:

$$I_{L\Delta} = I_{F\Delta} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{U}{Z} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$I_{L\Delta} = I_{F\Delta} \cdot \sqrt{3} = \frac{U}{Z} \cdot \sqrt{3}$$

We stellen vast dat de lijnstroom bij sterstand 3 keer kleiner is dan bij driehoekstand. Omdat de spanning over de staterspellen bij sterstand  $\sqrt{3}$  keer kleiner wordt dan bij driehoekstand, wordt ook het koppel in sterstand  $(\sqrt{3})^2 = 3$  keer kleiner;  $T$  is immers evenredig met  $U^2$ .

Praktische gevolgen daarvan zijn:

- De aanloopstroom wordt 3 keer kleiner;
- Het aanloopkoppel wordt ook 3 keer kleiner.

Controleer dit bij de volgende uitsnede uit een tabel van motorkarakteristieken.

| vermogen<br>kW | motortype     | bij vollast       |             |               | opgenomen<br>stroom<br>bij 380 V<br>A | $\frac{T_k}{T_n}$ | rechtstreekse aanloop   |                   |                   | Y-Δ-aanloop<br>$\frac{I_d}{I_n}$ |
|----------------|---------------|-------------------|-------------|---------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|
|                |               | min <sup>-1</sup> | $\eta$<br>% | cos $\varphi$ |                                       |                   | $I_d$<br>bij 380 V<br>A | $\frac{T_d}{T_n}$ | $\frac{I_d}{I_n}$ |                                  |
| 11             | AK 160 M 22 N | 2930              | 86          | 0,89          | 22                                    | 2,4               | 132,8                   | 2,6               | 6,1               | 2                                |
| 15             | AK 160 M 32 N | 2925              | 87,5        | 0,88          | 29,4                                  | 2,4               | 181,9                   | 2,7               | 6,2               | 2,1                              |

( $I_d$  en  $T_d$ : aanloopwaarden)

De koppel-snelheidsgrafiek bij ster-driehoekaanloop is weergegeven in fig. 180. De voorgaande bespreking vinden we duidelijk geïllustreerd in het verloop van de karakteristieken.

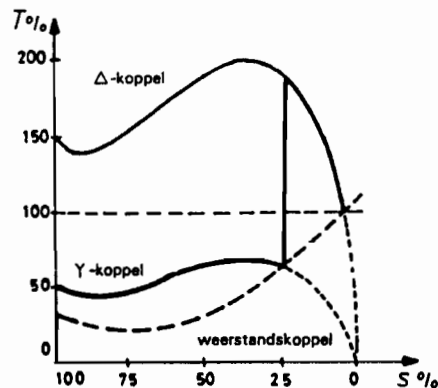


fig. 180

Om geschikt te zijn voor ster-driehoekaanloop moeten de spanningsaanduidingen op de motor aangepast zijn aan de netspanningswaarde, bv. 220 of 380 V.

#### Praktische uitvoeringen van ster-driehoekschakelingen

– met gewone ster-driehoekschakelaars (fig. 181)

De overgang van ster- naar driehoekstand veroorzaakt bij het openen van de statorkring overgangsverschijnselen. Gelijktijdig treedt er een stroom- en koppelpiek op. Om deze redenen wordt het gebruik van een ster-driehoekaanloop soms verboden.

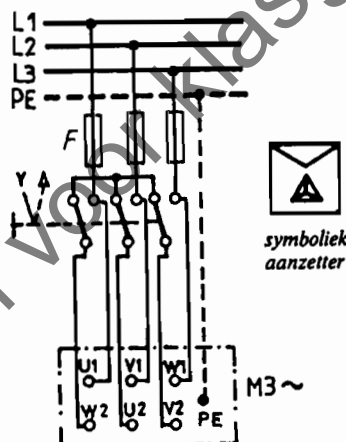


fig. 181

– met speciale ster-driehoekschakelaars

De speciale ster-driehoekschakelaars hebben te maken met ingebouwde omschakelbare veiligheden of schakelaars met tussenstanden. In het laatste geval worden in de tussenstanden weerstanden aan de statorwikkelingen voorgeschakeld, zodat de stroomstoten en de overgangsverschijnselen verkleinen. Dit systeem wordt toegepast bij motoren met groot vermogen.

#### 4 Speciale aanzetinrichtingen in de statorketen

##### Autovariabele automatische aanzetter

Een bijzonder type van statoraanzetter is de autovariabele automatische aanzetter. Het toegepaste principe is de weerstandsverandering van een aangepaste elektrolyt (die een negatieve temperatuurcoëfficiënt bezit) overeenkomstig de temperatuur van de elektrolyt (fig. 182). In tegenstelling tot de gewone aanzetter verloopt de weerstandswaardeverandering op een continue manier (fig. 183).

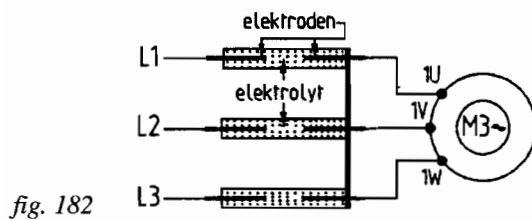


fig. 182

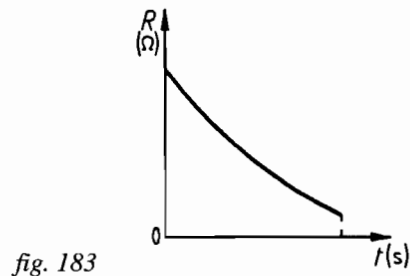


fig. 183

### Softstarter

Principieel vervult de softstarter de rol van spanningsregelaar van de statorwikkeling. Omdat we op de voedingsspanning inwerken, zal ook bij de softstarter het aanloopkoppel relatief klein zijn en de aanloopstroom beperkt (zachte aanloop). De motorspanning wordt bij de softstarter geregeld door in de statorkring gestuurde thyristoren op te nemen. De elektronische besturingseenheid zal de ontstekingshoek voor de faseaansnijding van de voedingsspanning zodanig regelen dat de motorspanning geleidelijk stijgt totdat de maximumwaarde bereikt is (ontstekingshoek  $0^\circ$ ).

De besturingseenheid bevat echter meer:

- Via de controle van de opgenomen stroomsterkte (via bv. stroomtransformatoren) zal de besturingseenheid het gewenste motoraanzetkoppel onder controle houden.
- Ook de aanlooptijd kan via regeling van de parameters in overeenstemming met de belasting ingesteld worden.

Na de aanloop zal de besturingseenheid de vermogenelementen (thyristoren) in de statorkring overbruggen om nutteloze verliezen tegen te gaan.

Een grondige studie van de elektronische besturingseenheid hoort binnen het concept van dit boek niet thuis.

### b Aanzetinrichtingen in de rotorketen

Motoren met aanzetweerstand in de rotorketen zijn alleen mogelijk bij motoren met bewikkelde rotor; de z.g. sleep-ringmotoren. Met behulp van aangepaste rotorweerstand kan men de aanloopstroom beperken én het verloop van het aanloopkoppel beïnvloeden. Door gedurende de aanloop de rotorweerstand in trappen uit te schakelen en dus over te gaan op andere karakteristieken, kan men bereiken dat tijdens de hele aanlooperiode een vrijwel constant en maximaal koppel (fig. 169) optreedt bij een eveneens vrijwel constante aanloopstroom.

Kun je de formules aanhalen die de bovenstaande beweringen bevestigen?

#### 1 Aanzetapparatuur met schakelwals

In fig. 184 is het principeaansluitschema van een aanzetinrichting met weerstanden in de rotorketen weergegeven.

In de fig. 185 en 186 vinden we een uitgewerkt voorbeeld van aanzetapparatuur met schakelwals. De rotorweerstand wordt tijdens de aanloop stapsgewijze uitgeschakeld.

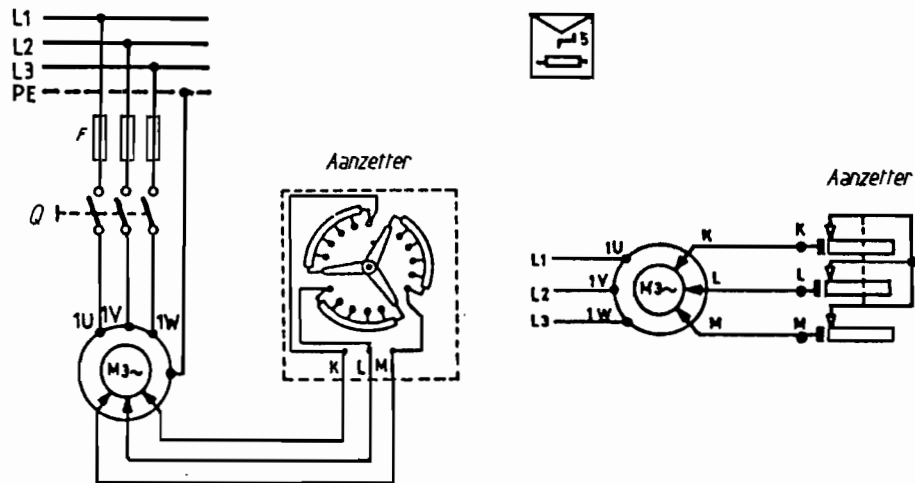


fig. 184

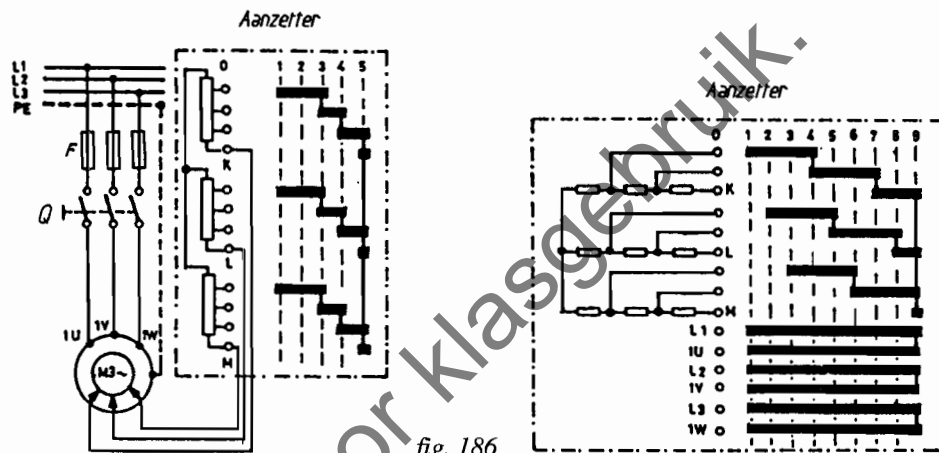


fig. 185

fig. 186

## 2 Autovariabele automatische aanzetter

Bij deze autovariabele automatische aanzetter in de rotorketen wordt de veranderlijke weerstandswaarde verkregen door in te spelen op het verschil in weerstandswaarde van een elektrolyt in koude, warme of gasvormige toestand.

Het grote voordeel van deze aanzetter is dat de weerstandsverandering in de rotorketen op een continue manier gebeurt.

In de fig. 187 en 188 zijn respectievelijk het aansluitschema van de aanzetter en het verloop van de weerstandswaarde  $R = f(t)$  in de rotorketen weergegeven.

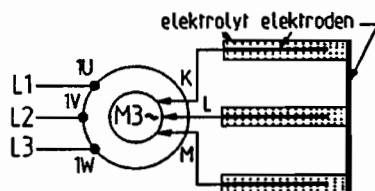


fig. 187

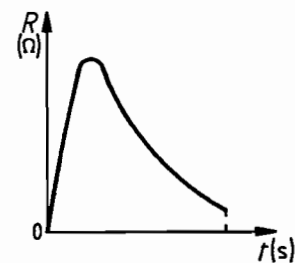


fig. 188



### 3.11 Regeling van de rotatiefrequentie bij driefasige inductiemotoren

#### 3.11.1 Principiële snelheidsregelmethoden

##### Doelstellingen

- Uit de formules de factoren bepalen die de rotatiefrequentie kunnen wijzigen.
- De principewerking van snelheidsregeling door pooltalomschakeling toelichten.
- De verschillende bedrijfsuitvoeringen van de Dahlandermotor met hun respectieve schakelingen toelichten.
- De snelheidsregeling door wijziging van de slipwaarde met behulp van de aangelegde spanning uitleggen.
- De snelheidsregeling door wijziging van de slipwaarde met behulp van rotorweerstand uitleggen.
- De snelheidsregelmethoden door wijziging van de netfrequentie uitleggen.

Uit vroeger bestudeerde eigenschappen van driefasige inductiemotoren volgden de formules die betrekking hadden op rotatiefrequenties:

De slip  $s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \Rightarrow$  de rotatiefrequentie  $n_r = n_s \cdot (1 - s)$

met  $n_s = \frac{f_s}{p}$  wordt de rotorrotatiefrequentie  $n_r = \frac{f_s}{p} \cdot (1 - s)$

Hierin is

$n_s$ : de rotatiefrequentie van het statordraaiveld (in  $s^{-1}$ )

$n_r$ : de rotatiefrequentie van de rotor (in  $s^{-1}$ )

$f_s$ : de frequentie van het voedende net (in  $s^{-1}$  of Hz)

$s$ : de slip

$p$ : het aantal poolparen

Uit deze laatste formule leiden we af dat de wijziging van de rotorrotatiefrequentie verkregen kan worden door:

a de wijziging van het aantal poolparen;

b de wijziging van de slip;

c de wijziging van de netfrequentie.

##### a Wijziging van het aantal poolparen

###### 1 Principe

Twee motortypes passen pooltalwijziging toe: motoren waarvan de stator uitgevoerd is met gescheiden wikkelingen en de z.g. Dahlandermotoren.

*Motoren met gescheiden wikkelingen* laten twee, drie of vier rotatiefrequenties toe. De wikkelingen met verschillend poolpaartal zijn inwendig meestal in ster geschakeld zodat bij een motor met twee snelheden slechts zes aansluitklemmen naar buiten worden gebracht (fig. 189).

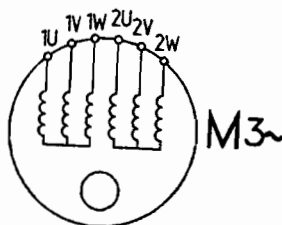


fig. 189

De snelheidsverhoudingen zijn:  $\frac{p_1}{p_2}$  waarin  $p$ : aantal poolparen.

Willekeurige snelheidsverhoudingen kunnen verkregen worden.

Bij *Dahlandermotoren*, waarbij slechts één (gedeelde) wikkeling wordt gebruikt, kan men door de wikkelingshelften op een bepaalde manier te schakelen twee snelheden krijgen. De snelheidsverhouding bedraagt daar steeds 1/2.

Een combinatie van Dahlanderwikkeling en gescheiden wikkeling is mogelijk.

Pooltalomschakelbare motoren worden gebruikt waar discontinue snelheidsvariëaties vereist worden met aanzienlijke verschillen in rotatiefrequentie.

## 2 Praktische pooltalomschakelbare motoren

Voorziet men bij een driefasige inductiemotor de statorwikkeling van aftakkingen of wordt de stator uitgevoerd met verscheidene statorwikkelingen, dan kan men verschillende pooltallen vormen waardoor, met aangepaste hulpschakelingen, pooltalomschakeling verkregen wordt. Op deze manier kan men voor eenzelfde motor twee of meer rotatiefrequenties krijgen. Voor de synchrone snelheid  $n_s$  geldt immers

$$n_s = \frac{f_s}{p}$$

Verandering van pooltal moet altijd gebeuren in de stator- en rotorwikkeling van de motor. Bij kooiankermotoren vervalt deze eis echter, omdat het poolpaartal van de rotor zich automatisch aanpast aan het poolpaartal van de stator.

Praktisch gebeurt het pooltalomschakelen op de volgende manieren:

- Bij gebruik van elektrisch van elkaar gescheiden wikkelingen met verschillend poolpaartal:  
Tijdens de werking is slechts één wikkeling in gebruik. De rotatiefrequentieverhoudingen van de motor zijn afhankelijk van de poolpaartallen, bv. 1/2, 1/3, 1/4 enz.
- Bij gebruik van een *Dahlanderwikkeling* bij kooiankermotoren:  
De Dahlanderwikkeling bestaat uit twee identieke wikkelhelften die in serie of in parallel kunnen worden geschakeld. De mogelijke schakelwijzen noemt men: ster-, driehoek- en dubbelsterschakeling (fig. 190).

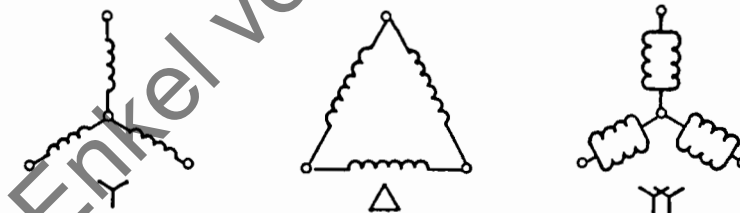


fig. 190

Pooltalomschakeling gebeurt door omkering van de stroomzin in één van de wikkelhelften, zodat het aantal polen wordt verdubbeld. Hieruit volgt dan ook dat de pooltalverhouding en de rotatiefrequentieverhouding altijd 1/2 bedragen.

Een voorbeeld van de stroomverdeling en het aantal polen in een eenfasewikkeling bij een Dahlandermotor met resp. 2 en 4 polen is te zien in fig. 191.

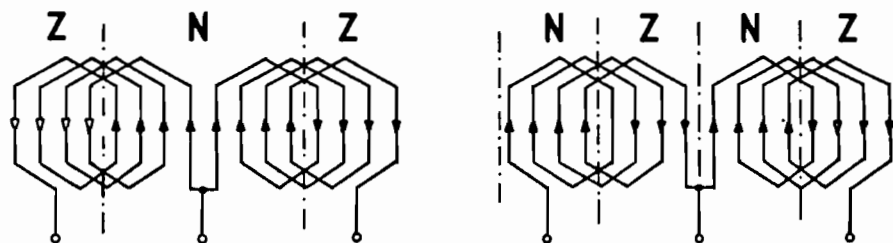


fig. 191

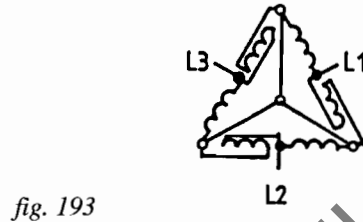
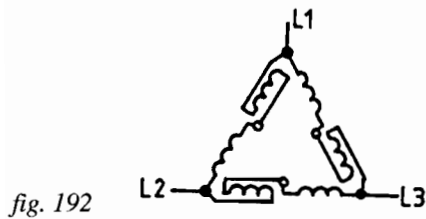
Dahlandermotoren komen voor in drie bedrijfsuitvoeringen:

- met ongeveer gelijk koppel bij beide rotatiefrequenties (fig. 192 en 193);
- met ongeveer gelijk vermogen bij beide rotatiefrequenties (fig. 194 en 195);
- met kwadratisch met de rotatiefrequentie variërend koppel (fig. 196 en 197).

De schakelwijze bij respectievelijk lage en hoge snelheid is hierbij verschillend. De figuren 192 t.e.m. 197 geven schematisch een overzicht van de verschillende bedrijfsuitvoeringen en hun respectieve schakelingen bij lage en hoge rotatiefrequentie.

– *Schakeling met ongeveer gelijk koppel*

De schakelwijze is driehoeksschakeling bij lage snelheid, dubbelsterschakeling bij hoge snelheid (fig. 192 en 193).

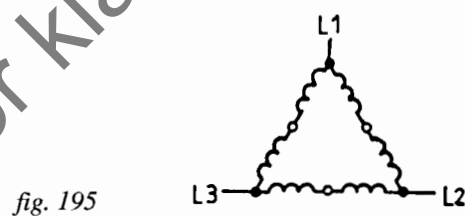
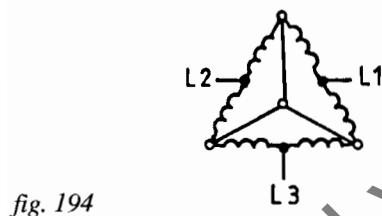


De vermogenverhouding bedraagt 1/1,5 à 1,8.

Beschikt de motor over negen aansluitklemmen, dan kan de motor bij laag toerental in ster-driehoek aanlopen. De aanloop is dan zacht en er is aanloopstroombeperking.

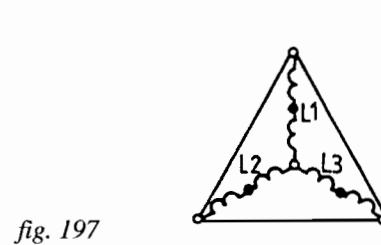
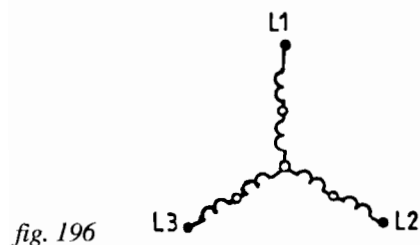
– *Schakeling met ongeveer gelijk vermogen*

De schakelwijze is dubbelster bij lage snelheid, driehoeksschakeling bij hoge snelheid. De vermogenverhouding bedraagt 1/1 (fig. 194 en 195).



– *Schakeling met kwadratisch variërend koppel*

Deze schakeling wordt toegepast bij gebruik van aandrijvingen voor pompen, ventilatoren en compressoren. De schakelwijze is ster-dubbelsterschakeling. De vermogenverhouding bedraagt 0,3/1 (figuren 196 en 197).



### b Wijziging van de slip

Verandering van slip kan op twee manieren verkregen worden: verandering van de aangelegde netspanning of verandering van de rotorespanning.

#### 1 Verandering van de netspanning

Uit de theorie van de asynchrone inductiemotor weten we dat het kippkoppel  $T_k$  evenredig is met het kwadraat van de aangelegde spanning; de kipslip  $s_k$  is onafhankelijk van deze spanning.

Uit de grafiek  $T = f(n)$  volgt dat bij constante belasting  $T_n$  de rotatiefrequentie verkleind kan worden van  $n_s$  (synchrone snelheid) tot de rotatiefrequentie die overeenstemt met de kipslip (fig. 198).

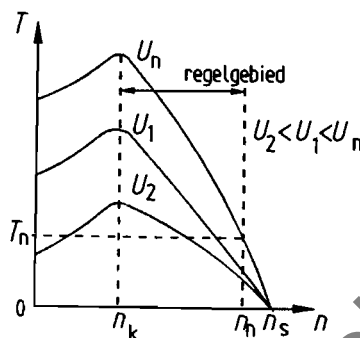


fig. 198

Bij verlaging van de spanning vergroot de gevoeligheid van de snelheidsvariëaties bij belastingsvariëaties.

Vergroten van de kipslip verbreedt de snelheidsvariëatiemogelijkheid (fig. 199).

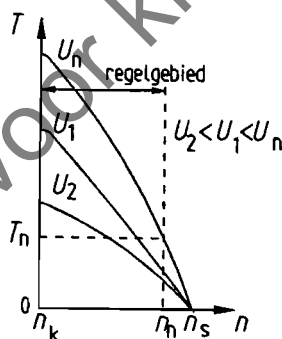


fig. 199

Bij aandrijvingen waarbij het koppel constant blijft, is dit de eenvoudigste methode voor snelheidsregeling. De verliezen die hierbij optreden, zijn echter zeer groot. Omdat het jouleverlies afhankelijk is van de slip ( $P_{jr} = s \cdot P_r$ ) wordt dit jouleverlies bij groter wordende slip groter. Ook het rotorvermogen wordt in dezelfde mate groter. Bij constant blijvende rotorweerstand komt dit neer op verhoging van de rotorstroom, dus ook van de statorstroom en de jouleverliezen in de stator. Deze verliezen treden volledig in de motor zelf op.

Spanningsregeling kan op de volgende manieren verwezenlijkt worden:

- door gebruik te maken van een transformator met verschillende aftakkingen;
- door gebruik te maken van een inductieregelaar;
- door het vergroten van de ontstekingshoek bij het gebruik van thyristorvoeding (fig. 200). Principeel past men bij de thyristorvoeding impulsbreedtemodulatie toe: een bepaald deel van een gelijkspanning (verkregen door gelijkrichting) wordt overgedragen naar een belasting. De verkregen spanning heeft dan een benaderende sinusvorm.

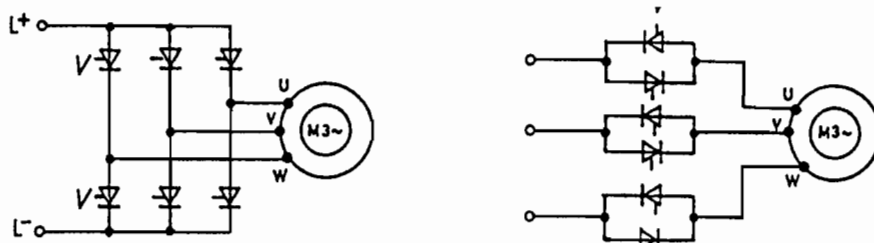


fig. 200

## 2 Verandering van de rotorspanning

Verandering van de rotorspanning kan slechts worden toegepast bij sleepringankermotoren. De eenvoudigste manier om dit te verwezenlijken is een driedfasige rotorvoorschakelweerstand voorzien. (Een aangepaste rotoraanzetter kan deze functie vervullen voorzover hij berekend is voor continu gebruik.)

Zoals vroeger al bleek, blijft het motorkoppel bij het vergroten van de rotorweerstand ongewijzigd terwijl de kipslip vergroot.

Uit de grafieken van fig. 201 volgt dat, bij constant koppel, snelheidsvermindering kan ontstaan door de voorschakelweerstand te vergroten.

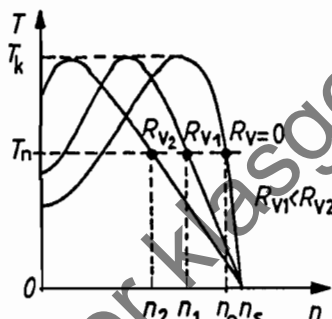


fig. 201

Het blijkt ook dat de gevoeligheid van de rotatiefrequentie voor een koppelwaardeverandering toeneemt bij het vergroten van de weerstandswaarde, terwijl snelheidsvariatie bij kleine koppelwaarden gering is. Hier stijgen, bij constant verondersteld koppel, ook de jouleverliezen. De supplementaire verliezen in de rotor treden echter grotendeels op in de voorschakelweerstand, zodat de temperatuurstijging van de motorwikkelingen minder groot is dan bij statorspanningswijziging.

Bij sleepringankermotoren bestaan ook elektronische systemen voor snelheidsregeling met of zonder terugwinning van de slipenergie.

De bespreking van deze systemen die werken met invertoren en frequentieomzetter valt buiten het kader van deze leereenheid. Dergelijke systemen worden behandeld in het vak vermogenelektronica.

## c Wijziging van de netfrequentie

De netfrequentie bepaalt de rotatiefrequentie van het draaiveld en hierdoor ook de rotatiefrequentie van de motor. Frequentieverandering wijzigt de veldsterkte; de coëfficiënt van zelfinductie  $L$  van de motorwikkeling verkleint (vergroot) immers de inductieve reactantie bij dalende (stijgende) frequentie. De motorstroom en dus ook de magnetisatiestroom vergroot (verkleint). Wil men de veldsterkte constant houden, dan dient men de netvoedingsspanning aan te passen evenredig met de frequentie. *De voedingseenheid moet dus een frequentieregeling én een spanningsregeling omvatten.* (fig. 202b)

Uit de theorie van de inductiemotor weten we dat het koppel onafhankelijk is van de frequentie, zodat ook het verloop van de karakteristiek  $T = f(n)$  ongewijzigd blijft.

Het verloop van de grafiek  $T = f(n)$  wordt getoond in fig. 202.

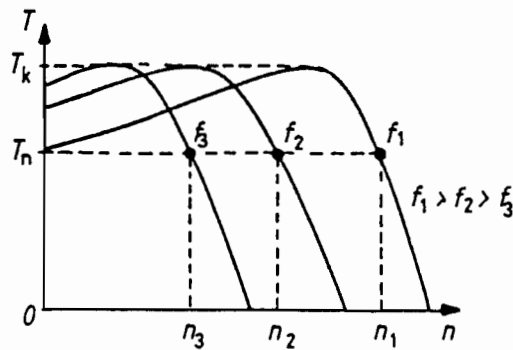


fig. 202a

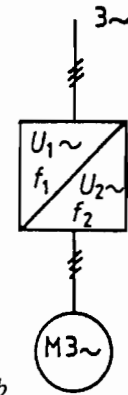


fig. 202b

Belangrijk bij deze manier van snelheidsregeling is wel dat er, voor alle belastingsgeval-  
len, verliesvrije regeling van de rotatiefrequentie mogelijk is: de slipwaarde blijft im-  
mers constant.

#### Toelichting

Frequentieomvormers werken hoofdzakelijk volgens hetzelfde hoofdprincipe: de netvoe-  
ding wordt aangesloten op een gelijkrichter die de wisselstroom (ac) omvormt tot een  
pulserende gelijkstroom (dc). Deze gelijkstroom wordt in een *inverter* omgevormd tot  
een nieuwe wisselstroom met veranderlijke frequentie.

Een schematisch overzicht geeft fig. 203, een meer gedetailleerd beeld tonen de fig. 204  
en 205a. In de tussenkring wordt 'gechopped' (in-uitschakelfunctie) en gefilterd (smoor-  
spoel en afvlakcondensator) zodat een instelbare dc-spanning wordt geleverd aan de in-  
verter die door verandering van de cyclusduur de gelijkstroom omvormt tot een wissel-  
stroom met veranderlijke frequentie. De controle- en regeleenheid vergelijkt de veran-  
derlijke dc-uitgangsspanning met eeningangssignaal en regelt de 'chopperfunctie'.

In fig. 205b ziet men een foto van een frequentiegeregelde inductiemotor.

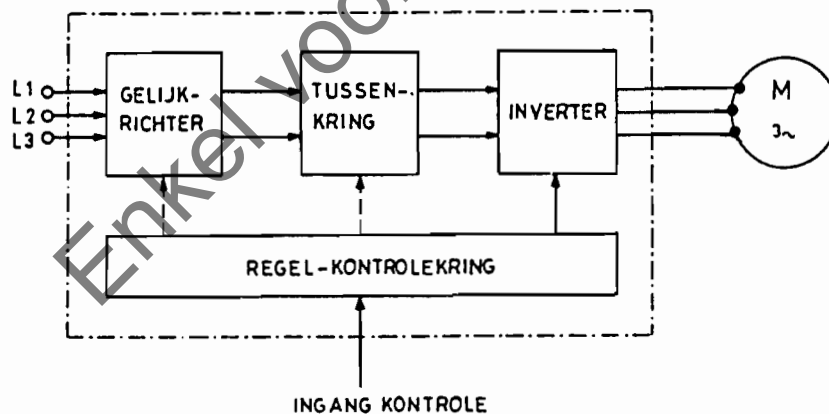


fig. 203

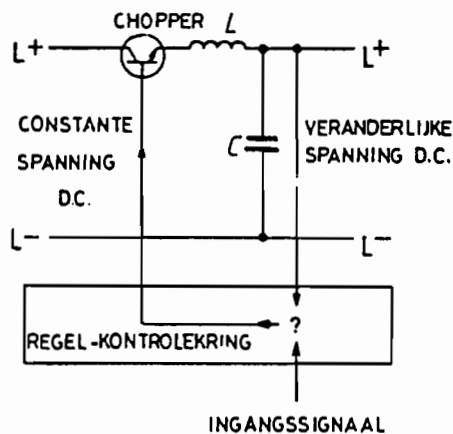


fig. 204

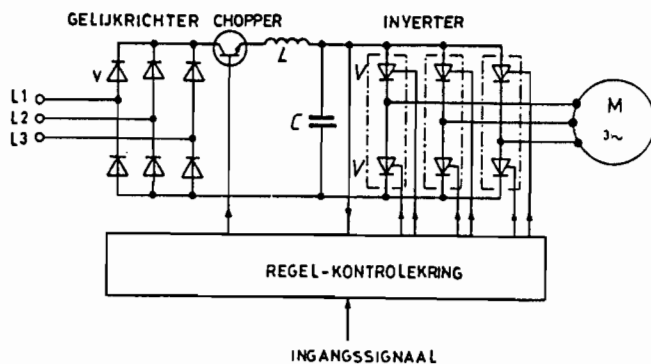


fig. 205a

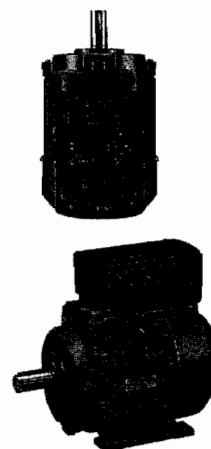


fig. 205b

### 3.11.2 Beoordelingscriteria

#### Doelstelling

- De beoordelingscriteria van een snelheidsregelsysteem toelichten.

De voornaamste beoordelingscriteria van snelheidsregelsystemen zijn:

- de grootte van de rotatiefrequentie;
- vermogen-rotatiefrequentie karakteristiek;
- het dynamische gedrag;
- het economische aspect;
- het energieverdelingsaspect.

#### a Grootte van de rotatiefrequentievariatie

De volgende gevallen kunnen zich voordoen:

- 1 continue variatie van de rotatiefrequentie:
  - met geringe grootte voor aanpassing of correctie van een rotatiefrequentie;
  - met aanzienlijke grootte;
- 2 discontinue variatie met aanzienlijke verschillen in rotatiefrequentie.

#### b Vermogen-rotatiefrequentiekarakteristiek

Door aanpassing van de snelheid krijgt men naast rotatiefrequentievariatie ook verandering in de vermogen-rotatiefrequentiekarakteristiek.

Voor het verband aandrijfkoppel-netvermogen geldt de betrekking

$$P_{\text{net}} = \omega_s \cdot T$$

waarin

$P$  : netvermogen (in W) (verwaarlozing statorverliezen)

$\omega_s$  : hoeksnelheid draaiveld (in rad/s)

$T$  : askoppel (in Nm)

Als de netfrequentie constant wordt gehouden, is  $\omega_s = \text{constant}$ , zodat

$$P_{\text{net}} = k \cdot T$$

Het opgenomen vermogen is evenredig met het askoppel zolang de netfrequentie constant is.

Algemeen geldt voor het verband aandrijfkoppel-asvermogen de betrekking

$$P_{\text{as}} = \omega_{\text{as}} \cdot T = 2 \pi \cdot n_r \cdot T$$

of  $P_{as} = k' \cdot n_r \cdot T$

waarin

$n_r$ : rotorrotatiefrequentie (in  $s^{-1}$ )

Het asvermogen is evenredig met het product van koppel- en rotorrotatiefrequentie.

Naar gelang van de vereisten van het aan te drijven werktuig kunnen vermogenskarakteristieken op de volgende manieren t.o.v. elkaar verlopen:

*1 Het koppel is constant en onafhankelijk van de snelheid bij constante netfrequentie*

Deze werksituatie doet zich voor bij hijswerktuigen, pompen en compressoren met constante persdruk, walsen, transportbanden en arbeidswerktuigen met constant werkkoppel.

De grafieken  $P_{net} = f(n)$  en  $P_{as} = f(n)$  verlopen volgens fig. 206.

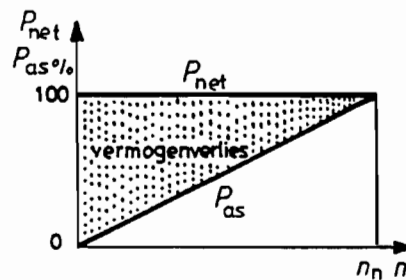


fig. 206

Vooropstelling van constant koppel impliceert constant opgenomen netvermogen, want de vooropgestelde formules worden met  $T = \text{constant}$ :

$$P_{net} = \omega_s \cdot T = k$$

$$P_{as} = \omega_r \cdot T = k \cdot n_r \cdot T = k' \cdot n_r$$

Het asvermogen is recht evenredig met de rotatiefrequentie.

Het gearceerde deel stelt het vermogenverlies voor bij snelheidsregeling met constant moment  $T$ . Snelheidsregeling gaat gepaard met groot vermogenverlies: bij verlaging van de rotatiefrequentie tot de helft van de nominale rotatiefrequentie bedraagt het vermogenverlies 50 %.

*2 Het asvermogen is constant bij constante netfrequentie*

Deze belastingssituatie doet zich voor bij werktuigmachines, draaibanken, boormachines, houtbewerkingsmachines, e.d.

Uit de formule  $P_{as} = k \cdot n_r \cdot T = \text{constant}$

volgt dat  $T = \frac{P_{as}}{k \cdot n_r} = \frac{k'}{n_r}$  (hyperbolisch verloop)

Het netvermogen  $P_{net} = k \cdot T = k \cdot k' \cdot \frac{1}{n_r} = \frac{k''}{n_r}$  vertoont eveneens een hyperbolisch verloop.

Uit de grafieken (fig. 207) blijkt weer dat snelheidsvermindering gepaard gaat met groot vermogenverlies.

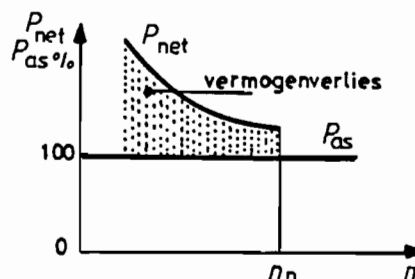


fig. 207



### 3 Het koppel verandert kwadratisch t.o.v. de snelheid bij constante netfrequentie

Deze belastingssituatie doet zich voor bij ventilatoren, centrifugaalpomp, roterende compressoren, roermachines.

Uit de formule  $P_{\text{net}} = \omega_s \cdot T$  (met  $T = k \cdot n_r^2$ ) volgt:

$$P_{\text{net}} = k \cdot n_r^2$$

Het opgenomen netvermogen verandert kwadratisch met de rotatiefrequentie (parabool). Het asvermogen verandert hierbij volgens de derde macht van de rotatiefrequentie, want

$$P_{\text{as}} = k \cdot n_r \cdot T$$

met

$$T = k \cdot n_r^2$$

of 
$$P_{\text{as}} = k \cdot n_r^3$$

Uit de grafieken van fig. 208 blijkt het vermogenverlies bij snelheidsregeling gunstiger.

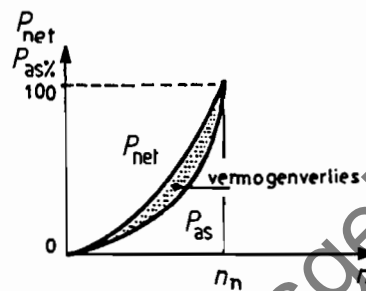


fig. 208

### 4 Het koppel verandert op een lineaire manier bij constante netfrequentie

Deze belastingssituatie doet zich voor bij kalanders (textiel- en papierwikkelmachines).

Uit de formule  $P_{\text{net}} = \omega_s \cdot T$  (met  $T = k \cdot n_r$ ) volgt:

$$P_{\text{net}} = k \cdot n_r$$

Het netvermogen is evenredig met de rotatiefrequentie.

Het asvermogen verandert hierbij kwadratisch, want

$$P_{\text{as}} = k \cdot n_r \cdot T$$

wordt 
$$P_{\text{as}} = k \cdot n_r \cdot k' \cdot n_r = k \cdot n_r^2$$

Uit de grafieken van fig. 209 krijgt men een idee van het vermogenverlies bij snelheidsregeling.

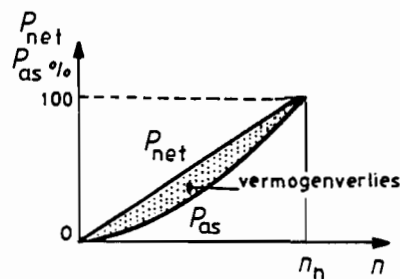


fig. 209

*c Dynamisch gedrag*

Vooraf van belang zijn hierbij de graad van stabiliteit en de afwijking t.o.v. de ingestelde waarde, de snelheid van de aanpassing, de overgangsverschijnselen (zoals stroompieken) en de koppelvariatië bij verschillende snelheden.

*d Economische aspecten*

Bij continue werking van een motor zijn de arbeidsfactor en het rendement van groot belang.

Bij intermitterende werking zijn het te installeren vermogen en de jouleverliezen aanzienlijk groter dan bij continue werking, zodat een groter nominaal vermogen vereist wordt om hetzelfde nuttige vermogen te krijgen.

*e Energieverdelingsaspect*

Vooraf van belang voor verdeling van de elektrische energie zijn o.a. de stroompieken, de asymmetrische belasting, het reactieve vermogen en het eventueel optreden van hogere harmonischen (netvervuiling).

### 3.12 Elektrisch remmen

**Doelstelling**

- De verschillende systemen van het elektrisch remmen toelichten.

Elektrisch remmen bij driefasige asynchrone motoren kan praktisch op de volgende manieren gebeuren:

- tegenstroomremmen
- gelijkstroomremmen
- remming door zelfbekrachtiging bij sleepankermotoren
- remming door hypersynchrone werking
- remming door hyposynchrone werking
- remming door eenfasige aansluiting.

#### 3.12.1 Tegenstroomremmen

Tegenstroomremmen ontstaat door het omschakelen van de motor in de andere draaizin. Het volstaat hiertoe twee netdraden om te wisselen (fig. 210). De draaizin van het draai-veld wordt dan tegengesteld aan de draaizin van de motor.

De slip is dan altijd groter dan 1; op het ogenblik van het omschakelen is de waarde bijna gelijk aan 2 ( $s = 2 - s_n$ ): fig 211.

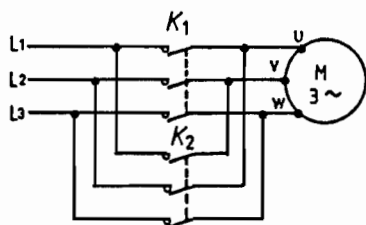


fig. 210

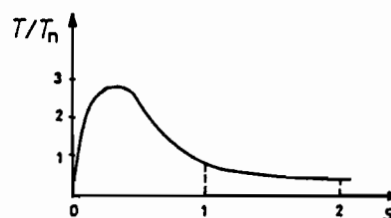


fig. 211

Zo treedt in de rotor een spanning op die ongeveer dubbel zo groot is als bij stilstand ( $E_r = s \cdot E_{r0}$ ). De rotorstroom bereikt dan waarden die zeer groot zijn: de remenergie die hierbij vrijkomt, moet door de motor verstrooid worden. De motor, aangedreven in tegengestelde zin van zijn eigen elektrisch opgewekte koppel, vertraagt. De remming die

op die manier tamelijk brutaal gebeurt, kan bij sleepmotoren echter geregeld worden door tussenvoeging van rotorweerstand (meestal dezelfde weerstanden die als aanzetter gebruikt worden).

De doorsnede van de wikkelingen van sleepmotoren moeten wel berekend worden op de dubbele aanloopwaarde van de stroomsterkte. Het remmen moet gecontroleerd worden opdat de motor niet in tegengestelde zin zou draaien. Controle kan gebeuren door meting van de rotorstroom of rotorspanning. Beide grootheden geven een trouw beeld van de rotatiefrequentie. Door de statorwikkelingen tijdens het remmen in ster i.p.v. in driehoek te schakelen is de remming minder brutaal.

### 3.12.2 Gelijktroomremmen

De methode van het gelijkstroomremmen vereist het afschakelen van de motor van het voedende net én het aansluiten van een lage gelijkspanning (20 à 24 V) op twee aansluitklemmen van de stator (fig. 212a). Er ontstaat aldus een stilstaand magnetisch veld bij een draaiende rotor (fig. 212b).

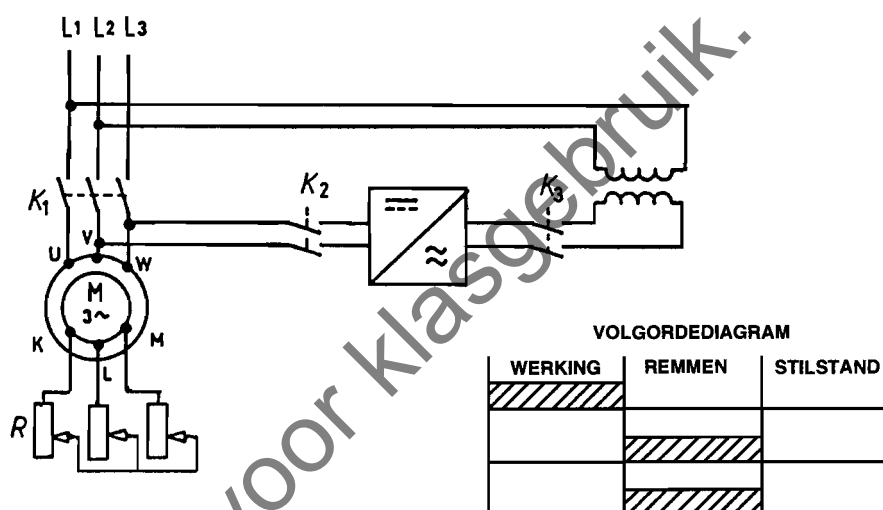


fig. 212a

De slip benadert de waarde 1 (orde van grootte ca. 0,8).

De grootte van het remkoppel hangt uitsluitend af van de geïnjecteerde gelijkstroom (normale waarde is  $I = 1,4 I_n$ ).

Het verloop van de grafieken wordt in fig. 212c weergegeven.

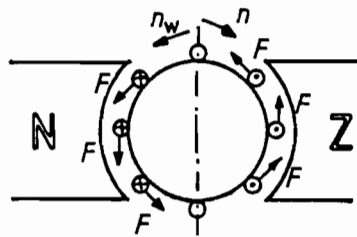


fig. 212b

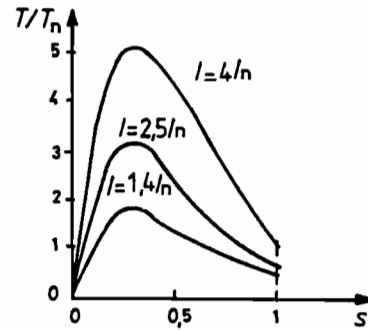


fig. 212c

Remming tot stilstand wordt verkregen zonder gevaar voor aanlopen in de andere zin, behalve in het bijzondere geval waarbij de aangedreven last deze bewegingszin mogelijk maakt. In dit speciale geval is continue remming voorzien, zodat een kleine rotatiefrequentie behouden blijft.

Bij sleepringmotoren kan het remkoppel supplementair geregeld worden met behulp van rotorweerstand. Er is extra warmteontwikkeling in de motor.

### 3.12.3 Remming door zelfbekrachtiging

Bij remming door zelfbekrachtiging maakt men kortstondig gebruik van een gelijkspanning met gering vermogen om de zelfbekrachtiging te starten. (Vergelijk dit met de functie van het remanente magnetisme bij gelijkstroommachines met zelfbekrachtiging.) Nadien wordt deze hulpbron uitgeschakeld en maakt men gebruik van de gelijkgerichte spanning afkomstig van de rotorwikkeling. De aldus verkregen gelijkstroom wordt teruggevoerd naar de klemmen van de stator (fig. 213).

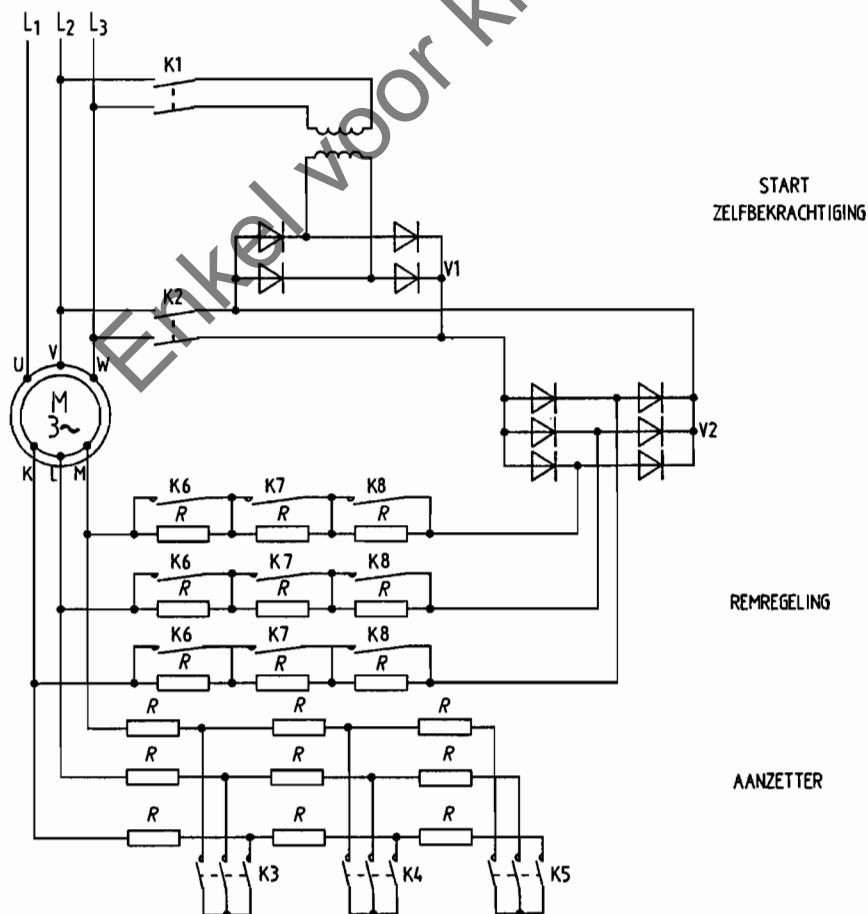


fig. 213

### 3.12.4 Remming door hypersynchrone werking

Deze manier van remmen is enkel mogelijk bij hijswerktuigen tijdens het dalen (strijken) van de last. De last kan dan aan de motor een rotatiefrequentie geven die groter is dan de synchrone rotatiefrequentie. Vanaf dat ogenblik werkt de motor als asynchrone generator die energie terugstuurt naar het net. Een remmend koppel ontstaat. Remmend en aandrijvend koppel bereiken een evenwichtstoestand. Dit betekent dat gedurende een korte tijdspanne wordt geremd met een constante daalsnelheid als gevolg. Remming op deze manier kan niet leiden tot snelheden beneden de synchrone snelheid, m.a.w. van echte remming tot stilstand is geen sprake.

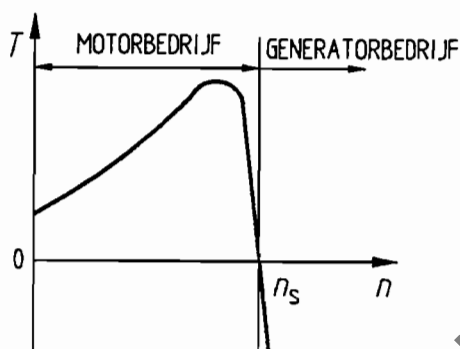


fig. 214

#### Toelichting

##### Poolomschakelbare wikkelingen

Bij een asynchrone motor met poolomschakelbare statorwikkelingen kan men hypersynchroon remmen door om te schakelen naar een hoger aantal polen. Dit komt overeen met een lagere rotatiefrequentie van het statordraaiveld. De machine zal nu werken als asynchrone generator tot de lagere synchrone rotatiefrequentie bereikt is.

##### Frequentieomvormer

Als men een frequentieomvormer gebruikt kan de rotatiefrequentie van het statordraaiveld afnemen door de frequentie van het voedende net te verlagen. Op deze manier kan men eveneens asynchrone generatorwerking en dus een gewenste remming krijgen.

### 3.12.5 Remming door hyposynchrone schakelwijze

De methode van de hyposynchrone schakelwijze houdt in dat men een van de statorwikkelingen ompoolt (fig. 215).

Het verkregen remkoppel is gelijkaardig aan dat verkregen door tegenstroomremmen. Deze werkwijze biedt als voordelen dat de remming stabiel verloopt en er geen onderbreking is van de voeding tijdens de remwerking.

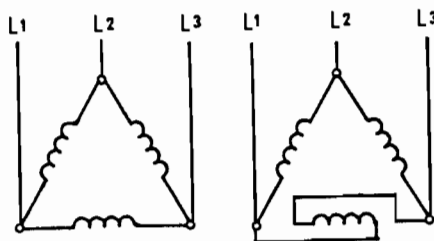


fig. 215

### 3.12.6 Remming door eenfasige aansluiting (fig. 216)

Deze remwijze kan worden beschouwd als een systeem met twee gekoppelde motoren, tegengesteld draaiend, maar parallel aangesloten op hetzelfde net. Ook hier treedt extra verwarming in de motor op.

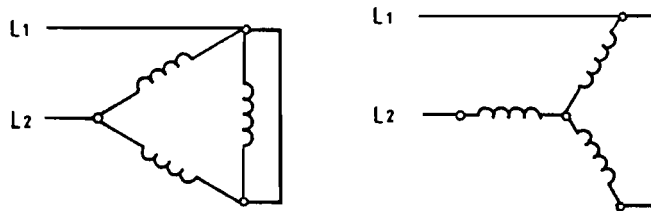


fig. 216

Buiten de besproken, zuiver elektrische remsystemen bestaan er ook nog elektromechanische remsystemen. Deze vallen buiten het kader van de leerstof. De elektromechanische remsystemen zullen worden besproken bij de speciale motoren.

### 3.13 Bepalen van de slip

#### Doelstelling

- De slip met een mV-meter, A-meter of stroboscoop bepalen.

De slip kan altijd bepaald worden door de rotorrotatiefrequentie met een toerenteller te meten en daaruit de waarde van de slip te berekenen met de formule

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

Voor kleine vermogens zal de belasting van een 'mechanische' tachometer een niet-toelaatbare belasting uitmaken. In dit geval gebruiken we een toerenteller (digitaal) met lichtspot of een stroboscoop. Deze laatste methoden belasten de motor niet en leveren een nauwkeuriger resultaat op.

In het kort geven we nog enkele middelen aan om de slip te bepalen.

#### 3.13.1 Met een draaispoel-mV-meter

We plaatsen de mV-meter over twee sleepringen van de bewikkelde rotor. We weten dat deze spanning bij normale werking zeer klein is; vandaar het lage meetbereik van het meettoestel. De meter van de draaispoelmeter kan, omwille van de lage frequentie, het momentele spanningsverloop volgen. Per periode zal de naald een volledige schommeling tonen. Gedurende een tijd 't' (seconden) tellen we het aantal volledige schommelingen N.

De rotorfrequentie is dan:  $f_r = \frac{N}{t}$  (Hz).

De slip  $s = \frac{f_r}{f_s}$ .

Als het een kooirotor betreft, kan de mV-meter via twee sleepcontacten op beide asen aangesloten worden. De flux die dwars door de rotor gaat, veroorzaakt in de as eveneens kleine inductiespanningen op dezelfde rotorfrequentie.

### 3.13.2 Met een ampèremeter

We schakelen de A-meter in een fase van de rotorwikkeling (dus niet van toepassing bij kooiankerrotors) en meten het aantal naaldschommelingen  $N$ , in een tijd van  $t$  seconden. Wanneer de A-meter een weekijzerinstrument is, zal elke periode van de rotorstroom overeenkomen met twee schommelingen van de naald, zodat de rotatiefrequentie

$$f_r = \frac{N}{2t}$$

en 
$$s = \frac{f_r}{f_s} = \frac{N}{2f_s \cdot t}$$

Met deze meetwerkwijze kan men met voldoende nauwkeurigheid 120 schommelingen per minuut tellen. Hiermee komt bij statorfrequentie  $f_s = 50$  Hz een slip overeen van

$$s = \frac{120}{100 \cdot 60} = 0,02 \text{ of } 2 \, \%.$$

Bij gebruik van een draaispoelmeter komt elke periode overeen met een volledige schommeling. De rotorfrequentie voor  $N$  schommelingen in  $t$  seconden is dan

$$f_r = \frac{N}{t}$$

en 
$$s = \frac{f_r}{f_s} = \frac{N}{t \cdot f_s}$$

Bij statorfrequentie  $f_s = 50$  Hz wordt  $s = \frac{N}{50 \cdot t}$

De maximumwaarde van de slip die we nog voldoende nauwkeurig kunnen bepalen, is hier  $\pm 4 \, \%$ .

### 3.13.3 Met een stroboscoop

Een stroboscoop is een elektronisch apparaat dat intensieve lichtflitsen voortbrengt. De frequentie waarmee deze lichtflitsen optreden, kan op een continue manier ingesteld worden. Bij het aanbrengen van een opvallend merkteken op een draaiend onderdeel kunnen we de frequentie van de lichtflitsen zodanig regelen dat ze telkens opflitsen als het merkteken de lichtflits passeert. We krijgen daardoor de indruk dat het draaiende onderdeel stilstaat. Door de frequentie van het aantal lichtflitsen af te lezen, kennen we rechtstreeks de rotatiefrequentie.

De slip is dan

$$s = \frac{f_r}{f_s}$$

We merken terloops op dat draaiende onderdelen op een rotatiefrequentie van  $50 \text{ s}^{-1}$  in de nabijheid van een tl-lamp de indruk geven stil te staan. Dit z.g. 'stroboscopisch effect' brengt gevaar mee voor de omgeving. Bij verlichting van een machinepark met tl-lampen moet hiermee rekening worden gehouden.

De stroboscopische methode kan eveneens toegepast worden zonder stroboscoop. Men maakt in dit geval gebruik van een gasontladingslamp die gevoed wordt met dezelfde frequentie als die waarop de motor aangesloten is. Deze methode is echter weinig praktisch; daarom beperken we ons enkel tot het vermelden ervan.

### 3.14 Elektrische beveiliging van motoren

#### Doelstelling

- De noodzaak van de elektrische beveiliging van motoren toelichten.

#### a Doel van de elektrische beveiliging van motoren

- Beletten dat de temperatuur van de motorwikkelingen zo sterk stijgt dat de motorwikkelingen gevaar lopen te verbranden.
- Het snel afschakelen van de motor bij het optreden van kortsluiting.
- Het inschakelen van de motor beletten bij ontbrekende of te lage aangesloten spanning.

#### b Oorzaken van abnormale temperatuurstijging

- De belangrijkste oorzaak van abnormale temperatuurstijging is overbelasting van de motor: toenemende belasting (groter motorkoppel) vereist een hogere stroomsterkte. Zelfs door een geringe overschrijding van de grenstemperatuur wordt de levensduur van de motor sterk verkort. Merken we hierbij op dat, volgens de voorschriften, motoren in warme toestand gedurende twee minuten een overbelasting van 1,5-maal de nominale stroomsterkte ( $I_n$ ) moeten kunnen verdragen, zonder dat hun grenstemperatuur bereikt wordt. Maatgevend voor overbelasting zijn dus de stroomsterkte en de tijdsduur.
- Onderbreking van één fase bij driefasemotoren.
- Te hoge schakelfrequentie bij motoren met intermitterende werking.
- Te lage aangelegde spanning.
- Het blokkeren van de motor (de rotor).

#### c Toegepaste beveiligingssystemen

- Overdimensionering van de motor: hierbij is het gevaar voor overbelasting van de motor inderdaad praktisch uitgesloten. Nadelen zijn: de hogere aanschaffkosten en de hogere werkingskosten wegens het lager rendement van de motor (slechtere arbeidsfactor) bij een vermogen lager dan het nominale vermogen.
- Elektrische motorbeveiligingsapparaten, waarvan de belangrijkste zijn: de thermisch-maximaalbeveiliging, de elektromagnetische maximaalbeveiliging, de nulspanningsbeveiliging en de elektronische thermistorbeveiliging.

### 3.15 Storingen

#### Doelstelling

- Enkele optredende storingen met hun respectieve oorzaken verklaren.

#### 3.15.1 De lagers lopen warm

Afhankelijk van de gebruikte lager en zijn smering kunnen allerlei oorzaken van warmlopen optreden zoals: onvoldoende of overdreven smering, niet-cilindrische as, te strak gespannen riem, onzuivere of niet aangepaste olie, defecte lagering ...



### 3.15.2 De temperatuur van de stator loopt te hoog op

De oorzaak kan hier overbelasting zijn of een kortsluiting in de wikkelingen. Dit kan een directe kortsluiting zijn ofwel via de massa. Ook kan de motor verkeerd aangesloten zijn, bv. in driehoek i.p.v. in ster.

Als bij een bewikkelde rotor een deel van de rotorwikkeling kortgesloten is (direct of via de massa), dan wordt de stroomloop in de rotor gestoord. Bij open rotorketen zullen die kortgesloten windingen overmatig verwarmen. Bij een dergelijk defect hoort men bij open rotorketen een gebrom in sommige standen.

### 3.15.3 Het normale werkkoppel wordt niet bereikt

Dit is dikwijls te wijten aan te lage spanning op de motorklemmen. Het komt bv. voor als de motor in ster i.p.v. in driehoek aangesloten is.

### 3.15.4 De motor loopt niet aan

- De rotor zit geblokkeerd omdat bv. de belasting te hoog is. Of: er is geen stroom in een van de statorspoelen omdat bv. één fasedraad onderbroken is. In dit geval hoort men een karakteristiek gebrom.
- Een van de statorwikkelingen kan verkeerd aangesloten zijn op het klemmenbord (bv. bij herwikkelen).
- De rotor voert geen stroom door een fout in de rotorketen of aanzetweerstand (bv. vuile sleepingen).
- De aanzetweerstand heeft een te grote waarde.

### 3.15.5 De rotatiefrequentie is te klein

Er is een daling van de netfrequentie, en/of een te hoge weerstand in de rotorketen (sleepingen, borstels of defect in aanzetweerstand). Als een van de rotor geleiders naar de weerstand onderbroken is, zal de motor bij het aanzetten maar de halve synchrone rotatiefrequentie bereiken.

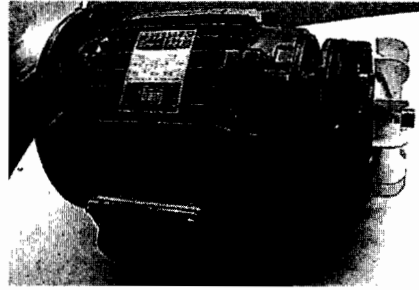
Als de motor normaal aan het draaien is en men een borstel licht, blijft de motor op ongeveer dezelfde rotatiefrequentie doordraaien bij gering belastingkoppel. Neemt het belastingkoppel toe, dan zal de rotatiefrequentie tot op halve waarde vertragen.

## 3.16 Speciale driefasige inductiemotoren

### 3.16.1 Remmotoren

#### Doelstellingen

- Het begrip *remmotor* toelichten.
- De bedrijfsvoorwaarden van een remmotor onderscheiden.
- Aan de hand van een montageschema de werking en eigenschappen van een schijfmotor toelichten.
- Aan de hand van een montageschema de werking en eigenschappen van een schuifankermotor toelichten.



### Algemeenheden

Naast elektrisch remmen (leereenheid 3, par. 3.12) gebruikt men ook mechanische en elektro-mechanische remsystemen om motoren tot stilstand te brengen.

Remmotoren zijn motoren met aangebouwd (zie bovenstaande foto) of ingebouwd remsysteem. Deze motortypes worden gebruikt bij aandrijvingen van bepaalde types machines die, snel en binnen nauwkeurig bepaalde limieten van tijd en bedrijfsstand, stilgelegd moeten kunnen worden.

De voorwaarden die opgelegd kunnen worden, hebben betrekking op:

- de veiligheid van personeel of materieel bij toevallige of gewilde stroomonderbreking, bv. hijswerktuigen, snijbanken, stanspersen e.d.;
- de opvoering van de productiviteit door beperking van dode tijden wegens optredende traagheidskrachten (aanzetfrequentie opvoeren);
- een verzekerde blokkering om het in beweging brengen door statische krachten te beletten (lieren, kranen, liften, loopkranen, transportbanden e.d.).

### Schijfremmotor

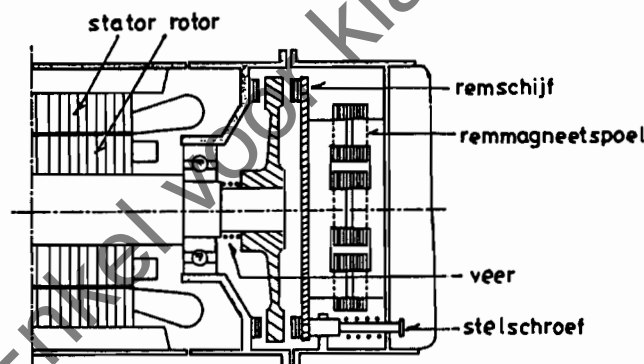


fig. 217

Uit fig. 217 blijkt voldoende de principewerking van de schijfremmotor. De eigenschappen van dit type motor zijn:

- De rem werkt soepel, zonder remstoten.
- De remkracht is instelbaar en kan binnen bepaalde grenzen continu worden geregeld.
- De remkracht is ook bij stilstand mogelijk.
- Om de remkracht te beëindigen, moet de bekrachtigingsstroom van de remmagneetspoel onderbroken worden.

Een eventueel nadeel van dit type remmotor is dat er bij het onderbreken van de voedingsspanning geen remkracht aanwezig is.

### Toelichting

#### Remenergie

Een bijkomend voordeel van dit type remmotor is dat de warmte voortkomend van de remenergie niet vrijkomt in de motorwikkelingen zelf.

### Schuifankermotor

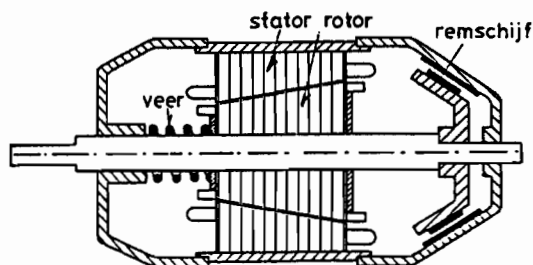


fig. 218

De schuifankermotor is meestal een motor van het type inductiemotor met kooirotor. De schuifankermotor bezit een rotor (fig. 218) die in de conisch uitgevoerde stator past. Bij normaal werken wordt de rotor door het statorveld volledig binnen de stator getrokken en dit tegen de druk van de veer in. Het uitschakelen van de motor veroorzaakt een axiale verplaatsing van de rotor (enkele mm) t.o.v. de stator door werking van drukveren. Deze kleine axiale verplaatsing naar rechts brengt een remschijf tegen een vast remvlak, zodat snel wordt geremd.

Bij stilstand en ontbreken van netstroom is de rem altijd geblokkeerd: deblokkering van de remmen is dan meestal mogelijk door toepassing van afzonderlijke bekrachtiging van de remmagneetspoel of d.m.v. een mechanisch systeem.

#### Toelichting

##### Bekrachtiging van de remmagneetspoel

De remmagneetspoel wordt meestal bekrachtigd met gelijkstroom.

Aangezien de aansluiting normaal gebeurt op de motoraansluitklemmen is een gelijkrichter of transformator-gelijkrichter voorzien. Onderbreking van de bekrachtigingsstroom kan zowel aan gelijk- als wisselspanningszijde gebeuren. Onderbreking langs gelijkspanningszijde geeft een kortere responsietijd.

### 3.16.2 De lineaire inductiemotor

#### Doelstellingen

- Het begrip *lineaire inductiemotor* verklaren.
- De principewerking van de lineaire inductiemotor toelichten.

Een lineaire motor kan worden beschouwd als een doorgesneden en in een plat vlak opengeslagen kooimotor (fig. 219, 220 en 221).

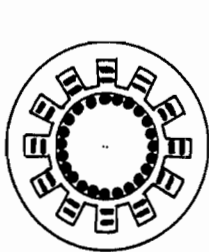


fig. 219

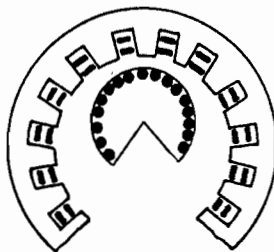


fig. 220

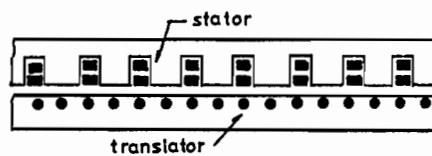


fig. 221

De rotor is meestal (hoewel niet noodzakelijk) het onderdeel dat een lineaire beweging krijgt; de specifieke benaming van de rotor is *translator*, de stator behoudt steeds zijn benaming.

Wordt de driefasewikkeling aangesloten op een driefasenet, dan ontstaat in de luchtspleet een magnetisch veld in de vorm van een lopende sinusvormige golf. De synchrone snelheid van deze golf is gelijk aan

$$v_s = 2f \cdot \tau_p$$

met

$v$  : translatiesnelheid (in m/s)

$f$  : netfrequentie (in Hz)

$\tau_p$  : poolsteek van de statorwikkeling

De snelheid van het bewegende deel wordt

$$v = v_s (1 - s)$$

met  $s$ : slipfactor

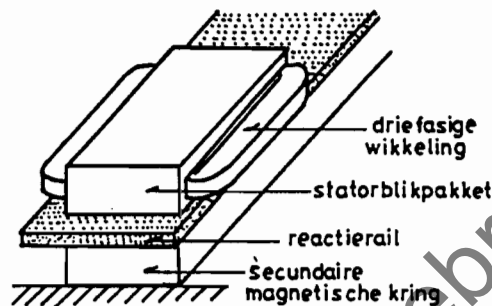


fig. 222

Hoe de drijvende kracht ontstaat, volgt uit fig. 222 (lineaire motor). De translator is hier uitgevoerd als een rail van elektrisch goed geleidend materiaal ('reactierail' genoemd) die bevestigd is op een balk uit weekijzer. Het bewegende deel is in fig. 222 de stator.

Ten gevolge van de statorstromen en het hiermee optredende statorveld worden in de translator wervelstromen opgewekt. Er ontstaan lorentzkrachten in een vlak evenwijdig aan het oppervlak van de rail, in de bewegingsrichting evenals loodrecht op deze laatste. Ten gevolge van de wet actie = reactie werken op de stator even grote, maar tegengestelde krachten die de stator zullen voortdrijven. De dwarskrachten aan beide zijden worden opgevangen door geleidetrails.

Het verloop van de drijfkraft overeenkomstig de slip is identiek met die van de normale asynchrone motor. Snelheidsregeling is enkel mogelijk door wijzigen van de netfrequentie. Wegens de noodzakelijk grotere luchtspleet zijn de arbeidsfactor en het rendement aanzienlijk kleiner dan bij overeenkomstige draaistroommotoren.

#### Toelichting

##### Minimumsnelheid

Bij normale netfrequentie van 50 Hz kan de synchrone snelheid niet kleiner worden dan  $1,5 \text{ à } 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  omdat anders de poolsteek te klein en bijgevolg onuitvoerbaar wordt.

##### Magnetische levitatie

Naast de al vernoemde krachten bestaan er ook krachten loodrecht op het oppervlak van de rail. Deze krachten kunnen principieel gebruikt worden voor magnetische levitatie of ophanging.

## 3.17 Voorbeelden

- 1 Een driefasige stator van een kooimotor bezit 36 ongesplitste spoelen. De frequentie van de driefasespanning bedraagt 50 Hz. Bereken de rotatiefrequentie van het draaiveld.

*Oplossing*

3 spoelen vormen 1 poolpaar.

36 spoelen komen overeen met  $\frac{36}{3} = 12$  poolparen.

$$n_s = \frac{f}{p} = \frac{50}{12} = 4 \frac{1}{6} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

of  $4 \frac{1}{6} \cdot 60 = \frac{25}{6} \cdot 60 = 250 \text{ omw/min (min}^{-1}\text{)}$

- 2 Men sluit een 4-polige asynchrone motor aan op een net van 380 V – 50 Hz. De rotatiefrequentie van de motor is  $24 \frac{1}{3} \text{ s}^{-1}$ . Hoe groot zijn de slip (absolute, relatieve en procentuele waarde) en de frequentie van de rotorstroom bij het starten en na het voltooiën van de aanloop?

*Oplossing*

$$n_s = \frac{f}{p} = \frac{50}{2} = 25 \text{ s}^{-1}$$

$$s_a = n_s - n_r = 25 - 24 \frac{1}{3} = \frac{2}{3} \text{ s}^{-1}$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{25 - 24 \frac{1}{3}}{25} = 0,0267$$

$$s \% = 0,0267 \cdot 100 = 2,67 \%$$

Rotorstroomfrequentie bij start:

$$f_{r0} = 50 \text{ Hz} = f_s$$

Rotorstroomfrequentie na aanloop:

$$f_{\text{rom}} = f_{r0} \cdot s = 50 \cdot 0,0267 = 1,34 \text{ Hz}$$

- 3 Een statorwikkeling (500 windingen per fase) wordt in driehoek geschakeld op een net van 380 V – 50 Hz. De machinefactor van Kapp bedraagt 4. Als het spanningsverlies in de stator verwaarloosd wordt, hoe groot is dan de maximale flux van het draaiveld in de luchtspleet?

*Oplossing*

$$U_{\text{net}} = E_s = K \cdot \phi_m \cdot f \cdot N_s$$

waaruit:  $\phi_m = \frac{E_s}{K \cdot f \cdot N_s} = \frac{380}{4 \cdot 50 \cdot 500} = 0,0038 \text{ Wb of } 3,8 \text{ mWb}$

- 4 De tweepolige, driefasige stator van een kooimotor wordt in ster geschakeld op een net van 380 V – 50 Hz. De procentuele slip bedraagt 5 %. De machinefactor is 3,83. De statorwikkeling bestaat per fase uit 150 windingen, de rotor slechts uit 25 windingen per fase. Hoe groot is, bij verwaarlozing van de statorverliezen, de rotorspanning per fase bij het starten en bij nominale rotatiefrequentie?

*Oplossing*

De statorspanning per fase bedraagt:

$$U_F = E_F = \frac{U_{Lnet}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$$

De transformatieverhouding bedraagt:

$$k = \frac{150}{25} = 6$$

Nu is  $k = \frac{E_{s0}}{E_{r0}}$

waaruit  $E_{r0} = \frac{E_{s0}}{k} = \frac{220}{6} = 36,67 \text{ V}$

$$E_m = s \cdot E_{r0} = 0,05 \cdot 36,67 = 1,83 \text{ V}$$

- 5 Een driefasige asynchrone motor heeft de volgende waarden voor elke rotorwikkeling:  $R_{r0} = 0,02 \Omega$  en  $X_{r0} = 0,08 \Omega$ . Als de impedantie van de statorwikkeling verwaarloosbaar klein is, hoe groot moet de rotoraanzetweerstand (per fase) zijn om bij het starten het maximumkoppel te krijgen?

*Oplossing*

$$s_r = \frac{R_r'}{X_{r0}} = 1$$

Hieruit volgt

$$R_r' = X_{r0} = 0,08 \Omega$$

Vermits  $R_r' = R_r + R_{aanloop} = 0,08 \Omega$

moet  $R_{aanloop} = R_r' - R_r = 0,08 - 0,02 = 0,06 \Omega$

( $R_{aanloop}$  = aanloopweerstand per fase)

- 6 Een normaal werkende driefasige kooimotor, aangesloten op een net van 380 V – 50 Hz, levert een vermogen van 22 kW. Bij vollast is de rotatiefrequentie 960 min<sup>-1</sup>. De statorverliezen bedragen 5 % van het toegevoerde vermogen. Het rendement bedraagt 0,92 en de arbeidsfactor 0,85. Bereken het aantal polen van de stator, de opgenomen statorstroom bij vollast en de rotorkoperverliezen.

*Oplossing*

Statordraaiveld:

$$n_s = 1000 \text{ min}^{-1} \text{ of } 16\frac{2}{3} \text{ s}^{-1} \Rightarrow p = \frac{f}{n} = \frac{50}{16\frac{2}{3}} = 3$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1000 - 960}{1000} = \frac{40}{1000} = 0,04 \text{ of } 4 \%$$

$$P_n = P_t \cdot \eta$$

waaruit 
$$P_t = \frac{P_n}{\eta} = \frac{22\,000}{0,92} = 23\,913 \text{ W}$$

Uit 
$$P_t = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ volgt:}$$

$$I = \frac{P_t}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{23\,913}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 42,74 \text{ A}$$

Statorverliezen:

$$P_{vs} = 0,05 \cdot P_t = 0,05 \cdot 23\,913 \cdot 0,005 = 1196 \text{ W}$$

Luchtspleetvermogen:

$$P_r = P_t - P_{vs} = 23\,913 - 1196 = 22\,717 \text{ W}$$

Rotorjouleverlies:

$$P_{jr} = s \cdot P_r = 0,04 \cdot 22\,717 = 909 \text{ W}$$

- 7 Van een driefasige inductiemotor zijn door proeven en metingen de volgende resultaten gekend:

- De nullaststroom met verwaarloosbare hysteresis- en wervelstroomverliezen bedraagt 2 A.
- De nominale werkwaarden zijn:  $I_n = 15 \text{ A}$ ;  $\cos \varphi = 0,85$ ;  $T_n = 60 \text{ Nm}$ .
- De transformatieverhouding stator/rotor bedraagt 1,875.

Teken het cirkeldiagram en bepaal uit het cirkeldiagram de naar de stator getransformeerde nominale rotorstroom, de nominale rotorstroom en het maximumkoppel.

*Oplossing*

$$I_m = I_0 = 2 \text{ A}$$

$$\cos \varphi = 0,85 \Rightarrow \varphi = 31^\circ 47' 18''$$

$$\text{schaal stroomwaarden: } 1 \text{ cm} = 2 \text{ A}$$

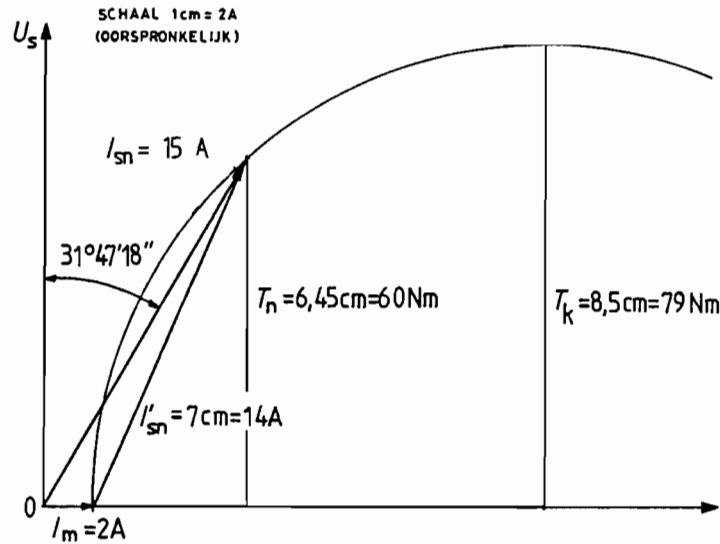


fig. 223

Uit de tekening volgt:

$$I'_{sn} = 7 \text{ cm} = 14 \text{ A}$$

$$\text{schaal } T: \frac{60 \text{ Nm}}{6,45 \text{ cm}} = 9,3 \text{ Nm/cm}$$

$$T_k = 9,3 \text{ cm} = 9,3 \cdot 8,45 = 78,6 \text{ Nm}$$

$$I_m = k \cdot I'_{sn} = 1,875 \cdot 14 = 26,25 \text{ A}$$

- 8 Bij een driefasige asynchrone motor worden de volgende gegevens verstrekt: opgenomen vermogen 12kW; weerstand statorwikkeling per fase 0,18  $\Omega$ ; ijzerverliezen 250 W; mechanische verliezen 500 W; netstroom 30 A; slip 5 %. Bereken het elektrische vermogen overgebracht naar de rotor, het rotorjouleverlies, het elektromechanische vermogen van de rotor en het nuttige vermogen van de motor.

Oplossing

$$P_{rel} = P_i - P_{Fe} - P_{js}$$

met  $P_{js} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2 = 3 \cdot 0,18 \cdot 30^2 = 486 \text{ W}$

$$P_{rel} = 12\,000 - 250 - 486 = 11\,264 \text{ W}$$

$$P_{jr} = s \cdot P_{rel} = 0,05 \cdot 11\,264 = 563 \text{ W}$$

$$P_{em} = P_{rel} - P_{jr} = 11\,264 - 563 = 10\,701 \text{ W}$$

$$P_{as} = P_n - P_{mech} = 10\,701 - 500 = 10\,201 \text{ W}$$



- 9 De nominale rotatiefrequentie van een sleepringmotor bedraagt  $1415 \text{ min}^{-1}$ . De rotorwikkeling is in ster geschakeld. Tussen de sleepringen meet men bij geblokeerde rotor een spanning van  $259,8 \text{ V}$ . De rotorweerstand bedraagt  $0,25 \Omega$ ; de rotorreactantie bij stilstand bedraagt  $0,75 \Omega$ . Bereken de rotorstroom bij stilstand en bij nominale rotatiefrequentie.

*Oplossing*

Bij aanloop is  $I_{r0} = \frac{E_{r0}}{Z_{r0}}$ .

Hierin is

$$E_{r0} = \frac{259,8}{\sqrt{3}} = 150 \text{ V}$$

en

$$Z_{r0} = \sqrt{R_r^2 + X_{r0}^2} = \sqrt{0,25^2 + 0,75^2} \\ = \sqrt{0,0625 + 0,5625} = \sqrt{0,625} = 0,79 \Omega$$

$$I_{r0} = \frac{150}{0,79} = 189,9 \text{ A}$$

Bij nominaal bedrijf is  $n_s = 1500 \text{ min}^{-1}$ .

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1415}{1500} = \frac{85}{1500} = 0,057 \text{ of } 5,7 \%$$

$$I_m = \frac{U_m}{Z_m}$$

Hierin is

$$U_m = s \cdot U_{r0} = 0,057 \cdot 150 = 8,55 \text{ V}$$

en

$$Z_m = \sqrt{R_r^2 + (s \cdot X_{r0})^2} = \sqrt{0,25^2 + (0,057 \cdot 0,75)^2} \\ = \sqrt{0,0625 + (0,04275)^2} = \sqrt{0,0625 + 0,001828} \\ = \sqrt{0,064328} = 0,254 \Omega$$

$$I_m = \frac{8,55}{0,254} = 33,66 \text{ A}$$

### 3.18 Toepassingen

- 1 Een driefasige stator van een asynchrone motor bezit 12 ongesplitste spoelen. De frequentie van de aangesloten driefasespanning bedraagt  $60 \text{ Hz}$ . Bereken de rotatiefrequentie van het draaiveld.
- 2 Een zespolige kooiankermotor heeft een rotatiefrequentie  $16 \text{ s}^{-1}$  bij een netfrequentie van  $50 \text{ Hz}$ . Bereken de absolute, relatieve en procentuele slipwaarden van de rotorstroom.
- 3 Een vierpolige sleepringmotor met vermogen  $10 \text{ kW}$ ,  $\cos \varphi = 0,75$  en rendement  $\eta = 0,85$  wordt aangesloten op een net van  $380 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$ . De slip bedraagt  $4 \%$ . Bereken de opgenomen statorstroom, de rotatiefrequentie van de rotor en het askoppel bij vollast.
- 4 De stator van een driefasige kooimotor heeft 48 gleuven met elk 15 geleiders. De factor van Kapp bedraagt 4. De motor wordt in ster aangesloten op een net van  $380 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$ . Bereken de maximumwaarde van de poolflux (de statorverliezen zijn verwaarloosbaar klein).

- 5 Bij een driefasige sleepringmotor wordt bij stilstand, tussen twee sleepringen, een spanning gemeten van  $400\text{ V} - 50\text{ Hz}$ . De rotorgelijkstroomweerstand bedraagt  $0,2\ \Omega$ ; de coëfficiënt van zelfinductie van één motorfase is  $0,02\text{ H}$ . De rotor zelf is in ster geschakeld. De slip bedraagt  $5\%$ . Bij de aanzet wordt in elke rotorfase een aanzetweerstand van  $3,71\ \Omega$  gebruikt. Bereken de rotorstroom bij het aanzetten, de arbeidsfactor bij het aanzetten en de rotorstroom bij nominale werking.
- 6 Een zespolige driefasige asynchrone motor werkt op een net van  $380\text{ V} - 50\text{ Hz}$ . Zijn vermogen is  $6,3\text{ kW}$ , met een rendement van  $85\%$  bij  $\cos \varphi = 0,6$ . Bereken de rotatiefrequentie als de slip  $0,03$  is, het uit het net opgeslorpte actieve, reactieve en schijnbare vermogen en het nuttige koppel.

### 3.19 Diagnostische toets

*Zie Toetsenboekje.*

### 3.20 Herhalingstaken – Basis

- 1 Een zespolige asynchrone motor wordt aangesloten op een net van  $380\text{ V} - 50\text{ Hz}$ . De rotatiefrequentie bedraagt  $15\ \frac{2}{3}\text{ s}^{-1}$ . Bereken de rotatiefrequentie van het draaiveld, de slipwaarden, de frequentie van de rotorstroom bij het starten en bij nominale rotatiefrequentie.
- 2 De driefasige stator van een kooimotor bestaat uit 48 ongesplitste spoelen. De frequentie van de aangesloten netspanning bedraagt  $60\text{ Hz}$ . Bereken de rotatiefrequentie van het draaiveld.
- 3 Een vierpolige kooimotor, aangesloten op een net van  $50\text{ Hz}$  heeft bij nominale rotatiefrequentie een slip van  $6\%$ . Hoe groot is de nominale rotatiefrequentie van de motor?
- 4 Een vierpolige  $5\text{ kW}$ -kortsluitankermotor wordt aangesloten op een net van  $380\text{ V} - 50\text{ Hz}$ . Hij heeft de volgende karakteristieken: slip  $= 5\%$ ,  $\cos \varphi = 0,84$  en  $\eta = 0,76$ . De aanzetstroom bedraagt  $5,4 I_n$ , het aanzetkoppel  $2,1 T_n$ . Bereken de aanzetstroomwaarde en de waarde van het aanzetkoppel.
- 5 Men wenst bij de aanzet van een asynchrone sleepringmotor het kipkoppel te krijgen. Als de verliezen in de stator verwaarloosbaar klein zijn, de rotorweerstandswaarde  $0,1\ \Omega$  en de rotorreactantiewaarde (aanloop)  $1\ \Omega$  bedraagt, hoe groot moet dan de bijgeschakelde rotoraanzetweerstand per fase bedragen?
- 6 Van een  $10\text{ kW}$  driefasige kooiankermotor, aangesloten op een net met frequentie  $50\text{ Hz}$ , zijn de volgende gegevens beschikbaar: de motor is zespolig uitgevoerd, de rotorkoperverliezen bedragen  $500\text{ W}$ , de totale statorverliezen  $120\text{ W}$  en het rendement is  $0,85$  (telkens bij nominale werking beschouwd). Bereken de synchrone rotatiefrequentie, het rotorvermogen, de slipwaarde, de nominale rotorrotatiefrequentie en het asvermogen.
- 7 Bij de aanloop van een sleepringmotor meet men  $95\text{ V}$  tussen twee sleepringen. De rotorwikkeling is in ster geschakeld. De rotorgrootheden zijn:  $R_r = 0,15\ \Omega$ ,  $X_{r0} = 1,1\ \Omega$ . De nominale slip heeft als waarde  $4\%$ . Bereken de rotoraanloopstroom bij kortgesloten rotor, evenals de nominale rotorstroom.

### 3.21 Verrijkingsopdrachten

- 1 Een zespelige asynchrone motor is in ster aangesloten op een net van 380 V – 50 Hz. De nominale slip is 3 %. De statorwikkeling bestaat uit 150 windingen per fase; het spanningsverlies in deze windingen wordt verwaarloosd. De rotorwikkeling die kortgesloten is heeft 25 windingen per fase, waarbij de gelijkstroomweerstand voor één fase 0,02  $\Omega$  en de reactantie bij het starten 0,05  $\Omega$  bedraagt.  
Bereken: de rotorrotatiefrequentie bij nominale werking, de rotorfasespanning bij het starten, de rotorfasespanning bij nominale werking, de rotorfase-impedantie bij het starten, de rotoraanzetstroom per fase, de rotorfase-impedantie bij nominale werking, de rotorfasestroom bij nominale werking, de verhouding aanzet-nominale stroom voor de rotor, de arbeidsfactor van de rotorkring bij het aanzetten en bij nominale werking.
- 2 Van een driefasige kooimotor worden de volgende gegevens verstrekt: motorspanningen 380/660 V, netspanning 380 V – 50 Hz. De netstroom bedraagt 10 A. De rotatiefrequentie is 2875 min<sup>-1</sup>, het rendement 0,85 en de arbeidsfactor 0,83.  
Bereken: de slipwaarde, het opgeslorpte vermogen, de rotorstroomfrequentie (motor op snelheid), het nominale askoppel, de nominale hoeksnelheid van de rotor.
- 3 Bij een sleepringmotor horen de volgende gegevens: het totale opgeslorpte vermogen is 10 kW, de arbeidsfactor is 0,79, het rendement bij vollast bedraagt 0,83, de rotatiefrequentie is 2930 min<sup>-1</sup>, de rotor is in ster geschakeld. Elke rotorfase heeft de volgende karakteristieken: gelijkstroomweerstand 0,3  $\Omega$ , reactantie 3  $\Omega$ . De opgemeten spanning tussen twee sleepringen bij het starten is 200 V. De motor wordt aangesloten op een driefasig net van 380 V – 50 Hz.  
Bereken: het aantal polen, de slip, het nominale asvermogen, de netlijnstroom en de nominale rotorfasestroom.
- 4 Een driefasige zespelige kooimotor wordt aangesloten op een net van 380 V – 50 Hz. Het luchtspleetvermogen bedraagt 10 kW. De stator is in ster geschakeld. Verdere gegevens zijn: arbeidsfactor 0,85, slip 3 %, nominale statorverliezen 900 W, mechanische en ijzerverliezen van de rotor 460 W, rotorfasegelijkstroomweerstand 0,03  $\Omega$ .  
Bereken: de nominale rotatiefrequentie, de nominale jouleverliezen in de rotor, het nominale asvermogen, het nominale askoppel, het rendement bij vollast, de nominale netstroom, de nominale rotorfasestroom.
- 5 Een tweepolige driefasige sleepringmotor wordt aangesloten op een driefasig net van 380 V – 50 Hz. De in ster geschakelde rotor bezit de volgende karakteristieken: rotorfaseweerstand 0,15  $\Omega$ , rotorfasereactantie (starten) 0,7  $\Omega$ , spanning gemeten bij het starten tussen twee sleepringen 160 V, nominale rotatiefrequentie 2875 min<sup>-1</sup>.  
Bereken: de synchrone rotatiefrequentie, de slip, de waarde van het kipkoppel, de rotatiefrequentie van de motor bij de kipkoppelwaarde, de rotorfasestroom bij het starten, de nominale rotorfasespanning, de nominale rotorfasestroom, de bij te schakelen rotorfasegelijkstroomweerstand om bij het starten als rotoraanloopstroom de nominale rotorstroom te krijgen.

# SYNTHESE

## Driefasige inductiemotoren (asynchrone motoren)

### Principe

De driefasige inductiemotor (asynchrone motor) is een draaistroommotor bestemd voor aansluiting op een driefasenet. De benaming asynchrone motor is ontleend aan het feit dat het bewegende deel (de rotor) zich niet met dezelfde rotatiefrequentie verplaatst als het magnetische draaiveld dat door de stator, aangesloten op een driefasenet, ontwikkeld wordt. Het statordraaiveld veroorzaakt in de rotorwikkelingen inductiestromen die zich tegen hun ontstaansoorzaak verzetten. Een rotatie in de zin van het draaiveld (motorwerking) is er een gevolg van.

$$\text{De rotatiefrequentie van het statordraaiveld } n_s = \frac{f}{p} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

### Invloed van het draaiveld op de rotorwikkeling

De geïnduceerde rotorspanning

$$E_r = s \cdot E_{r0}$$

met de slip  $s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$  en met rotorfrequentie  $f_r = s \cdot f$  veroorzaakt een

rotorstroom ( $I_r$ ) die  $\varphi_r^\circ$  naaijt op de rotorspanning  $E_r$  en dus ook op het statordraaiveld.

$$\text{tg } \varphi_r = \frac{X_r}{R_r} = s \cdot \frac{X_{r0}}{R_r}$$

### Ontwikkeld koppel ( $T$ )

Het ontwikkelde koppel hangt af van de verschuivingshoek  $\varphi_r$  tussen de rotorstroom en het statordraaiveld. De grootte van de rotorgelijkstroomweerstand  $R_r$ , de slip  $s$  en de inductieve reactantie ( $X_{r0}$ ) bij netfrequentie (bij stilstand) bepalen het verloop van het motorkoppel.

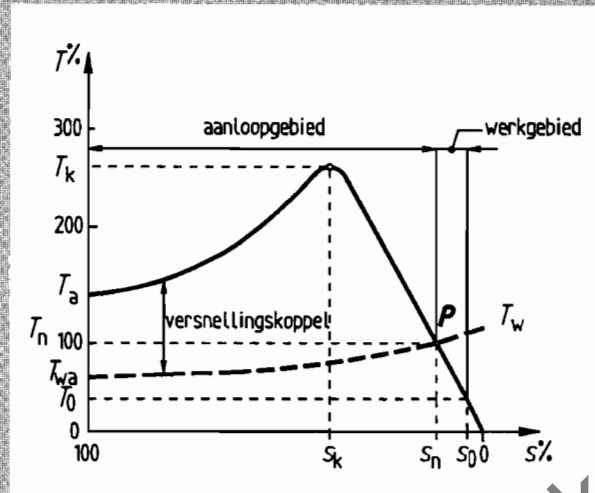
De maximumwaarde van het koppel

$$T_k = k \cdot \frac{1}{2X_{r0}} \quad (\text{kipkoppel in Nm})$$

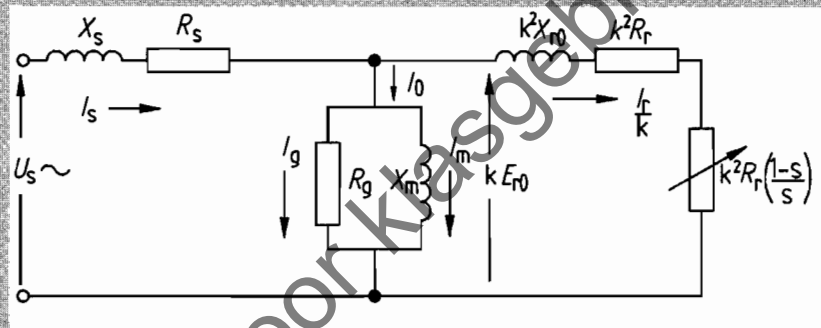
De slipwaarde  $s_k$  waarbij het kipkoppel optreedt

$$s_k = \frac{R_r}{X_{r0}}$$

Het grafische verloop  $T = f(s)$  is weergegeven in de onderstaande figuur.



### Equivalentenete



Uit de equivalentenete kunnen we de volgende grootheden (per fase beschouwd) afleiden:

- Het uit het net opgenomen schijnbare vermogen van de motor is:  

$$S = U_L \cdot I_s \quad (\text{VA})$$
- De respectieve verliezen, optredend in de stator, bedragen:
  - jouleverlies (koperverlies)  $P_{js} = R_s \cdot I_s^2$
  - ijzerverlies  $P_{Fe} = \frac{E_s^2}{R_g}$
- Het elektrisch actieve vermogen dat door de stator effectief wordt overgedragen naar de rotor bedraagt:

$$P_{\text{rotor}} = \frac{R_r}{s} \cdot I_r^2 \quad (\text{W})$$

- In de rotor treedt ook nog een jouleverlies op met waarde  $P_{jr} = R_r \cdot I_r^2$
- Het rotorjoule-effect is een deel van het elektrische vermogen door de stator overgedragen op de rotor. Overeenkomstig het rotorvermogen bedraagt het rotorjoule-effect

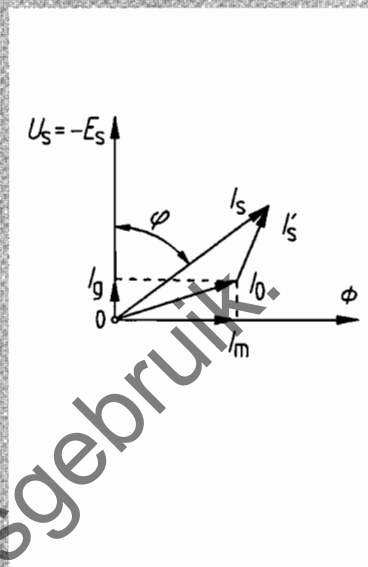
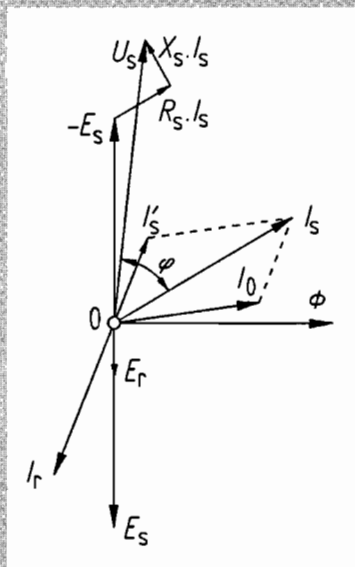
$$P_{jr} = R_r \cdot I_r^2 = s \cdot \frac{R_r}{s} \cdot I_r^2 = s \cdot P_{\text{rotor}} \quad (\text{W})$$



- Het elektrisch actieve vermogen dat op de motoras ter beschikking komt

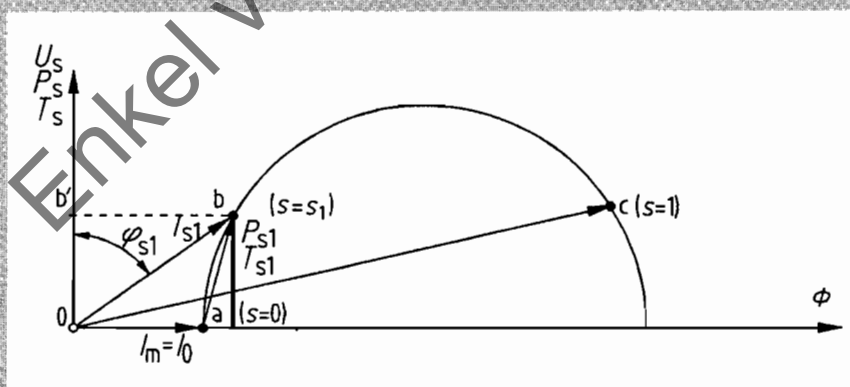
$$R_r \cdot \frac{1-s}{s} \cdot I_r^2 = P_r \cdot (1-s) \quad (\text{W})$$

### Vectordiagram van een belaste motor



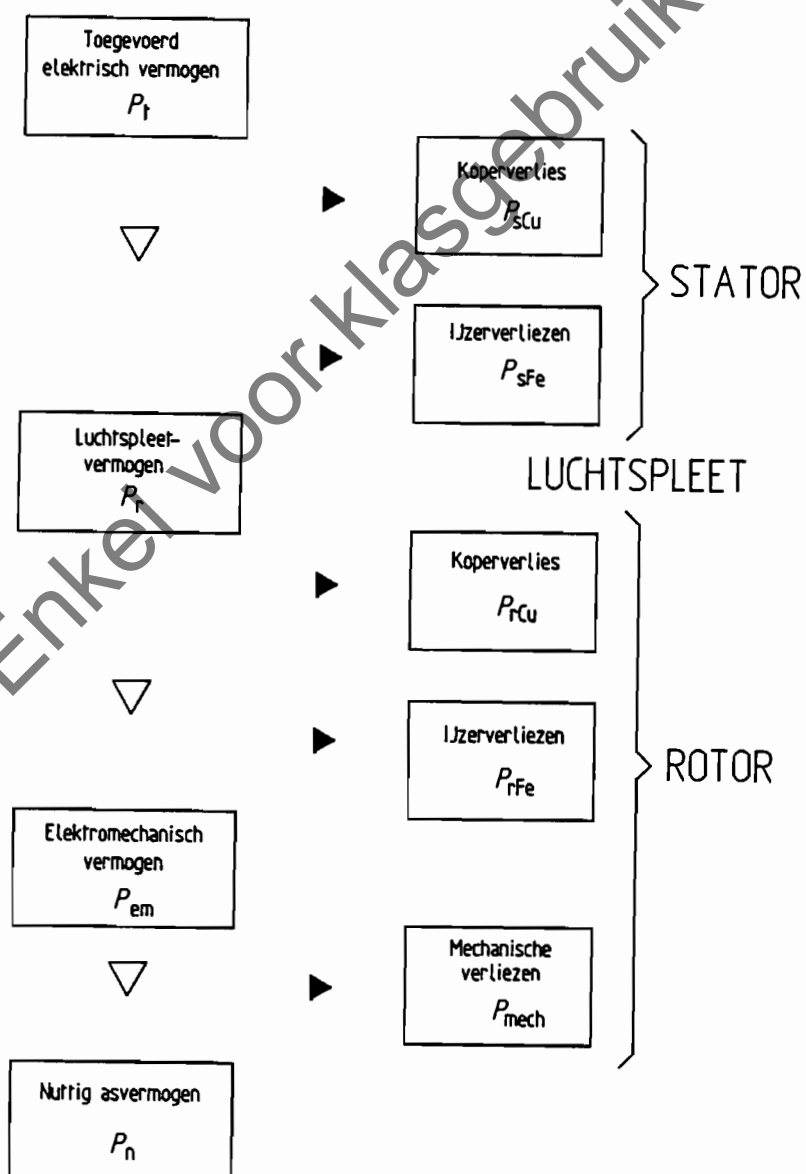
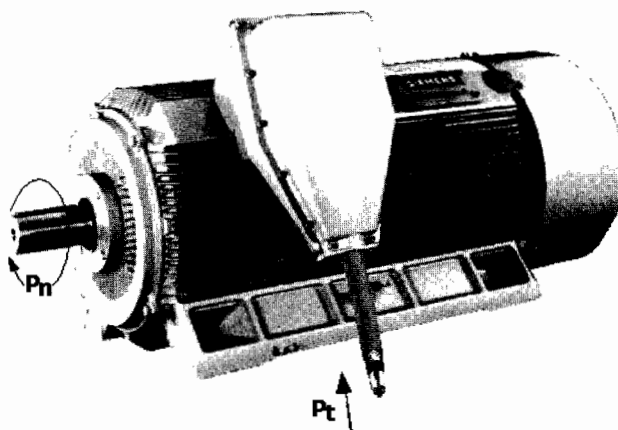
### Vereenvoudigd cirkeldiagram

Bij normale werking van de motor verplaatst het uiteinde van de statorstroomvector zich tussen de punten a ( $s = 0$ ) en c ( $s = 1$ ).



Uit het vereenvoudigde cirkeldiagram kunnen we (mits aanpassing van de schaal) o.m. het opgenomen vermogen en het ontwikkelde motorkoppel afleiden door de vector  $I_s$  te projecteren op de  $U_s$ -as.

# Vermogen en rendement



### Types van driefasige inductiemotoren

Een driefasige inductiemotor is gekenmerkt door:

- de statorspanningen die aansluiting op verschillende voedingsnetten moeten toelaten;
- het rotortype. We onderscheiden *kortsluitankermotoren* (KA-motoren) en *motoren met bewikkelde rotor* (SA-motoren). Binnen de kortsluitankermotoren onderscheiden we motoren met *enkelkooirotor* en motoren met *stroomverdringingsrotor*.

### Het aanlopen van driefasige inductiemotoren

De aanloop van een inductiemotor geeft aanleiding tot twee toestandsveranderingen:

- een *elektrische toestandsverandering* met een korte inschakelstroomstoot tot gevolg (max. 8-maal de nominale stroomsterkte);
- een *mechanische toestandsverandering* die afhangt van het momentoverschot ( $T_m - T_w$ ) en die de massa's van de bewegende delen moet versnellen. Deze versnelling vraagt, na de inschakelstroomstoot, een aanzienlijk grotere stroom (max. 5-maal de nominale stroomsterkte) dan bij nominaal gebruik.

Naar gelang van de toegelaten waarde van de motorstroom en het verlangde aanzetkoppel onderscheidt men verschillende aanzetmethoden:

- *direct aanzetten*, vooral van toepassing bij de kooiankermotoren of de motoren met kortgesloten rotorwikkeling;
- *aanzetten met aanloopstroombeperking*, door een aanzetinrichting in de statorketen (kooiankermotoren) of een aanzetinrichting in de rotorketen (sleepingmotoren).

#### Aanzetinrichting in de statorketen

Als voornaamste aanzetters noteren we:

- weerstanden in de statorketen;
- de aanzettransformator;
- de ster-driehoekaanzetter;
- de autovariabele aanzetter;
- de softstarter.

Aangezien het koppel evenredig is met de motorspanning in het kwadraat kan hier gesteld worden dat het aanzetkoppel aanzienlijk vermindert. De aanloopstroom vermindert evenredig met de aangelegde spanning.

#### Aanzetinrichting in de rotorketen (bewikkelde rotoren)

Als voornaamste aanzetters noteren we:

- aanzetapparatuur met schakelwals;
- de autovariabele aanzetter.

De gepaste keuze van aanzetweerstand zal ertoe leiden dat de aanloopstroom beperkt wordt terwijl men kan bereiken dat tijdens de hele aanlooperperiode een vrijwel constant en maximaal koppel gerealiseerd wordt.



### Regeling van de rotatiefrequentie

$$n_r = \frac{f}{p} (1 - s)$$

We regelen de rotatiefrequentie door:

- wijziging van het aantal poolparen ( $p$ );
- wijziging van de slip ( $s$ );
- wijziging van de netfrequentie ( $f$ ).

### Elektrisch remmen

Elektrisch remmen is mogelijk door:

- tegenstroomremmen;
- gelijkstroomremmen;
- remmen door zelfbekrachtiging bij sleepankermotoren;
- remmen door hypersynchrone werking;
- remmen door hyposynchrone werking;
- remmen door eenfasige aansluiting.

Enkel voor klasgebruik.



Enkel voor klasgebruik.