

L. Butaye

# Elektrische machines

Asynchrone machines en gelijkstroommachines

Energietechnologie - Fase 2

Editie 2023-2024



Hoort er bij deze Acco-cursus een digitale component,  
dan vind je achteraan de code en werkwijze.

Wettelijk depot: D/2023/0543/218

ISBN: 9789464674965

© Copyright by Acco (Academische Coöperatieve Vennootschap cv), Leuven (België)

Het is verboden om deze uitgave of gedeelten ervan over te nemen of te kopiëren zonder *voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever*. Voor aanvragen tot of informatie in verband met het overnemen en/of gebruik van gedeelten uit deze publicatie, neem je contact op met Acco Learn, Sluisstraat 10, 3000 Leuven (België) – tel. 016/62.80.00 - e-mail: [accolearn@acco.be](mailto:accolearn@acco.be).

**acco**  
**learn**

Literatuurlijsten, boeken, cursussen, digitale oefeningen en meer:  
[www.acco.be](http://www.acco.be)

*Beste student*

*De cursus die voor u ligt, is deze van elektrische machines, een wereld waarin magnetisme, elektromagnetisme, AC-netwerken en driefasige systemen, complexe getallen, vectordiagramma's, enz. hand in hand gaan. Deze cursus is een werkdocument. De cursus instuderen zoals hij bij de aanvang van het academiejaar door u ontvangen is, volstaat niet. Talrijke figuren, vectordiagramma's, equivalente ketens, enz. zullen gedurende de les stapsgewijs en met verschillende kleuren aangebracht en opgebouwd worden. De opbouw en inzichten kunnen niet in één figuur - zwart op wit - weergegeven worden. Aan u om actief deel te nemen in de les, en het werkdocument tot een levende cursus te maken.*

*Deze cursus sluit volledig aan bij de cursus transformatoren. Veel inzichten, kennis, basisbegrippen en grootheden, enz. zullen nu terug toegepast worden maar verder uitgebreid worden. De oefeningen hebben tot doel de gezien theorie toe te passen. Het zijn invulbladen. De oefeningen kunnen thuis grondig voorbereid worden. De oefeningen die niet aanbod komen in de les, kunnen ter verbetering afgegeven worden en/of voorafgaand aan de les even overlopen worden en/of in het monitoraat besproken worden.*

*Naast het monitoraat zijn er achteraan deze cursus zelfevaluatie vragen opgesteld. Los deze op als test voorafgaand aan de evaluatie, nadat de leerstof grondig begrepen en ingestudeerd werd. Controleer nadien uw antwoorden op correctheid a.d.h.v. cursus. Het aantal vragen is afgенomen. Er moet immers gestreefd worden naar het zelfstandig instuderen en verwerken van deze cursus. Vul dus zelf aan en denk zelf na over mogelijke vragen.*

*Veel succes !*

*Mevr. L. Butaye*

*Liesbet.butaye@odisee.be*

Hoofdstuk 1 INLEIDING TOT DE LEERINHOUD ELEKTRISCHE MACHINES .....	8
1.1 Classificatie .....	8
1.2 Conventies .....	9
1.2.1 Generator .....	9
1.2.2 Motor.....	9
1.2.3 Opmerking.....	9
Hoofdstuk 2 ASYNCHRONE MACHINES.....	10
2.1 De bouw van de asynchrone machine .....	10
2.1.1 De stator.....	10
2.1.2 De rotor .....	12
2.2 Aandrijfsystemen en werkingsmodes .....	14
2.2.1 Algemeen.....	14
2.2.2 Motorwerking.....	14
2.2.3 Generatorwerking .....	15
2.2.4 Kwadrantenwerking .....	15
2.3 Het magnetisch draaiveld.....	18
2.4 Het asynchroon ideaal motorprincipe.....	27
2.5 Het asynchroon ideaal generatorprincipe.....	33
2.6 De slip .....	37
2.6.1 Begrip absolute slip .....	37
2.6.2 Begrip relatieve slip.....	37
2.6.3 Begrip procentuele slip .....	38
2.6.4 Afgeleide formules .....	38
2.7 De frequentieafhankelijke rotorgrootheden.....	38
2.7.1 De rotorfrequentie .....	38
2.7.2 De rotoremk .....	39

2.7.3	De rotorreactantie.....	40
2.8	Het equivalent schema van de niet ideale asynchrone machine.....	40
2.8.1	De niet ideale asynchrone motor bij nullast .....	40
2.8.2	De niet ideale asynchrone motor bij rotorstilstand.....	42
2.8.3	De belaste niet ideale asynchrone motor bij nominaal draaien.....	44
2.8.4	De niet ideale asynchrone generator.....	47
2.9	Vermogensverdeling en rendement.....	48
2.9.1	In de stator .....	48
2.9.2	Overdracht tussen stator en rotor .....	49
2.9.3	In de rotor.....	49
2.10	Inwendig koppel.....	50
2.11	Statische werking van de asynchrone motor.....	54
2.12	Dynamische werking van de asynchrone motor.....	56
2.13	Toerentalvariatie.....	58
2.13.1	Poolomschakelbare motoren .....	58
2.13.2	Variatie van de frequentie .....	60
2.13.3	Variatie van de slip .....	64
2.14	Stroom-toerentalkarakteristiek .....	67
2.15	Aanloopmethodes.....	69
2.15.1	Directe aanloop .....	69
2.15.2	Aanloop onder verlaagde spanning .....	71
2.15.3	Aanloop met supplementaire rotorweerstanden.....	74
2.16	Dubbelkooirotor en stroomverdringingsrotor.....	77
2.16.1	Dubbelkooirotor .....	78
2.16.2	Stroomverdringingsrotoren .....	80
2.17	Oefeningen.....	82

2.17.1	Oefening 1 .....	82
2.17.2	Oefening 2 .....	83
2.17.3	Oefening 3 .....	83
2.17.4	Oefening 4 .....	84
2.17.5	Oefening 5 .....	85
2.17.6	Oefening 6 .....	86
2.17.7	Oefening 7 .....	87
2.17.8	Oefening 8 .....	88
2.17.9	Oefening 9 .....	89
2.17.10	Oefening 10 .....	91
2.17.11	Oefening 11 .....	92
2.17.12	Oefening 12 .....	93
2.17.13	Oefening 13 .....	94
2.17.14	Oefening 14 .....	94
2.17.15	Oefening 15 .....	95
2.17.16	Oefening 16 .....	96
2.18	Zelfevaluatie.....	97
Hoofdstuk 3	GELIJKSTROOMMACHINES .....	120
3.1	Inleiding .....	120
3.2	De bouw van de gelijkstroommachine .....	121
3.2.1	De onderdelen.....	121
3.2.2	De stator .....	121
3.2.3	Het anker .....	122
3.3	De verschillende types gelijkstroommachines .....	123
3.3.1	De permanent magneet motor .....	123
3.3.2	De types bekragtiging.....	124

3.4	Principe gelijkstroommotor .....	125
3.4.1	Principe .....	125
3.4.2	Motorwerking .....	128
3.4.3	Primair verschijnsel bij motorwerking .....	129
3.4.4	Secundair verschijnsel bij motorwerking .....	129
3.5	Ankerreactie .....	131
3.5.1	Onbelast .....	131
3.5.2	Belaste gelijkstroommachine .....	132
3.5.3	Oplossingen .....	133
3.6	Principe gelijkstroomdynamo .....	135
3.6.1	Principe .....	135
3.6.2	Dynamowerking .....	137
3.6.3	Primair verschijnsel .....	138
3.6.4	Secundair verschijnsel .....	139
3.7	Vermogenverdeling motor .....	139
3.8	Vermogenverdeling dynamo .....	142
3.9	Kwadrantenwerking .....	143
	.....	144
3.10	Onafhankelijk bekragtigde gelijkstroommotor .....	144
3.10.1	Equivalent schema .....	144
3.10.2	Veldstroom .....	145
3.10.3	Ankerstroom .....	145
3.10.4	Koppelkarakteristiek .....	145
3.10.5	Toerentalkarakteristiek .....	146
3.11	Shuntmotor .....	148
3.11.1	Equivalent schema .....	148

3.11.2 Veldstroom.....	148
3.11.3 Ankerstroom.....	148
3.11.4 Koppelkarakteristiek .....	149
3.11.5 Toerentalkarakteristiek .....	149
3.12 Seriemotor .....	150
3.12.1 Equivalent schema .....	150
3.12.2 Ankerstroom.....	150
3.12.3 Koppelkarakteristiek .....	151
3.12.4 Toerentalkarakteristiek .....	151
3.13 Toerentalvariatie van de OB-motor.....	152
3.13.1 Regeling van de ankerspanning.....	153
3.13.2 Regeling van de ankerweerstand .....	154
3.13.3 Regeling van de flux .....	155
3.14 Aanloopstroombeperking .....	155
3.15 Oefeningen.....	158
3.15.1 Oefening 1 .....	158
3.15.2 Oefening 2 .....	159
3.15.3 Oefening 3 .....	160
3.15.4 Oefening 4 .....	161
3.15.5 Oefening 5 .....	162
3.15.6 Oefening 6 .....	163
3.15.7 Oefening 7 .....	164
3.15.8 Oefening 8 .....	165
3.15.9 Oefening 9 .....	166
3.15.10 Oefening 10 .....	167
3.15.11 Oefening 11 .....	168

3.15.12	Oefening 12 .....	169
3.15.13	Oefening 13 .....	170
3.15.14	Oefening 14 .....	171
3.15.15	Oefening 15 .....	173
3.15.16	Oefening 16 .....	174
Hoofdstuk 4	Aanbevolen handboeken elektrische machines - Literatuurlijst.....	176

---

**Hoofdstuk 1 INLEIDING TOT DE LEERINHOUD ELEKTRISCHE MACHINES**

---

**1.1 Classificatie**

---

De naam 'elektrische machine' geldt voor elke machine, waarin een elektrisch geleidend circuit in beweging is ten opzichte van een magnetisch of elektromagnetisch veld of omgekeerd en waarbij telkens elektrische energie omgezet wordt in mechanische energie of omgekeerd.

Elektrische machines zijn dus elektromechanische omzetters van energie. Die omzetting gebeurt door toedoen van magnetische of elektromagnetische velden. Elektrische machines kunnen onderverdeeld worden in :

- *generatoren* : dit zijn die elektrische machines die mechanische energie omzetten in elektrische energie
- *motoren* : dit zijn die elektrische machines die elektrische energie omzetten in mechanische energie.

We beperken ons in deze cursus tot roterende bewegingen.

Zowel voor de generatoren als voor de motoren kan men een classificatie maken naargelang het een *gelijk-* of *wisselstroomtype* betreft.

Bij wisselstroommachines onderscheiden we de synchrone en de asynchrone machines. De synchrone machine treffen we vooral aan als generator. De asynchrone motor daarentegen is een van de meest gebruikte motoren.

Het is nuttig om op te merken dat alhoewel de transformator geen elektromechanische energieomzetter is, transformatoren meestal behandeld worden in de cursus elektrische machines. Het werkingsprincipe van de transformator ligt aan de basis van de werking van de meer ingewikkelde draaiende wisselstroommachines. Hij vormt dan ook het uitgangspunt in de besprekking van de asynchrone machine. Denk aan de gelijkenis bv. van het equivalent schema van de transformator met dit van de asynchrone machine/motor. Daarbij komt dat de transformator dikwijls gebruikt wordt in combinatie met wisselstroommachines.

## 1.2 *Conventies*

---

### 1.2.1 *Generator*

De werking van de generator steunt op de Blv-regel (rechterhandregel – zie inleiding boek transformatoren). Bij de generatorwerking is de energiestroom gericht van het werktoog of de last naar het net. Een positief of negatief teken kan slechts toegekend worden aan de energiestroom op basis van een voorafgaande keuze van een referentierichting.

Voor generatoren neemt men bij voorkeur de generatorconventie aan, nl. waarbij de energiestroom bij normaal bedrijf, nl. bij generatorwerking, een positief teken krijgt.

### 1.2.2 *Motor*

De werking van de motor baseert zich op de Bli-regel (linkerhandregel – zie inleiding boek transformatoren) . Vermits het vermogen aan de verbruiker geleverd wordt, is het belangrijk om een motorconventie te kiezen, waarbij de energiestroom bij normaal bedrijf positief is.

Het is duidelijk dat in de conventie van motorwerking, de tekens negatief zullen worden indien de machine zich dan als generator zou gedragen. De aanzet om over te gaan van generator-naar motorwerking of omgekeerd wordt hierdoor mogelijk !

### 1.2.3 *Opmerking*

- Algemeen zal steeds de naam ‘machine’ optreden teneinde zowel de motor- als generatorwerking te dekken. Het overgaan van generator- naar motorwerking of omgekeerd zal voor bepaalde types van motoren verder in de cursus aangetoond worden. De tekenconventie en arbeidsfactor spelen hier een cruciale rol !
- Bij transformatoren treedt een gemengde situatie op vermits de primaire kring zich ‘gedraagt’ als motorwerking, terwijl in de secundaire kring een generatorwerking ‘optreedt’.

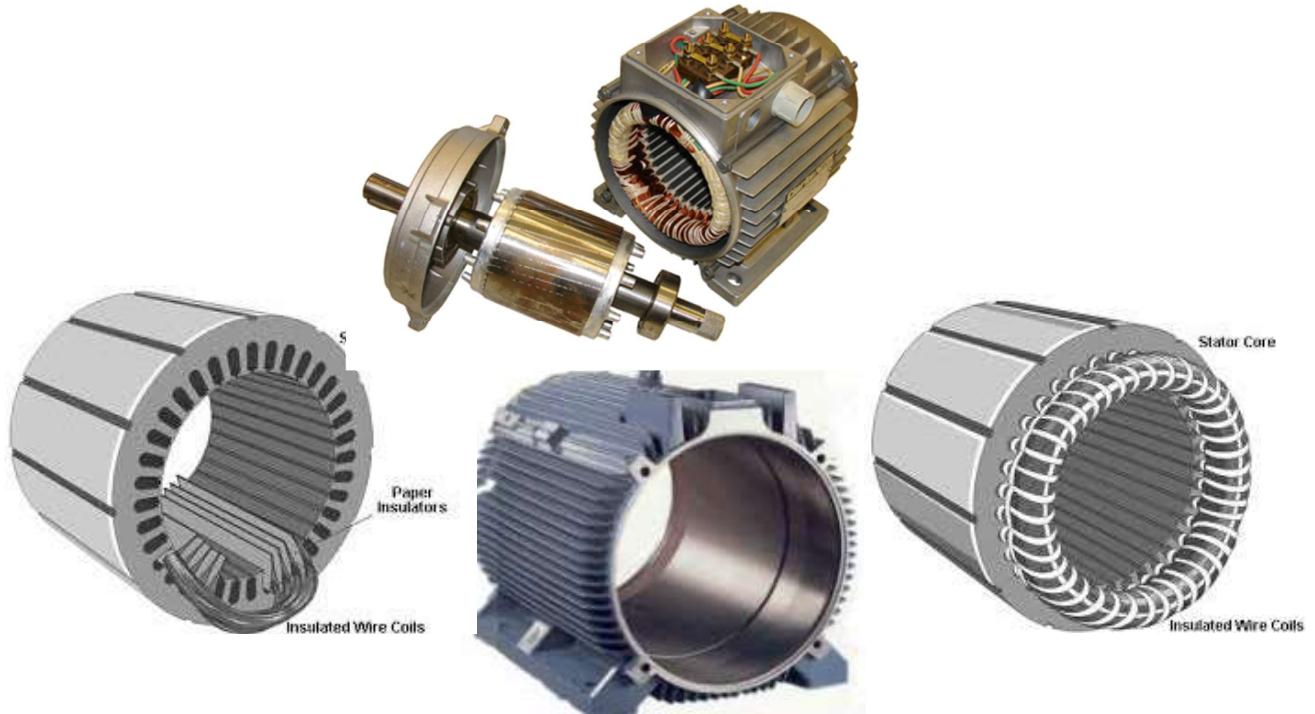
## Hoofdstuk 2 ASYNCHRONE MACHINES

### 2.1 De bouw van de asynchrone machine

De driefasige asynchrone machine (motor of generator) is opgebouwd uit een statisch (stilstaand) gedeelte, de *stator* en een roterend (draaiend) gedeelte, de *rotor* genoemd. Beiden zijn van elkaar gescheiden door een kleine *luchtspleet*.

#### 2.1.1 De stator

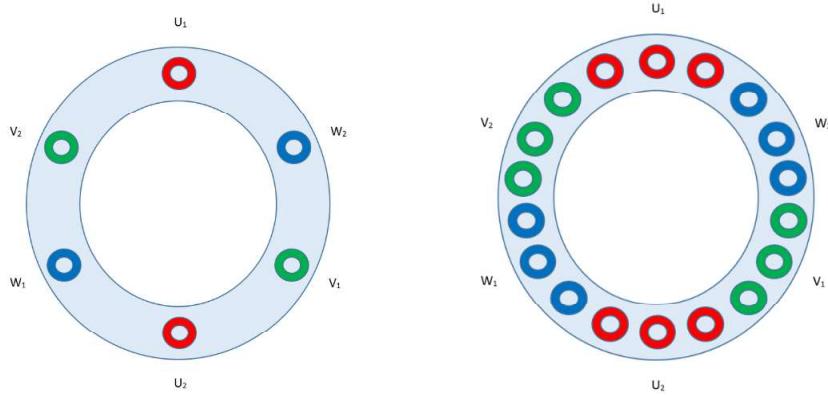
De *stator* van de driefasige asynchrone machine bestaat altijd uit een behuizing van gietstaal waarin de driefasige statorwikkelingen in gleuven, regelmatig over de statoromtrek verdeeld, aangebracht zijn. De stator van een asynchrone machine bevat dus juist zoals de stator van een synchrone motor en deze van een synchrone generator, een *driefasige wikkeling*.



Bron : Siemens Catalog D81.1 (bovenaan)

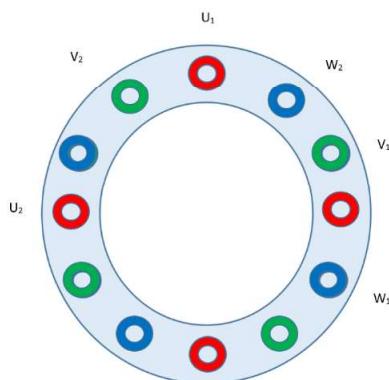
Bron : Windmolensite.be (onderaan)

De driefasige wikkeling kan *twee- of meerpolig* uitgevoerd zijn ; één- of meergaats gewikkeld zijn.



Bovenstaande figuren stellen een tweepolige draaistroomwikkeling voor die één gaats (linkerzijde) en meergaats (rechterzijde) gewikkeld is. In beide gevallen ontstaat dan in de asynchrone machine bij het aansluiten van een driefasige spanning op de statorwikkeling, een *tweepolig draaiveld*. Om deze reden wordt de driefasige asynchrone motor ook draaistroommotor genoemd.

Hieronder wordt een vierpolige wikkeling voorgesteld die één gaats gewikkeld is, als schematische voorstelling. In praktijk zal uiteraard de wikkeling steeds meergaats gewikkeld is. De vierpolige wikkeling, één gaats of meergaats gewikkeld, zal een *vierpolig draaiveld* opwekken.



De statorwikkeling wordt dus o.a. gekarakteriseerd door het aantal polenparen dat per fase optreedt. Het *aantal polenparen* per fase wordt voorgesteld door  $p$ . Een tweepolige wikkeling bezit 2 polen (één noord- en één zuidpool) en dus 1 polenpaar;  $p$  kan dus gelijkgesteld worden aan 1. Een vierpolige wikkeling wordt gekenmerkt door  $p = 2$ , d.w.z. 2 polenparen of 4 polen.

In de ruimte zullen voor een tweepolige wikkeling de beginpunten van elke spoelzijde telkens onder  $120^\circ$  verschoven zijn. Voor een vierpolige wikkeling liggen de beginpunten telkens onder een hoek van  $60^\circ$ .

### 2.1.2 De rotor

Naargelang de constructie van de rotor van de asynchrone machine, onderscheidt men 2 types machines : de kooirotormachines en de sleepringmachines.

De *kooirotormachines*, ook *kooiankermachines* of *kortsluitrotormachines* genoemd, hebben een gelamelleerde rotor. De rotor heeft op de as een groot aantal stalen plaatjes, samengevoegd tot een cilinder. In die plaatjes, waarin vooraf gieuven of gaten geponst werden, zijn koperen of aluminiumstaven aangebracht. Deze zijn aan de uiteinden langs weerszijden met koperen of aluminiumringen verbonden en dus kortgesloten (kortsluitringen). Doordat de staven met beide ringen een kooi vormen spreken we ook van een kooirootor.

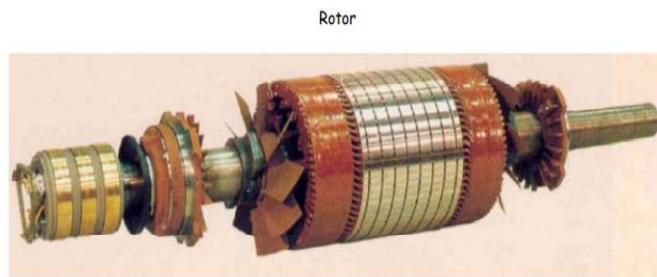
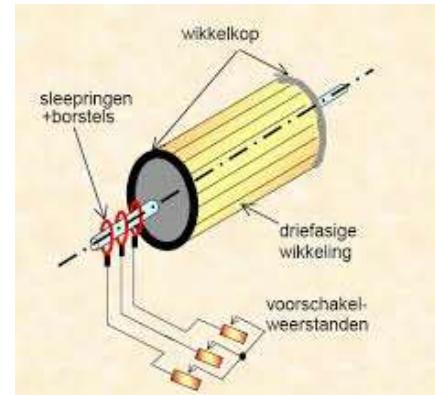
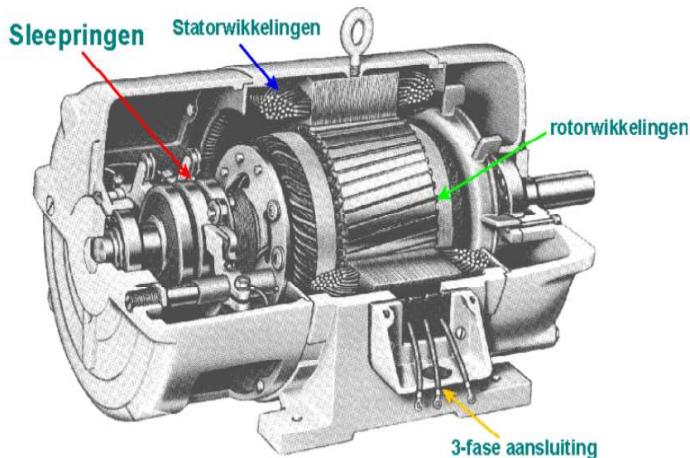


Bron : Educypedia - Wikipedia (bovenaan)

Bron : Siemens Catalog D81.1 (onderaan)

Bij *sleepringmachines* daarentegen bevat de gelamelleerde rotor een geïsoleerde driefasige wikkeling aangebracht in gleuven, waarvan de uiteinden verbonden zijn met sleepringen. De rotor is bij een sleepringmachine evenzeer bewikkeld. Hierbij moet het aantal polen van de driefasige rotorwikkeling identiek zijn aan het aantal polen van de bijkomende statorwikkeling.

De drie uiteinden van de driefasige rotorwikkeling zijn inwendig met elkaar verbonden, zodat de rotorspoelen vast in ster geschakeld zijn. De drie beginpunten, K, L en M van de rotorwikkeling zijn verbonden aan drie sleepringen die op de rotoraas zijn aangebracht. Op die sleepringen, die t.o.v. de as en t.o.v. elkaar geïsoleerd zijn, rusten borstels die met drie rotorklemmen verbonden zijn. Op die drie klemmen kan een driefasige rotoraanzetweerstand aangesloten worden.



Bron : Windmolensite (linksboven)

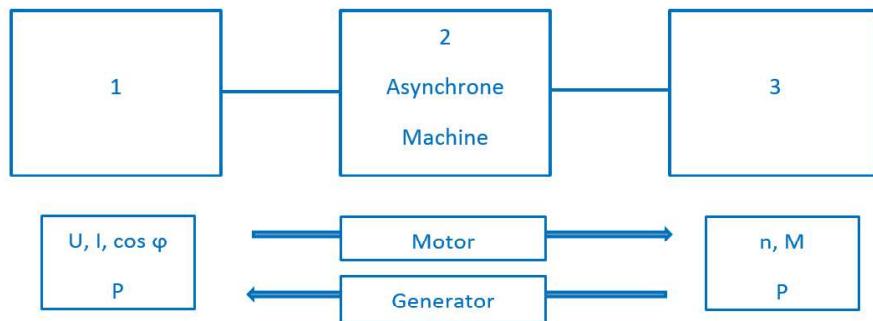
Bron : Educypedia (rechtsboven-onderaan)

## 2.2 Aandrijfsystemen en werkingsmodes

---

### 2.2.1 Algemeen

Moderne elektrische aandrijfsystemen bestaan uit drie delen : een elektronische systeemblok (blok 1), een elektrische machine (blok 2) en een mechanische systeemblok (blok 3).



Het hart van dit systeem wordt gevormd door de machine, hier in het bijzonder de asynchrone machine. De grootheden die blok 1 karakteriseren zijn van elektrische aard zoals de spanning, de stroom, de arbeidsfactor, het elektrisch vermogen, enz. Het gedrag van blok 3 wordt gekarakteriseerd door mechanische grootheden zoals het toerental, het koppel, het mechanisch vermogen. Ditzelfde blokschema (blok 2) kan zich nu in 2 moden bevinden, motormode of generatormode.

### 2.2.2 Motorwerking

Bij motorwerking verloopt de *energiestroom* in de zin van blok 1 naar blok 3 toe. De ingangsgrootheden van het systeem zijn elektrische grootheden, de uitgangsgrootheden mechanische grootheden. De elektrische machine (blok 2) neemt elektrisch vermogen op uit de voeding en zet deze om in mechanische energie die afgegeven wordt aan het werktuig. De elektrische machine drijft het werktuig aan en werkt dus als motor. De energiestroom wordt als positief beschouwd.

### 2.2.3 Generatorwerking

Bij generatorwerking daarentegen gebeurt de *energiestroom* in de omgekeerde zin. De ingangsgrootheden zijn nu de mechanische grootheden geworden, de uitgangsgrootheden daarentegen zijn de elektrische grootheden. De elektrische machine neemt mechanisch vermogen op uit de mechanische systeemblok en geeft elektrisch vermogen af aan de elektronische systeemblok. Men zegt dat de elektrische machine als generator werkt. De energiestroom wordt negatief beschouwd.

### 2.2.4 Kwadrantenwerking

Bij een driefasige asynchrone machine wordt het elektrisch toegevoegd vermogen gegeven door  $P_1 = 3.U_F.I_F.\cos\varphi_{1F} = \sqrt{3}.U_L.I_L.\cos\varphi_{1F}$ . Bij motorwerking is het machinevermogen positief, bij generatorwerking is het negatief, en dit vanwege de arbeidsfactor.

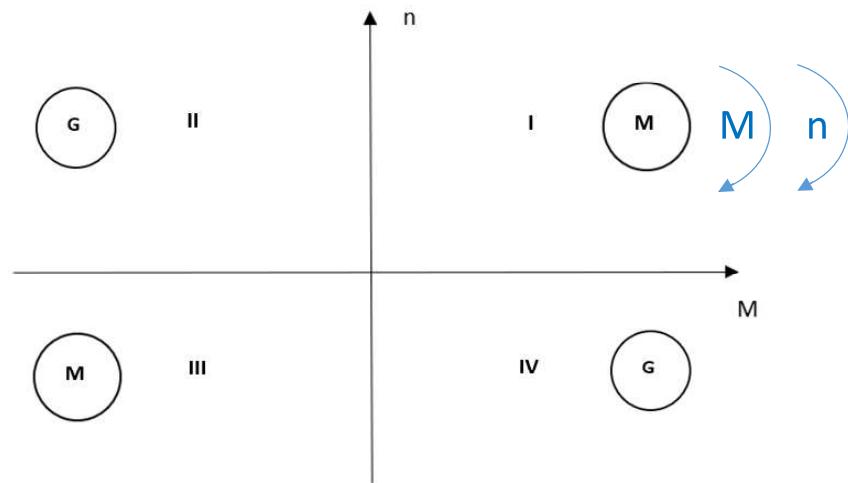
Het mechanisch vermogen wordt gegeven door  $P = M.\omega$  met  $\omega = 2\pi.n/60$  (rad/s). Het mechanisch vermogen is positief als beide factoren  $M$  en  $\omega$  hetzelfde teken bezitten; het mechanisch vermogen is negatief als beide een verschillend teken bezitten.

Algemeen worden het toerental en het koppel als positief beschouwd in de rechtsom zin, negatief bij de linksom zin.

Elk van de gegevens is samengebracht in onderstaande tabel.

		Motorwerking	Generatorwerking
Toerental n pos	M	pos	neg
	$\cos\varphi_{1F}$	pos	neg
Toerental n neg	M	neg	pos
	$\cos\varphi_{1F}$	pos	neg

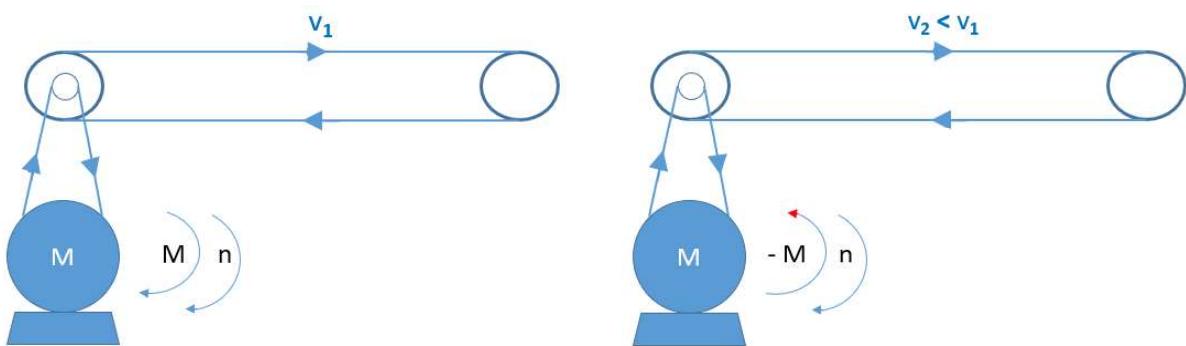
De elektrische machine kan zich dus voor de positieve of negatieve draaizin bevinden in de motor- of generatormode. Er zijn dus 4 bedrijfsmogelijkheden. Deze kunnen we voorstellen in het  $n = f(M)$ -assenstelsel, nl. het toerental versus koppel-assenstelsel.



Elk kwadrant komt met één bedrijfstoestand overeen. In het eerste en derde kwadrant werkt de machine als motor ; in het tweede en vierde kwadrant als generator. In welke kwadranten een welbepaalde aandrijving kan werken, hangt mede ook af van het werk具ig. We verduidelijken dit hieronder met 3 eenvoudige voorbeelden, nl. een transportband, een hefbrug en een lift.

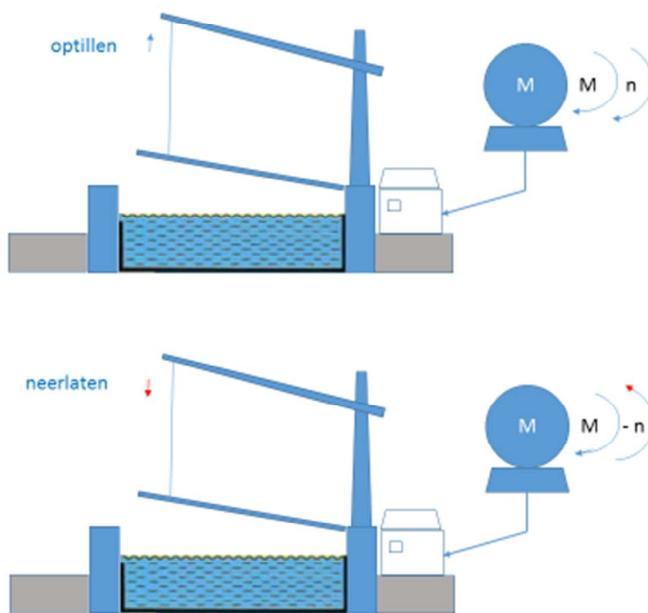
#### Voorbeeld 1

De transportband wordt in het algemeen gekenmerkt door één draairichting. In onderstaande figuur (links) drijft de elektrische machine de transportband aan. Koppel en toerental zijn beide positief. De machine werkt als motor in kwadrant 1. In de rechtse figuur remt de machine de transportband af. De draaizin is echter dezelfde gebleven, het toerental neemt af maar blijft positief ; het koppel keert echter om. De machine werkt als generator in het tweede kwadrant. De transportband in dit voorbeeld gedraagt zich dus als een werk具ig met een tweedekwadrantenbedrijf, d.w.z. in kwadrant 1 en 2 ofwel in kwadrant 3 en 4 bij de andere draaizin.

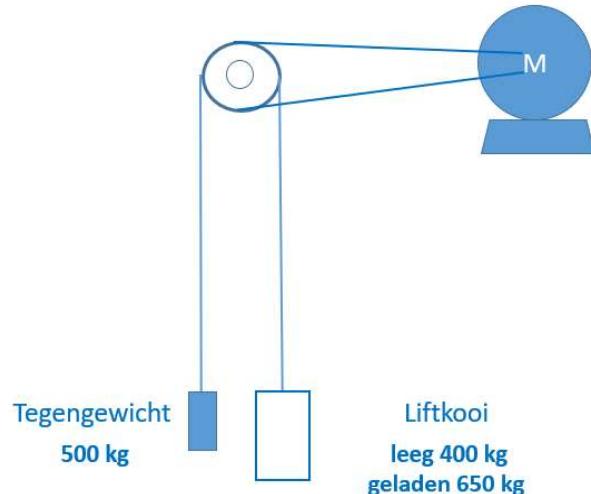


*Voorbeeld 2*

De hefbrug is ook een voorbeeld van een tweekwadrantenbedrijf. Bij het heffen zal de aandrijving in kwadrant 1 werken vermits het koppel en het toerental hetzelfde teken hebben (hier beide positief). Bij het neerlaten de aandrijving zal overgegaan worden naar kwadrant 4 vermits het toerental negatief wordt terwijl het koppel positief blijft. Er wordt overgegaan van motorwerking naar generatorwerking.

*Voorbeeld 3*

Voor een vierkwadrantenbedrijf nemen we het voorbeeld van een lift. De machine kan zowel als generator of als motor fungeren.



In onderstaande tabel worden de verschillende bedrijfsmogelijkheden weergegeven. Vul de tabel verder aan, gebruikmakend van en redenerend op het cijfervoorbeeld.

koppel	–	toerental	kwadrant	bedrijf	
	M		n	I	Liftkooi leeg - neerwaarts
					Liftkooi vol - neerwaarts
					Liftkooi vol - omhoog
					Liftkooi leeg - omhoog

In vele toepassingen wordt de elektrische machine vaak enkel en alleen gebruikt als motor. Ze werkt dan slechts in kwadrant 1 of 3. Het is duidelijk dat dit ook het geval kan zijn voor de generatorwerking. De machine werkt dan ofwel in kwadrant 2 ofwel in 4. De elektrische machine noemt dan een generator (alternator indien het een synchrone machines betreft, dynamo indien het een gelijkstroommachine betreft).

### 2.3 Het magnetisch draaiveld

---

In de luchtspleet van een wisselstroommachine wordt door de driefasige statorwikkeling, een draaiveld opgewekt. Algemeen kan men stellen dat een magnetisch draaiveld een veld is dat zich in de loop van de tijd voortplant langs de omtrek van de machine, met een welbepaalde constante omloopsnelheid  $n_s$  én waarbij het veld in grootte constant blijft. Deze constante snelheid van het draaiveld wordt de *synchrone snelheid*  $n_s$  genoemd. De snelheid van de rotor daarentegen is  $n_R$  en zal verschillend zijn van de synchrone snelheid  $n_s$  en kan – bv. bij wijziging van de belasting – variabel zijn.

Het magnetisch draaiveld kan twee- of meerpolig zijn. Het draaiveld wordt opgewekt door de driefasige wikkeling, die gelijkmatig in de ruimte aangebracht is in de gleuven van het blikpakket, te laten doorlopen door een driefasige stroom, afkomstig van een driefasige spanning. Deze constructie komt zowel voor bij asynchrone machines als bij synchrone machines. Ter info : beide types van machines hebben echter een verschillende rotor. De synchrone machine heeft een rotor waarvan de wikkeling een gelijkstroom voert of een permanent magneet systeem. De rotor wekt dus in dit geval zelf een rotorveld op, dat onafhankelijk is van het feit of dat stator al dan niet gevoed wordt.

De eenvoudigste driefasige statorwikkeling bestaat uit drie gleufparen die elk  $120^\circ$  ten opzichte van elkaar verschoven zijn. Deze drie spoelen worden gevoed door drie wisselstromen met dezelfde effectieve waarde, dezelfde frequentie en die onderling  $120^\circ$  verschoven zijn t.o.v. elkaar, afkomstig van een driefasige statorspanning. Er ontstaat een magnetisch draaiveld in de stator dat zich via de luchtspleet en de rotor sluit. Het draaiveld induceert een spanning in de rotorgedeelten. Vermits de rotorgedeelten kortgesloten zijn, zal de geïnduceerde spanning rotorstromen doen ontstaan. Vanwege het inductiekarakter in de rotor (geïnduceerde spanning/stroom) wordt de asynchrone machine/motor ook inductiemachine/motor genoemd.

In eerste instantie wordt het draaiveld uitgetekend vertrekende van de driefasige stromen die vloeien door de tweepolige wikkeling. We doen dit voor vier tijdstippen. We kunnen hieruit besluiten dat er ten eerste een tweepolig draaiveld ontstaat. Ten tweede maakt het veld gedurende één periode van de stromen (spanningen) een volledige omwenteling. Hieruit kan afgeleid worden dat het synchrone toerental voor een tweepolige statorwikkeling gelijk is aan  $n_s = 60.f_s$ . Ten derde blijkt dat de grootte van het draaiveld op elk tijdstip (in uitbreiding op de beschouwde tijdstippen van  $\omega t = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  en  $270^\circ$ ) gelijk is en wordt gegeven door  $\phi_{tot} = 1,5 \cdot \phi_m$ .

Herhaal deze oefening nu voor een vierpolige wikkeling. Het vierpolig draaiveld dat nu ontstaat, heeft gedurende één periode slechts een halve omwenteling gemaakt. Voor het synchrone toerental geldt er nu dat  $n_s = 60.f_s/2$ . Voor elke tijdstip blijft de grootte van het draaiveld constant. Naar analogie kan voorspeld worden dat voor een zes polig draaiveld de formule  $n_s = 60.f_s/3$  zal worden bekomen. Veralgemeen we dit dan bekomen we voor het synchroon toerental van een asynchrone machine

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

waarbij  $p$  het aantal polenparen is van de statorwikkeling en dus  $2p$  het aantal polen van de machine is. Daarnaast wordt  $n_s$  uitgedrukt in omwentelingen/minuut of in toeren/min.

Men kan de hoeksnelheid van het resulterend magnetisch draaiveld omkeren door de fasevolgorde van de voedende wisselstromen te wijzigen. Dit heeft tot gevolg dat de rotor van de driefasige machine in de andere zin zal draaien. Praktisch verwezenlijken we dit door twee klemmen van het voedende driefasige systeem te verwisselen. De wijziging van de draaizin van het magnetisch draaiveld wordt grafisch nagegaan op de derde figuur (van wijzerzin naar tegenwijzerzin).

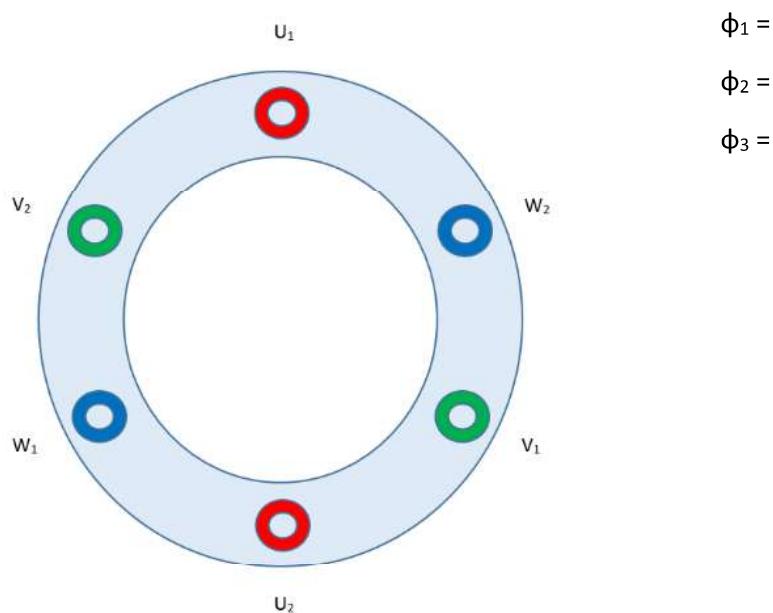
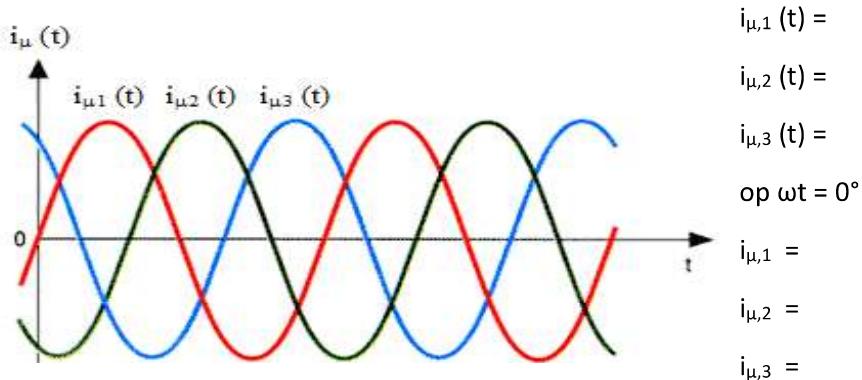
Het ontstaan van het draaiveld kan ook wiskundig aangetoond worden. Het resulterend draaiveld is

$$\bar{h} = h_x + h_y = 1,5 \cdot H_m \cdot e^{-j\omega t}$$

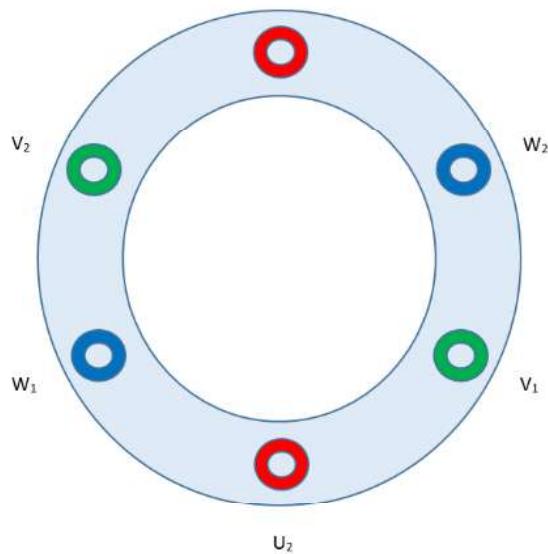
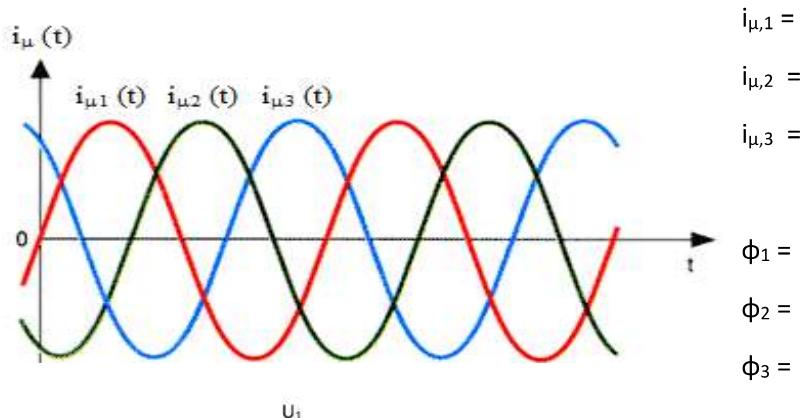
Deze uitdrukking toont aan dat het draaiveld een constante amplitude heeft van  $1,5 H_m$  en met een constante hoeksnelheid van  $\omega$  in uurwijzerzin – indien het driefasig direct systeem aangeboden wordt – ronddraait. Wanneer men nu in de statorwikkeling twee lijnen omwisselt en aldus een indirect systeem aanbiedt, zal de draaizin omkeren. Het draaiveld wordt dan :

$$\bar{h} = h_x + h_y = 1,5 \cdot H_m \cdot e^{+j\omega t}$$

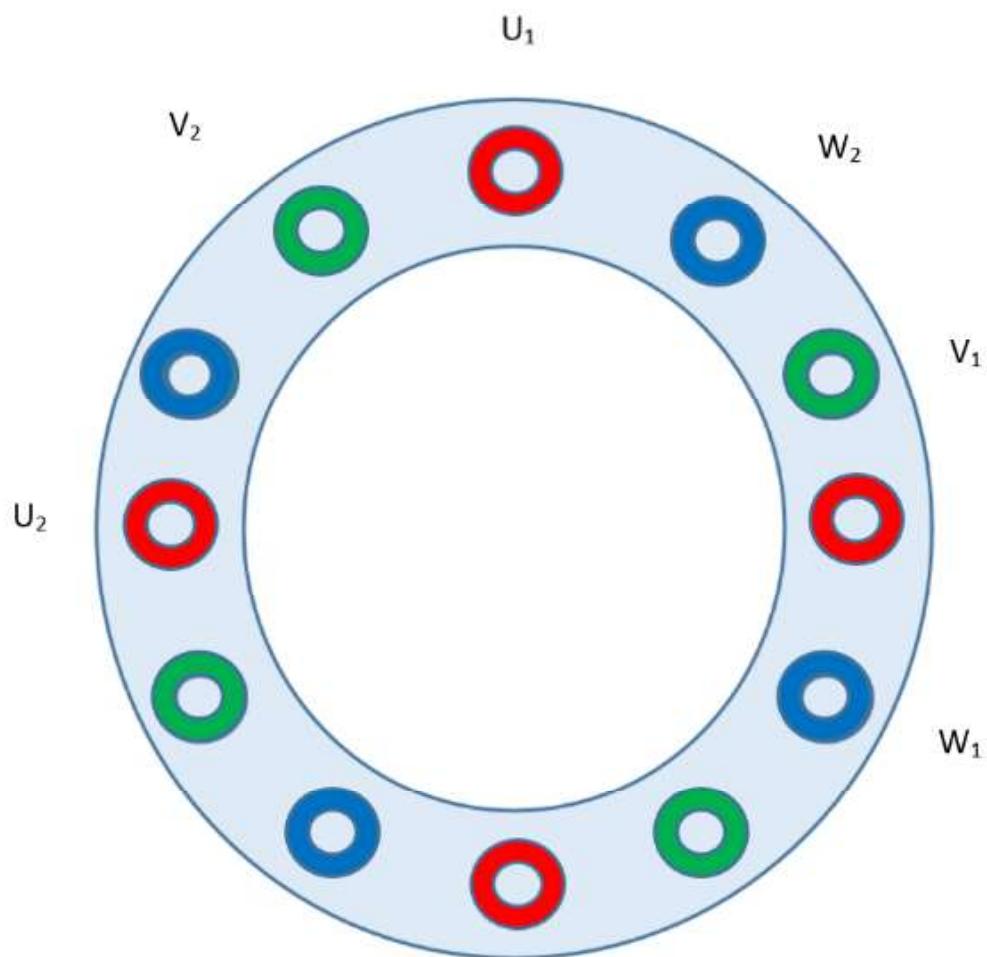
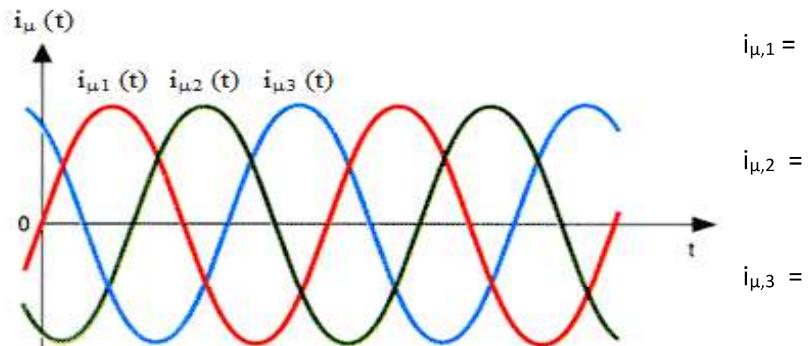
Tweepolig draaiveld – Draaizin in **uurwijzerzin** –  $\omega t = 0^\circ$



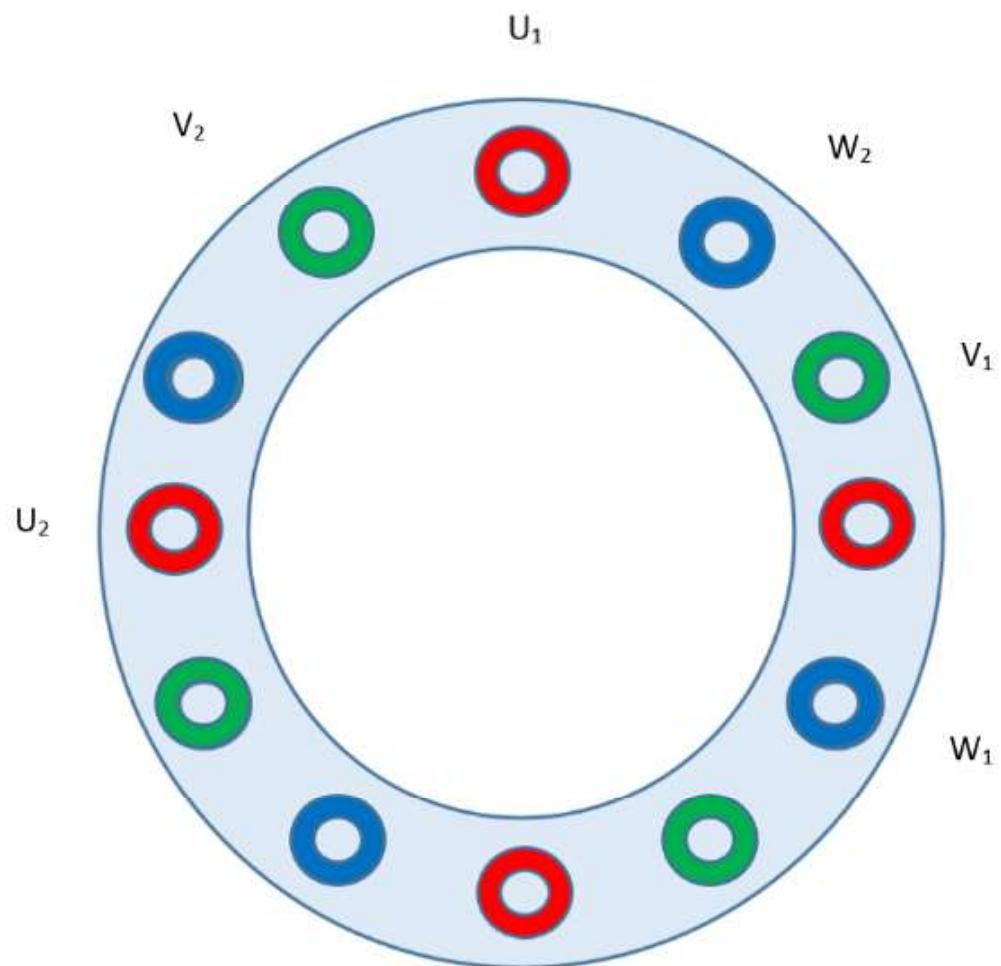
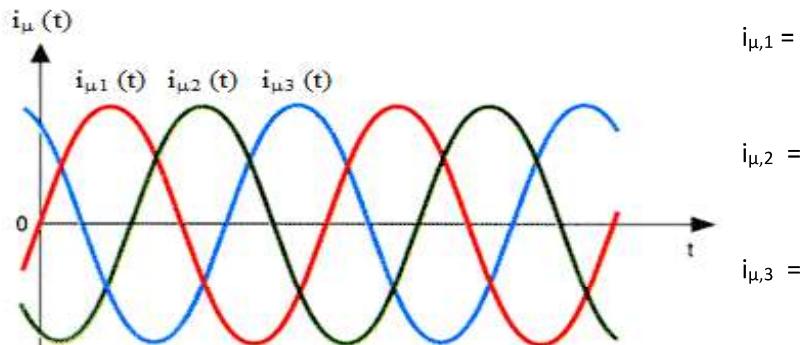
Tweepolig draaiveld – Draaizin in **uurwijzerzin** –  $\omega t = 90^\circ$



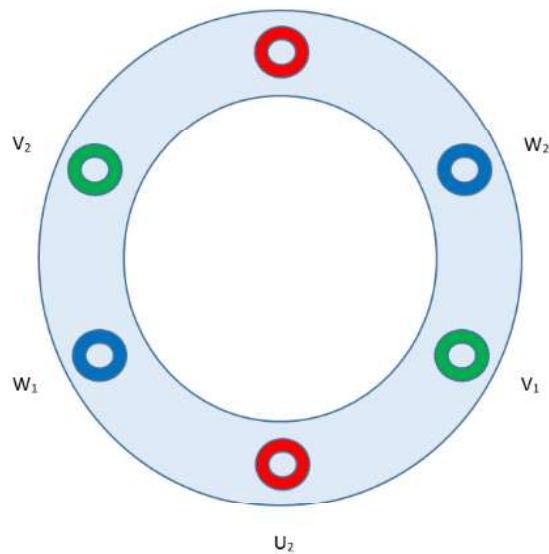
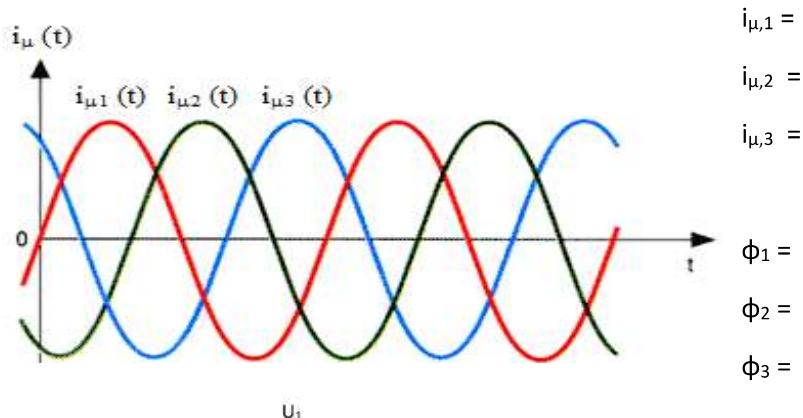
Vierpolig draaiveld – Draaizin in **uurwijzerzin** –  $\omega t = 0^\circ$



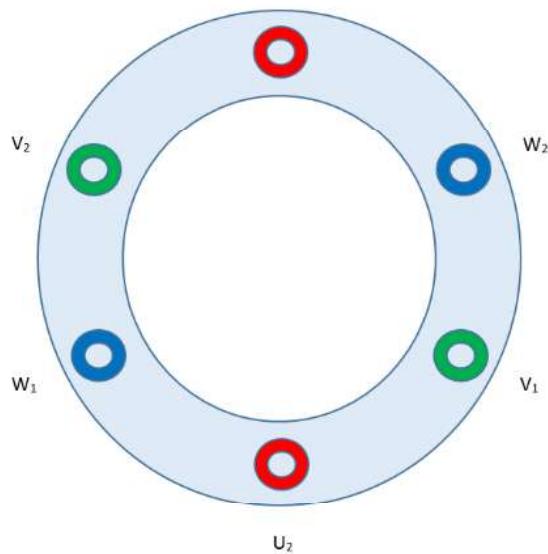
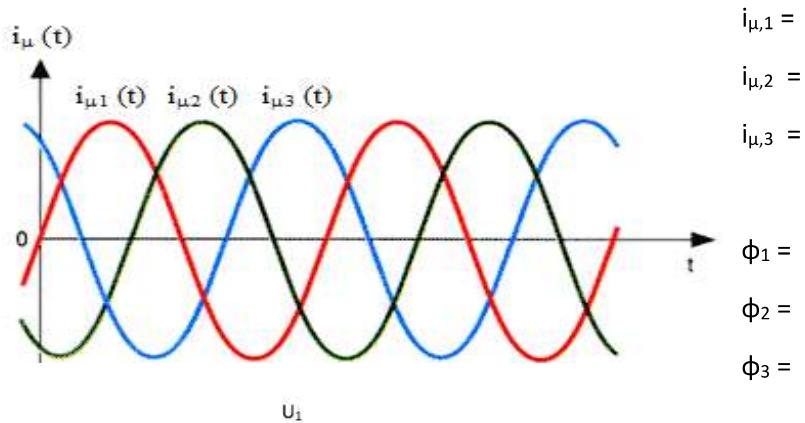
Vierpolig draaiveld – Draaizin in **uurwijzerzin** –  $\omega t = 90^\circ$



Tweepolig draaiveld – Draaizin in tegenwijzerzin –  $\omega t = 0^\circ$



Tweepolig draaiveld – Draaizin in tegenwijzerzin –  $\omega t = 90^\circ$



## 2.4 Het asynchroon ideaal motorprincipe

---

De geïdealiseerde asynchrone machine bezit enerzijds de bewikkeld statorwikkeling die in deze paragraaf als ideale spoelen kunnen beschouwd worden (geen ohmse weerstand, geen lekreactantie) en anderzijds een rotorwikkeling of rotorgeleiders die zuiver ohms zijn (geen lekreactantie). De asynchrone machine – motor in deze paragraaf – heeft ook geen ijzerverliezen (wervelstroomverliezen en hysteresisverliezen worden als 0 beschouwd). In verdere paragrafen zullen de niet ideale elementen beschouwd worden om te komen naar de meest algemene voorstelling van de asynchrone motor (resp. asynchrone generator). De werking van deze asynchrone motor kan begrepen worden a.d.h.v. een ideaal vectordiagramma – naar analogie met het vectordiagramma van de ideale driefasige transformator – en nadien fysisch a.d.h.v. het uittekenen van de diverse grootheden.

De bewikkeld statorwikkeling wordt gevoed met een driefasige spanning

$$u_1(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + 0^\circ)$$

$$u_2(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ)$$

$$u_3(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 240^\circ)$$

met statorfrequentie  $f_s$ . Deze driefasige spanning geeft aanleiding tot een driefasig systeem van magnetiseringsstromen

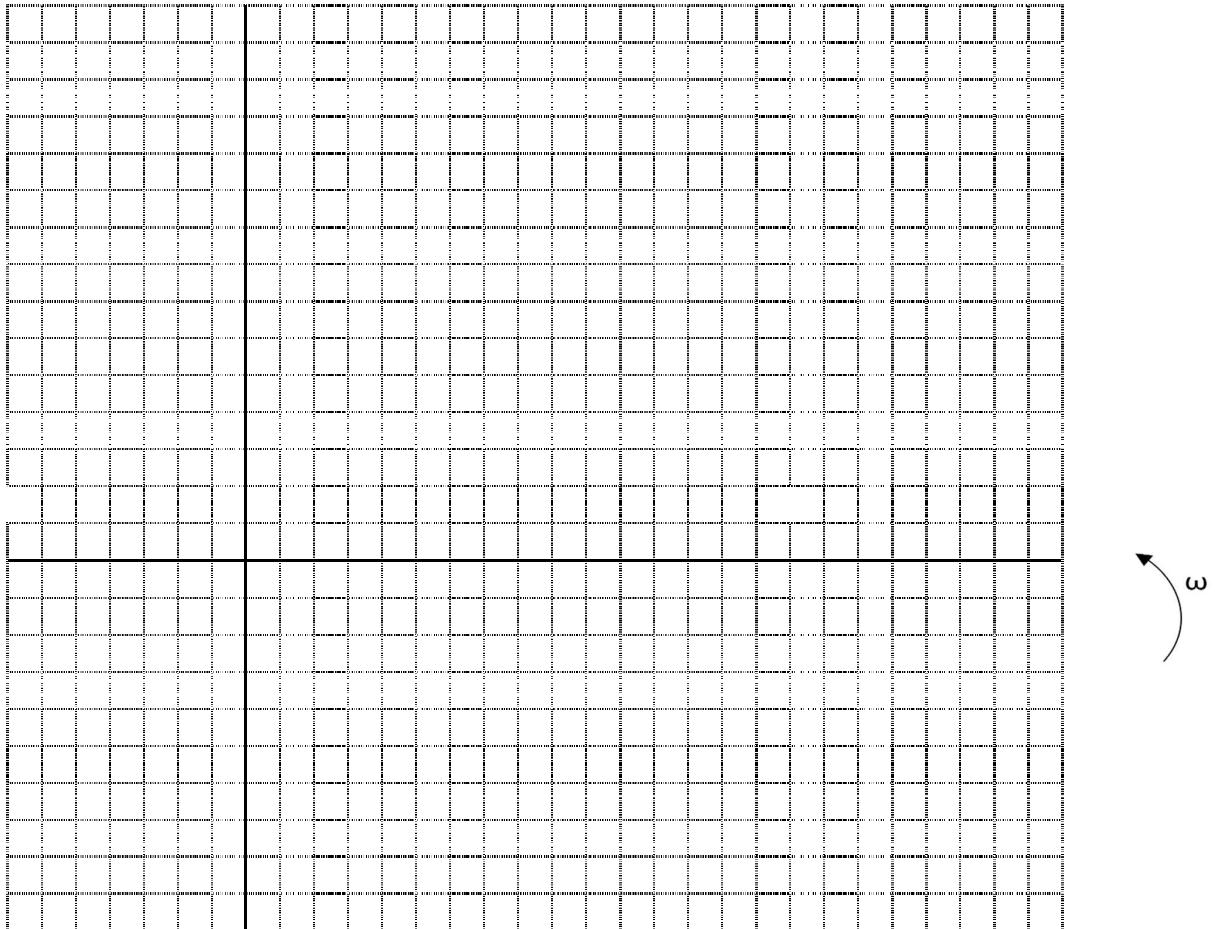
$$i_{\mu,1}(t) = I_{\mu,m} \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ)$$

$$i_{\mu,2}(t) = I_{\mu,m} \cdot \sin(\omega \cdot t - 210^\circ)$$

$$i_{\mu,3}(t) = I_{\mu,m} \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ)$$

dat op zijn beurt het magnetisch draaiveld doet ontstaan. De magnetiseringsstromen zijn in fase met hun respectievelijke fluxen (hoofdfluxen). In elke fase van de statorwikkeling wordt een tegenemk  $\bar{E}_1$  geïnduceerd, gelijk in grootte en tegengesteld gericht aan de overeenkomstige aangelegde fasespanning  $\bar{U}_1$ . De stilstaande rotor bevindt zich nu in het magnetisch draaiveld opgewekt door de stator. Er ontstaat dus in elke rotorfase een inductiespanning  $\bar{E}_2$ , in fase met  $\bar{E}_1$ , en  $90^\circ$  naastliggend op de flux  $\bar{\phi}$ .

## Vectordiagramma ideale motor



De rotorfasespanning  $\bar{E}_2$  veroorzaakt op haar beurt een rotorfasestroom  $\bar{I}_2$  in fase met  $\bar{E}_2$ . De rotor is immers kortgesloten en de kortsluitimpedantie werd – ideaal – zuiver ohms verondersteld. De rotorstroom  $\bar{I}_2$  wekt op haar beurt de rotorflux  $\bar{\phi}_2$  op die in fase is met de rotorstroom  $\bar{I}_2$  (Wet van Hopkinson) en dus  $90^\circ$  naastliggend is op het hoofdveld. Vermits de grootte van het hoofdveld in de asynchrone machine niet kan wijzigen omdat de aangelegde spanning en de frequentie constant zijn, zal er een bijkomend veld  $\bar{\phi}_1$  opgewekt worden dat het rotorveld  $\bar{\phi}_2$  volledig compenseert. Hiervoor wordt in de stator een bijkomende statorstroom  $\bar{I}_1'$  opgenomen. Deze bijkomende stroom  $\bar{I}_1'$  is in fase met het veld  $\bar{\phi}_1$  en - in het ideale geval - met de aangelegde spanning  $\bar{U}_1$  en dus  $90^\circ$  voor op  $\bar{\phi}$ .

De totale opgenomen statorstroom  $\bar{I}_1$  is de vectoriële som van de bijkomende stroom  $\bar{I}'_1$  en van de magnetiseringsstroom  $\bar{I}_\mu$ . Merk op dat de analogie groot is met het werkingsprincipe van de ideale transformator die ohms belast wordt. Een asynchrone motor kan immers beschouwd worden als een equivalente kortgesloten driefasige transformator. Bovenstaand vectordiagramma en het equivalent schema dat verder uitgewerkt wordt, vertonen grote gelijkenissen met dit van de ideale transformator.

Uit het vectordiagramma volgt dat de faseverschuiving tussen de aangelegde spanning en de totale opgenomen statorstroom gelegen is tussen de  $0^\circ$  en  $90^\circ$ . De arbeidsfactor is dus positief en dus ook het machinevermogen. Een positief machinevermogen wijst op motorwerking of op een energieoverdracht van de elektrische voeding (elektronische of elektrische systeemblok paragraaf 2.2.1) naar het werktuig (mechanische systeemblok paragraaf 2.2.1).

Merk op dat het vectordiagramma enkel de situatie weergeeft bij stilstand of juist bij aanzetten van de motor. De stator- en rotorfrequentie zijn dan identiek en dus kunnen de diverse grootheden op eenzelfde vectordiagramma voorgesteld worden. Van zodra de rotor draait, is dit niet meer het geval en kan dit vectordiagramma dus niet getekend worden tenzij via een kunstgreep waarbij de diverse grootheden allemaal onderhevig zullen worden aan de statorfrequentie. Daarom wordt er verder in de cursus het begrip slip ingevoerd zodat het equivalent schema en het niet ideaal vectordiagramma bij draaien kan getekend worden.

Dezelfde redenering als deze bij het tekenen van het vectordiagramma, wordt nu gevuld bij het grafisch uittekenen op verschillende tijdstippen van de volgende grootheden : de magnetiseringsstromen  $\bar{I}_\mu$ , de statorflux  $\bar{\phi}$ , de rotoremk  $\bar{E}_2$  en dus de rotorstroom  $\bar{I}_2$ , de rotorflux  $\bar{\phi}_2$ , de compenserende statorflux  $\bar{\phi}_1$ , en de bijkomende statorstroom  $\bar{I}'_1$ . Grafisch wordt nu ook aangetoond dat de rotorflux  $\phi_2$   $90^\circ$  nijdend is op de hoofdflux  $\bar{\phi}$ , die op zijn beurt  $90^\circ$  nijdend is op de statorflux  $\bar{\phi}_1$ . De stator- en rotorflux zijn gelijk in grootte doch tegengesteld gericht.

Verder stellen we vast dat de rotorgeleiders stroomvoerend zijn. De interactie van de rotorstromen met het magnetisch draaveld van de stator genereert een kracht (Lorentzkracht) en dus een koppel dat de rotor laat draaien met het rotortoerental nr. Uit de zin van de Lorentzkräften volgt dat het resulterend koppel dat aldus ontstaat dezelfde zin

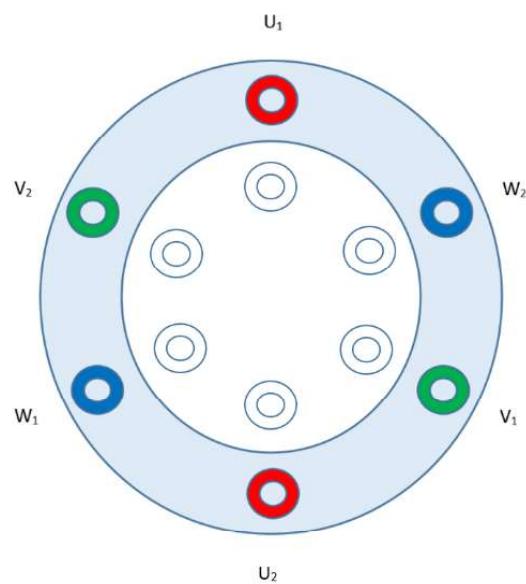
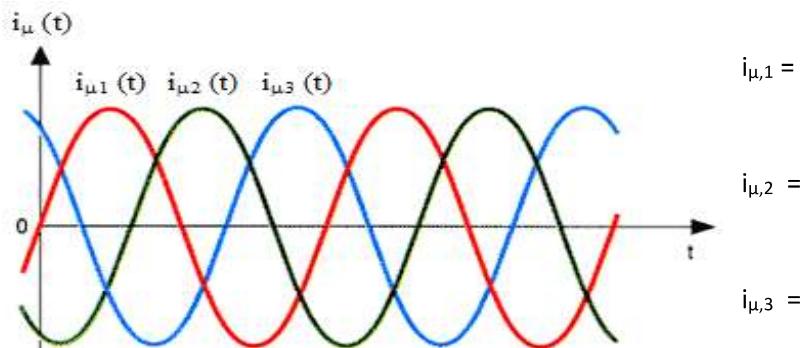
heeft als deze van het draaiveld. Een machinekoppel in dezelfde zin als de zin van het draaiveld, wijst op motorwerking.

Merk op dat onder invloed van het resulterend koppel de rotor zal versnellen tot het koppel gelijk is aan het tegenwerkend koppel van het werktuig. We kunnen nu al fysisch begrijpen dat de rotorspanning  $E_2$  zal verkleinen als het toerental van de rotor toeneemt vermits dan de relatieve snelheid van de rotor afneemt ( $E = B \cdot L \cdot v$ ).

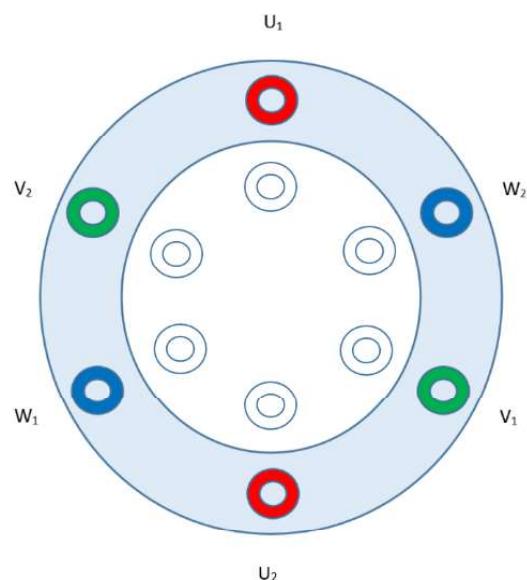
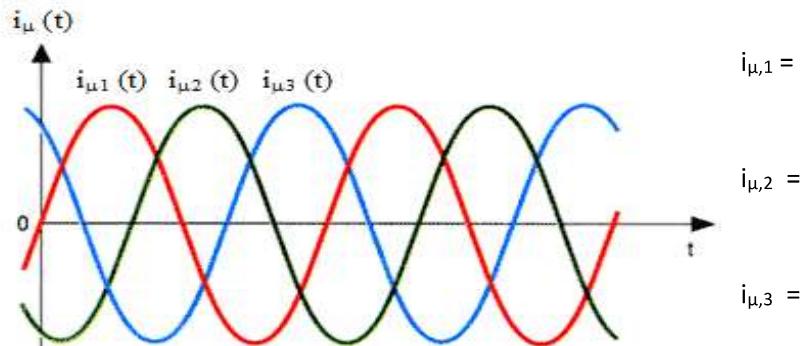
Ook de frequentie  $f_r$  van de rotorspanning zal dalen als de motor van stilstand naar een welbepaald toerental gaat.

Tevens volgt hieruit ook dat de machine nooit zonder uitwendige hulp het synchrone toerental kan bereiken daar in dit geval de relatieve snelheid 0 zou zijn en dus de opgewekte rotorspanning  $E_2$  en de rotorstroom  $I_2$  nul worden. Hierdoor zou het aandrijvend koppel wegvallen en zou de machine terug vertragen. Het toerental van de asynchrone motor zal dus steeds kleiner zijn dan het synchrone toerental ; vandaar ook zijn naam asynchrone motor/generator/machine ! Vermits de rotorspanningen en rotorstromen geïnduceerd worden door het draaiveld, wordt deze motor ook inductiemotor genoemd.

Tweepolig draaiveld – Draaizin in **uurwijzerzin** – Motorwerking -  $\omega t = 0^\circ$



Tweepolig draaiveld – Draaizin in **uurwijzerzin** – Motorwerking -  $\omega t = 90^\circ$



## 2.5 Het asynchroon ideaal generatorprincipe

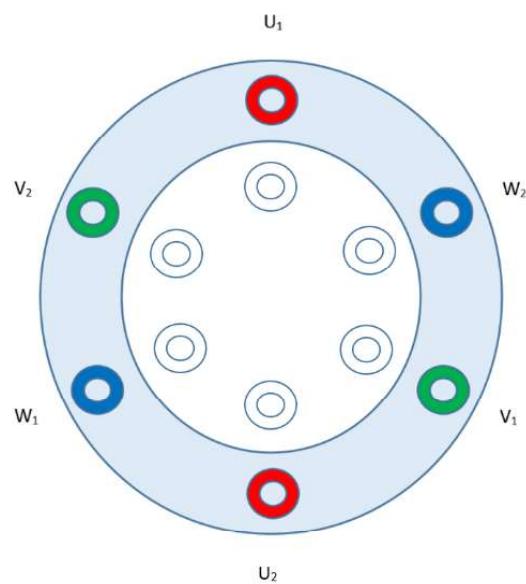
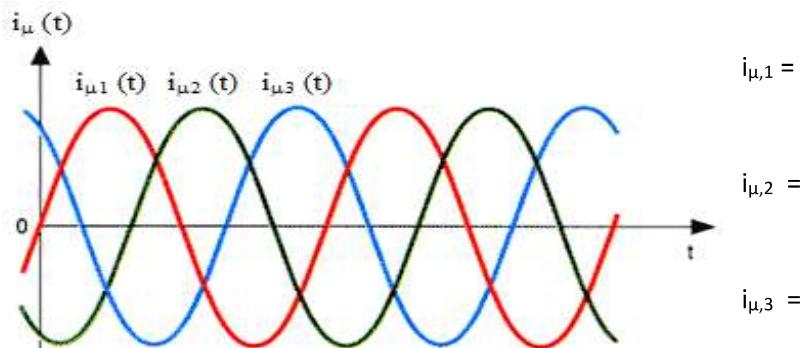
---

We beschouwen terug een ideale asynchrone machine. Het rotortoerental is nu echter groter dan het synchrone toerental. Beide toerentallen zijn wel volgens dezelfde zin georiënteerd. Men spreekt van oversynchrone werking. Dit komt praktisch overeen met een werktuig dat de machine aandrijft.

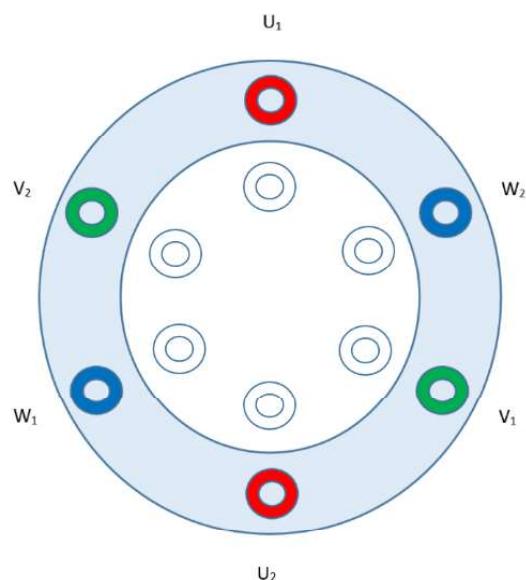
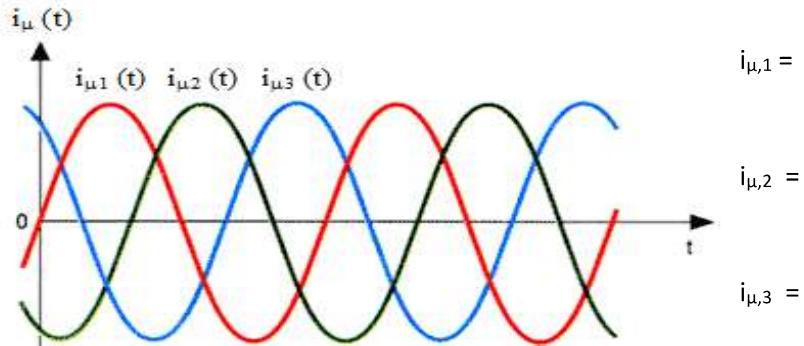
Stellen we nu eerst dezelfde grootheden grafisch voor zoals in de vorige paragraaf 2.4, nl. de magnetiseringsstromen  $\bar{I}_{\mu 1}$ ,  $\bar{I}_{\mu 2}$ ,  $\bar{I}_{\mu 3}$ , de stator(hoofd)flux  $\bar{\phi}$ , de synchrone snelheid  $n_s$ , de rotorsnelheid  $n_R$  en de relatieve snelheid  $v_{rel}$ . Als gevolg van het feit dat het rotortoerental nu groter is dan het synchroon toerental, zal de relatieve snelheid wijzigen van zin. Door de wijziging in teken van de relatieve snelheid  $v_{rel}$  wordt duidelijk dat de opgewekte emk  $\bar{E}_2$  in de rotor en de rotorstroom  $\bar{I}_2$  ompolen ten opzichte van bij het motorprincipe. De rotorflux  $\bar{\phi}_2$ , de compenserende statorflux  $\bar{\phi}_1$  en de bijkomende statorstroom  $\bar{I}_1'$  kunnen nadien aangevuld worden. Beschouwen we een aantal verschillende tijdstippen (bv.  $\omega t = 0^\circ$  en  $\omega t = 90^\circ$ ). We stellen vast dat de rotorflux  $\bar{\phi}_2$  nu  $90^\circ$  voorjlend is op de stator(hoofd)flux  $\bar{\phi}$ , terwijl de compenserende statorflux  $\bar{\phi}_1$   $90^\circ$  naijlend is op de stator(hoofd)flux  $\bar{\phi}$ . De stroomvoerende rotorgeleiders bevinden zich terug in het draiveld van de stator. De bepaling van de zin van de Lorentzkrachten leert ons dat er een resulterend koppel ontstaat dat tegengesteld is aan de draaizin van de rotor. De machine zal dus het aandrijvend werktuig afremmen. Dit is kenmerkend voor de generatorwerking.

Uit de ligging van de drie fluxen én uit het teken van de rotorspanning en de rotorstroom t.o.v. bij motorwerking, kan nu het vectordiagramma getekend worden bij generatorwerking, gebruikmakend van het initiële vectordiagramma van de transformator/motor (aangelegde spanning  $\bar{U}_1$ , magnetiseringsstroom  $\bar{I}_{\mu}$ , flux  $\bar{\phi}$ , tegenemk in de stator  $\bar{E}_1$ ). De faseverschuiving tussen statorspanning  $\bar{U}_1$  en de totaal opgenomen statorstroom  $\bar{I}_1$  is gelegen tussen  $90^\circ$  en  $180^\circ$ . Dit duidt op een negatieve arbeidsfactor  $\cos \varphi_1$  en dus op een negatief machinevermogen (negatieve energiestroom). Een negatief machinevermogen impliceert een energieoverdracht van het werktuig naar de machine en zo naar de elektrische voeding ; dus generatorwerking.

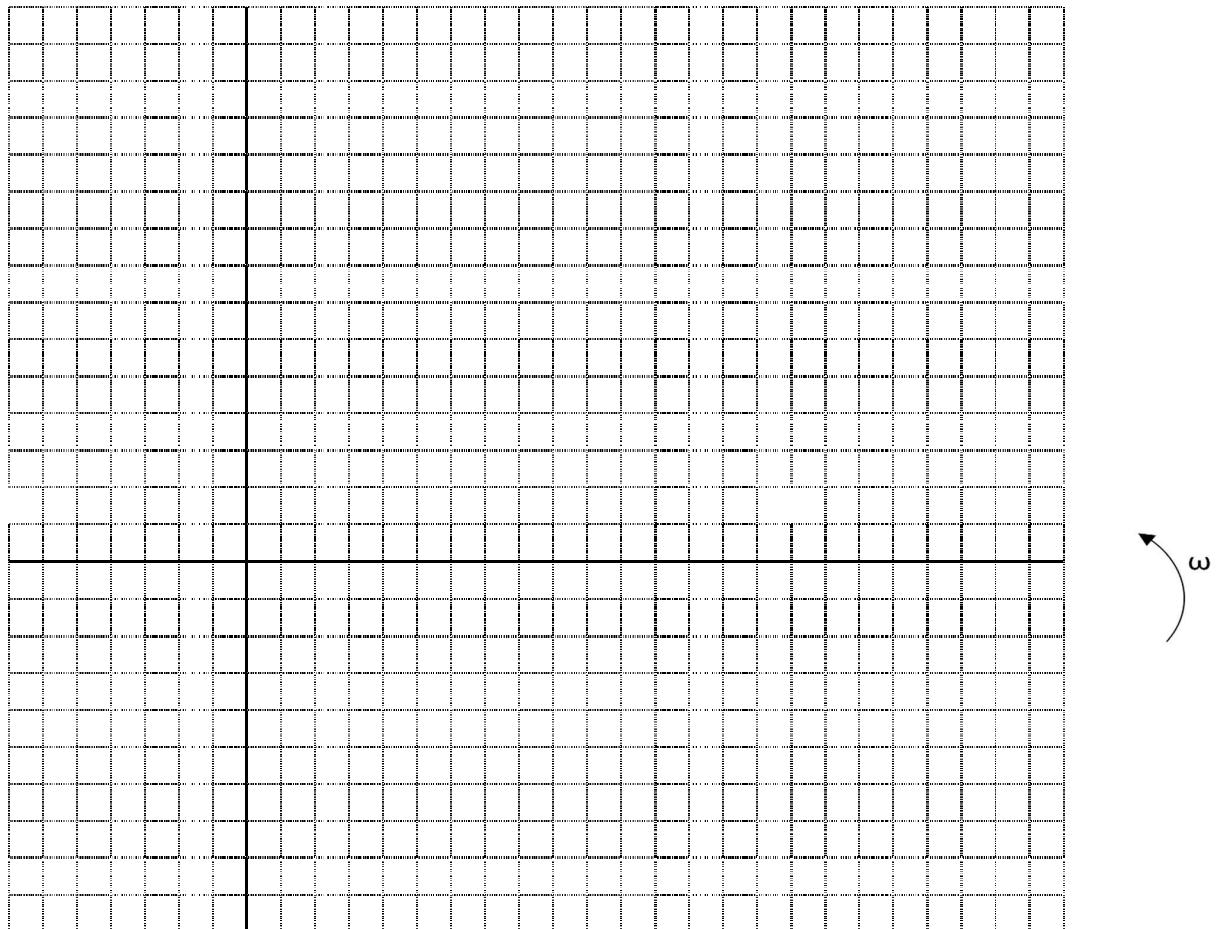
Tweepolig draaiveld – Draaizin in **uurwijzerzin** – Generatorwerking -  $\omega t = 0^\circ$



Tweepolig draaiveld – Draaizin in **uurwijzerzin** – Generatorwerking -  $\omega t = 90^\circ$



Vectordiagramma ideale generator



## 2.6 De slip

---

### 2.6.1 Begrip absolute slip

Wordt de stator van de asynchrone motor op het driefasig net aangesloten, dan is op het ogenblik dat de rotor nog stilstaat, de relatieve snelheid  $v_{rel}$  van het draaiveld ten opzichte van de rotor het grootst. Naarmate het toerental van de rotor  $n_R$  toeneemt, zal de relatieve snelheid  $v_{rel}$  van het draaiveld afnemen en daardoor zullen ook de opgewekte rotorspanning  $E_2$  en rotorstroom  $I_2$  afnemen. Het rotortoerental  $n_R$  kan echter nooit het draaiveldtoerental  $n_s$  bereiken. Anders zou de fluxverandering nul zijn en dus de opgewekte spanning en geïnduceerde stroom nul zijn.

Draait de motor in nullast, dan draait de motor onbelast en zal de motor het snelst draaien. Als gevolg van de ventilatie- en de wrijvingsverliezen, zal het rotortoerental juist iets kleiner zijn dan het synchroon toerental. De motor draait op het nullasttoerental  $n_{R,0}$ .

Het begrip *absolute slip*  $s_a$  - uitgedrukt in omwentelingen per minuut - wordt gedefinieerd als het absolute verschil tussen de synchrone snelheid  $n_s$  (synchroon toerental) en de snelheid van de rotor  $n_R$  (rotortoerental).

$$s_a = n_s - n_r = \frac{60}{2\pi} \cdot (\omega_s - \omega_r)$$

### 2.6.2 Begrip relatieve slip

Het begrip *relatieve slip*  $s$  wordt gedefinieerd als de verhouding van de absolute slip en het synchrone toerental

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

Verder in de nota's wordt de relatieve slip  $s$ , dé slip genoemd.

De positieve waarde van de slip ligt voor de motorwerking tussen 1 (stilstand) en 0 (bij synchroon draaien). De nominale waarde  $s_n$  van de slip bedraagt tussen 0.02 – 0.08. Een negatieve waarde van de slip duidt op generatorwerking.

### 2.6.3 Begrip procentuele slip

Wordt de relatieve slip in procenten uitgedrukt, dan wordt er gesproken van de *procentuele slip*. De nominale slip binnen het werkingsgebied ligt bij asynchrone motor tussen 2 % en 8%.

### 2.6.4 Afgeleide formules

Volgende formules kunnen afgeleid worden voor het rotortoerental en de rotorhoeksnelheid.

$$n_r = n_s (1 - s)$$

$$\omega_r = \omega_s (1 - s)$$

Duid volgende bijzondere punten aan :  $n_{R,0}$ ;  $n_{R,n}$ ;  $n_s$ ;  $s = 1$ ;  $s = 0$ ;  $s_n$ ; motor/generatorgebied.



## 2.7 De frequentieafhankelijke rotorgrooteden

---

### 2.7.1 De rotorfrequentie

Volgens de formule

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

zal de tegenemk  $E_1$  opgewekt door het draaiveld, de frequentie  $f_s$  bezitten, waarin  $n_s$  het toerental is van het draaiveld t.o.v. een stilstaande statorwikkeling waarin de spanning wordt

opgewekt. Voor alle frequentieafhankelijke grootheden van de stator, kan een gelijkaardige redenering toegepast worden, bv. voor de stator lekflux  $X_1$ .

Vermits de rotorspanning opgewekt wordt bij stilstand maar evenzeer op het ogenblik dat de rotor reeds een welbepaalde snelheid  $n_R$  heeft t.o.v. het synchroon toerental  $n_s$ , zal voor de rotorfrequentie het toerentalverschil  $n_s - n_r$  (of het relatieve verschiltoerental) van het draaiveld t.o.v. de rotor moeten ingevuld worden. Het verband tussen de rotorfrequentie en de frequentie van de stator wordt gegeven door

$$\begin{aligned} f_r &= \frac{n_s - n_r}{60} \cdot p \\ f_r &= \frac{n_s - n_r}{60} \cdot p \cdot \frac{n_s}{n_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot p \cdot \frac{n_s}{60} \\ f_r &= s \cdot f_s \end{aligned}$$

### 2.7.2 De rotoremk

Beschouwen we een asynchrone machine met een stator met  $N_s$  windingen per fase en een rotor gekarakteriseerd door  $N_r$  per fase, dan geldt er voor de opgewekte emk's in de stator :

$$E_1 = 4,44 \cdot f_s \cdot N_s \cdot \Phi_m$$

en in de stilstaande rotor of op het moment van aanzetten , index st van 'starten' of 'stilstaand'

$$E_{2,ST} = 4,44 \cdot f_s \cdot N_r \cdot \Phi_m$$

terwijl voor een draaiende rotor de opgewekte emk  $E_2$  gelijk is aan

$$E_2 = 4,44 \cdot f_r \cdot N_r \cdot \Phi_m = s \cdot E_{2,ST}$$

Onderstaande betrekking blijft nog steeds geldig :

$$\frac{E_1}{E_{2,ST}} = \frac{N_s}{N_r} = k$$

zodat ook

$$E_2 = s \cdot E_{2,ST} = s \cdot \frac{E_1}{k}$$

De rotoremk wordt dus, naarmate de slip kleiner wordt, in evenredigheid kleiner t.o.v. de rotoremk opgewekt bij rotorstilstand.  $E_2$  is maximaal bij stilstand ( $E_{2,ST}$ ) en is 0 bij synchroon

draaien. Kan je dit ook fysisch uitleggen ?  $E_{2,n}$  bedraagt slechts een kleine fractie van  $E_{2,ST}$ , namelijk de fractie  $s_n$ .

### 2.7.3 De rotorreactantie

De leefluxen sluiten zich grotendeels over de lucht en zijn recht evenredig met hun resp. stromen. Ze zijn in fase met de stromen die ze opwekken. Ze wekken zoals bij de transformator, een inductieve spanningsval op. Bij stilstand geldt voor de rotorreactantie :

$$X_{2,ST} = \omega_S \cdot L_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_2$$

terwijl bij draaien

$$X_2 = \omega_r \cdot L_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot L_2 = s \cdot X_{2,ST}$$

De lekreactantie  $X_{2,ST}$  bij stilstand is de grootst mogelijke lekreactantie. Naarmate de motor op snelheid komt, zal  $X_2$  lineair afnemen met de slip. Bij het nominale toerental zal  $X_{2,n}$  slechts een fractie zijn van  $X_{2,ST}$ , namelijk  $s_n$ .

## 2.8 Het equivalent schema van de niet ideale asynchrone machine

---

### 2.8.1 De niet ideale asynchrone motor bij nullast

Bij nullast bereikt de asynchrone motor nagenoeg het synchrone toerental  $n_s$ , zodat de slip  $s_0$  bijna nul is en de opgewekte rotorspanning  $E_{2,0}$  dus zeer klein wordt.

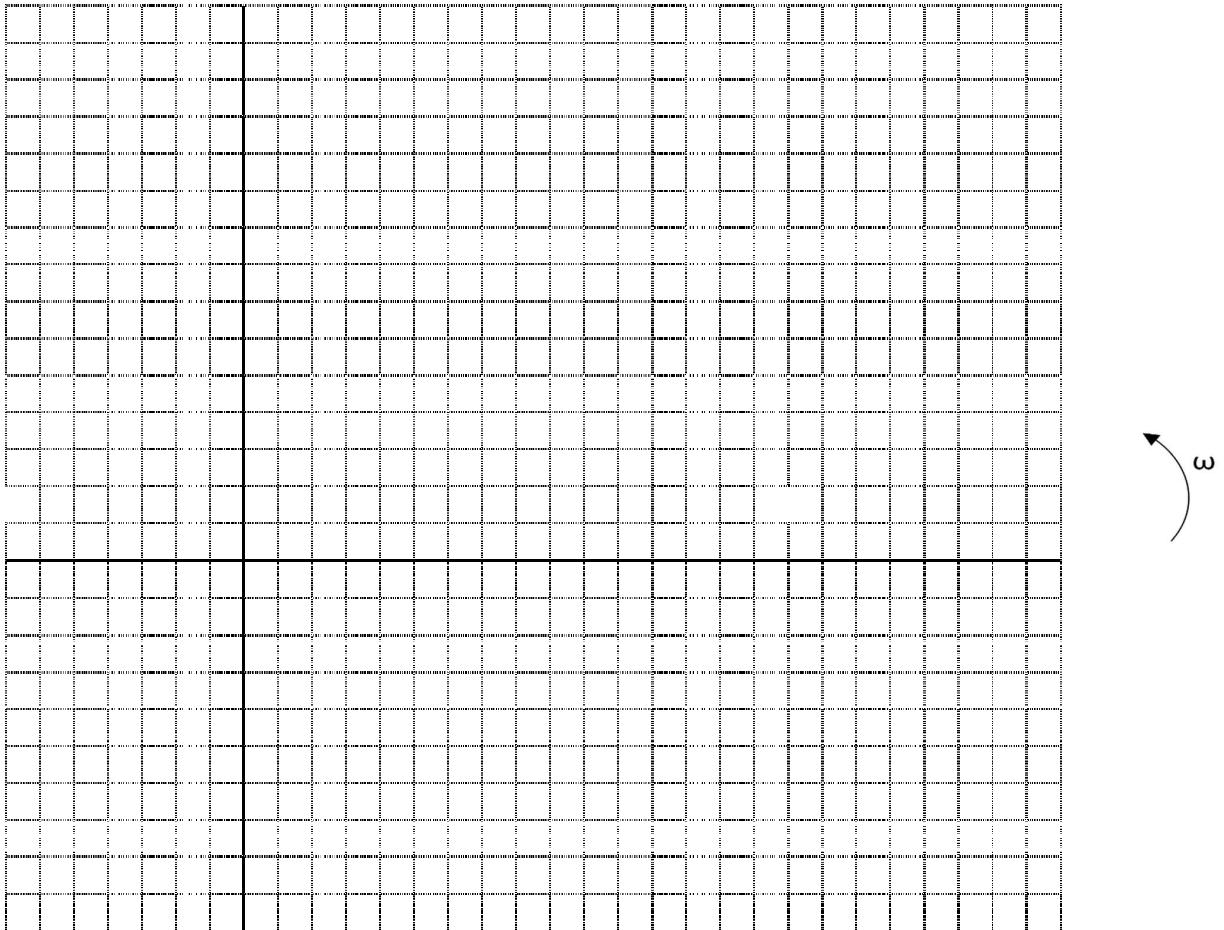
Aan de statorzijde is de overeenkomst met de primaire van de driefasige transformator praktisch volledig, op de waarde van de nullaststroom na. De nullaststroom bedraagt bij de driefasige asynchrone motor een derde tot de helft van de nominale statorstroom vanwege de aanwezige luchtspleet, terwijl dit bij de driefasige transformator van de grootteorde is van 10 % of nog minder is vanwege de afwezigheid van een luchtspleet. De nullaststroom bestaat uit de magnetiseringsstroom  $I_\mu$  voor het opwekken van het magnetisch veld en de verliesstroom  $I_v$  voor dekking van de ijzerverliezen. Ook hier is de nullaststroom  $I_0$  fel naijlend op de aangelegde primaire spanning. De nullaststroom is evenmin in fase met het veld wegens

het verschijnsel van hysteresis en wervelstromen. De nullaststroom is dus een weinig voorlijend op het veld.

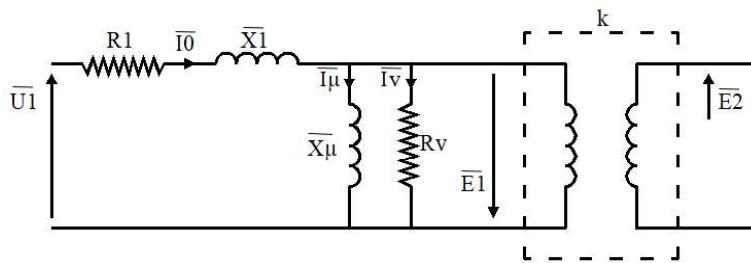
Het is duidelijk dat door de grotere nullaststroom de spanningsvallen in de stator relatief groter zullen zijn dan bij de transformator, zodat de tegenemk  $\bar{E}_1$  meer zal afwijken van de aangelegde spanning  $\bar{U}_1$ . Aan de rotorzijde van de driefasige asynchrone motor wordt bij nullast nagenoeg geen emk opgewekt vanwege de slip  $s_0$  die bijna 0 is, terwijl er aan de secundaire zijde van de transformator in nullast een maximale emk opgewekt wordt. Het verband tussen de aangelegde statorspanning en de spanningsvallen in de stator en de tegenemk wordt gegeven door :

$$\bar{U}_1 = R_1 \cdot \bar{I}_0 + X_1 \cdot \bar{I}_0 - \bar{E}_1$$

Dit vectordiagramma herhaalt zich voor de tweede en de derde fase, resp.  $120^\circ$  en  $240^\circ$  naast op het getekende vectordiagramma. In het vectordiagramma wordt slechts één fase voorgesteld. Voorstelling in het complexe domein



Equivalent schema bij nullast



### 2.8.2 De niet ideale asynchrone motor bij rotorstilstand

Bij stilstand of dus bij het net inschakelen van de asynchrone motor maar beschouwd op het moment van aanzetten (ST), is de statorfrequentie  $f_s$  gelijk aan de rotorfrequentie  $f_R$  omdat de slip gelijk is aan één. Slip gelijk aan 1 is de maximale waarde van de slip die optreedt bij motorwerking. De opgewekte rotorspanning  $E_{2,ST}$  is als gevolg van  $s=1$ , maximaal en ook veel groter dan  $E_{2,n}$  bij normaal bedrijf. De relatieve snelheid is binnen het gebied van motorwerking maximaal. Dit geldt evenzeer voor de rotorstroom.

Wanneer echter de secundaire van een transformator kortgesloten is terwijl de primaire gevoed wordt met de nominale spanning, zal de kortsluitstroom in de primaire en in de secundaire van de grootteorde van  $20.I_n$  zijn. Bij de driefasige asynchrone motor is dit heel wat minder nl. 5 à 6  $I_n$ . De verklaring hiervoor dient gezocht te worden in het feit dat de magnetische keten van de driefasige asynchrone motor een relatief grote luchtspleet bezit.

Bij inschakelen (starten) wordt in de rotor een tegenemk  $E_{2,ST}$  opgewekt,  $90^\circ$  naastliggend op de resulterende flux en die voldoet aan :

$$E_{2,ST} = 4,44 \cdot f_s \cdot N_r \cdot \Phi_m$$

In de gesloten rotorketen vloeit er een rotorstroom die in grootte gegeven wordt door :

$$I_{2,ST} = \frac{E_{2,ST}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2,ST}^2}}$$

De rotorkring zal maximaal inductief zijn bij rotorstilstand. Constructief wordt er voor gezorgd dat  $X_{2,ST}$  tussen de 4 à 6 keer  $R_2$  bedraagt. In deze cursus wordt er verder veelal gewerkt met

$$X_{2,ST} = 5 \cdot R_2$$

De rotorstroom is dan ook sterk naajlend op de rotoremk en de arbeidsfactor van de stilstaande rotor ( $\cos \varphi_{2,ST}$ ) heeft een waarde van ongeveer 0.2. De hoek  $\varphi_{2,ST}$  is dus zeer groot. Andere wetmatigheden gezien in het hoofdstuk van de transformatoren blijven geldig. We vermelden :

$$\frac{\overline{I'_{1,ST}}}{\overline{I_{2,ST}}} = -\frac{1}{k}$$

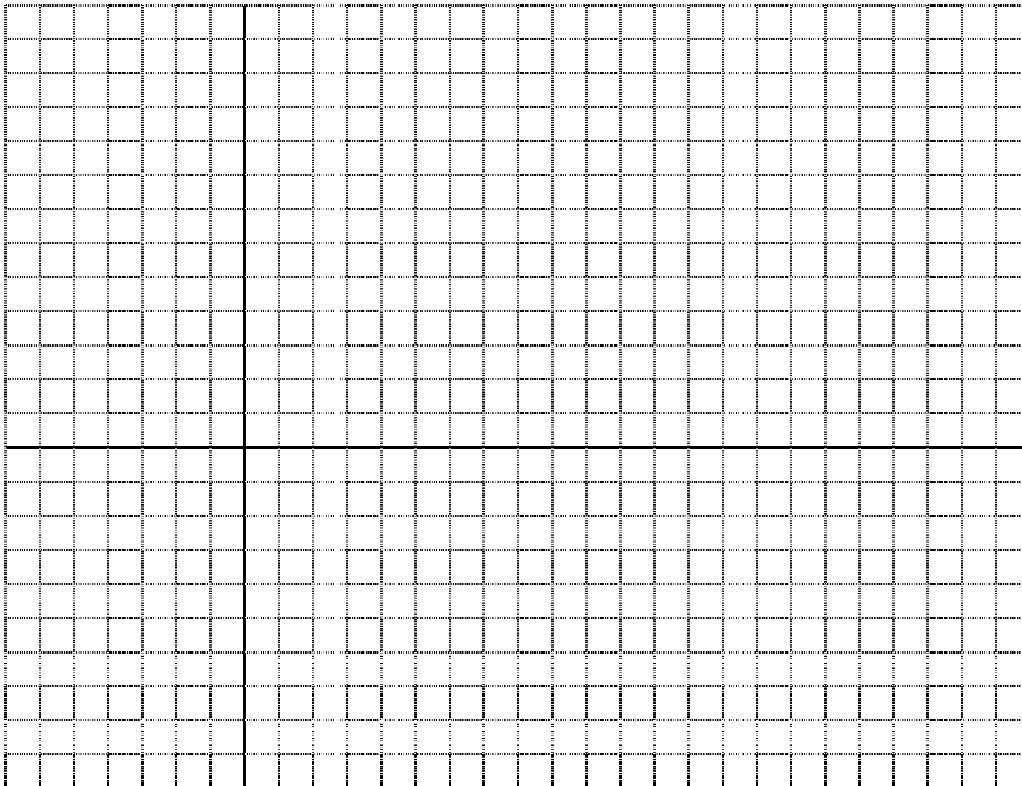
$$\overline{I_{1,ST}} = \overline{I_0} + \overline{I'_{1,ST}}$$

In de statorwikkelingen zijn de spanningsvallen gewijzigd door de wijziging die de statorstroom ondergaan heeft in grootte en in faseverschuiving. Ook hier blijft het verband geldig :

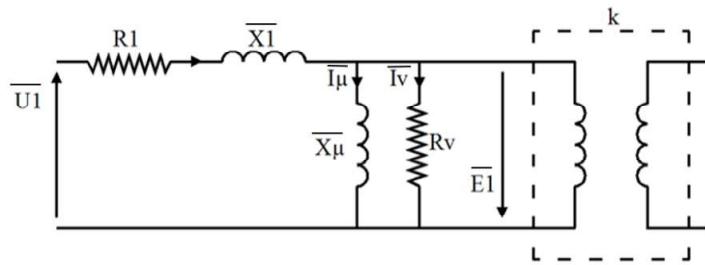
$$\overline{U_1} = R_1 \cdot \overline{I_{1,ST}} + X_1 \cdot \overline{I_{1,ST}} - \overline{E_1}$$

De faseverschuiving tussen de statospanning en de statorstroom, nl.  $\varphi_{1,ST}$  is groter dan de faseverschuiving tussen de rotorspanning en de rotorstroom  $\varphi_{2,ST}$ . Vermits de arbeidsfactor van de rotor ongeveer gelijk is aan 0.2, zal deze van de stator dan ook kleiner zijn van 0.2.

Voorstelling in het complexe domein bij stilstand/starten



Equivalent schema – Vul verder aan vertrekkende vanuit de rotorgrootheden :



### 2.8.3 De belaste niet ideale asynchrone motor bij nominaal draaien

Een belaste asynchrone motor kunnen we vergelijken met een belaste transformator mits we enkele wijzigingen indachtig zijn.

Voor de opbouw van het vectordiagramma wordt verwezen naar dat van de belaste niet ideale transformator.

Terwijl de transformator werkt met een nagenoeg constante secundaire emk is deze van de asynchrone motor veranderlijk en afhankelijk van de belasting, en dus van de slip  $s$ , hier specifiek  $s_n$ . De statorfrequentie  $f_s$  en de rotorfrequentie  $f_R$  zijn erg verschillend geworden. Bij nominaal bedrijf is de rotorspanning

$$E_{2,n} = s_n \cdot E_{2,ST}$$

klein vermits de nominale slip  $s_n$  klein is, grootteorde 2 à 8 %.

Ook de rotorimpedantie wijzigt onder invloed van de slip :

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{R_2^2 + s^2 \cdot X_{2,ST}^2}$$

Ten opzichte van bij rotorstilstand is nu

$$\frac{R_2}{s} = 5 \cdot X_{2,ST}$$

De invloed van de rotorlekreactantie op de rotorimpedantie bij draaien wordt dan ook betrekkelijk klein zodat de rotorketen zich, van nullast (sterk inductief) tot vollast (praktisch ohms) gedraagt. Het gedrag van de stator bij draaiende en belaste rotor is dan ook te vergelijken met het gedrag van de primaire bij een nagenoeg ohms belaste secundaire. Alleen

zal door de relatief veel grotere nullaststroom de statorstroom heel wat meer naijlen op de aangelegde statospanning dan dat dit het geval is met de primaire stroom t.o.v. de primaire spanning bij een transformator.

De rotorstroom bij draaien – weinig naijlend op de rotoremk – wordt gegeven door :

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_2}{R_2 + \bar{X}_2} = \frac{s \cdot \bar{E}_{2,ST}}{R_2 + s \cdot \bar{X}_{2,ST}} = \frac{\bar{E}_{2,ST}}{\frac{R_2}{s} + \bar{X}_{2,ST}}$$

of in grootte door :

$$I_2 = \frac{\bar{E}_{2,ST}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (\bar{X}_{2,ST})^2}}$$

In deze algemene formule voor de rotorstroom is de slip  $s$  de onafhankelijk veranderlijke. Op die manier kan de  $I_2 = f(s)$ -karakteristiek bekomen worden of voor oefeningen kan bij elke waarde van de slip, de bijhorende rotorstroom berekend worden. Voor nominaal draaien wordt  $s$  vervangen door de nominale slip  $s_n$ . Bij starten wordt  $s$  vervangen door  $s = 1$ .

Daarnaast laat deze formule toe om het equivalent schema van de draaiende rotor te herleiden tot een equivalent schema waarbij de rotor onderhevig is aan de statorfrequentie zonder hierbij de werking van de rotor te wijzigen. De rotorstroom blijft in waarde behouden terwijl de rotoremk en de rotorlekflux deze worden van bij stilstand. Een aanpassing om de grootte van de rotorstroom constant te houden en afhankelijk te maken van de belasting en dus van het toerental, dient enkel te gebeuren door de waarde van de rotorweerstand te delen door  $s$ . De totale rotorweerstand bij draaien  $\frac{R_2}{s}$  kan nadien verder opgesplitst worden in  $R_2$  de rotorweerstand én  $R_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}$  de fictieve belastingsweerstand.

Ook reflectie van de rotor naar de stator kan nu uitgevoerd worden aan de hand van de regels die bij de transformatoren opgesteld werden (bv. rotor impedantie vermenigvuldigen met  $k^2$  om deze in de stator geplaatst te krijgen) .

Deze rotorstroom werkt ook nu demagnetiserend zodat er van statorzijde een toename moet gebeuren in de statorstroom. Deze magnetiserende stroom  $\bar{I}'_1$  stelt zich vectorieel samen met de nullaststroom  $\bar{I}_0$  tot de totale statorstroom  $\bar{I}_1$ .

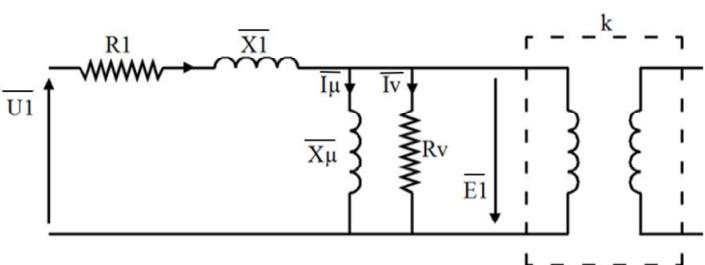
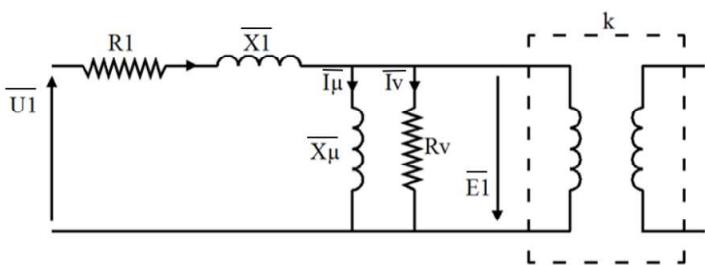
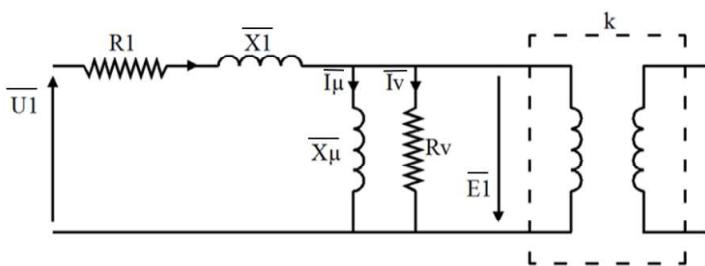
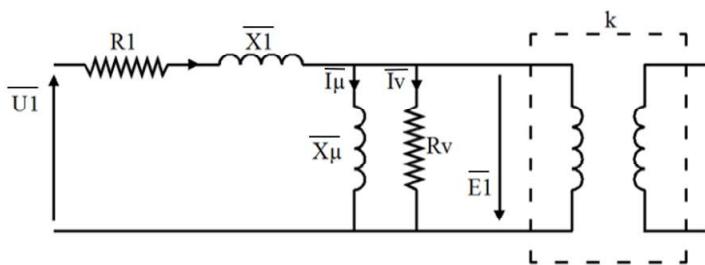
$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}'_1$$

Deze statorstroom doet in de statorwikkeling spanningsvallen ontstaan zoals bij nullast en bij de stilstaande rotor, nu gegeven door de statorspanningsvergelijking :

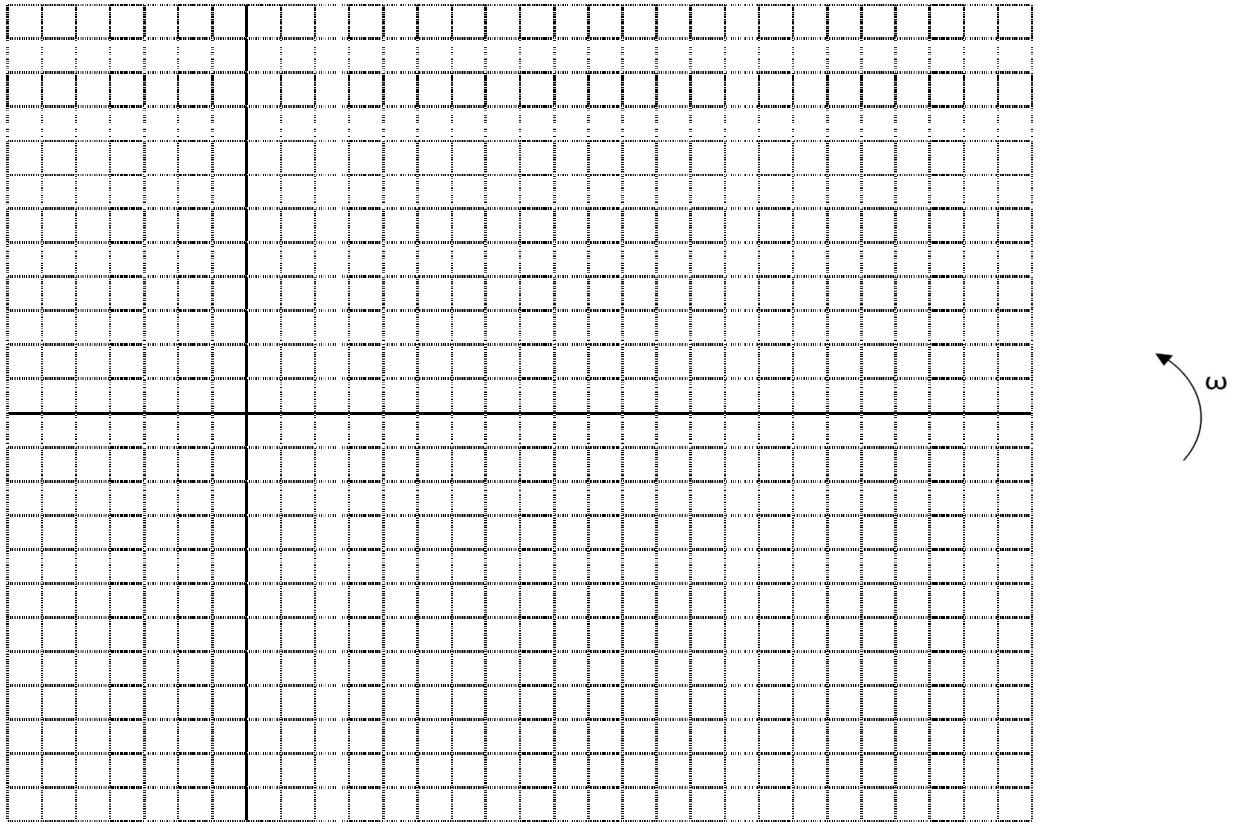
$$\bar{U}_1 = R_1 \cdot \bar{I}_1 + \bar{X}_1 \cdot \bar{I}_1 - \bar{E}_1$$

Er wordt opgemerkt dat de arbeidsfactor van een belaste asynchrone motor veel groter is dan van een onbelaste motor (zie labo). Tevens is ook hier terug de faseverschuiving tussen de statorspanning en statorstroom iets groter dan deze tussen de resp. rotorgrootheden.

Afleiding van het equivalent schema bij een draaiende belaste asynchrone motor – vul aan :



Vectordiagramma van de nominaal draaiende asynchrone motor :



#### 2.8.4 De niet ideale asynchrone generator

Wordt de asynchrone machine nu als generator beschouwd, dan zal het rotortoerental groter zijn dan het synchroon toerental. De slip wordt dus negatief. Merk op dat de spanningsval over de rotorweerstand  $R_2$  negatief wordt vanwege de factor  $\frac{R_2}{s}$ . De ligging van de rotorstroom en de bijkomende statorstroom alsook hun overeenkomstige velden  $\phi_1$  en  $\phi_2$  volgen uit het ideale vectordiagramma bij generatorwerking.

Let in het bijzonder op de ligging van de rotoremk  $E_2$  t.o.v.  $E_{2,ST}$ . Beiden zijn in tegenfase vanwege de negatieve waarde van de slip !

Teken het vectordiagramma van de niet ideale asynchrone generator vertrekende van het vectordiagramma van de ideale generator samen met het inzicht dat de velden verschoven zijn en de spanningsval  $\frac{R_2}{s}$  negatief is (linkerzijde).

## 2.9 Vermogensverdeling en rendement

---

Als de asynchrone machine als motor fungeert, wordt het toegevoerd of het uit het net driefasig opgenomen elektrisch actief vermogen gegeven door :

$$P_1 = 3 \cdot U_{F,1} \cdot I_{F,1} \cdot \cos \varphi_{F,1}$$

waarin de statorspanning  $U_{1F}$  en de statorstroom  $I_{1F}$ , de fasegrootheden voorstellen. Er wordt tevens verondersteld dat de motor zich als een evenwichtige belasting gedraagt voor het net. Het opgenomen elektrisch actief vermogen kan uiteraard ook voorgesteld worden in functie van de lijngrootheden :

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_{L,1} \cdot I_{L,1} \cdot \cos \varphi_{F,1}$$

Verder doorheen deze paragraaf wordt er gewerkt met de fasegrootheden. Het opgenomen actief vermogen wordt gedissipeerd in elk van de in het equivalent schema voorkomende weerstanden. Er worden van links naar rechts volgende deelvermogens genoteerd :

### 2.9.1 In de stator

De vermogensverdeling in de stator kan opgedeeld worden in de *statorkoperverliezen*  $P_{cu,S}$ . Dit vermogen wordt gedissipeerd in de driefasige statorwikkeling die gekarakteriseerd wordt door de ohmse weerstand  $R_1$ , per fase. De totale statorkoperverliezen bedragen :

$$P_{Cu,S} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{F,1}^2$$

De statorkoperverliezen zijn kwadratisch afhankelijk van de statorstroom  $I_1$  en afhankelijk van de ohmse weerstand van de statorwikkeling  $R_1$ .

Daarnaast treden er *statorijzerverliezen*  $P_{Fe,S}$ , te wijten aan het hysteresisverschijnsel en de wervelstromen. Deze statorijzerverliezen zijn – zie hoofdstuk transformatoren – vooral afhankelijk van de grootte van de statorspanning en van de statorfrequentie. Deze zullen dus bij de nominale statorspanning en nominale statorfrequentie constant zijn, en zijn dus onafhankelijk van de rotorstroom of belastingsgraad van de motor. De totale statorijzerverliezen bedragen :

$$P_{Fe,S} = 3 \cdot U_{F,1} \cdot I_{F1,0} \cdot \cos \varphi_{F1,0} - 3 \cdot R_1 \cdot I_{F1,0}^2$$

### 2.9.2 Overdracht tussen stator en rotor

Het resterende actief vermogen, nl. het toegevoegd vermogen verminderd met de statorkoperverliezen en de statorijzerverliezen, is het *luchtspleetvermogen*  $P_L$ . Het luchtspleetvermogen  $P_L$  kan voorgesteld worden als het vermogen dat de stator overdraagt aan de rotor. Deze overdracht gebeurt via de luchtspleet, vandaar de naam, en is gelijk aan :

$$P_L = P_1 - P_{Cu,S} - P_{Fe,S}$$

Dit actief vermogen is – gezien vanuit de rotor – ook de som van alle actieve vermogens die gedissipeerd worden in de rotor, of nog, het vermogen gedissipeerd in de totale rotorweerstand bij draaien :

$$P_L = 3 \cdot \frac{R_2}{s} \cdot I_{F,2}^2$$

### 2.9.3 In de rotor

In de rotor worden enerzijds de *rotorkoperverliezen*  $P_{Cu,R}$  gedissipeerd in de ohmse weerstand  $R_2$  van de rotor, en worden gegeven door :

$$P_{Cu,R} = 3 \cdot R_2 \cdot I_{F,2}^2$$

en zijn kwadratisch afhankelijk van de rotorfasestroom  $I_{F,2}$  en afhankelijk van  $R_2$ , die de ohmse weerstand van de rotorfasewikkeling of van de staaf voorstelt.

De *rotorijzerverliezen*  $P_{Fe,R}$  zijn o.a. frequentieafhankelijk. Bij nominaal bedrijf zijn ze relatief klein doordat de rotorfrequentie  $f_r$  slechts een fractie is van de statorfrequentie  $f_s$ . De rotorijzerverliezen worden in veel gevallen – tenzij anders opgegeven in de oefening – verwaarloosd.

Het inwendig vermogen  $P_i$  is het luchtspleetvermogen verminderd met de rotorkoperverliezen en de rotorijzerverliezen.

$$P_i = P_L - P_{Cu,R} - P_{Fe,R}$$

En bij verwaarlozing van de rotorijzerverliezen, komt het inwendig vermogen overeen met

$$P_i = 3 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot R_2 \cdot I_{F,2}^2$$

Van dit vermogen zal nog een klein gedeelte omgezet worden in *wrijving-* en *ventilatieverliezen*  $P_v$ . Deze mechanische verliezen zijn afhankelijk van het rotortoerental. Aangezien het rotortoerental weinig verandert bij variërende belasting (zie verder) zullen deze mechanische verliezen praktisch constant blijven tussen nullast en vollast. Ze kunnen dan ook even groot beschouwd worden als bij nullast. Het overige gedeelte van het actief vermogen komt op de as beschikbaar als *mechanisch of nuttig vermogen*  $P_{as}$  of  $P_n$  of  $P_{mech}$  of  $P_2$ .

$$P_2 = P_i - P_v$$

Het *rendement* is te berekenen met

$$\eta = \frac{P_2}{P_i} \cdot 100 \%$$

Het rendement kan bepaald worden met de *directe methode*, d.w.z. het opgenomen vermogen bepalen met één van de geschikte wattmetermethoden en het afgegeven vermogen bepalen door het toerental en het koppel te meten. Bij de *indirecte methode* zal het rendement bepaald worden aan de hand van het opgenomen vermogen en de verschillende deelvermogens  $P_{cu}$ ,  $P_{Fe}$ , enz. te bepalen.

## 2.10 Inwendig koppel

---

Vetrekende van de formule van het luchtspleetvermogen, kunnen we afleiden dat het inwendig koppel gegeven wordt door :

$$M_i = 3 \cdot \frac{R_2}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{k^2} \cdot \frac{s}{R_2^2 + s^2 \cdot X_{2,ST}^2}$$

In deze afleiding zijn de statorweerstand en de statorreactantie van de asynchrone motor verwaarloosd zodat de aangelegde spanning kon gelijkgesteld worden aan de tegenemk. De formule stelt het inwendig koppel voor in functie van de slip. Het inwendig koppel blijkt afhankelijk te zijn van de rotorweerstand, de rotorinductantie, de statorfrequentie, het – kwadraat van – de aangelegde spanning én de slip. De slip is hier uiteraard de onafhankelijk

veranderlijke. Bovenstaande formule kan dus getekend worden als  $M_i = f(s)$  of  $M_i = f(n_r)$ . Voor het verloop van deze koppel-toerental (of koppel-slip) karakteristiek worden enkele bijzondere punten bepaald van de grafiek waarbij telkens de aangelegde spanning, de statorfrequentie, de rotorweerstand en de inductantie constant gehouden worden :

- Het inwendig koppel is nul voor een slip die gelijk is aan 0.
- Het inwendig koppel streeft naar 0 voor een slip die naar oneindig streeft. De wijze waarop de 0 wordt bereikt volgt uit de verdere redenering.
- Het inwendig koppel is positief voor positieve slipwaarden, negatief voor negatieve slipwaarden. De teller van de breuk bepaalt het teken van het koppel.
- Het inwendig koppel blijkt voor een slipwaarden van 1 (resp. -1) een welbepaalde positieve (resp. negatieve) waarde  $M_{i,ST}$  te bezitten. Dit koppel wordt het *aanzetkoppel* (of *aanloopkoppel*)  $M_{i,ST}$  genoemd. Bij rotorstilstand (starten) ontwikkelt de rotor een elektromechanisch koppel waardoor de rotor begint te draaien of dit althans probeert indien het tegenwerkend koppel te groot zou zijn. In tegenstelling tot gelijkstroommotoren wordt een driefasige asynchrone motor gekenmerkt door een relatief klein aanzetkoppel althans voor motoren die zo geconstrueerd zijn dat het nominaal koppel bekomen wordt bij een slip van 4-5 %.
- Het gedeelte van de koppelkarakteristiek voor  $s \geq 0$  kan gespiegeld worden rond de as  $s = 0$  en de as  $M_i = 0$ , om de karakteristiek te bekomen van het generator gebied.

Het is duidelijk dat in het verloop van het inwendig koppel in functie van de slip een extreum (maximum of minimum) zal moeten voorkomen. De formule van het inwendig koppel afleiden naar de slip (eerste afgeleide) en gelijkstellen aan nul, levert die welbepaalde slip waar het maximum (of minimum) koppel optreedt :

$$s_k = \pm \frac{R_2}{X_{2,ST}}$$

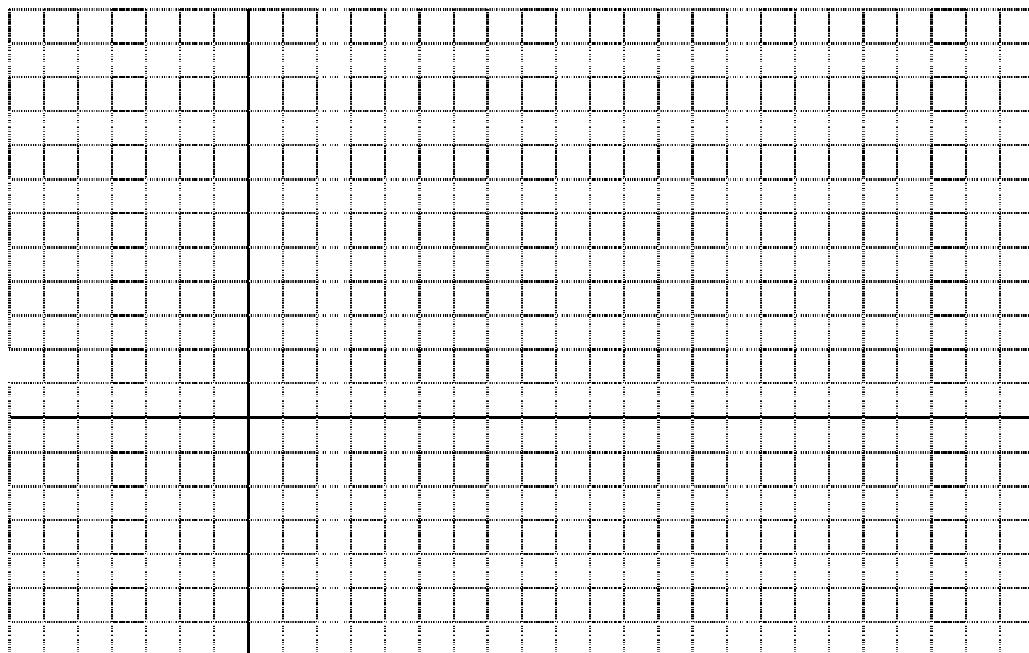
De slip waar het maximum (resp. minimum) koppel zal optreden, noemt de *kipslip*  $s_k$ . Het overeenkomstige toerental noemt het *kiptoerental*  $n_k$ . Zeer belangrijk is dat de grootte van de kipslip bepaald wordt door de rotorweerstand en wel zo dat bij een groter wordende rotorweerstand de kipslip toeneemt. Het maximum in de grafiek zal dus verschuiven richting

$s=1$  bij motorwerking of zich voordoen bij lagere toerentallen. De kipslip bij asynchrone motoren is vier- tot zesmaal de nominale slip. Bij kooirotormotoren ligt de kipslip vast gezien  $R_2$  en  $X_{2,ST}$  vaste waarden zijn. Bij sleepringmotoren daarentegen kan de kipslip gewijzigd worden door aanloop- of regelweerstanden in de rotorkring te schakelen en aldus  $R_2$  te verhogen.

Het maximum koppel noemt het *kipkoppel*  $M_{i,k}$  en bekomt men door de kipslips  $s_k$  in te vullen in de formule van het inwendig koppel :

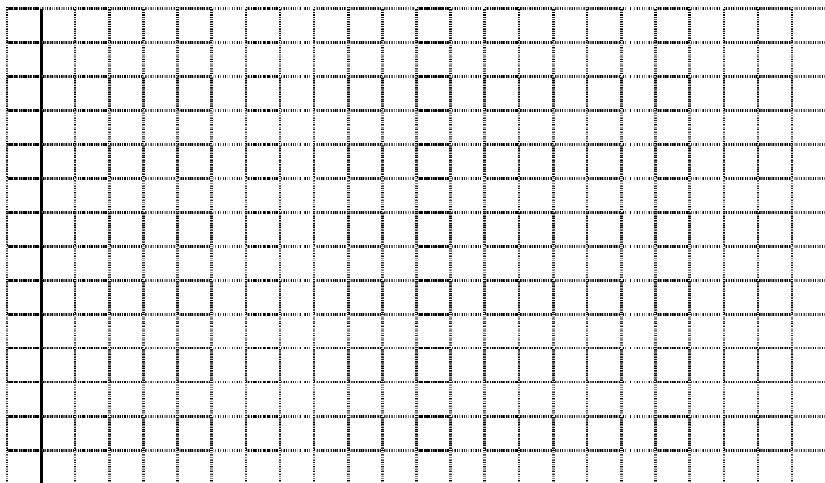
$$M_k = \pm \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{k^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot X_{2,ST}}$$

Het kipkoppel treedt op in de karakteristiek overeenkomstig het maximum koppel dat de machine kan leveren. Het kipkoppel blijkt onafhankelijk te zijn van de rotorweerstand. Het kipkoppel moet minstens 1,6 maal groter zijn dan het nominale koppel. De verhouding van het kipkoppel tot het nominale koppel noemt men de overbelastbaarheid. Indien de karakteristiek volledig getekend is, stellen we vast dat voor kleine waarden van de slip en bij een constant blijvende rotorweerstand, het koppel nagenoeg lineair afhankelijk is van de slip (nagenoeg een rechtlijnig gedeelte van de karakteristiek). Voor grote waarden van de slip daarentegen zal bij een constant blijvende rotorweerstand het koppel zich niet lineair gedragen met de slip. De koppel-toerentalkarakteristiek



Enkele belangrijke punten op de grafiek zijn : het aanlooppunt, het kippunt, het nominale punt, het nullastpunt en het synchroon punt. Duid onderstaande punten aan op de koppel-toerentalkarakteristiek.

- (1) De motor wordt gestart, de rotor vertrekt vanuit rusttoestand, het rotortoerental is gelijk aan nul. De slip is maximaal ( $s = 1$ ), het aanzetkoppel  $M_{i,ST}$  is klein.
  - (2) Als ongeveer 80 % van het synchroon toerental bereikt is, ontwikkelt de motor zijn maximum koppel, het kipkoppel  $M_k$  bij  $s_k$  of bij toerental  $n_k$ .
  - (3) De motor bereikt nadien zijn nominaal toerental  $n_{r,n}$  bij ongeveer 96 % van het synchroon toerental. Bij het nominaal toerental of bij de nominale slip  $s_n$  ontwikkelt de motor zijn nominaal koppel  $M_{i,n}$ .
  - (4) Bij nullast is het rotortoerental  $n_{r,0}$  iets groter dan bij nominale belasting en bijna gelijk aan het synchroon toerental  $n_s$ . Het nullastpunt is dit punt waarbij de machine juist voldoende koppel  $M_{i,0}$  - het nullastkoppel - levert om zijn eigen mechanisch verlieskoppel  $M_v$  te compenseren. Het nuttig koppel, of het koppel geleverd op de as, is nul.
  - (5) Bij het synchroon toerental wordt er geen koppel geleverd door de motor.
  - (6) Het onstabiele gebied : een kleine verandering in belasting heeft een relatief grote snelheidsverandering tot gevolg. De motor neemt in dit gebied een te grote stroom op,  $I >> I_n$  (zie paragraaf 2.14).
  - (7) Het werkingsgebied van de motor : Dit gebied ligt tussen het nominale koppel en het nullastkoppel van de motor. Hier zal een belastingsverandering een kleine snelheidsverandering tot gevolg hebben. De opgenomen stroom ligt tussen  $I_{1,n}$  en  $I_0$  (zie paragraaf 2.14).



In de koppel-toerentalkarakteristiek onderscheiden we drie gebieden :

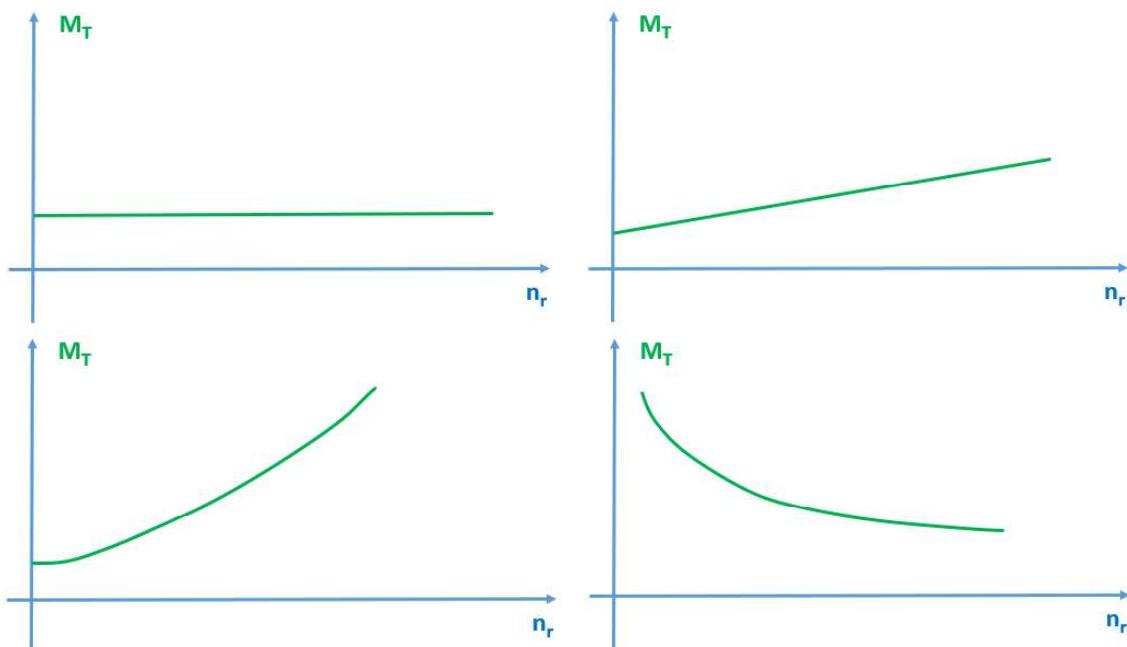
- (a) Gebied van tegenstroomremmen (toerental [-oneindig, 0])
- (b) Gebied van motorwerking (toerental [0, ns[)
- (c) Gebied van generatorwerking (toerental ] ns, oneindig])

Het gebied van tegenstroomremmen betekent fysisch dat de rotor omgekeerd draait ten opzichte van het draaiveld. Dit gebeurt bij het omkeren van de zin van het draaiveld - en dus door praktisch twee lijnen te verwisselen - gedurende de tijd dat de rotor nog in de vorige zin draait. Het draaiveld wil dan de draaizin van de rotor omkeren. Dit heeft een krachtige remming tot gevolg.

## 2.11 *Statische werking van de asynchrone motor*

---

Bij de keuze van de asynchrone motor dien je onder andere rekening te houden met de aard en de grootte van de belasting. Elk werktuig wordt gekarakteriseerd door een specifieke koppel-toerentalkarakteristiek. De koppel-toerentalkarakteristieken van de belasting kunnen ingedeeld worden in constante koppel-toerentalkarakteristiek, een lineaire karakteristiek, een kwadratische karakteristiek, of een invers proportionele koppel-toerentalkarakteristiek. Algemeen worden deze karakteristieken *de belastingskarakteristieken*  $M_T = f(n_r)$  genoemd.



Indien men de koppel-toerentalkarakteristiek van de aan te drijven machine (belasting – werktuig) projecteert op de koppel-toerentalkarakteristiek van de aandrijvende motor, bekom je het statisch werkingspunt. Het *statisch werkingspunt* is het snijpunt van beide karakteristieken. Dit punt moet in het werkingsgebied van de motor liggen, d.w.z. tussen het nominaal punt en het nullastpunt. Idealiter ligt het punt op of zo dicht mogelijk bij het nominaal koppel en nominaal toerental maar wel juist onder dit punt. Het toerental is dan iets groter dan het nominaal toerental maar kleiner dan het nullasttoerental, het geleverde koppel iets kleiner dan het nominale koppel met groter dan het nullastkoppel.

De reden hiervoor wordt hieronder uitgelegd. Bevindt het geheel van de aandrijvende motor en de aan te drijven belasting, zich in een *statische toestand* dan wil dit zeggen dat het rotortoerental constant is. Dit zal het geval zijn indien het aandrijvende koppel  $M_i$  van de motor juist gelijk is aan het totaal tegenwerkend koppel. Het totaal tegenwerkend koppel  $M_T$  bestaat uit het koppel nodig om de eigen mechanische verliezen te compenseren en het koppel van het werktuig (belastingskoppel). Het inwendig koppel  $M_i$  van de motor moet dus in statische toestand voldoen aan :

$$M_i = M_v + M_w$$

waarbij  $M_v$  het verlieskoppel van de motor is, d.w.z. de wrijvings- en de ventilatieverliezen. Het tegenwerkend koppel van de belasting of het werktuig wordt  $M_w$  genoemd. Het verlieskoppel en het belastingskoppel samen vormen het totaal tegenwerkend koppel  $M_T$ . De statische toestand wordt dus bereikt indien

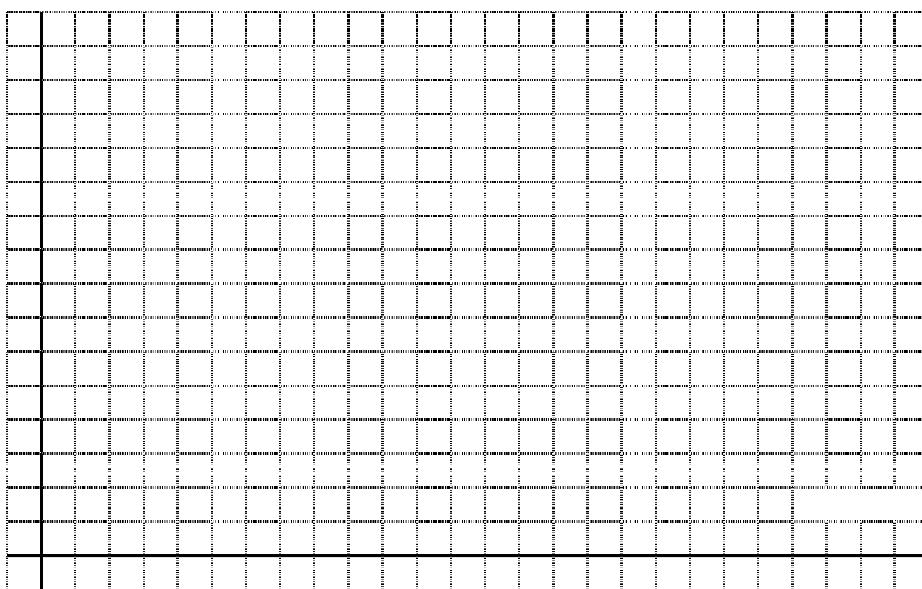
$$M_i = M_T$$

en kan grafisch voorgesteld worden als het snijpunt van de motorkarakteristiek met de karakteristiek van de belasting.

Kan en mag deze statische toestand zich in elk punt van de koppel-toerentalkarakteristiek van de motor voordoen ? Het *statisch werkingspunt* moet gelegen zijn in het werkingsgebied van de motor. Voor de asynchrone motor is dit gebied gelegen tussen het nullastpunt en het nominale punt. De snijpunt van beide karakteristieken moet dus in dit gebied liggen. Ligt het snijpunt buiten dit gebied, en wordt er dus *continu* een koppel gevraagd dat groter is dan het nominale koppel, zal de motor overbelast worden (cfr. stroom karakteristiek verder in dit hoofdstuk paragraaf 2.14).

In de vorige paragraaf was het nullastpunt reeds ter sprake gekomen. Werkt de motor in dit nullastpunt dan zal hij geen nuttig koppel afgeven aan het werktuig. Het inwendig koppel wordt enkel geleverd voor zijn eigen verliesmoment te overwinnen. Ook het verliesmoment van de motor heeft een bepaalde koppel-toerentalkarakteristiek. Dit wordt de nullastbelastingslijn genoemd. Ze benadert een kwadratisch verloop en is dichtbij de toerental as gelegen. Een goede motor bezit immers een zo klein mogelijk verlieskoppel. Het snijpunt van de motorkarakteristiek met de nullastbelastingslijn wordt dan het nullastwerkingspunt genoemd. Dit punt ligt dichtbij het synchroon punt. We stellen op onderstaande koppel-toerentalkarakteristiek het nominale punt, het nullastpunt, het statisch werkingspunt, het werkingsgebied van de motor, de nullastbelastingslijn en de belastingslijn van een werktuig voor.

#### Koppel-toerental karakteristiek



#### 2.12 Dynamische werking van de asynchrone motor

---

Een aandrijving (combinatie motor en belasting) bevindt zich een dynamische toestand (of dynamische werking) als het rotortoerental niet constant is. Het rotortoerental wijzigt, dit wil zeggen dat de motor zal versnellen of vertragen. Enerzijds kan het wijzigen van de belasting

zorgen voor een variatie in toerental, anderzijds kan ook het aanlopen van de motor beschouwd worden als dynamische werking.

Versnellen of vertragen van het aandrijvingssysteem is slechts mogelijk indien de motor onderhevig is aan een versnellingsmoment  $M_J$  (positief bij versnellen, negatief bij vertragen). Het *versnellingsmoment*  $M_J$  is afhankelijk van het *traagheidsmoment*  $J$  van het volledige systeem en afhankelijk van de *hoekversnelling*  $\alpha$  (of de vertraging) van de motor. We bekomen

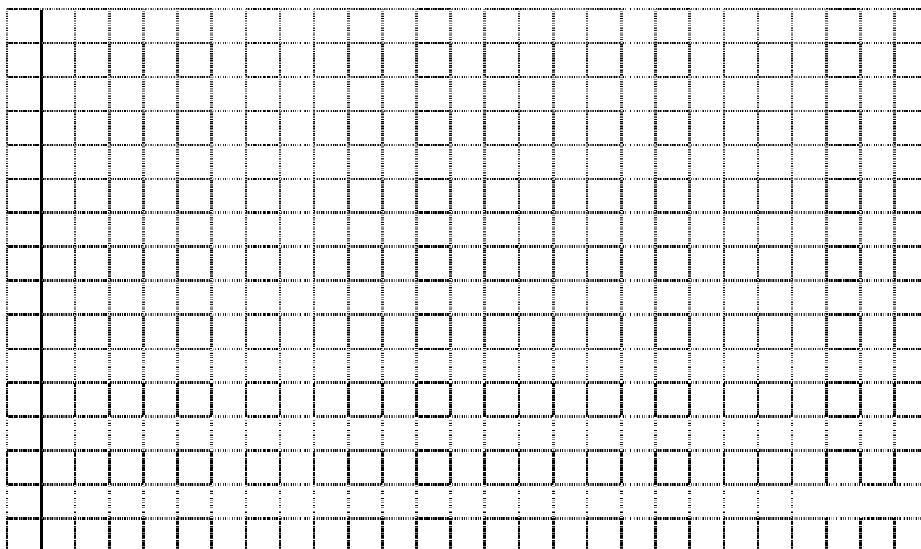
$$M_J = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \alpha$$

De algemene vergelijking die de dynamisch werking van het systeem karakteriseert, is :

$$M_i = M_T + M_J = M_T + J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_T + J \cdot \alpha$$

Het versnellingsmoment  $M_J$  wordt ook het koppeloverschot (positief of negatief) genoemd en kan grafisch voorgesteld worden als - per toerental - het verschil tussen het inwendig koppel  $M_i$  en het tegenwerkend koppel  $M_T$ . Dit positieve verschil is nodig wil de motor kunnen versnellen. We kunnen besluiten dat het gedeelte van de belastingskarakteristiek dat voor het statisch werkingspunt gelegen is, steeds onder de motorkarakteristiek moet liggen. Is dit niet het geval, dan zal er op dat ogenblik geen positief koppeloverschot en dus ook geen versnelling meer zijn, waardoor de statische toestand zou bereikt worden bij een te lage snelheid in het onstabiele gebied; een te grote stroom zou opgenomen worden (paragraaf 2.14).

#### Koppel-toerental karakteristiek



Wil de motor vanuit stilstand kunnen versnellen dan moet het motorkoppel steeds groter zijn dan het belastingskoppel. Het verschil tussen beide karakteristieken is maat voor het versnellingskoppel.

Merk op dat het belastingskoppel op het ogenblik van aanzetten, ook nog het *losbrekkoppel* of lostrekkoppel genoemd wordt. Bij een aantal toepassingen is het losbrekkoppel groter dan het startkoppel van de motor. De motor kan dus in dit geval niet starten.

### 2.13 Toerentalvariatie

---

Uit de formule

$$n_r = n_s \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f_s}{p} \cdot (1 - s)$$

blijkt dat er drie methoden of principes zijn om het rotortoerental van de asynchrone motor te wijzigen, namelijk door verandering van

- het aantal polenparen
- de frequentie van de netspanning
- de slip
  - door wijziging van de rotorweerstand
  - door wijziging van de netspanning

#### 2.13.1 Poolomschakelbare motoren

Het aantal polen van de asynchrone motor wordt bepaald door de statorwikkeling. Eénmaal de statorwikkeling gewikkeld is, ligt het aantal polen vast.

Indien men echter twee of meerdere statorwikkelingen met een verschillend aantal polenparen voorziet, beschikt de motor over twee of meerdere synchrone toerentallen. Een andere mogelijkheid om - maar dan slechts - twee rotatiesnelheden te bekomen, biedt de dahlander-motor.

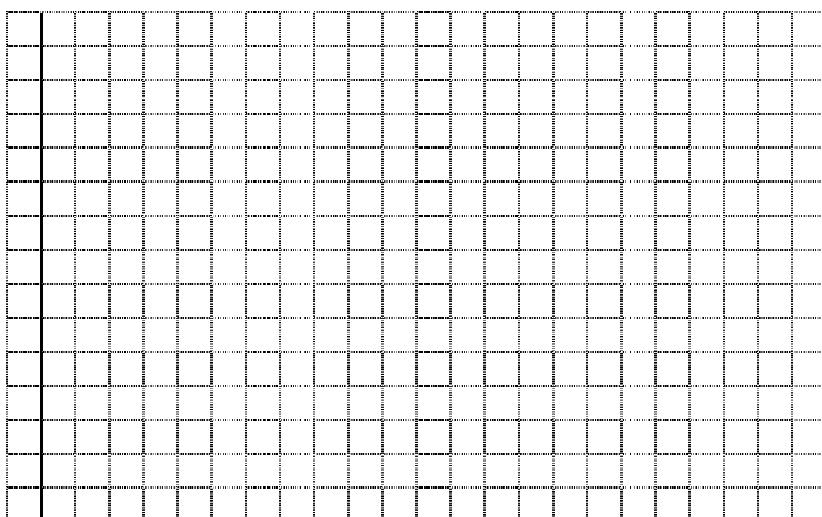
Poolomschakeling kan enkel bij kooirotormotoren toegepast worden, omdat enkel de kooirotor zich automatisch aan het aantal aangeboden statorpolen kan aanpassen.

#### 2.13.1.1 *Motoren met meerdere statorwikkelingen*

In de stator worden twee (of meer) volledig van elkaar gescheiden statorwikkelingen, elk met een ander poolparengetal aangebracht. Eén van de wikkelingen is steeds buiten gebruik. De rotatiesnelheden die aldus bekomen kunnen worden, zijn volledig onafhankelijk van elkaar. Polenverdubbeling of snelheidshalvering wordt niet op deze manier tot stand gebracht.

Gescheiden wikkelingen worden dan ook slechts toegepast in de andere gevallen : bv. 2p gelijk aan 4/6, 6/8 of 8/10. Beide wikkelingen kunnen in ster of in driehoek aangesloten worden, afhankelijk van de beschikbare spanning. Meestal echter is de sterverbinding reeds op voorhand inwendig gerealiseerd zodat op het klemmenbord zes klemmen aangebracht zijn. De laagste rotatiesnelheid wordt verkregen door de klemmen met het laagste voorafgaande cijfer met het net te verbinden.

Deze motoren worden meestal uitgevoerd zodanig dat ze voor beide snelheden - ongeveer - hetzelfde nominale koppel bezitten.



### 2.13.1.2 *Dahlandermotor*

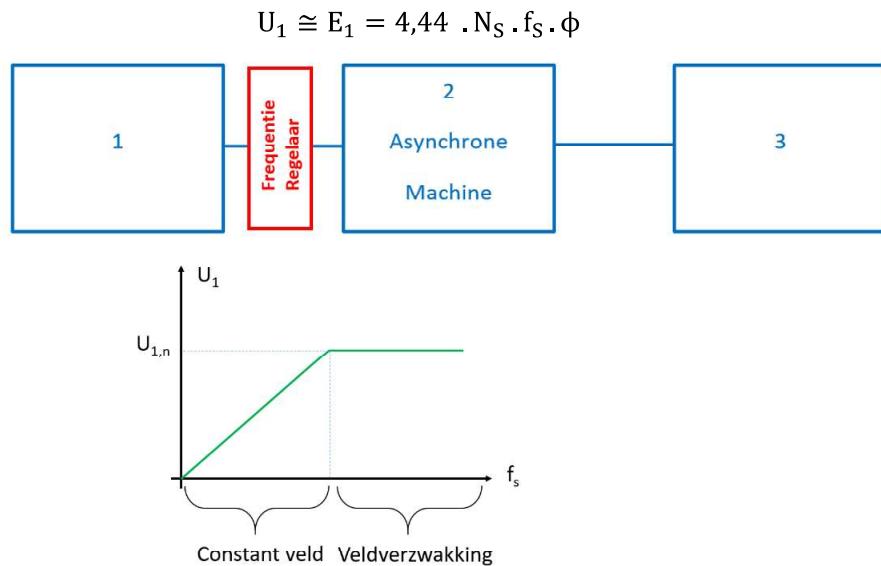
Bij een dergelijke poolomschakelbare motor heeft de stator slechts één driefasige stator wikkeling. Elke statorfase bestaat uit twee wikkelingshelften die op verschillende manieren (serie/parallel) kunnen worden verbonden en gevoed. De meest voorkomende schakelingen voor aandrijvingen met een constant koppel zijn de driehoekschakeling en de dubbelsterschakeling. Het aantal polenparen dat hierbij ontstaat, verhoudt zich steeds als twee tegen één zodat enkel twee rotatiesnelheden in verhouding één tegen twee mogelijk zijn.

Netaansluiting op klemmen met de laagste (resp. hoogste) nummering behoort bij de laagste (resp. hoogste) snelheid.

Er wordt opgemerkt dat er ook motoren bestaan waarbij de dahlanderwikkeling gecombineerd wordt met een gescheiden wikkeling. De eerste mogelijkheid is dat er twee gescheiden wikkelingen zijn waarvan één in dahlanderschakeling. Het aantal aansluitklemmen bedraagt dan negen. Er zijn drie toerentallen mogelijk waarvan er twee in de verhouding twee tot één staan. De tweede mogelijkheid is dat er twee gescheiden wikkelingen voorzien zijn, beide in dahlanderschakeling. Hier zijn dus vier toerentallen mogelijk. Het aantal aansluitklemmen bedraagt dan twaalf.

### 2.13.2 *Variatie van de frequentie*

Om de snelheid van een asynchrone motor te regelen kan men ook de frequentie van de statospanning wijzigen. Door deze variabel te maken, wijzigt men immers het synchroon toerental, en dus onrechtstreeks het rotortoerental. Het net levert echter een spanning met een constante frequentie van 50 Hz. Inzichten en kennis van vermogen elektronica zijn dus nodig om de machine een frequentie aan te bieden die continu regelbaar is tussen enkele Hz en enkele tientallen Hz. Men gaat ervan uit - in deze paragraaf - dat er een systeem bestaat dat een wisselspanning met vaste nominale spanning en vaste nominale frequentie kan omzetten in een spanning met een regelbare frequentie en grootte. Het verband tussen de statospanning, de flux en de statorfrequentie wordt gegeven door :



Voor de goede werking van de motor mag de flux zijn nominale waarde niet overschrijden anders wordt de magnetisatiestroom te groot.

Er worden 2 gebieden onderscheiden :

- gebied met frequenties kleiner en gelijk aan de nominale frequentie :

Indien men de motor wil aansturen met een frequentie kleiner of gelijk aan de nominale frequentie, dan moet de aangelegde spanning op eenzelfde wijze dalen, wil de flux zijn nominale waarde behouden. Met andere woorden bij frequenties lager dan de nominale frequentie moet de verhouding spanning tot frequentie constant gehouden worden. De invloed van de wijziging van de statospanning en de statorfrequentie op de koppel-toerentalkarakteristiek wordt nagegaan a.d.h.v. enkele bijzondere punten van de grafiek.

- Indien de machine zijn nominale stroom vergt, dan kan het nominale koppel geleverd worden over het volledige werkingsgebied. Dit wil zeggen dat het nominale koppel constant blijft.
- Het kipkoppel is onafhankelijk van de statorfrequentie en blijft dus in dit gebied (nagenoeg\*) constant.
- Het synchroon toerental varieert evenredig mee met de statorfrequentie (bij een constant aantal polenparen).

- Het absoluut toerentalverschil  $\Delta n_k$ , dit is het toerentalverschil tussen het kiptoerental en het synchroon toerental, blijft identiek en is onafhankelijk van de frequentie.

$$\Delta n_k = n_s - n_k$$

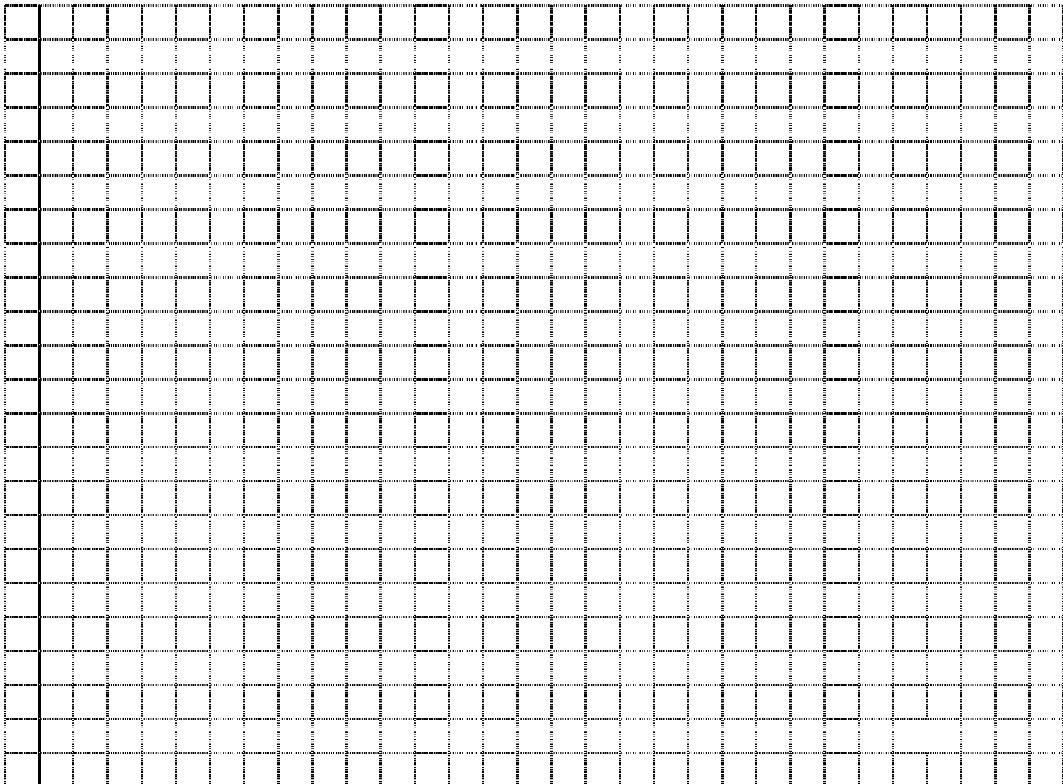
$$\Delta n_k = n_s - n_s \cdot (1 - s_k)$$

$$\Delta n_k = \frac{R_2}{\frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot L_2}$$

Afgezien van de synchrone snelheid blijven dus alle overige eigenschappen van de motor onveranderd. De vorm van de motorkarakteristiek blijft dus (nagenoeg\*) ongewijzigd ; hij verschuift enkel horizontaal, afhankelijk van de ingestelde frequentie. De statische werkingspunten verschuiven dus (naar links of naar rechts) over de belastingslijn.

Nagenoeg\* omdat de aangelegde spanning gelijkgesteld werd aan de tegenemk. In praktijk zijn deze verschillend en dit zal een kleine invloed hebben op o.a. de grootte van het kipkoppel.

#### Koppel-toerentalkarakteristiek



- *gebied met frequenties groter dan de nominale frequentie:*

Indien men de motor wil aansturen met een frequentie groter dan de nominale frequentie dan kan men deze constante spannings-frequentieverhouding niet meer handhaven door de spanningsbegrenzing die optreedt op de statorspanning. In dit gebied wordt de statorspanning op zijn nominale waarde gehouden terwijl de frequentie verder kan stijgen. Als gevolg hiervan zal de flux dalen en kleiner worden dan de nominale flux. De machine werkt in het gebied van veldverzwakking. De invloed van de wijziging van de statorspanning en de statorfrequentie op de koppel- toerentalkarakteristiek gaan we na aan de hand van enkele bijzondere punten van de grafiek :

- Indien de machine zijn nominale stroom opneemt, dan zal het nominale koppel omgekeerd evenredig variëren met de statorfrequentie. De nominale koppels liggen dus in dit gebied op een hyperbool.
- Het kipkoppel is evenredig met het kwadraat van de statorspanning tot de statorfrequentie en bij nominale statorspanning, varieert het kipkoppel dus omgekeerd met het kwadraat van de statorfrequentie.
- Het synchroon toerental varieert met de statorfrequentie (bij een constant aantal polenparen).
- Het absoluut toerentalverschil  $\Delta n_k$  dat de ligging van de maximum ten opzichte van het synchroon punt bepaalt, blijft identiek.

De vorm van de motorkarakteristiek blijft dus ongewijzigd doch hij ligt vervat tussen een kwadratisch dalende karakteristiek voor de kipkoppels en een hyperbool voor de nominale koppels. Verder verschuift hij horizontaal, afhankelijk van de ingestelde frequentie. De statische werkingspunten verschuiven ook hier terug over de belastingslijn.

Merk op dat in het gebied van veldverzwakking het inwendig koppel daalt, wat beperkingen met zich meebrengt in verband met de keuze van de belasting bij deze gebruikte toepassing van toerentalvariatie.

De naam oversynchroon bedrijf komt vaak voor in deze context doch is een foutieve aanduiding. Bij veranderende statorfrequentie wijzigt immers ook het synchroon toerental van de machine. Zolang de inductiemachine als motor werkt, draait ze dus lager dan het

synchroon toerental en bevindt ze zich in een gebied lager dan het synchroon punt, dat wel variabel is. Het machine blijft als motor werken.

Merk tevens op dat bij een correcte keuze van de frequentie zelfs een aanloopkoppel kan bekomen worden dat gelijk is aan het maximum koppel.

### 2.13.3 Variatie van de slip

#### 2.13.3.1 Variatie van de statospanning

De aangelegde spanning kan geregeld worden door gebruik te maken van een driefasige regelbare transformator, thyristors of triacs. Verlaagt men de statospanning, dan zal de koppel-toerentalkarakteristiek wijzigen volgens

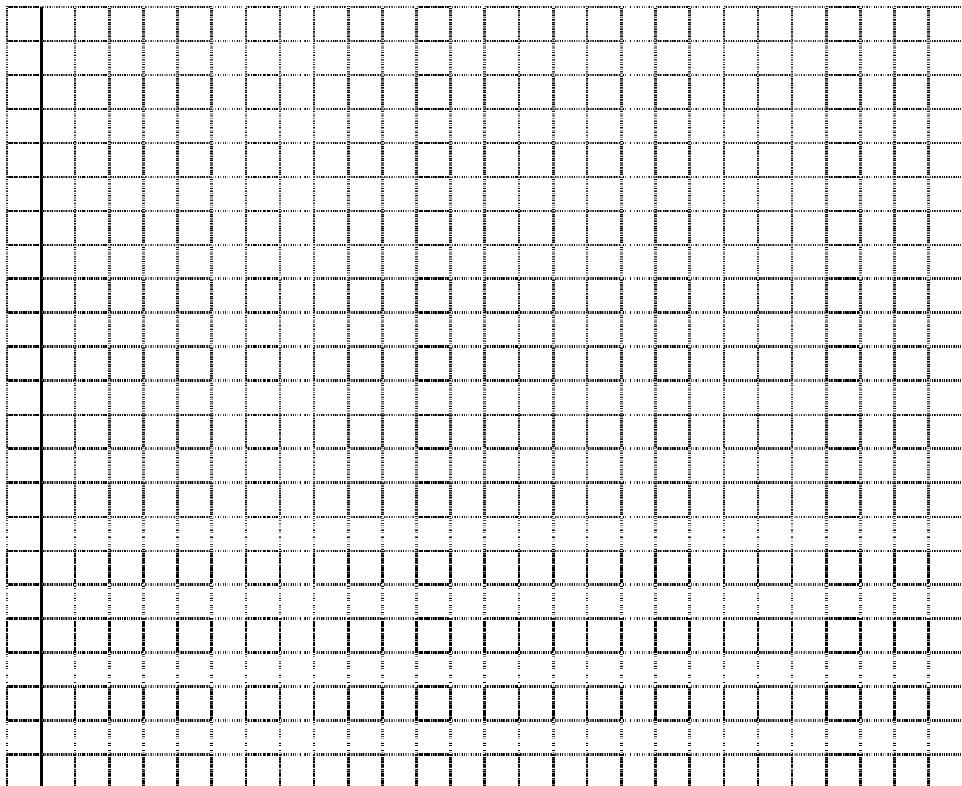
- Het kipkoppel is kwadratisch afhankelijk van de statospanning ; het daalt dus kwadratisch indien de statospanning lineair afneemt. Bij een kleine voedingsspanning zal het beschikbare motorkoppel klein zijn.
- Het synchroon toerental blijft constant.
- Het absoluut toerentalverschil  $\Delta n_k$  dat de ligging van het maximum ten opzichte van het synchroon punt bepaalt, blijft identiek.

Bij de nominale statospanning drijft de motor de belasting aan tot in een welbepaald rotortoerental (nominaal toerental of hoger). Verlaag je de statospanning dan daalt het rotortoerental. Het regelgebied is beperkt tot het kiptoerental. Als de statospanning nog lager zou geregeld worden, dan werkt de motor in het onstabiele gebied. Het motorkoppel is dan lager dan het belastingskoppel. Hierdoor daalt het rotortoerental nog meer, waardoor er meer veldlijnen gesneden worden, zodat de opgewekte emk in de rotor toeneemt, alsook de rotorstroom en dus het koppel. Het rotortoerental stijgt dan terug, waardoor de rotoremk terug zou dalen, enz.

Het regelgebied bij deze methode is klein. Het regelgebied kan vergroot worden door de rotorweerstand te vergroten zodat de kipslip groter wordt, en dus ook het regelgebied. Deze

methode kan gebruikt worden voor motoren waarvan de koppel-toerentalkarakteristiek sterk daalt bij belasting, de zgn. weerstandsmotoren. Tevens is deze methode slechts zinvol voor belastingen met een kwadratische koppel-toerentalkarakteristiek.

Koppel-toerentalkarakteristiek bij verschillende statospanningen



#### 2.13.3.2 Variatie van de rotorweerstand

Uit vorige paragrafen mocht blijken dat een asynchrone motor in het werkingsgebied werkt met kleine waarden van de slip.

Vergroting van de rotorweerstand  $R_2$  heeft een toename van de slip tot gevolg. Het rotortoerental neemt dus af. Toerentalvariatie is dus mogelijk door de rotorweerstand te wijzigen. Veranderen van de rotorweerstand is echter enkel mogelijk bij sleepringmotoren. Teken in onderstaande koppel-toerentalkarakteristiek een aantal koppel-toerental karakteristieken bij verschillende rotorweerstanden rekening houdend met het feit dat

- het synchroon toerental constant blijft.

- het kipkoppel gelijk blijft in grootte
- de kipslip vergroot indien de rotorweerstand toeneemt
- de helling voor kleine slipwaarden afneemt bij stijgende rotorweerstand.

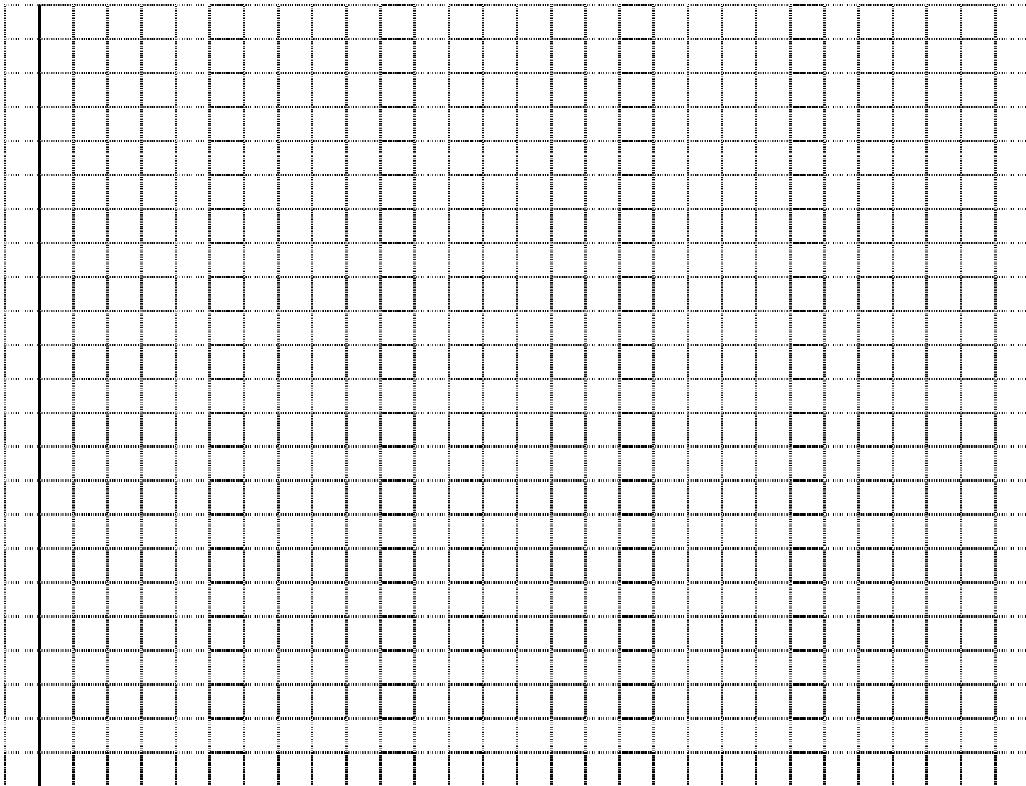
Bij een correcte keuze van de grootte van de rotorweerstand kan zelfs een aanloopkoppel bekomen worden dat gelijk is aan het maximum koppel. Vermits de kipslip gegeven wordt door

$$s_k = \pm \frac{R_2}{X_{2,ST}}$$

en de kipslip nu bij stilstand moet bereikt worden, geldt  $s_k \equiv s = 1$  en dus dat

$$R_2 = X_{2,ST}$$

Voor aandrijvingen met een zeer hoog losbreekkoppel is dit een ideale uitgangspositie. Nadeel van deze methode is de dissipatie die optreedt in de weerstanden.



## 2.14 Stroom-toerentalkarakteriek

Bij het starten van een asynchrone motor vloeit een stroom in de stator die veel groter is dan de nominale stroom. Als gevolg van de inwendige impedantie van het net treedt er een spanningsval op in het net. Omdat deze spanningsval hinderlijk is voor andere gebruikers, moet de aanloopstroom beperkt worden. Daarnaast moet deze intense stroom ook beperkt worden om beschadiging van de motorwikkeling te voorkomen. Een verklaring voor deze grote aanloopstroom kan gevonden worden in onderstaande redenering.

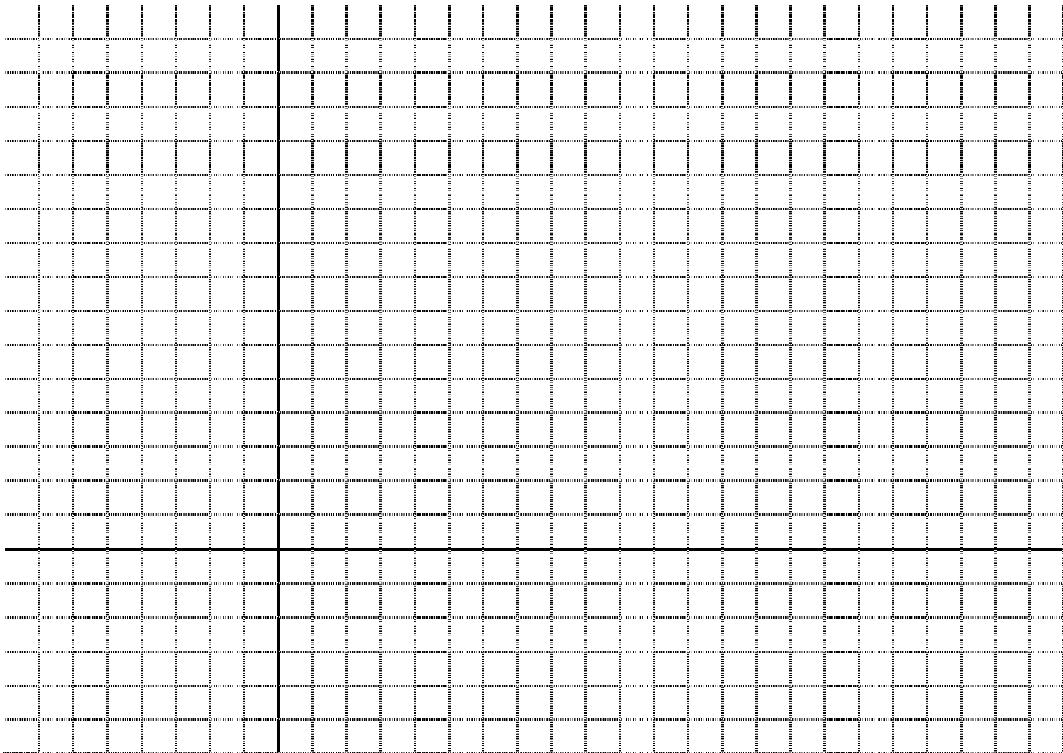
Het verloop van de rotorstroom in functie van de slip wordt gegeven door

$$I_2 = \frac{E_{2,ST}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2,ST}^2}}$$

Het verloop van de rotorstroom in functie van de slip wordt in onderstaande figuur voorgesteld.

Bepaal achtereenvolgens de rotorstroom voor enkele bijzondere punten, nl.  $s = 0$ ,  $s = 1$ ,

$s = -1$ ,  $s$  naderend naar  $+\infty$  of naar  $-\infty$ , enz. en duid deze punten aan op de grafiek.



Om het verloop van de statorstroom in functie van de slip te kennen, moet onderstaande formule toegepast worden :

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \left( -\frac{1}{k} \right) \cdot \bar{I}_2$$

Bij verwaarlozing van de nullaststroom en na toepassen van reflectie van de rotorgrootheden naar de statorgrootheden, wordt de aanloopstroom gegeven door

$$I_{1,ST} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + k^2 \cdot R_2)^2 + (X_1 + k^2 \cdot X_{2,ST})^2}}$$

De statoraanzetstroom is verschillende keren (4 tot 6-maal) groter dan de nominale statorstroom. Zet men de statorstroom uit in functie van het toerental, dan blijkt dat voor toerentallen gelegen tussen de 0 en 0,8.n<sub>s</sub> de statorstroom slechts weinig afneemt ; 25 tot 40 %. De statoraanzetstroom vermindert slechts sterk eens het maximaal koppel bereikt is. Indien de motor dus traag op gang komt ten gevolge van de belasting, blijft de te grote stroom te lang aanhouden zodat niet alleen spanningsdalingen in het net voorkomen doch ook het gevaar voor verbranding van de statorwikkelingen niet uitgesloten kan worden.

Beperken van de aanloopstroom houdt in dat :

- de statorspanning verlaagd wordt of
- de statorweerstand of de statorreactantie verhoogd wordt of
- de rotorweerstand of de rotorreactantie verhoogd wordt.

De problematiek van het beperken van de aanloopstroom moet echter in een breder kader gezien worden. Uit voorgaande besprekingen blijkt dat het aanzetkoppel van de driefasige asynchrone motor relatief klein is in vergelijking met bv. het aanzetkoppel van een gelijkstroommotor van hetzelfde vermogen. Het aanzetkoppel is vooral afhankelijk van de verhouding van de rotorweerstand tot de rotorreactantie en van de statorspanning. Aanloopmethoden die inspelen op deze laatste grootheden zullen de aanloopstroom dus wel beperken doch tevens invloed uitoefenen op het aanloopkoppel. Het aanloopkoppel vormt een belangrijke grootheid omdat de grootte ervan enerzijds bepalend is voor de versnelling van de motor vanuit een stilstaande toestand en anderzijds voor de bepaling van de gekozen belasting. Hoe groter het aanloopkoppel, hoe groter het aanloopversnellingskoppel of het

koppeloverschot bij stilstand zal zijn. Tevens mogen we niet uit het oog verliezen dat de keuze van de motor en van de startmethode vooral bepaald wordt door de aard van de belasting. Een overzicht van alle gebruikelijke methodes wordt hier weergegeven. Op de directe aanloop na, hebben alle aanloopmethodes tot doel de aanloopstroom te beperken wat echter automatisch – in de meeste gevallen een negatieve – invloed heeft op de grootte van het aanloopkoppel.

## 2.15 Aanloopmethodes

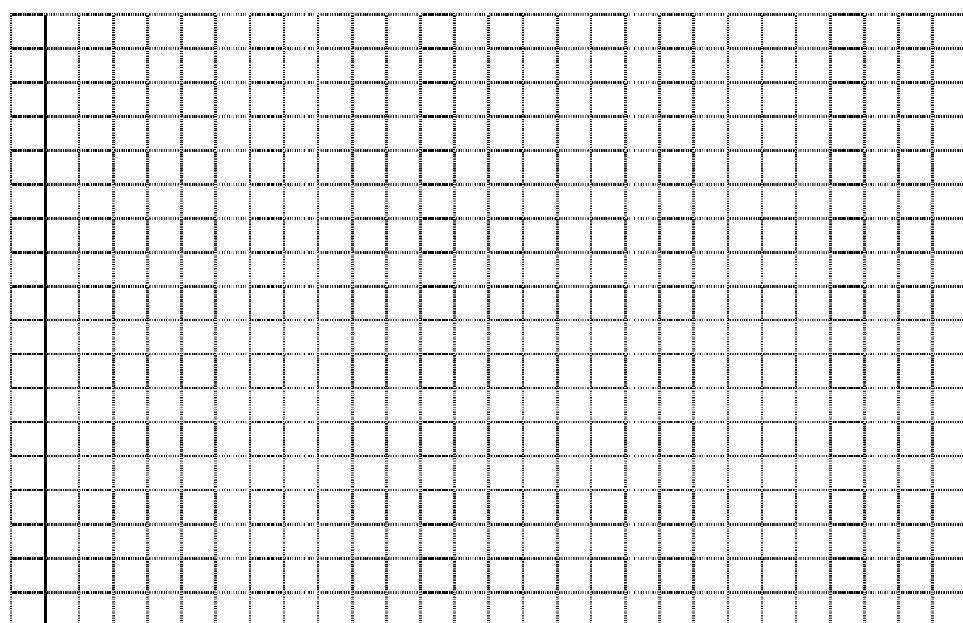
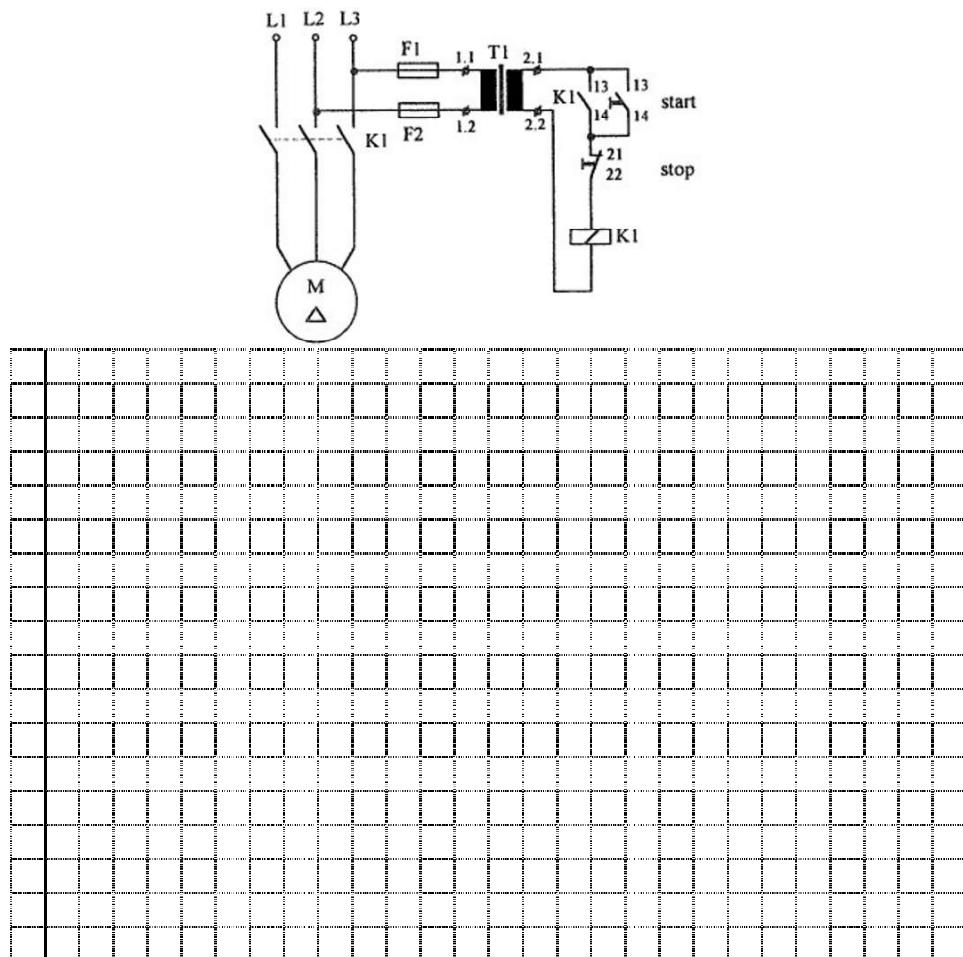
---

### 2.15.1 Directe aanloop

Deze aanloopmethode kan aangewend worden bij motoren met een klein vermogen of bij grotere motoren die aangesloten worden op een net met een voldoende lage inwendige impedantie. De motor wordt rechtstreeks aangesloten op de netspanning. Het aanzetkoppel is maximaal,  $M_{i,ST}$  terwijl de aanzetstroom niet beperkt wordt.

Bij directe aanloop wordt de motor met behulp van een driepolige handbediende schakelaar ofwel automatisch via een start-stop schakeling direct op het net aangeschakeld. Een voorbeeld van een mogelijke schakeling wordt in onderstaande figuur weergegeven. Indien de start drukknop ingedrukt wordt, wordt de spoel van de contactor K1 bekrachtigd. De contacten van de hoofdkring worden gesloten en de motor loopt aan. Het hulpcontact wordt gesloten, zodat de startdruktoets niet langer ingedrukt moet worden. Door de monostabiele stopschakelaar in te drukken, wordt de keten onderbroken en openen de contacten van de contactor K1. Er wordt gekozen voor een start-stop schakeling prioriteit stop. De transformator zet de voedingsspanning om naar een lagere waarde. Voor de stuurketen zijn 24, 48, 110 en 230 V genormaliseerde waarden. De beveiligingen zijn niet opgenomen in deze figuur.

Stel in onderstaand figuren het verloop van het werkingspunt voor in de koppel-toerentalkarakteristiek en in de statorstroom-toerental karakteristiek. Tevens kan het verloop van de netstroom in functie van de tijd weergegeven worden.



Bij direct inschakelen, komt rechtstreeks de spanning van het net over de statorwikkelingen te staan. Afhankelijk van de netspanning wordt de stator in ster of in driehoek aangesloten. Belangrijk hierin is de kenplaat van de motor. Staat op de kenplaat 230/400 V dan betekent dit dat de motorwikkelingen per fase geschikt zijn voor 230 V. Concreet betekent dit dat de motor in driehoek kan aangesloten worden op een net van 3 x 230 V lijnspanning of in ster op een net van 3 x 400 V lijnspanning. Staat er op de kenplaat 400 V/690V vermeld, dan mag er over de statorwikkeling 400 V fasespanning staan. Dit betekent dat de motor in driehoek op een net met lijnspanning 400 V kan geplaatst worden of in ster op een net met 690 V lijnspanning.

Op de kenplaat wordt tevens de constructeur, het type nummer, het nominaal vermogen (vermogen bij vollast of bij nominale belasting), het nominaal toerental, de nominale spanningen (steeds 2 waarden ..../.... V), de nominale stromen, de isolatieklasse vermeld.

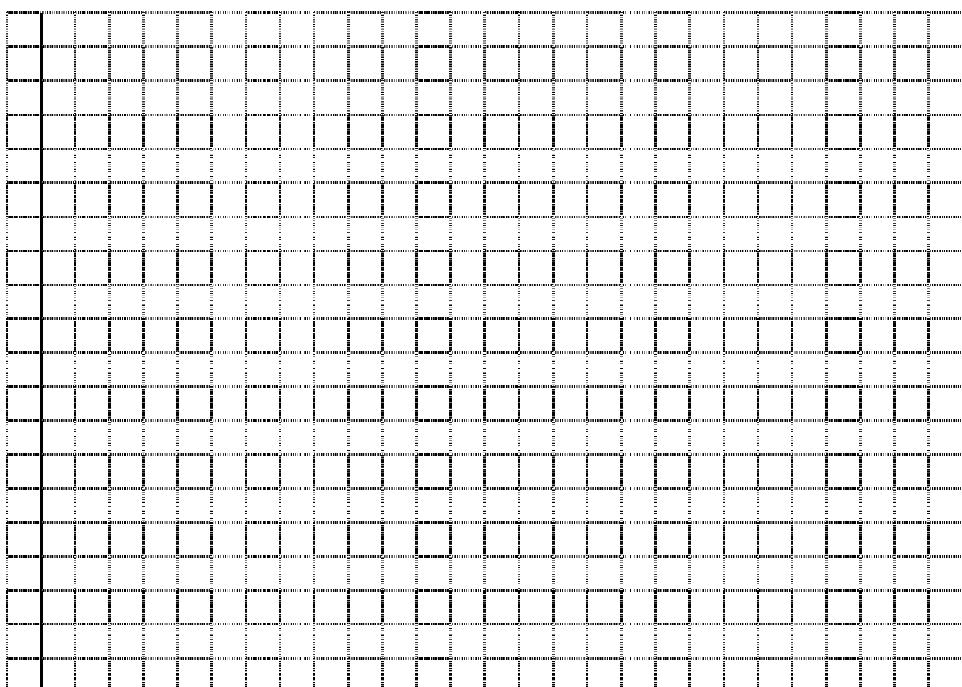
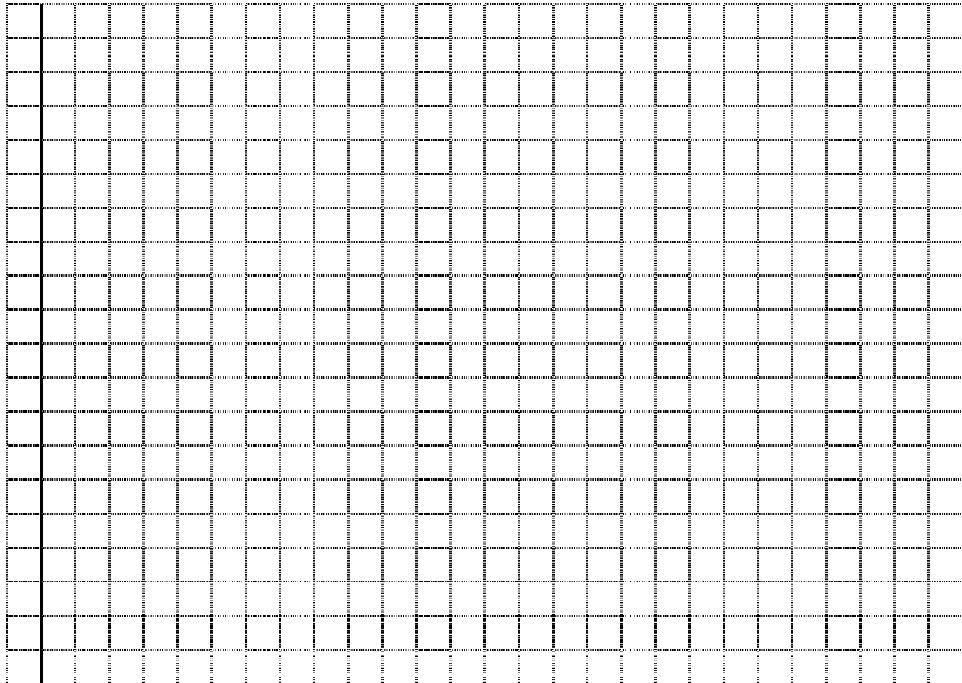
## 2.15.2 Aanloop onder verlaagde spanning

### 2.15.2.1 Ster-Driehoekaanloop

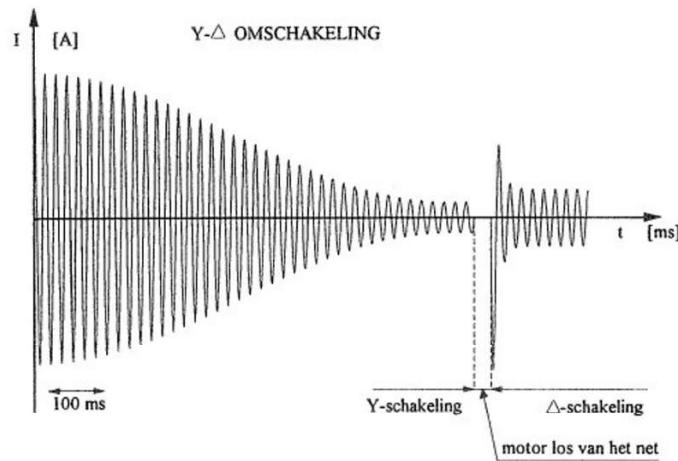
Ster-driehoek aanloop is enkel toepasbaar bij motoren die in bedrijfsstand in driehoek geschakeld worden. De motor loopt aan met de statorwikkeling in ster geschakeld. Heeft de motor vrijwel zijn nominaal toerental bereikt, dan wordt de statorwikkeling in driehoek geschakeld. Bij deze aanloopmethode worden het aanloopkoppel en aanloopstroom teruggebracht tot een derde van de waarde die men zou krijgen bij directe inschakeling met de statorwikkeling in driehoek. Onder vollast aanlopen kan problemen scheppen. Stel in onderstaande figuur zowel het koppel als de stroom karakteristiek voor bij ster-driehoek aanloop.

In onderstaande figuur wordt het verloop van de statorstroom tweemaal weergegeven, nl. bij een motor die in ster en die in driehoek geschakeld is. Evenzeer wordt in de koppeltoerentalkarakteristiek beide modi voorgesteld. De overschakeling van ster naar driehoek gebeurt bij een hoog toerental. Hierdoor blijft de stroom op het moment van overschakelen klein ten opzichte van de 5-7  $I_n$ . Zou de overschakeling gebeuren bij een laag

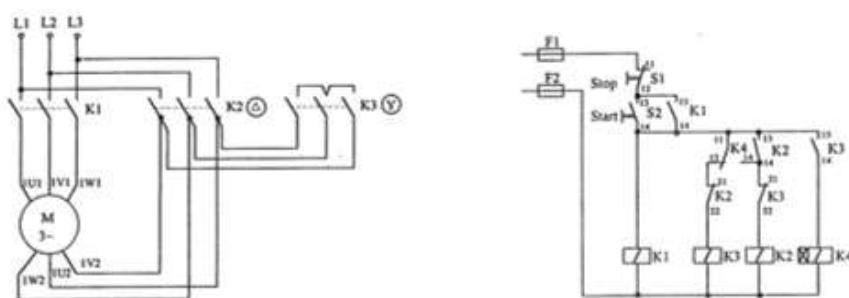
toerental, dan zal de stroompiek op het ogenblik van overschakelen niet ver beneden 5-7  $I_n$  liggen. Het overschakelen vindt normaliter plaats rond 0,8  $n_n$ .



Het kleine tijdsinterval tijdens het omschakelen van ster naar driehoek - er vloeit geen stroom - heeft praktisch geen invloed op het rotortoerental vanwege de inertie van de motor. Er treden wel grote stroompieken op juist na de overschakeling van ster naar driehoek. Daarom is het gewenst de overschakeling van ster naar driehoek zo dicht mogelijk bij het nominale toerental te laten plaatsvinden. Anders treedt bij overschakeling een enorme stroomstoot op die de thermische beveiligingen aanspreekt.



In onderstaande figuur is het schema van de ster-driehoekschakeling weergegeven. Bij het starten wordt de lijncontactor K1 en de stercontactor K3 gesloten. Na een bepaalde tijd wordt K3 geopend. Vervolgens zal de driehoekcontactor K2 gesloten worden. Op de kenplaat van de driefasige motor wordt de nominale spanning gewoonlijk aangegeven in de vorm van  $U/U\sqrt{3}$  (bv. 230/400 V). Dit betekent dat er maximum  $U$  (de kleinste spanning) over de wikkeling mag staan. Concreet kan men de motor in driehoek schakelen op een netspanning van  $U$  of in ster op een spanning van  $U\sqrt{3}$ . Indien men deze motor wil starten met behulp van een ster-driehoek aanloop, dan moet de netspanning  $U$  zijn, zowel in ster als in driehoek. De driehoekstand is de bedrijfsstand, zodat de nominale fasespanning van de motor gelijk moet zijn aan de lijnspanning van het voedende net.



### 2.15.2.2 Aanloop met een spaartransformator

Door middel van een transformator kan de motorfasespanning tijdens het aanzetten verlaagd worden. Meestal wordt hiervoor dan gebruik gemaakt van een spaartransformator met enkele aftakkingen of een regelbare spaartransformator (rheotor) of een driefasige transformator met regelbare secundaire. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een contactorschakeling waarbij de contacten de motor progressief op een hogere spanningsaftakking zal schakelen tot de nominale spanning over de motor staat.

Ga zelf na dat de netstroom bij aanlopen  $k^2$  kleiner is dan bij directe aanloop. Daar het aanloopkoppel kwadratisch verminderd met de motorspanning, verminderd het koppel eveneens met een factor  $k^2$  ten opzichte van het startkoppel bij directe aanloop.

### 2.15.2.3 Aanloop met statoraanzetweerstanden (of smoorspoelen)

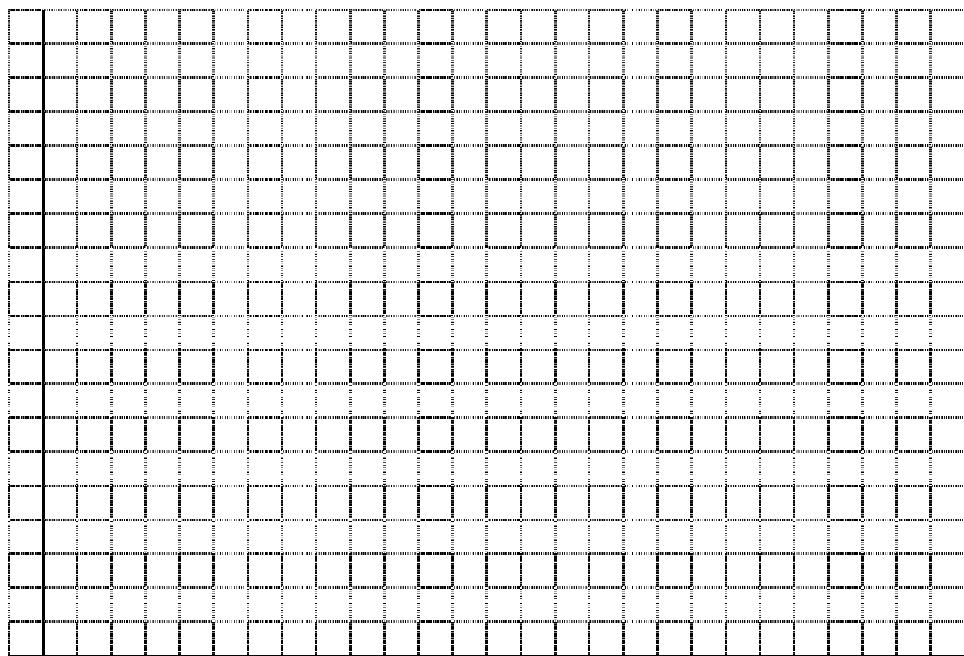
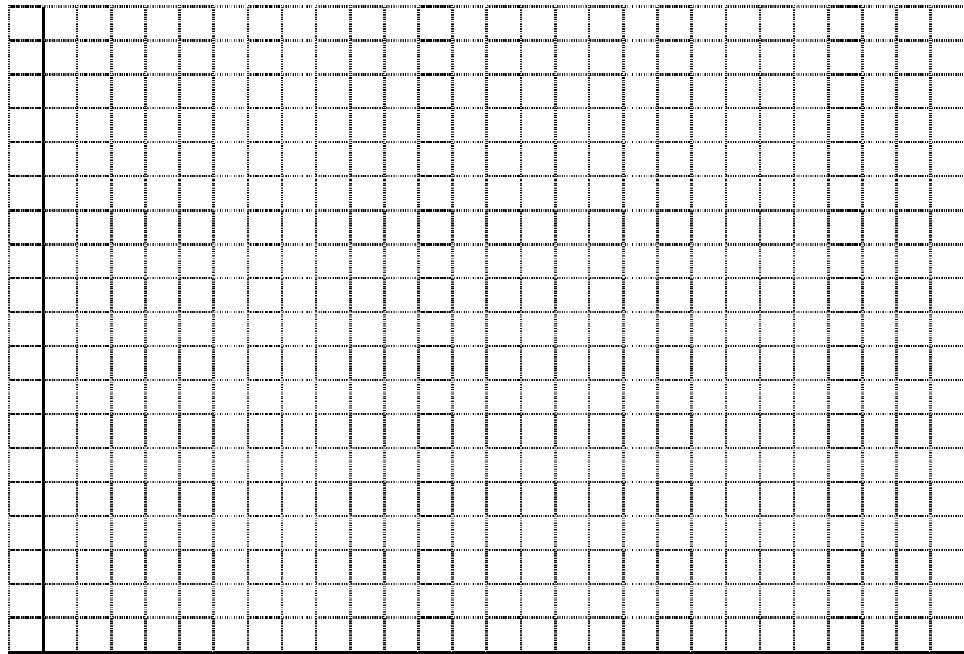
In elke lijn wordt een impedantie - in serie met de statorwikkeling - geplaatst die tijdens het aanlopen geleidelijk wordt uitgeschakeld. Hierdoor krijgt de motor een verlaagde spanning aangeboden. De aanloopstroom wordt kleiner, maar ook het aanloopkoppel verminderd sterk. Naarmate het toerental van de motor toeneemt, wordt trapsgewijs een groter gedeelte van de impedantie kortgesloten. Deze manier van aanzetten is vanwege het geringe aanzetkoppel alleen bruikbaar voor onbelaste aanloop. Als impedantie kunnen aanzetweerstanden of aanzetsmoorspoelen opgenomen worden. Bij een aanzetsmoorspoel treedt er uiteraard minder joule-effect op. De kostprijs is dan echter beduidend hoger.

### 2.15.3 Aanloop met supplementaire rotorweerstanden

De startstroom van een inductiemotor met bewikkeld rotor (sleepringenmotor) kan beperkt worden door in de rotorketen een bijkomende rotorweerstand te plaatsen. Het bijplaatsen van smoorspoelen is theoretisch ook mogelijk doch veroorzaakt een bijkomende faseverschuiving tussen de rotorstroom en de rotorspanning. Het motorkoppel zou hierdoor

verminderen. Weerstanden daarentegen verminderen de faseverschuiving zodat het koppel niettegenstaande de vermindering van de rotorstroom constant kan blijven of zelfs kan vergroten. Wel worden smoorspoelen gebruikt in combinatie met weerstanden. Ze worden dan parallel over elke weerstand geplaatst. Bij het begin van de aanloop is de rotorfrequentie hoog, en dus ook de reactantie van de spoel. Naarmate het toerental van de motor toeneemt, daalt de frequentie en daarmee ook de reactantie van de spoel. De afnemende reactantie sluit dus de weerstand meer en meer kort. Aan het einde van de aanloopperiode worden de rotoraanzetspoelen volledig kortgesloten. De spoelen doen dus dienst voor het automatisch en continue verminderen van de rotoraanloopweerstand.

Uit een vorige paragraaf blijkt dat het kipkoppel onafhankelijk is van de rotorweerstand, maar dat de kipslip wel afhankelijk is van de rotorweerstand. Door het bijplaatsen van een bijkomende rotorweerstand kan men er dus voor zorgen dat de kipslip groter worden, tot zelfs de kipslip bij 1 valt; het startkoppel zal dan tevens maximaal worden. De koppel-toerental karakteristiek en de stroomkarakteristiek voor verschillende rotorweerstanden zijn weergegeven in bovenstaande figuur. Het verloop van de koppel-toerentalkarakteristieken wordt hierop tevens aangeduid indien de rotorweerstand in verschillende stappen wordt uitgeschakeld. Beschouwt men een constante belastingskarakteristiek dan kan er zelfs aangelopen worden met een nagenoeg constant koppeloverschot.

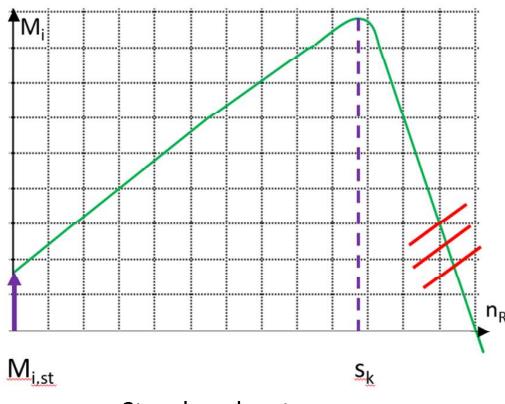


## 2.16 Dubbelkooirotor en stroomverdringingsrotor

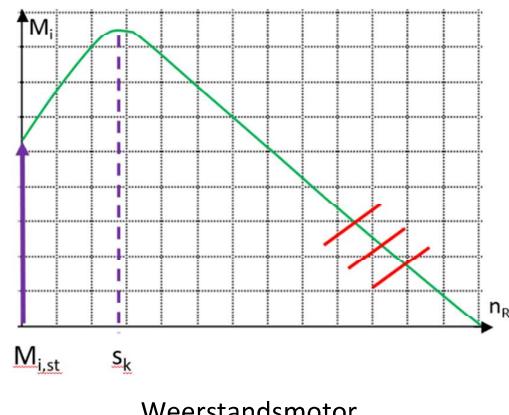
Kooirotoren zijn in vergelijking met bewikkeld rotoren eenvoudig van constructie, goedkoop en zeer stevig. Ze vergen nagenoeg geen onderhoud. Tevens bezitten ze het voordeel dat ze zich automatisch aanpassen aan het aantal polen van de gewikkeld stator.

De eigenschappen van de kooirotormotor worden bepaald door de bouw van de kooi, meer specifiek door de vorm van de gebruikte staven, de elektrische grootheden nl. de rotorweerstand en de rotorreactantie bij stilstand. Bezit de kooi immers een kleine weerstand dan heeft dit tot gevolg dat de kipslip klein is. Een dergelijke motor bezit dan een vrij steile koppel-toerentalkarakteristiek voor kleine slipwaarden en wordt gekenmerkt door het feit dat het toerental weinig varieert bij variërende belasting. Deze motoren worden *standaardmotoren* genoemd. Nadelig is dat zijn aanloopstroom groot is en zijn aanzetkoppel klein. Daarom wordt dit rototype alleen toegepast voor kleine motorvermogens en wanneer geen zware aanloop vereist is.

Is de rotorweerstand daarentegen groot, dan is de kipslip groot. De motor wordt gekenmerkt door een sterke toerentaldaling bij stijgende belasting. We spreken van een *weerstandsmotor*. Ze bezitten een groot aanloopkoppel en zijn uiterst geschikt voor toerentalvariatie met spanningsregeling. De kooistaven zijn vervaardigd van een materiaal waarvan de soortelijke weerstand groter is dan die van koper. Bij nominaal bedrijf zijn de koperverliezen relatief groter vergeleken met de normale kooirotor, zodat het rendement kleiner is en de warmteontwikkeling in de rotor groter is. Onderstaande figuur stelt beide koppel-toerental karakteristieken voor.



Standaardmotor

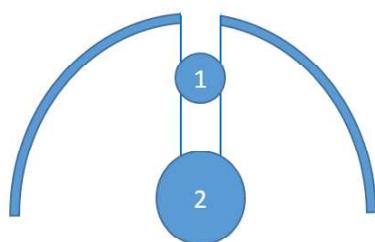


Weerstandsmotor

Het grote nadeel van de standaardinductiemotor met enkele kooirotor is dat het aanloopkoppel klein is en de aanloopstroom (6 maal de nominale stroom) groot is. Methoden om de aanloopstroom te beperken, hadden als nefast gevolg dat het aanloopkoppel nog kleiner werd of dat het toerental variabel was bij belasting. Daarom moet er een oplossing gezocht worden om het natuurlijke aanloopkoppel van de inductiemotor te verhogen door de waarde de rotorweerstand bij stilstand groter te maken zonder de waarde in de nominale bedrijfstoestand te beïnvloeden. Dit kan gebeuren door de rotorweerstand frequentie afhankelijk te maken. We maken gebruik van het *stroomverdringingseffect*. Hiervoor kunnen in praktijk twee constructies aangewend worden : de *dubbele kooirotor* of de *kooirotor met hoogstaven*.

### 2.16.1 Dubbelkooirotor

Een dubbelkooirotor bezit twee concentrische kooien, waarvan de staven door kortsluitringen met elkaar verbonden zijn. De ene kooi heeft staven met een kleine diameter en liggen dicht bij de luchtspleet. De weerstand van deze kooi is groot terwijl de inductantie klein is. De andere kooi bezit staven met een grotere diameter en liggen dieper in het blikpakket. Dit resulteert in een kleinere ohmse weerstand doch een grotere inductantie. Een en ander is voorgesteld in onderstaande figuur waarbij kooi 1 de buitenste kooi is, of de *bovenkooi* ook nog *startkooi* genoemd. De binnenste kooi (kooi 2) is de *onderkooi* of *bedrijfskooi*. Men neemt aan dat de stroomverdeling in beide kooien homogeen is.



- 1 : Buitenste kooi, bovenkooi of startkooi
- 2 : Binnenste kooi, onderkooi of bedrijfskooi

Bij het aanlopen ontstaat in de beide kooien van de stilstaande rotor een maximale rotoremk met een maximale frequentie gelijk aan de frequentie van het draaiveld. Beide grootheden

hebben hun invloed op de grootte van de resp. reactantie en op de grootte van de rotorstroom. Inspelend op dit én op het verschil in ohmse weerstand en inductantie van beide kooien, komen we tot volgende vaststelling :

- Bij aanzetten is de rotorstroom in de binnenkooi klein, de faseverschuiving tussen de rotoremk en de rotorstroom is groot. Het aanzetkoppel van de binnenkooi is klein.
- Bij aanzetten is de rotorstroom in de buitenkooi aanzienlijk groter dan deze in de binnenkooi. De stroom is weinig naaijend op de rotoremk. Het aanzetkoppel van de buitenkooi is vrij groot.

Bij de dubbelkooirotor wordt het aanzetkoppel bijgevolg hoofdzakelijk geleverd door de buitenkooi. Dit is de reden waarom die kooi ook *aanzetkooi* genoemd wordt.

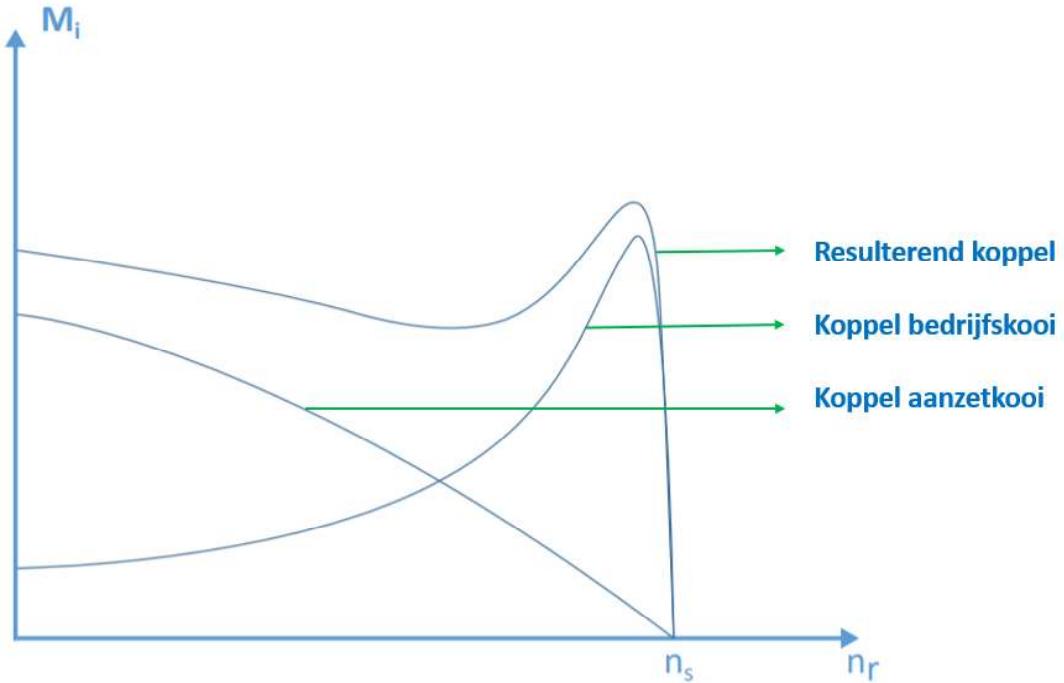
Naarmate het rotortoerental toeneemt, zullen de geïnduceerde rotoremk en ook de rotorfrequentie evenredig afnemen. De impedantie van de buitenkooi zal nagenoeg constant blijven zodat met de afname van de opgewekte rotoremk, bij toenemende rotorfrequentie, de stroom in de buitenkooi evenredig verminderd. In de buitenkooi wordt de stroom en het bedrijfskoppel dan klein.

In de binnenkooi daarentegen heeft de frequentieafname tot gevolg dat de impedantie aanzienlijk daalt. De stroom in de binnenkooi is groot en weinig naaijend op de rotoremk. Het bedrijfskoppel van de binnenkooi is daardoor groot. Bij een dubbelkooirotor wordt het bedrijfskoppel nagenoeg volledig geleverd door de binnenkooi. Daarom wordt ze ook de *bedrijfskooi* genoemd. De weerstand van de bedrijfskooi is kleiner zodat er een geringere toerentalvariatie optreedt bij belasting. Het rendement bij belasting blijft goed.

Er wordt besloten dat deze motor dezelfde voordelen biedt als een kooirotomotor met slechts één kooi. Bovendien heeft deze motor een beter aanloopkoppel en een merkelijk kleinere aanloopstroom.

In onderstaande figuur zijn de koppel-toerentalkarakteristieken van iedere kooi afzonderlijk voorgesteld alsook de resulterende karakteristiek van de dubbelkooirotomotor. Hieruit blijkt een verschijnsel dat de koppelvorming in een dubbelkooi karakteriseert : bij stijgend toerental daalt het koppel tot een minimale waarde, namelijk het zadelpunt om dan terug toe te nemen tot het kipkoppel. Vandaar ook de naam ‘zadelkarakteristiek’. De koppeldaling is sterker

naarmate het motorvermogen toeneemt. De motor kan op een laag toerental blijven hangen als het tegenwerkend koppel te hoog zou worden.



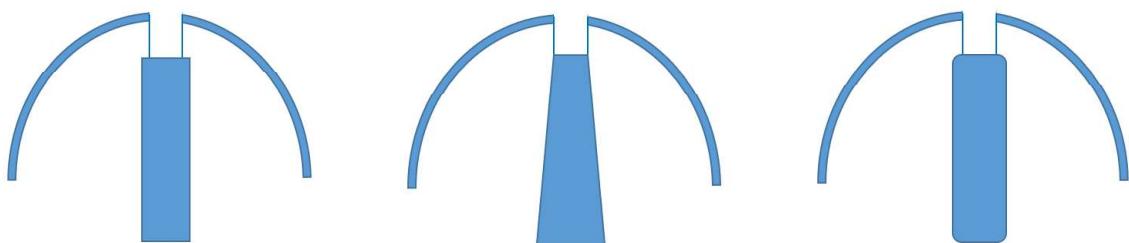
### 2.16.2 Stroomverdringingsrotoren

Om een te diep zadelpunt bij inductiemotoren met dubbelkooi te vermijden, wordt voor motoren met een groter vermogen overgegaan naar een stroomverdringingsrotor. Een continue stroomdichtheidsverandering over de kooidoorsnede is hierbij het voornaamste doel. Deze motoren zijn enkelkooirotoren waarbij in de kern van de rotor gleuven voorzien zijn met een grote hoogte/breedte-verhouding. Ze kunnen beschouwd worden als een oneindig aantal kooien boven elkaar.

Bij het starten hebben de dieper gelegen delen een grotere reactantie, waardoor de stroom naar boven toe verdrongen wordt. De stroomdichtheid in de rotorstaven is dan groter aan de gleufopening dan binnenin de gleuf. Daar alleen het bovenste gedeelte van de staven gebruikt wordt, verkleint de nuttige geleider doorsnede zodat de ohmse weerstand groter wordt. Het startkoppel stijgt en de aanloopstroom daalt. Deze motoren kunnen dus belast aanlopen. De

koppelverhoging kan nog meer uitgesproken worden als de doorsnede van de gleuf bovenaan kleiner gemaakt wordt dan onderaan.

De verdeling van de stroomdichtheid is afhankelijk van de rotorfrequentie. Bij nominale snelheid loopt de stroom meer in het binnenste gedeelte van de staven en werkt de motor als een enkelkooirotor.



## 2.17 Oefeningen

---

### 2.17.1 Oefening 1

**Gegeven :** Een asynchrone motor werd zespolig uitgevoerd en draait aan 970 tpm. De netfrequentie is 50 Hz.

#### Gevraagd

1. De absolute slip ( $s_a = 30 \text{ tpm}$ )

2. De relatieve slip ( $s = 0.03$ )

3. De frequentie van de rotorstroom ( $f_r = 1.5 \text{ Hz}$ )

### **2.17.2 Oefening 2**

**Gegeven :** Een vierpolige asynchrone motor met een slip van 4 % is aangesloten op een net met frequentie 50 Hz.

**Gevraagd :**

- 1.** Het rotortoerental ( $n_r = 1440 \text{ tpm}$ )

### **2.17.3 Oefening 3**

**Gegeven :** Een achtpolige asynchrone motor is aangesloten op een net met frequentie 50 Hz. De rotorfrequentie bedraagt 1 Hz.

**Gevraagd :**

- 1.** De procentuele slip ( $s = 2 \%$ )

- 2.** Het rotortoerental ( $n_r = 735 \text{ tpm}$ )

#### 2.17.4 Oefening 4

**Gegeven :** Een asynchrone motor met een vermogen van 2,2 kW is aangesloten op een 400 V – 50 Hz net in ster op 400 V. De motor is zespolig uitgevoerd en heeft een nominale slip van 5 %. De arbeidsfactor  $\cos \varphi_1$  is 0,75 en het rendement bedraagt 0,81.

**Gevraagd :**

1. Het rotortoerental bij vollast ( $n_r = 950 \text{ tpm}$ )

2. De opgenomen stroom ( $I_L = 5,23 \text{ A}$ )

3. Het koppel op de as bij vollast ( $M_{as} = 22,11 \text{ Nm}$ )

### 2.17.5 Oefening 5

**Gegeven :** Een asynchrone motor is tweepolig en heeft een nominale slip van 6 %. De motor neemt een vermogen op van 1,41 kW, het rendement bedraagt 0,78 en de arbeidsfactor van de stator is 0,86. De motor is aangesloten in ster op 400/230 V – 50 Hz. De aanzetstroom bedraagt zesmaal de nominale stroom en het aanzetkoppel 2,2 maal het nominale koppel.

**Gevraagd :**

1. De aanzetstroom ( $I_{1,ST} = 14,20 \text{ A}$ )

2. Het aanzetkoppel ( $M_{i,st} = 8,20 \text{ Nm}$ )

### 2.17.6 Oefening 6

**Gegeven :** Bij een sleepingsmotor meet men bij stilstand en bij een stator die aangesloten is op het net, een spanning van 100 V tussen de twee sleepingen. De rotorwikkelingen staan in ster. De rotorfaseweerstand bedraagt 0,2 ohm, de rotorreactantie bij stilstand 1 ohm. De nominale slip bedraagt 4 %.

**Gevraagd :**

1. De rotorstroom op het ogenblik van aanzetten en bij kortgesloten rotor ( $I_{2,ST} = 56,6 \text{ A}$ )

2. De rotorstroom bij nominaal bedrijf en bij kortgesloten rotor ( $I_{2,n} = 11,3 \text{ A}$ )

3. Hoe kan de grootte van beide stromen verklaard worden en in verband gebracht worden met elkaar ?

### 2.17.7 Oefening 7

**Gegeven :** Bij een sleepringenmotor meet men bij stilstand een spanning van 500 V tussen de sleepringen. De netfrequentie is 50 Hz. De rotorwikkelingen staan in ster. De rotorfaseweerstand bedraagt 0,2 ohm, de zelfinductiecoëfficiënt van de rotorfase is 0,04 H. De nominale slip bedraagt 5 %. De aanzetweerstand per fase is 9,8 ohm.

**Gevraagd :**

1. De rotorstroom op het ogenblik van aanzetten ( $I_{2,ST} = 17,98 \text{ A}$ )

2. De arbeidsfactor van de rotor op het ogenblik van aanzetten ( $\cos \varphi_{2,ST} = 0,623$ )

3. De rotorstroom bij nominaal bedrijf ( $I_{2,n} = 21,89 \text{ A}$ )

### 2.17.8 Oefening 8

**Gegeven :** Een sleepringenmotor is in ster aangesloten op 400 V – 50 Hz heeft bij vollast een slip van 4 % en neemt dan een stroom op van 50 A bij een arbeidsfactor van de stator gelijk aan 0,86. Bij een statorstroom van 25 A en arbeidsfactor van de stator van 0,8 is de totale vermogen dissipatie in de machine 2400 W. De totale ijzer- en wrijvingsverliezen bedragen 1600 W.

**Gevraagd :**

1. Het afgegeven vermogen bij halve belasting ( $P_n = 11,46 \text{ kW}$ )

2. Het afgegeven vermogen bij vollast ( $P_n = 24,99 \text{ kW}$ )

3. Het rendement bij vollast ( $\eta = 83,89 \%$ )

**2.17.9 Oefening 9**

**Gegeven :** Een achtpolige motor is in ster aangesloten op een 400 V – 50 Hz net. De nominale slip bedraagt 3 %. De statorwikkeling bestaat uit 80 windingen per fase. De rotorwikkelingen staan in ster en hebben 32 windingen per fase. De weerstand van de rotorfase is 0,04 ohm en de reactantie bij stilstand 0,24 ohm per fase. De ijzer- en mechanische verliezen van de rotor bedragen samen 410 W.

**Gevraagd :**

1. De maximale poolflux (12,951 mWb)

2. De rotorspanning bij stilstand (92 V)

3. De rotorspanning bij draaien (2,76 V)

4. De rotorstroom bij stilstand (378,12 A)

**5.** De rotorstroom bij draaien (67,91 A)

**6.** De statorstroom bij stilstand (151,25 A)

**7.** De statorstroom bij draaien (27,16 A)

**8.** Het vollastrendement als de arbeidsfactor van de stator 0,8 bedraagt en de verliezen in de stator 700 W bedragen. (88,95%)

**9.** Het vollastkoppel (175,75 Nm)

**2.17.10 Oefening 10**

**Gegeven :** Een 1100 kW kortsluitmotor drijft met een toerental van 147 tpm een compressor aan. De motor staat in ster op een spanning van 6000 V – 50 Hz. Het rendement bedraagt 0,9 terwijl de arbeidsfactor 0,88 is. De nominale slip is 2 %.

**Gevraagd :**

**1.** Het aantal polen van de asynchrone motor (40)

**2.** De statorstroom bij vollast (133,8 A)

**3.** De koperrotorverliezen als de statorverliezen 4 % bedragen van het toegevoerde vermogen (23,46 kW)

**2.17.11 Oefening 11**

**Gegeven :** Een asynchrone motor van 22 kW, 50 Hz is zespolig uitgevoerd en heeft bij vollast een slip van 4 %. De ijzer- en wrijvingsverliezen bedragen 250 W.

**Gevraagd :**

**1.** De absolute slip (40 tpm)

**2.** De koperrotorverliezen (927 W)

**2.17.12 Oefening 12**

**Gegeven :** Een zespolige motor neemt een vermogen van 10 kW op van een net van 50 Hz. Het koperrotorverlies bedraagt 400 W, het vermogen dissipatie in de stator 100 W. Het rendement is 0,8.

**Gevraagd :**

**1. De slip (4,04 %)**

**2. Het rotortoerental (960 tpm)**

**3. Het koppel op de as (79,6 Nm)**

**2.17.13 Oefening 13**

**Gegeven :** Een asynchrone motor heeft een rotorfaseweerstand van 0,01 ohm en een reactantie bij stilstand per fase van 0,06 ohm.

**Gevraagd :**

1. De aanzetweerstand om bij aanzetten het maximale koppel te bekomen

**2.17.14 Oefening 14**

**Gegeven :** Een asynchrone motor heeft een rotorfaseweerstand van  $R$  ohm en een rotorfasereactantie bij stilstand van  $8R$  ohm.

**Gevraagd :**

1. De aanzetweerstand om bij aanzetten het maximale koppel te bekomen

**2.17.15 Oefening 15**

**Gegeven :** Een sleepringmotor is aangesloten op een 50 Hz net. Bij stilstand meet men tussen de twee sleepringen een spanning van 173 V. De rotor staat in ster. De rotorfaseweerstand is 0.3 ohm en de rotorreactantie bij stilstand 1,25 ohm.

**Gevraagd :**

1. De rotorstroom bij een nominale slip van 4 % (13,14 A)

2. De weerstand die in elke rotorfase moet opgenomen worden om bij stilstand de nominale rotorstroom te bekomen (7,2 ohm)

**2.17.16 Oefening 16**

**Gegeven :** Een vierpolige motor heeft een rotorfaseweerstand van 0,1 ohm en bij stilstand een rotorfasereactantie van 0,5 ohm. De motor is aangesloten op een 50 Hz net. Bij een stilstaande rotor meet men 173 V tussen de sleeppringen.

**Gevraagd :**

1. De rotorstroom bij 1455 tpm (29,6 A)

2. De weerstand die in elke rotorfase moet opgenomen worden om bij dezelfde stroom als in het eerste geval het toerental op 900 tpm terug te brengen. (1,23 ohm)

## 2.18 Zelfevaluatie

---

**Doelstelling :**

- I. De fysische opbouw van de asynchrone machines, het draaiveld, de conventie motor/generator kunnen toepassen.

Verklaar, bespreek, weerleg, bewijs, enz. steeds nauwkeurig en volledig onderstaande vragen of beweringen.

1. Hoe is de asynchrone machine opgebouwd ? Geef de twee verschillende types ? Hoe kan je deze motor herkennen ? Geef een andere naam voor de asynchrone motor ?

2. Vul in :

		Generatorwerking	Motorwerking
Toerental n neg	M		
	$\cos \varphi_1$		
Toerental n pos	M		
	$\cos \varphi_1$		

**3.** Geef de formule voor het toegevoegd vermogen en het nuttig vermogen bij een asynchrone generator. Stel schematisch voor en duid de energiestromen aan.

**4.** Wat is een draaiveld ?

**5.** Aan welke voorwaarde(n) moet voldaan zijn om binnenin de stator van een asynchrone machine, een draaiveld te bekomen ? Leg uit.

6. Toon het ontstaan aan van een

6.1. tweepolig veld aan a.d.h.v. één ( $\omega t_3 = 180^\circ$ ) of meerdere figuren ( $\omega t_3 = 180^\circ$  en  $\omega t_4 = 270^\circ$  ).

6.2. vierpolig veld aan a.d.h.v. één ( $t = t_3$ ) of meerdere figuren ( $t = t_3$  en  $t = t_4$  ).

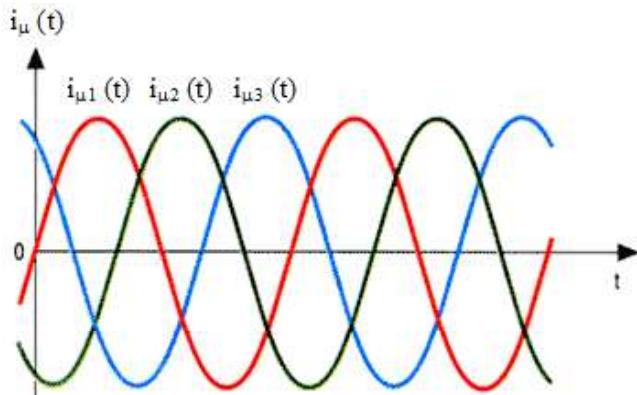
6.3. tweepolig draaiveld aan a.d.h.v. één ( $\omega t_3 = 180^\circ$ ) of meerdere figuren ( $\omega t_3 = 180^\circ$  en  $\omega t_4 = 270^\circ$  ), wijzerzin.

6.4. vierpolig draaiveld aan a.d.h.v. één ( $t = t_3$ ) of meerdere figuren ( $t = t_3$  en  $t = t_4$  ), wijzerzin.

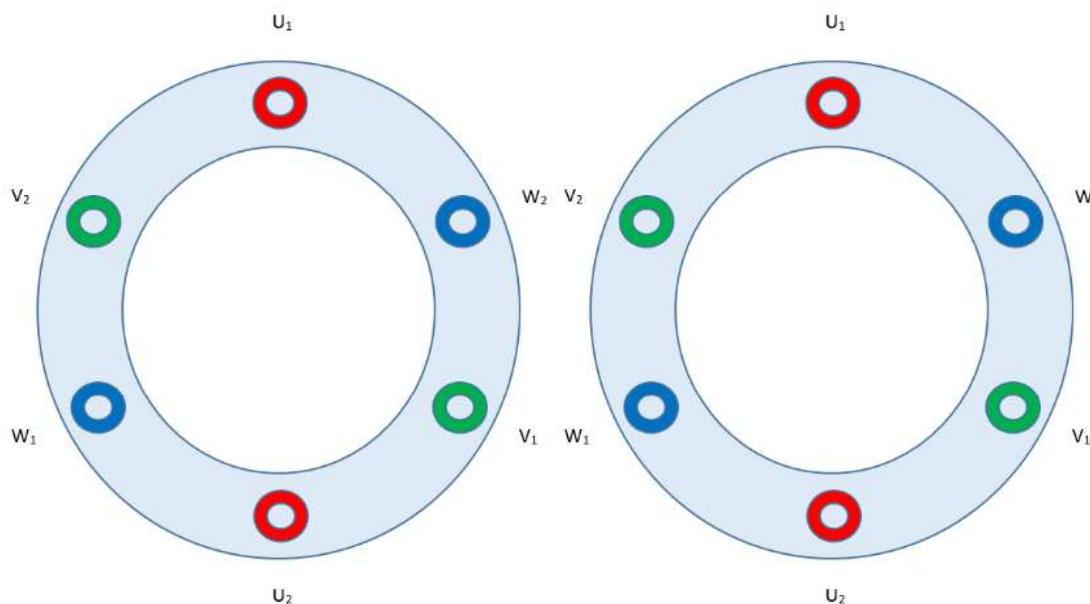
6.5. tweepolig draaiveld aan a.d.h.v. één ( $\omega t_3 = 180^\circ$ ) of meerdere figuren ( $\omega t_3 = 180^\circ$  en  $\omega t_4 = 270^\circ$  ), tegenwijzerzin.

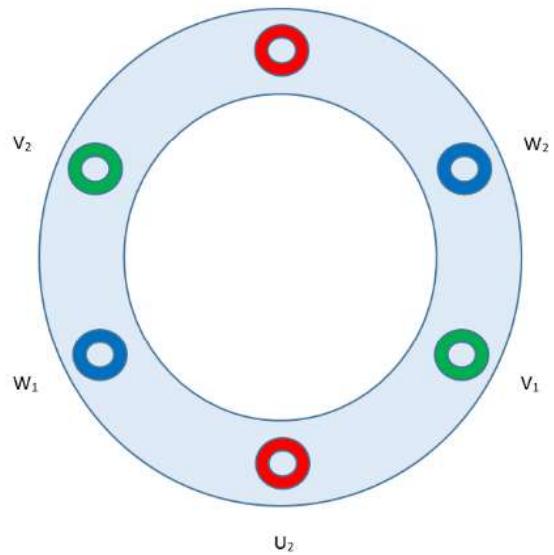
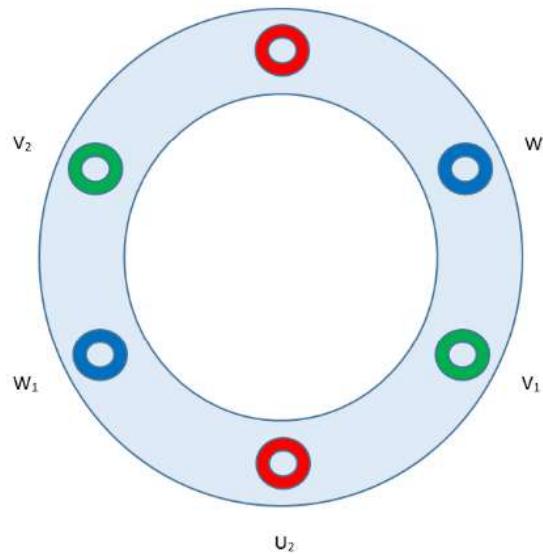
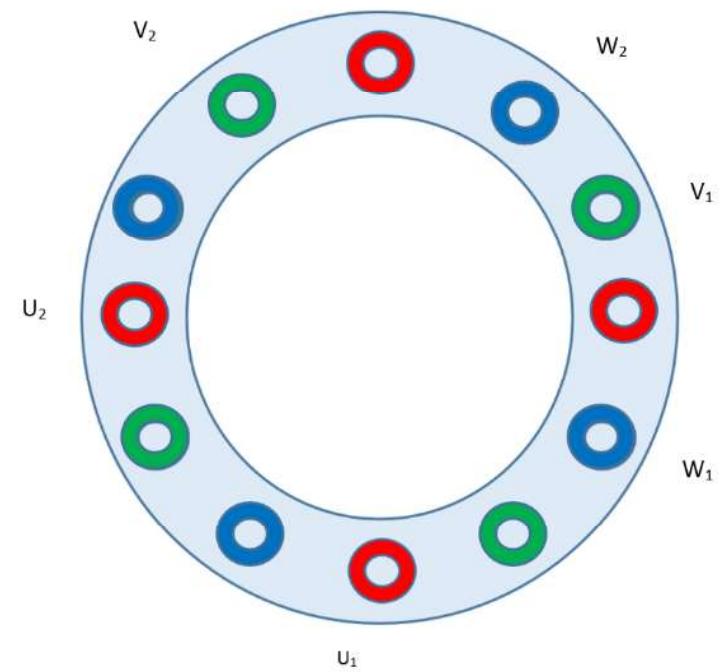
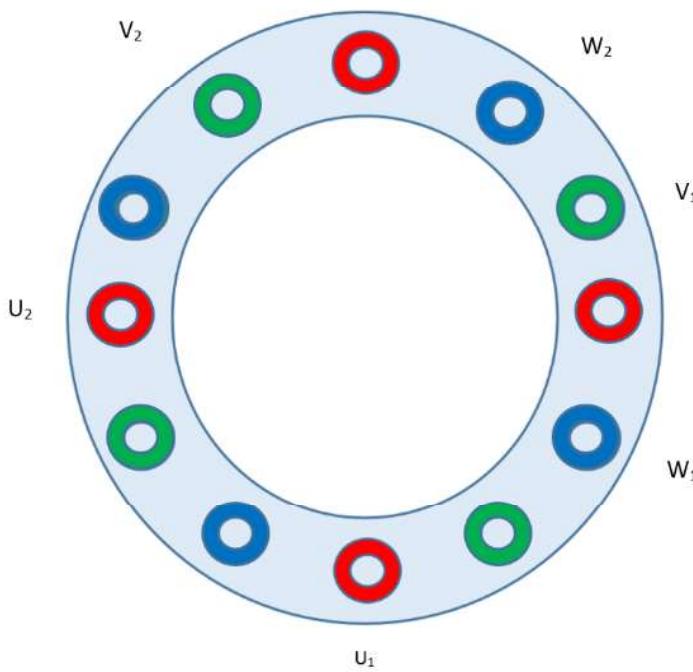
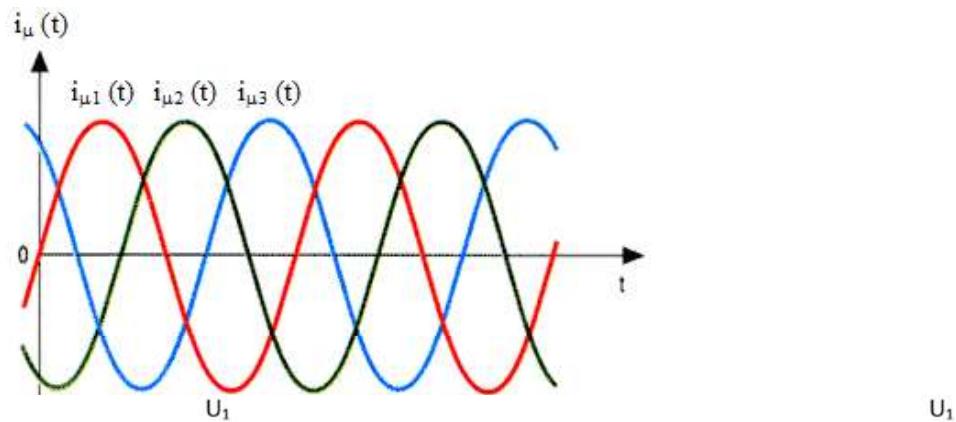
Kies voor een correct aantal tijdstippen ! Voorzie de figuren van de nodige uitleg.

Teken de grootheden in diverse kleuren, noteer ze in de tabel naast de resp. grootheid.



grootheid	kleur





7. Bepaal wiskundig de grootte van het tweepolig draaiveld op  $t = t_3$  en op  $t = t_4$ . Geef hiervan de afleiding met bijhorend vectordiagramma.

**Doelstelling :**

- II. **De werking van de ideale asynchrone motor en de ideale asynchrone generator kunnen uitleggen.**  
**Verklaar, bespreek, weerleg, bewijs, enz. steeds nauwkeurig en volledig onderstaande vragen of beweringen.**

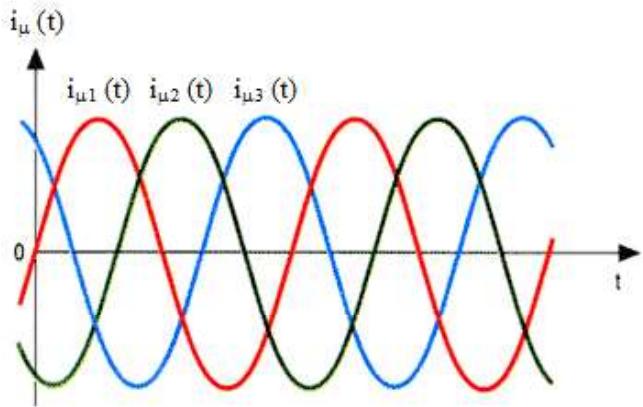
8. Kan een asynchrone motor op het synchroon toerental draaien ?
9. Beschouw de ideale asynchrone motor. Teken het vectordiagramma. In welke mate verschilt dit vectordiagramma van dit van de ideale transformator ?

10. Toon de werking aan van de asynchrone motor voor

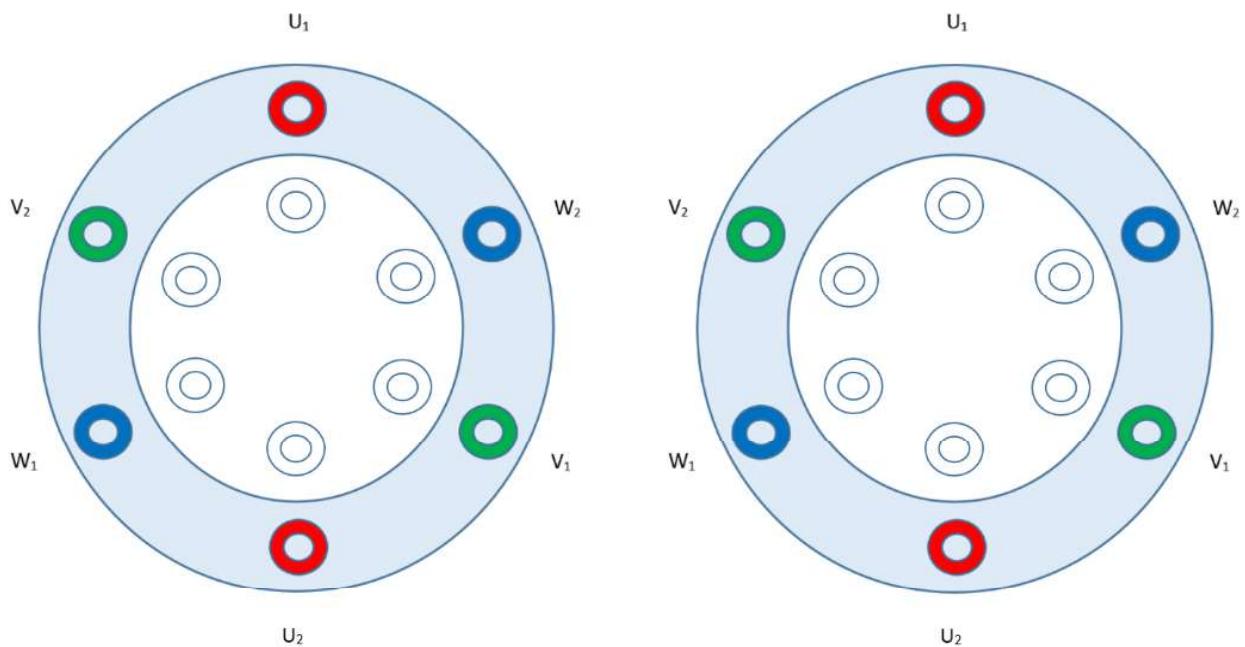
- 10.1. een tweepolig veld aan op  $\omega t_3 = 180^\circ$  met de draaizin in wijzerzin
- 10.2. een tweepolig veld aan op  $\omega t_4 = 270^\circ$  met de draaizin in wijzerzin

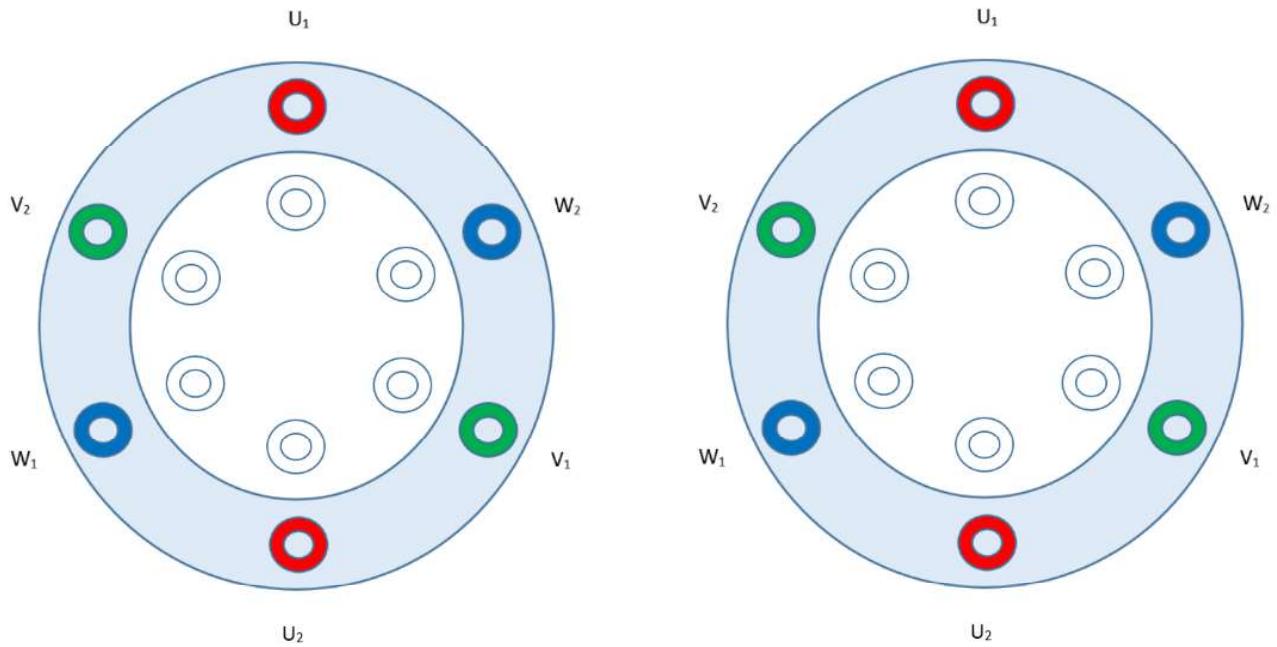
- 10.3. een tweepolig veld aan op  $\omega t_3 = 180^\circ$  met de draaizin in tegenwijzerzin
- 10.4. een tweepolig veld aan op  $\omega t_4 = 270^\circ$  met de draaizin in tegenwijzerzin

Voorzie de figuren van de nodige uitleg. Teken de verschillende grootheden ( $I_\mu$ ,  $\phi$ ,  $n_s$ ,  $n_r$ ,  $v$ ,  $I_2$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_1$ ,  $I'_1$ ,  $F$ ,  $M$ ) in verschillende kleuren en noteer de kleur in de tabel naast de resp. grootheid.



grootheid	kleur



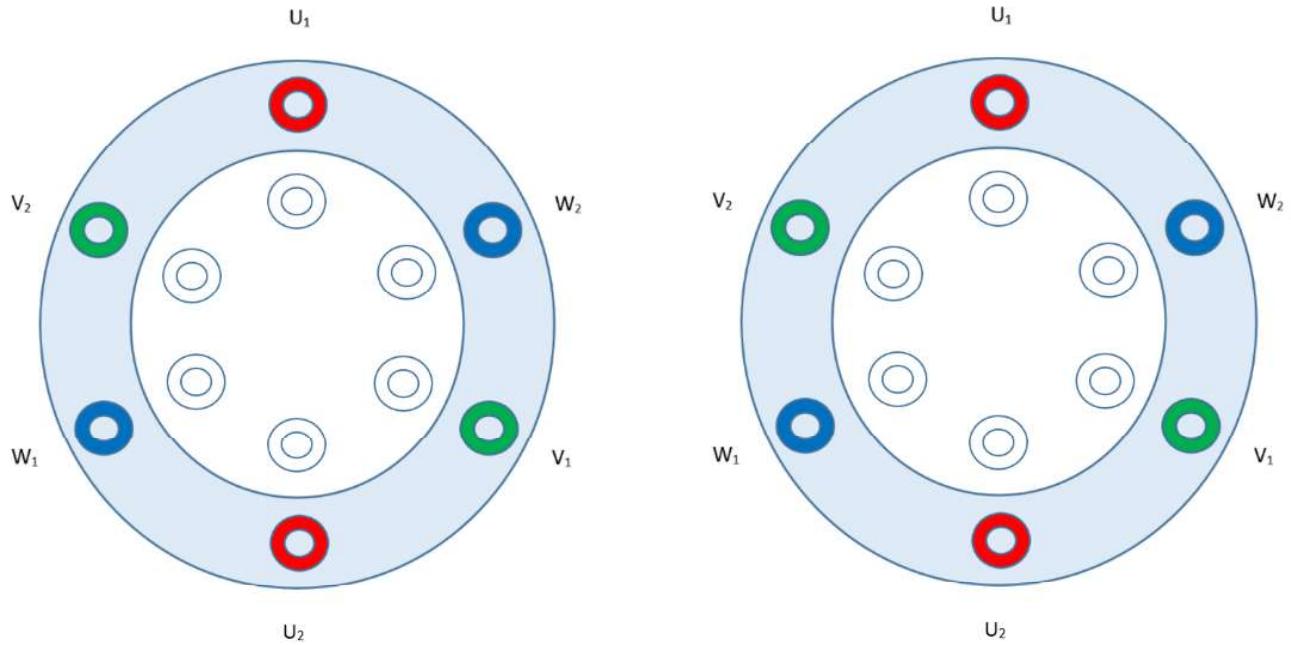


**11.** Toon de werking aan van de asynchrone generator voor

11.1. een tweepolig veld aan op  $\omega t_3 = 180^\circ$  met de draaizin in wijzerzin

11.2. een tweepolig veld aan op  $\omega t_4 = 270^\circ$  met de draaizin in wijzerzin

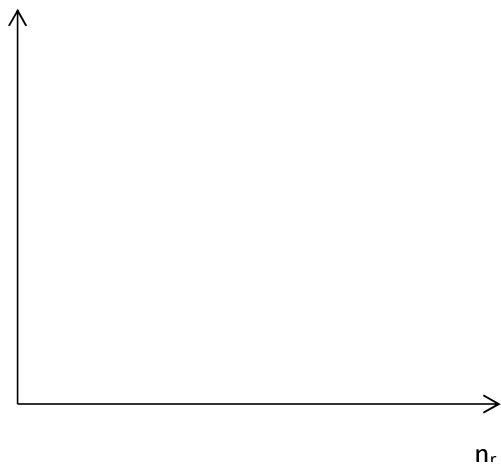
Voorzie de figuren van de nodige uitleg. Teken de verschillende grootheden ( $I_\mu$ ,  $\phi$ ,  $n_s$ ,  $n_r$ ,  $v$ ,  $I_2$ ,  $\phi_2$ ,  $I'_1$ ,  $F$ ,  $M$ ) in verschillende kleuren en noteer de kleur in de tabel naast de resp. grootheid.



- 12.** Teken het vectordiagramma van de ideale generator aan de hand van de besluiten uit de vierde vraag. In welke mate verschilt dit vectordiagramma van dit van de ideale motor ?

**Doelstelling :**

- III. **Inzicht hebben in de frequentieafhankelijke grootheden**  
**Verklaar, bespreek, weerleg, bewijs, enz. steeds nauwkeurig en volledig onderstaande vragen of beweringen.**
- 13.** Som de frequentieafhankelijke grootheden op bij de asynchrone motor. Geef aan hoe ze wijzigen in functie van de frequentie (formule). Geef voor elk van deze grootheden een fysische duiding voor hun wijziging i.f.v. de frequentie.
- 14.** Een asynchrone motor wordt nominaal belast. Teken de motorkarakteristiek. Duid het tegenwerkend koppel aan. Wat gebeurt er met onderstaande grootheden indien de belasting toeneemt (resp. afneemt)? Leg uit en geef een nauwkeurige verklaring, gebruikmakend van de passende formules. Geef tevens een fysische duiding. Duid – indien mogelijk – ook aan op de daarvoor voorziene grafiek.  
het inwendig koppel



het rotortoerental

de slip

de rotorfrequentie

de rotoremk

de rotorstroom  $I_2$

**Doelstelling :**

- IV. Inzicht hebben in de werking van de niet-ideale asynchrone motor bij nullast, starten en nominale werking.**

**Verklaar, bespreek, weerleg, bewijs, enz. steeds nauwkeurig en volledig onderstaande vragen of beweringen.**

- 15.** Vergelijk de arbeidsfactor van de rotor bij aanzetten van de niet ideale asynchrone motor met deze bij nominaal draaien. Bewijs dit aan de hand van vectordiagramma's en voorzie dit van de nodige verklaringen, uitleg, formules, equivalente schema's.

*Aanzetten-starten - Equivalent schema*

Vectordiagramma

Uitleg + verklaring

*Nominaal draaien /bedrijf - Equivalent schema*

Vectordiagramma

Uitleg + verklaring

**16.** Verklaar de fysische betekenis van de weerstanden  $R_2$ ,  $R_2/s$  en  $R_2(1-s)/s$

**17.** De nominaal draaiende asynchrone motor (niet ideaal) :

Geef het equivalent schema

Welke actieve vermogens treden er op in de draaiende asynchrone motor en in welke onderdelen van de machine treden deze vermogens op ? Som ze één na één op. Bespreek ze uitgebreid en leg uit wat hun fysische betekenis is uitgaande van het equivalent schema van de nominaal draaiende asynchrone motor en geef de formule van dit vermogen. Kan je de formules vlot omzetten ? Noteer tevens de formules van de resp. koppels.

**Doelstelling :**

- V. **Inzicht hebben in de koppel-toerentalkarakteristiek van de asynchrone motor.**

**Verklaar, bespreek, weerleg, bewijs, enz. steeds nauwkeurig en volledig onderstaande vragen of beweringen.**

**18.** Van welke parameters is het inwendig koppel van de asynchrone motor afhankelijk ?

**19.** Teken een realistische koppel-toerentalkarakteristiek samen met lineaire (resp. kwadratische, resp. constante) belastingskarakteristiek.

Duid hierop volgende punten/gebieden aan : het nullastkoppel  $M_{i,0}$  - het nominaal koppel  $M_{i,n}$  - het startkoppel  $M_{i,st}$  - het kipkoppel  $M_{i,k}$  - het nullasttoerental  $n_{r,0}$  - de kipslip  $s_k$  - het synchroon toerental  $n_s$  - de maximale slip bij motorwerking - werkingsgebied van de motor- onstabiele gebied van de motor - gebied van generatorwerking - het aanloopkoppel.

Duid op diezelfde grafiek voor een welbepaald gekozen toerental het tegenwerkend koppel - het koppeloverschot - het inwendig koppel aan.



**20. Betreffende de kipslip en het kippoppel**

19.1. Van welke parameters is de kipslip, resp. het kippoppel afhankelijk, i.f.v. het type motor.

19.2. Op welke wijze hebben deze parameters invloed op de koppel-toerentalkarakteristiek.

**21. Betreffende  $M_J$  :**

20.1. Leg de betekenis uit van het  $M_J$  koppel.

20.2. Kan  $M_J$  positief zijn ? Zo ja, situeer het gevolg voor de motorwerking.

20.3. Kan  $M_J$  nul zijn ? Zo ja, situeer het gevolg voor de motorwerking.

20.4. Kan  $M_J$  negatief zijn ? Zo ja, situeer het gevolg hiervan voor de motorwerking.

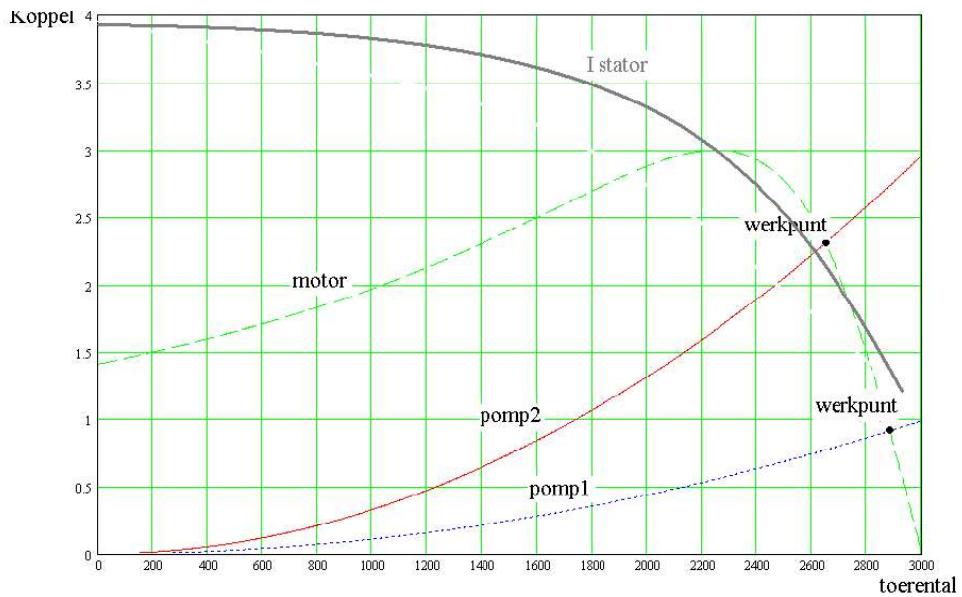
**22. Wat wordt er verstaan onder de statische werking van de motor ?**

Wat wordt er verstaan onder de dynamische werking van de motor ?

Zijn aan beide modi voorwaarden gekoppeld ?

**23. Gegeven :**

- onderstaande koppel-toerentalkarakteristiek,
- statorstroom-toerentalkarakteristiek van de motor
- twee belastingskarakteristieken van pomp 1, resp. pomp 2
- nominale stroom van de motor  $I_n = 1,75 \text{ A}$
- Bespreek het statisch en dynamisch gedrag van de motor, onderhevig aan elk van die belastingen.



## Deel 2

### Hoofdstuk 2 : Asynchrone machine - Motor - Generator

#### Belaste niet-ideale ASM

Notatie	Benaming	Fysische betekenis	Formule - Verband - indien van toepassing
$u_1(t)$			
$U_{1,m}$			
$I_0$			
$I_1$			
$I'_1$			
$I_2$			
$I_\mu$			
$I_v$			

$P_{cu,S}$							
$P_{Fe,S}$							
$P_{cu,R}$							
$P_{Fe,R}$							
$P_v$							
$P_1$							
$P_L$							
$P_i$							
$P_2$							



$E_1$											
$U_1$											
$E_2$											
$U_2$											
$E_{2,ST}$											
$f_s$											
$f_R$											
$n_s$											
$n_R$											
$s_a$											
$s$											
$\omega_s$											
$\omega_R$											

$R_1$											
$X_1$											
$R_V$											
$X_\mu$											
$R_2$											
$R_2/s$											
	$R_2(1-s)/s$										
		$X_2$									
			$X_{2,ST}$								
				$\varphi_1$							
					$\varphi_2$						
						$\varphi_{2,ST}$					

*Beste student*

*De cursus die voor u ligt, is het derde onderdeel van de cursus elektrische machines. Deze cursus is een werkdocument. De cursus instuderen zoals hij bij de aanvang van het academiejaar door u ontvangen is, volstaat niet. Een aantal figuren, grafieken, equivalenten ketens, enz. zullen gedurende de les stapsgewijs en met verschillende kleuren aangebracht en opgebouwd worden. Aan u om actief deel te nemen in de les, en het werkdocument tot een levende cursus te maken.*

*Deze cursus vormt het sluitstuk van de cursus elektrische machines en bevat een bespreking van de meest voorkomende gelijkstroommachines, dynamo's en motoren. Veel inzichten, kennis, basisbegrippen en grootheden, enz. zullen nu terug toegepast worden maar verder uitgebreid worden. De oefeningen hebben tot doel de geziene theorie toe te passen. Het zijn invulbladen. De oefeningen kunnen thuis grondig voorbereid worden. De oefeningen die niet aanbod komen in de les, kunnen ter verbetering afgegeven worden en/of voorafgaand aan de les even overlopen worden en/of in het monitoraat besproken worden.*

*In deze cursus werden geen zelfevaluatie vragen meer toegevoegd. Er moet immers gestreefd worden naar het zelfstandig instuderen en verwerken van deze cursus. Denk nu zelf na over mogelijke examenvragen, stel ze zelf op, en los ze op na het studeren van dit document. Wees nadien kritisch en controleer nauwgezet uw oplossing op correctheid a.d.h.v. cursus. Los alle oefeningen op het einde van het studeren in een willekeurige volgorde op.*

*Veel succes !*

*Mevr. L. Butaye*

*[liesbet.butaye@odisee.be](mailto:liesbet.butaye@odisee.be)*

---

**Hoofdstuk 3 GELIJKSTROOMMACHINES**

---

---

**3.1 Inleiding**

---

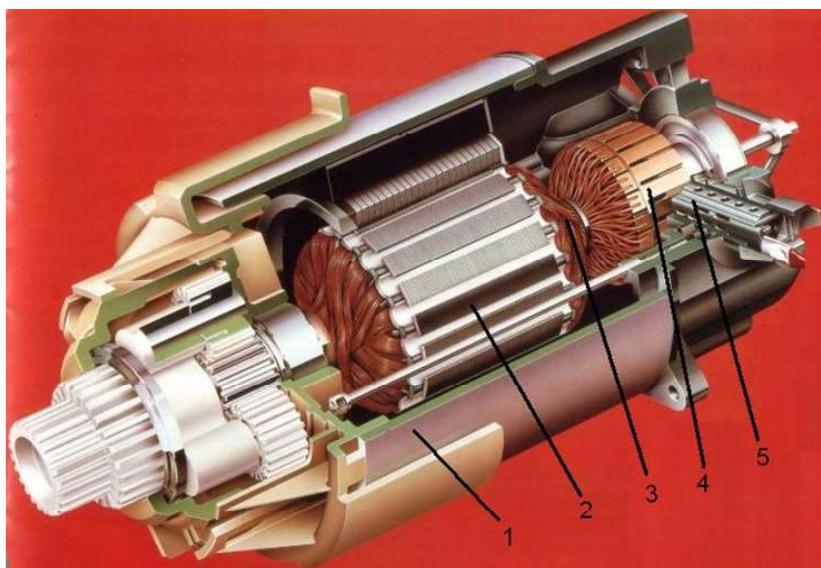
De naam ‘elektrische machine’ geldt voor elke machine, waarin een elektrisch geleidend circuit in beweging is ten opzichte van een magnetisch of elektromagnetisch veld of omgekeerd en waarbij telkens elektrische energie omgezet wordt in mechanische energie of omgekeerd.

Elektrische machines zijn dus elektromechanische omzetters van energie. Die omzetting gebeurt door toedoen van magnetische of elektromagnetische velden. Elektrische machines - en meer specifiek voor gelijkstroommachines - kunnen onderverdeeld worden in :

- *de dynamo's* : dit zijn die elektrische machines die mechanische energie omzetten in elektrische energie
- *de motoren* : dit zijn die elektrische machines die elektrische energie omzetten in mechanische energie.

### 3.2 De bouw van de gelijkstroommachine

#### 3.2.1 De onderdelen



1. De stator - behuizing
2. De statorwikkeling
3. De ankerwikkeling
4. De collector/commutator
5. De koolstofborstels

Bron : [http://users.telenet.be/stdvk\\_em\\_10/DC\\_werking/werking\\_DC\\_motor\\_frameset.htm](http://users.telenet.be/stdvk_em_10/DC_werking/werking_DC_motor_frameset.htm)

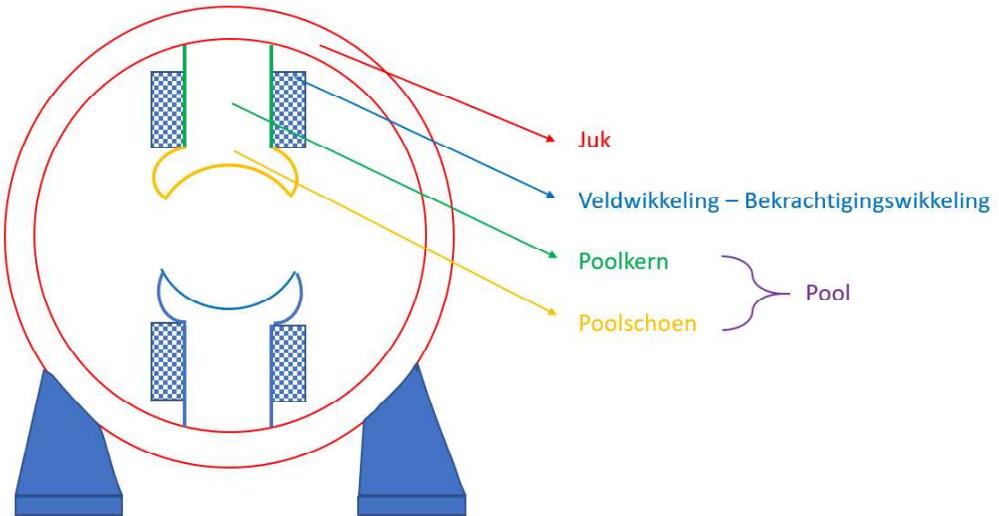
#### 3.2.2 De stator

Elke draaiende elektrische machine bestaat uit een *stator*, het stilstaand gedeelte en een *rotor*, het draaiende gedeelte. Een machine met stilstaande polen en een draaiende rotor, wordt een *buitenpoolmachine* genoemd.

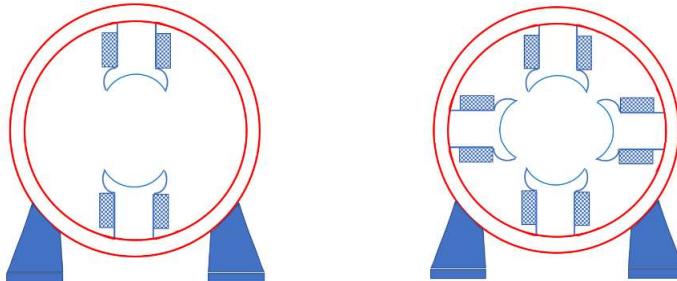
Bij een gelijkstroommachine zal de stator dienen voor het opwekken van het magnetisch veld. Het magnetisch veld kan opgewekt worden door een *permanente magneet*. In dit bijzonder geval wordt er gesproken van een permanent magneetmotor (afgekort PM-motor).

Het magnetisch veld kan ook opgewekt worden door een *elektromagneet*. De stator of ook wel het magneetgestel genoemd, bestaat dan uit een gietstalen juk, de uitspringende polen en een veldwikkeling. Deze veldwikkeling wordt ook de bekrachtigingswikkeling of de magneetwikkeling genoemd; ook soms de statorspoel genoemd. De polen op zich bestaan enerzijds uit een gelamelleerde poolkern, waarrond de veldwikkeling ligt, en anderzijds uit de gelamelleerde poolschoen. De poolschoen grenst aan de luchtspleet en zorgt door zijn vorm

voor een zo homogeen mogelijk magnetisch veld. Het lamelleren van de poolkern en van de poolschoen is om de wervelstromen in het ferromagnetisch materiaal te beperken. Doorheen de veldwikkeling (bekrachtigingswikkeling) vloeit de veldstroom (of bekrachtigingsstroom of magneetstroom).



De stator kan 2 of 4 (of meer) polen bevatten zoals voorgesteld in onderstaande figuur. Men spreekt dan over een tweepolige of een vierpolige machine. De magnetische keten wordt gevormd door het juk, de polen, de luchtspleet en het anker.

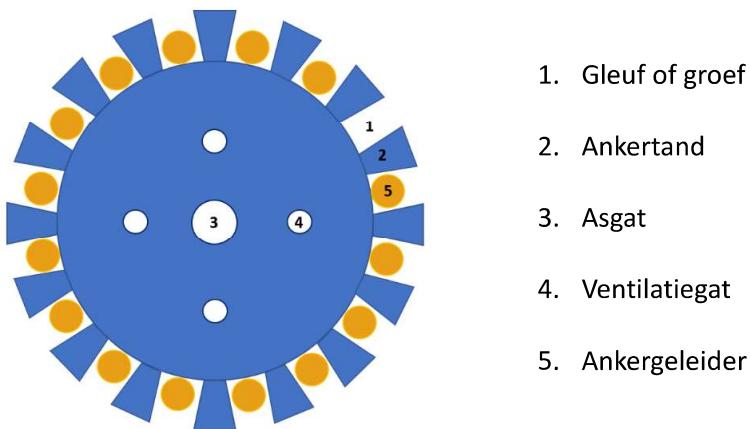


### 3.2.3 Het anker

Bij gelijkstroommachines wordt de rotor, het *anker* genoemd.

Bijna bij alle gelijkstroommachines wordt voor het anker een zogenaamde trommelanker gebruikt. Het trommelanker bestaat uit een groot aantal ankerblikken die ten opzichte van elkaar door een zeer dun laagje isolatielak geïsoleerd zijn. Ook hier heeft het lamelleren als doel de wervelstromen te beperken.

Een doorsnede van een ankerblik is voorgesteld in onderstaande figuur. Aan de omtrek bevinden zich een groot aantal groeven of gleuven waarin de ankergeleiders aangebracht zijn. De uiteinden van de ankergeleiders zijn verbonden met de collector of commutator. Via koolstofborstels zijn de twee uiteinden van de ankerspoelen verbonden met de klemmen A<sub>1</sub> en A<sub>2</sub> van het klemmenbord. Des te meer spoelen zich over de gehele omtrek gelijkmatig verdelen en des te groter het aantal aangebrachte commutatorlamellen, des te gelijkmatiger de gelijkspanning en -stroom of het resulterend koppel zullen zijn.



De rechtse draaizin wordt vastgesteld door een waarnemer die de machine bekijkt tegen de zijde van het aseinde. Voor een machine met twee aseinden wordt de draairichting vastgesteld door de waarnemer die de machine bekijkt tegen de van de commutator afgekeerde zijde.

### 3.3 De verschillende types gelijkstroommachines

---

#### 3.3.1 De permanent magneet motor

De *stator* van de permanent magneet motor is opgebouwd uit permanente magneten. De magnetische flux is dus steeds aanwezig. Het *anker* is qua opbouw identiek aan een gewone DC-motor, nl. de ankerwikkelingen zijn voorzien samen met een collector en koolstofborstels. De stroomvoerende geleiders van het anker zorgen - onder invloed van het magnetisch veld - voor een lorentzkracht. Deze lorentzkräften zorgen voor de draaiende beweging van de motor. De PM-motor wordt gekarakteriseerd door een hoger rendement. De joule-verliezen

worden immers beperkt tot deze die optreden in de stroomvoerende ankergeleiders, de stator ontwikkelt geen joule-verliezen in de permanente magneten. De toerental-karakteristiek is te vergelijken met deze van de OB-motor. Om de draaizin van de PM-motor om te keren, zullen de voedingsgeleiders naar het anker omgewisseld worden. Het magnetisch veld is meestal relatief klein en onveranderd. De PM-motor wordt dan ook meestal gebruikt voor machines met een klein vermogen.

### 3.3.2 De types bekraftiging

De verdere classificatie van de gelijkstroommachines gebeurt door onderscheid te maken of de veldstroom door een afzonderlijke spanningsbron of door de machine zelf wordt geleverd. Men onderscheidt dus :

- machines met *onafhankelijke (afzonderlijke of vreemde) bekraftiging*. Hier wordt de veldstroom geleverd door een onafhankelijke (afzonderlijke) spanningsbron. Deze machines worden afgekort als de OB-machine. De ankerwikkeling wordt aangeduid met de klemmen A<sub>1</sub> en A<sub>2</sub>, de veldwikkeling bevindt zich tussen de klemmen F<sub>1</sub> en F<sub>2</sub>.
- machines met *eigen- of zelfbekraftiging*. Bij gelijkstroommotoren wordt de veldstroom door hetzelfde net geleverd waarop het anker van de motor is aangesloten. Bij gelijkstroomgeneratoren (dynamo's) met zelfbekraftiging wordt de veldstroom door de machine zelf geleverd.

Gelijkstroommachines met eigen bekraftiging kunnen in het algemeen naargelang de wijze van de schakeling van de veldwikkeling ten opzichte van de ankerwikkeling, verder ingedeeld worden in de serie-, shunt- of compoundmachines. Om dit duidelijk te maken beschouwen we even de gelijkstroommotor.

Voor de *seriemotor* zal de veldwikkeling in serie staan met de ankerwikkeling. De serieveldwikkeling wordt aangeduid met de klemmen D<sub>1</sub> en D<sub>2</sub>. De stroom in de veldwikkeling is dezelfde als de stroom die in het anker vloeit. Aangezien de veldwikkeling doorlopen wordt door de ankerstroom, zal deze wikkeling uitgevoerd worden met een klein aantal windingen waarvan de geleiders uitgevoerd zijn met een relatief grote diameter.

Voor de *shuntmotor* zal de veldwikkeling - aangeduid met  $E_1$  en  $E_2$  - in parallel staan met de ankerwikkeling. Aangezien de ankerspanning (bronspanning) over deze veldwikkeling staat, zal deze wikkeling uitgevoerd worden met een groot aantal windingen waarvan de geleiders een relatief kleine diameter hebben.

Voor de *compoundmotor* zal de veldwikkeling deels een seriewikkeling, deels een shuntwikkeling bevatten.

De klemaanduidingen van de diverse veldwikkelingen worden in onderstaande tabel samengevat.

Benaming	Klemaanduiding
ankerwikkeling	A1 – A2
hulppoolwikkeling	B1 – B2
compensatiewikkeling	C1 – C2
seriewikkeling	D1 – D2
shuntwikkeling	E1 – E2
onafhankelijke bekragting	F1 – F2

### 3.4 Principe gelijkstroommotor

---

#### 3.4.1 Principe

Constructief is een gelijkstroommotor identiek aan een dynamo. Maar in plaats van mechanische energie te leveren en elektrische energie voor te brengen, legt men nu aan de motor een bepaalde spanning aan teneinde stroomvoerende ankergeleiders te bekomen. De motor neemt dus elektrische energie op vanuit het net, die op de verliezen na, omzet worden in mechanische energie.

De werking van de (gelijkstroom)motor berust op het effect van een flux op een stroom of beter, op het effect van de flux  $\phi$  op een stroomvoerende geleider (stroomvoerend raam).

Een stroomvoerende geleider ondervindt in een magnetisch veld op elk der windingszijden een lorentzkracht. De grootte van de elementaire kracht wordt gegeven door :

$$F = B \cdot l \cdot I_a$$

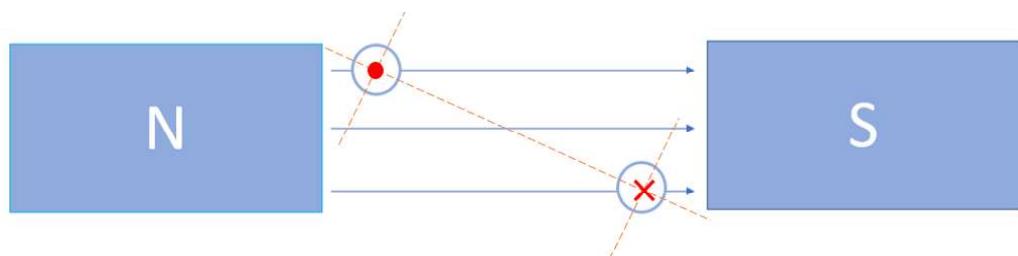
met  $B$  de inductie,  $l$  de nuttige lengte (in het magnetische veld) van de stroomvoerende geleider en  $I_a$  de stroomsterkte. De richting is loodrecht op het vlak dat gevormd wordt door de inductie en het stroomvoerende raam. De zin van de kracht wordt bepaald met de linkerhandregel. In deze elementaire formule wordt er verondersteld dat  $B$  en  $I_a$  loodrecht op elkaar staan (figuur 1). Indien het stroomvoerend raam en de inductie zich ten opzichte van elkaar onder een hoek  $\alpha$  bevinden (figuur2), wordt de grootte van de kracht gegeven door

$$F = B \cdot l \cdot I_a \cdot \cos \alpha$$

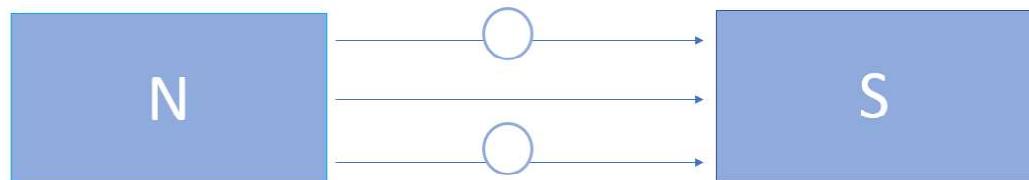
Ga zelf na dat om de motor in dezelfde zin te laten draaien, de stroomzin moet veranderen als het raam de neutrale lijn passeert en dus naar de andere poolzijde overgaat (fig. 3 en 4).



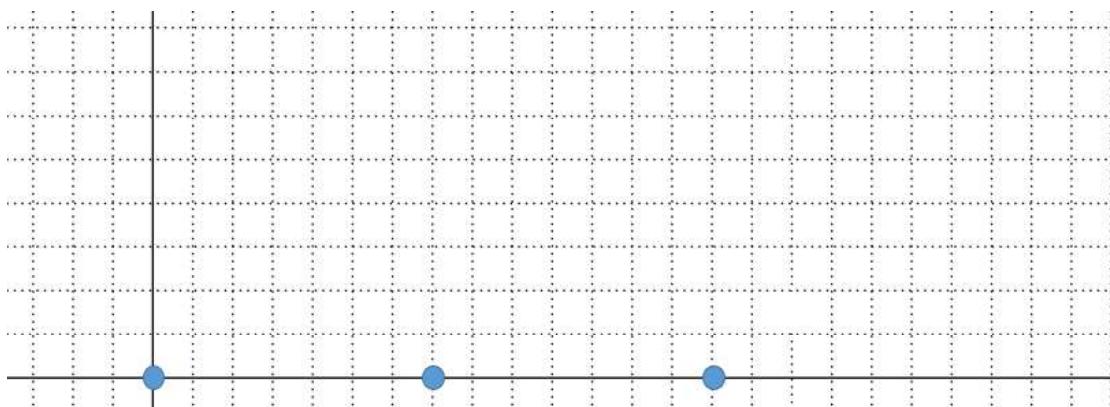
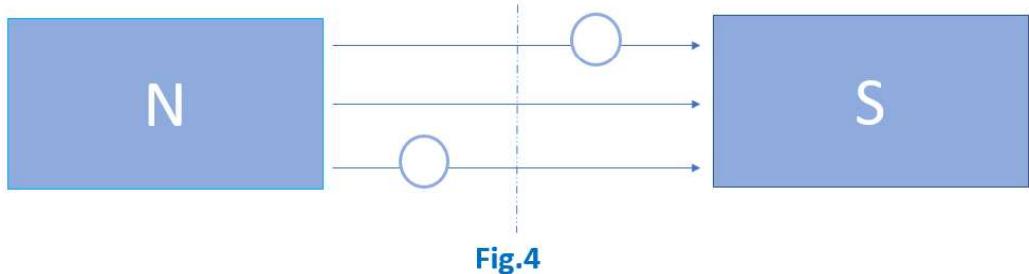
**Fig.1**



**Fig.2**



**Fig.3**



Beschouwen we per winding, de twee even grote, doch tegengesteld gerichte krachten, dan komt men aldus een elementair koppel

$$M = F \cdot d = B \cdot l \cdot I_a \cdot d$$

met  $d$  de diameter van het anker. Wordt de inductie  $B$  vervangen door  $\phi/S$

$$M = F \cdot d = \frac{\phi}{S} \cdot l \cdot I_a \cdot d = k_2 \cdot \phi \cdot I_a$$

$$\text{met } k_2 = \frac{l \cdot d}{S}$$

Hierin wordt  $k_2$  de tweede machineconstante genoemd, de flux  $\phi$  in Wb, de ankerstroom  $I_a$  in A en het koppel  $M$  in Nm.

Het verband tussen het koppel en het vermogen (zie asynchrone machines) blijft

$$P = M \cdot \omega$$

en dus

$$M = \frac{P}{\omega}$$

### 3.4.2 Motorwerking

Om naar de uiteindelijke uitwerking van de motor te komen, veronderstellen we dat de magnetische inductie in alle punten van de luchtspleet even groot is en radiaal gericht is. Om dit te bekomen wordt het magnetisch veld opgebouwd door poolschoenen te voorzien die zeer nauw aansluiten bij het cirkelvormig anker. De lorentzkrachten op de actieve geleiders zijn dan even groot en rakend aan de cirkelomtrek, en dus loodrecht op de straal. Het is enkel in de buurt van de neutrale lijn dat de krachtwerking verminderd en naar 0 gaat.

Wanneer het anker ronddraait in het magnetisch veld, zullen de opeenvolgende wikkelingen steeds voorzien moeten worden van een elektrische stroom die in de juiste zin vloeit. Het omkeren van de stroomzin gebeurt normaliter als de wikkeling de neutrale lijn voorbijkomt vermits de geleiders die zich daar bevinden een lorentzkracht opwekken die geen tangentiële component heeft en dus geen bijdrage leveren aan het motorkoppel.

Het ompolen van de stroomzin wordt gerealiseerd door de combinatie van koolstofborstels en commutator.

Een koolborstel is dit onderdeel dat bevestigd is aan de stator en elektrisch contact maakt met het roterende deel (anker) via een daaraan verbonden commutator. De borstels zijn stroom geleidende elementen die bestaan uit geperde koolstof, vandaar de naam koolstofborstels. De commutator of collector is een cirkelvormig geheel van koperen lamellen met daartussen isolatiemateriaal, dat in verbinding staan met de verschillende spoelen van het anker. De vast opgestelde koolstofborstels maken contact met de commutator.

De combinatie koolstofborstels en commutator dienen niet alleen om de stroomtoevoer naar het anker te verzorgen, maar ook om de stroomrichting steeds zó te schakelen dat het draaiend koppel een constante richting heeft. Daartoe is de commutator in aparte sectoren verdeeld, zodat bij een bepaalde stand van het anker en een bepaalde polarisatie van de magnetische polen een bepaalde richting van de stroom hoort.

### 3.4.3 Primair verschijnsel bij motorwerking

Uitgaande van de aanwezige inductie en de stroomvoerende geleiders in het anker, ontstaan de diverse lorentzkrachten  $F$ , die samen aanleiding geven tot het motorkoppel. Dit koppel zal – vergelijk het met de uitwerking bij de asynchrone motor – een aandrijvend koppel zijn. Door dit koppel ontstaat de draaiende beweging, en dus het toerental.

### 3.4.4 Secundair verschijnsel bij motorwerking

Van zodra het anker in beweging is, onder de vorm van het geïnitieerde toerental, is de B.L.v-regel van toepassing op het anker. Immers de ankergeleiders ondervinden zowel de relatieve snelheid – onder de vorm van het toerental – als de aanwezigheid van het magnetisch veld.

$$E = z \cdot B \cdot l \cdot v$$

$$E = z \cdot \frac{\phi}{S} \cdot l \cdot R \cdot \omega = z \cdot \frac{\phi}{S} \cdot l \cdot R \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n = k_1 \cdot \phi \cdot n$$

$$E = k_1 \cdot \phi \cdot n$$

$$\text{met } k_1 = z \cdot \frac{1}{S} \cdot l \cdot R \cdot \frac{2\pi}{60}$$

met  $k_1$  de eerste machineconstante. De opgewekte tegenemk is dus evenredig met het toerental en met de flux (in Wb). Hoe sneller de motor draait, des te hoger de tegenemk zal zijn.

Indien het anker stilstaat, is de tegenemk 0. De ankerstroom wordt bepaald door :

$$I_{a,\text{aan}} = \frac{U_a}{R_a}$$

Gezien het feit dat de ankerweerstand zeer klein is, is de ankerstroom bij stilstand (bij starten) zeer hoog, vandaar de notatie  $I_{a,\text{aan}}$ . Om de ankerstroom te beperken wordt veelal een voorschakelweerstand in serie met het anker geplaatst (zie paragraaf 1.14). De ankerstroom wordt dan :

$$I_a = \frac{U_a}{R_a + R_{aan}}$$

Zodra de motor draait, zullen de ankergeleiders veldlijnen snijden en wordt er een tegenemk E opgewekt. Bij een constant veld is de grootte van de tegenemk evenredig met het toerental. De zin van de tegenemk is tegengesteld gericht aan de aangelegde spanning  $U_a$ . Toegepast op de onafhankelijk bekraftigde motor

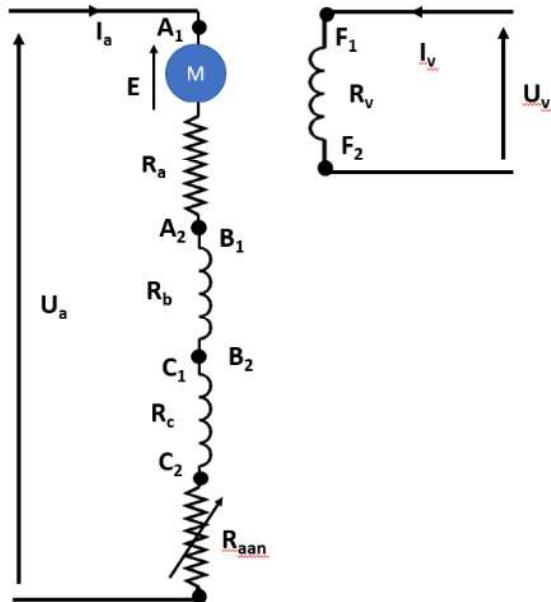
$$U_a = E + R_{a,tot} \cdot I_a$$

$$E = U_a - R_{a,tot} \cdot I_a$$

In deze vergelijking kan  $U_a$  groter zijn dan  $E$  : de gelijkstroommachine fungeert dan als motor. Er vloeit een ankerstroom vanuit het net naar de motor. Er ontstaat een koppel en de machine werkt als motor. De energiestroom wordt als positief beschouwd. Ga na in welk kwadrant de machine werkt.

In deze vergelijking kan  $U_a$  kleiner zijn dan  $E$  : de gelijkstroommachine fungeert dan als generator. De tegenemk  $E$  is dan  $R_{a,tot} \cdot I_a$  groter dan  $U_a$ . De machine wordt aangedreven en levert stroom aan het net.

Equivalent schema onafhankelijk bekraftigde motor :



Bovenstaande formule verder uitwerken, levert

$$E = U_a - R_{a,tot} \cdot I_a$$

$$k_1 \cdot n \cdot \phi = U_a - R_{a,tot} \cdot I_a$$

$$n = \frac{U_a - R_{a,tot} \cdot I_a}{k_1 \cdot \phi}$$

waarin de spanningsval  $R_{a,tot} \cdot I_a$  de inwendige spanningsval wordt genoemd. De grafiek van de toerentalkarakteristiek wordt verder uitgewerkt in de paragraaf OB-motor, samen met de koppelkarakteristiek.

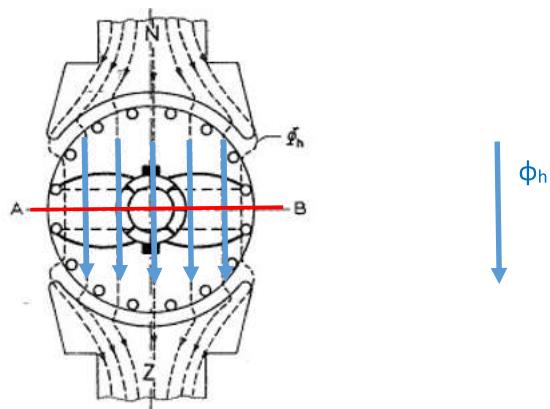
### 3.5 Ankerreactie

---

#### 3.5.1 Onbelast

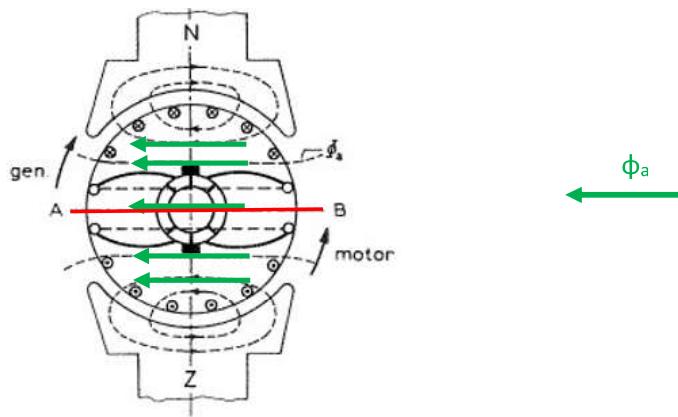
Onderstaande figuur geeft een onbelaste tweepolige gelijkstroommachine weer. De ankerstroom  $I_{a,0}$  wordt als zeer klein, of bijna nul beschouwd vermits de motor in nullast werkt. Het tegenwerkend koppel dat de motor moet leveren is immers nagenoeg nul, op zijn eigen verlieskoppel  $M_v$  - wrijvingsverliezen en ventilatieverliezen - na. Het veld dat door de ankerstromen  $I_{a,0}$  zou opgewekt worden, is zeer klein en wordt verwaarloosd ten opzichte van het hoofdveld  $\phi_h$ .

De polen leveren een magnetische veld, het *hoofdveld*  $\phi_h$ . De neutrale lijn AB staat loodrecht op het hoofdveld. De omwisseling van de stroomzin kan dus gebeuren ter hoogte van de neutrale lijn.

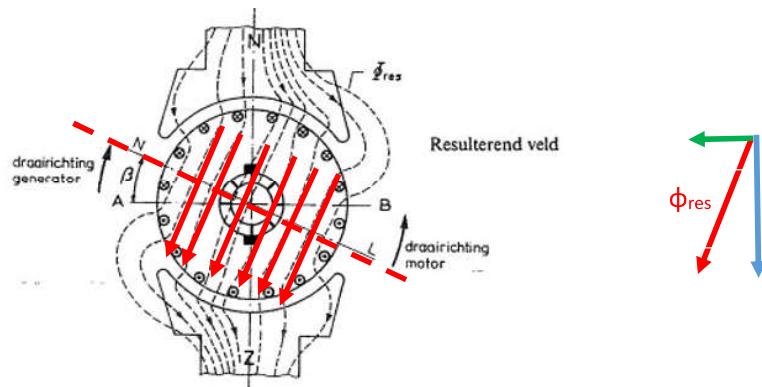


### 3.5.2 Belaste gelijkstroommachine

Wordt de gelijkstroommachine daarentegen belast, dan zullen de ankergeleiders stroomvoerend worden. Deze stroomvoerende geleiders, doorlopen door de ankerstroom  $I_a$ , veroorzaken op hun beurt een magnetisch veld, het ankerveld  $\phi_a$  of veld van ankerreactie  $\phi_{ar}$ . De richting, de zin en de grootte van het ankerveld zijn afhankelijk van de zin en de grootte van de ankerstroom. Dit ankerveld dat bij belasting ontstaat, sluit zich langs de poolschoenen van de hoofdpolen en beïnvloedt zo o.a. de ligging en de grootte van het hoofdveld.



Het hoofdveld en het ankerveld treden terzelfdertijd op bij een belaste machine, en vormen samen het resulterend veld  $\phi_{res}$ . De invloed van het ankerveld  $\phi_a$  op het hoofdveld  $\phi_h$  wordt *ankerreactie* genoemd.



De invloed van het ankerveld op het hoofdveld is drieledig.

Enerzijds wordt het hoofdveld in zijn globaliteit verzwakt, vermits het ankerveld aan de linkerzijde van de noordpool verzwakt en aan de rechterzijde versterkt. Bij de zuidpool is dit

net andersom. Het hoofdveld wordt dus aan de ene zijde versterkt en aan de andere zijde verzwakt.

Anderzijds wordt het hoofdveld vervormd. Daarnaast wordt er vastgesteld dat het resulterend veld bij een belaste machine over een hoek gedraaid is ten opzichte van het hoofdveld. Bovenstaande items zijn daarbij nog afhankelijk van de belasting.

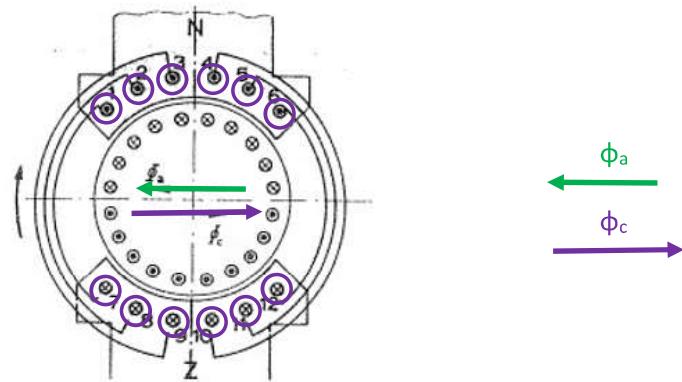
Nadelige gevolgen van de ankerreactie zijn :

- door het optreden van het ankerveld, bij het beladen van de machine, is het resulterend veld zwakker dan het oorspronkelijk veld. Dit is te wijten aan de verzadiging van de polen. De versterking aan de aflopende poolspitsen zal kleiner zijn - vanwege verzadiging - dan de verzwakking aan de oplopende poolspitsen. Hierdoor daalt het resulterend veld in grootte en daalt de geïnduceerde emk bij toenemende belasting, of vermindert het geleverde koppel.
- door het ankerveld ontstaat daarnaast ook een verdraaiing van de neutrale lijn. Aangezien de borstels enkel deze spoelen mogen kortsluiten die de neutrale lijn voorbij draaien en waarin dus praktisch geen emk geïnduceerd wordt (dynamo) of geen stroom loopt (motor), moet men eveneens de borstels over eenzelfde hoek verdraaien.
- bij wisselende belasting, nl. als de motor meer of minder belast wordt, verandert voortdurend het veld van ankerreactie in grootte en zal als gevolg hiervan dus ook de stand van de neutrale lijn voortdurend veranderen. Als gevolg hiervan verandert de stand van de neutrale lijn voortdurend waardoor men de borstelstand continue zou moeten veranderen. Om dit te vermijden heeft men naar middelen gezocht om de ankerreactie te compenseren of het effect van ankerreactie zo veel mogelijk te niet te doen.

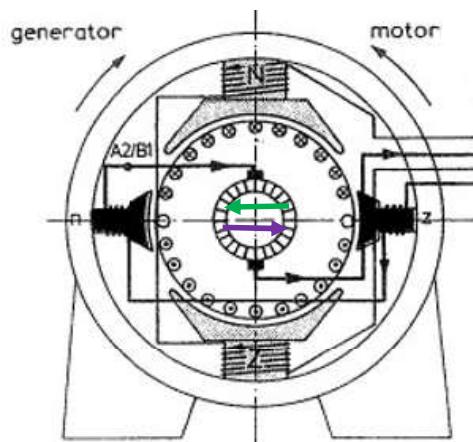
### 3.5.3 *Oplossingen*

Ankerreactie kan op twee manieren tegengegaan worden. Een eerste methode voorziet in een *compensatiewikkeling*. Bij grote, zwaar belaste gelijkstroommachines wordt een compensatiewikkeling toegepast. Deze wikkeling bestaat uit weinig windingen uitgevoerd met een grote diameter. Die windingen worden in de poolschoenen gelegd. In de stilstaande poolschoenen van de statorpolen zijn hiervoor axiale gleuven aangebracht waarin de geleiders

van de compensatiewikkeling liggen. Deze compensatiewikkeling – die eveneens in serie staat met het anker – wordt doorlopen door de ankerstroom en wel in die zin zodat het opgewekte veld (compensatieveld) net tegengesteld gericht is aan het veld van ankerreactie. Compensatiewikkelingen worden toegepast bij gelijkstroommachine met een groot vermogen.



Een tweede methode voorziet in een plaatsing van *hulppolen*. De ankerreactie wordt dan gecompenseerd worden door hulppolen die tussen de hoofdpolen in, in de stator geplaatst worden. Ook deze bekragtingswikkelingen worden in serie geschakeld met het anker. Ook hier moet de zin van de stroom zodanig zijn dat het veld dat door de hulppolen opwekt wordt, tegengesteld gericht is aan het ankerveld. Hulppolen worden gebruikt bij gelijkstroommachines met een klein vermogen. Het verschil tussen de uitvoering met de hulppolen en deze met een compensatiewikkeling is dat de hulppolen het anker dwarsveld slechts plaatselijk compenseert, terwijl de compensatiewikkeling dit over de gehele omtrek doet.



### 3.6 Principe gelijkstroomdynamo

---

#### 3.6.1 Principe

Uit de cursus van magnetisme en elektromagnetisme is bekend dat wanneer een winding met een constante snelheid in een homogeen magnetisch veld roteert, in deze winding een sinusoïdale spanning geïnduceerd wordt (fig. 1, 2, 3 en 4). De werking van de dynamo baseert zich op de Blv-regel : wanneer een geleider een magnetisch veld snijdt, zal in deze geleider een emk opgewerkt worden ter grootte van  $B \cdot l \cdot v$ . De bepaling van de zin van de opgewekte emk gebeurt door middel van de rechterhandregel (zie elektrische machines hoofdstuk 1 : inleiding tot de elektrotechniek) .

Beschouwen we vooreerst één winding met klemmen PQ die met een welbepaalde constante omtreksnelheid  $v$  draait. De grootte van de opgewekte spanning zal afhankelijk zijn van :

- de grootte van het magnetisch veld  $\phi$  (Wb) en dus van de magnetische inductie  $B$  (T)
- de rotatiesnelheid van de winding (toeren/min of toeren/s)
- de machineconstante : enkele constanten eigen aan de dynamo zelf zoals de werkzame lengte van de geleiders ( $m$ ), de diameter van de spoel  $d$  (m), enz. De totale machineconstante wordt verder weergegeven door de letter  $k_1$ .
- de stand van de winding ten opzichte van zin en de richting van de inductie : indien de winding zich in de neutrale lijn bevindt, zal de opgewekte spanning 0 zijn (fig. 1 en fig. 3) gezien de relatieve snelheid evenwijdig is met de inductie, terwijl indien de winding loodrecht op de neutrale lijn gepositioneerd is, zal de opgewekte spanning maximaal zijn (fig. 2). Tussen beide standen zal de opgewekte spanning variëren evenredig met een factor  $\sin \alpha$ .

Bepaal voor elk van onderstaande figuren de opgewekte spanning en zet deze waarde uit in onderstaande grafiek in functie van de hoek.

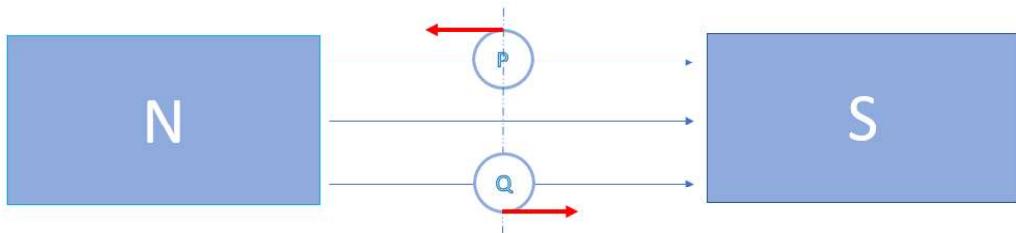


Fig.1

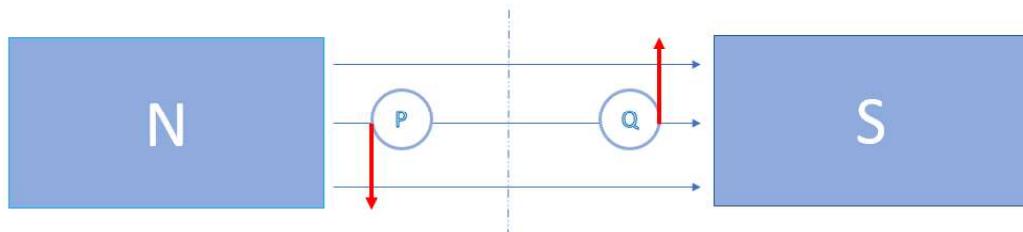


Fig.2

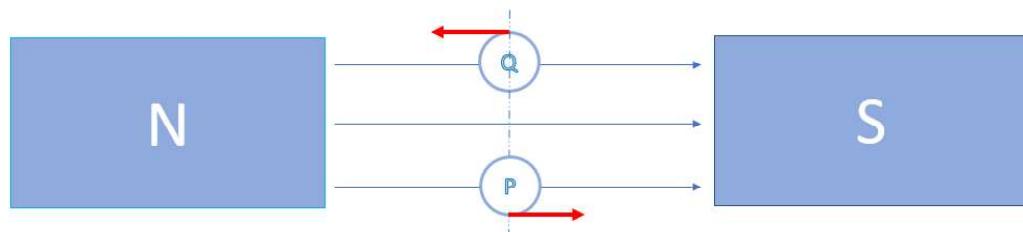


Fig.3

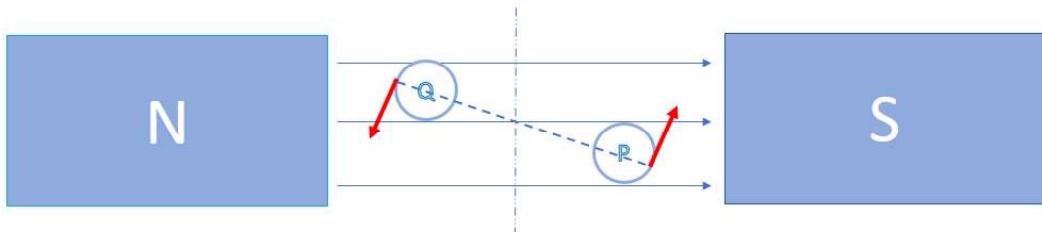


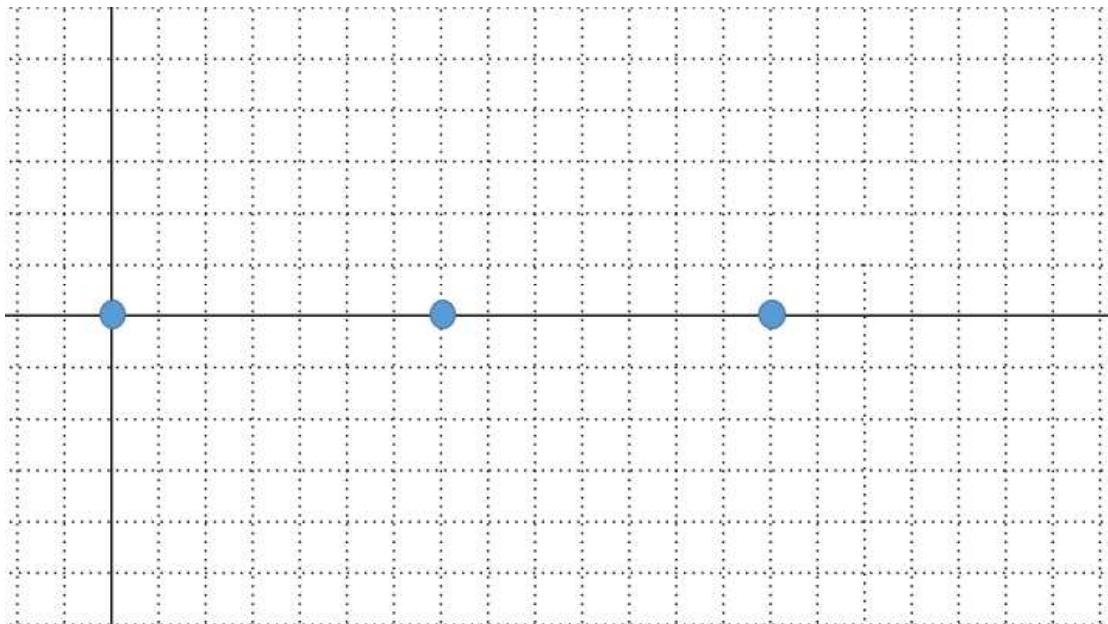
Fig.4

Uit onderstaande grafiek en figuren blijkt dat de opgewekte spanning sinusoïdaal is als de vorm van de polen recht is (constructie wordt in praktijk niet toegepast). Voor 2 geleiders die samen een stroomvoerend raam vormen wordt de opgewekte spanning tussen P en Q gegeven door

$$E_{PQ} = 2 \cdot B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha$$

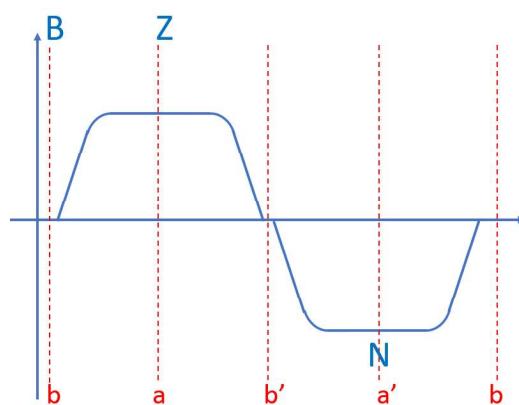
waarbij Blv beschouwd wordt als de opgewekte spanning in 1 geleider.

Een pulserende gelijkspanning kan bekomen worden door de geleiders te verbinden met een borstel, die altijd dezelfde polariteit behoudt.



### 3.6.2 Dynamowerking

Wanneer een geleider zich in een magnetisch veld beweegt en daarbij telkens de veldlijnen loodrecht snijdt, dan wordt in die geleider een emk geïnduceerd ter grootte van  $B \cdot L \cdot v$ . Om dit te bekomen zal er een magnetisch veld gecreëerd worden door de statorpolen hol uit te werken. De magnetische veldlijnen in de luchtspleet verlopen dan radiaal, zodat de actieve geleiders de veldlijnen nagenoeg steeds loodrecht snijden.



De magnetische inductie is echter niet overal even groot. Indien op experimentele wijze de inductie langsheel het anker zou opgemeten worden, bekomen we een verdeling zoals voorgesteld in bovenstaande figuur. Elke ankergeleider zal tijdens de omwenteling achtereenvolgens de veldlijnen volgens al deze inductiewaarden snijden.

Ter hoogte van de poolschoenen is de inductie nagenoeg constant; er worden dus ongeveer evenveel veldlijnen gesneden en de opgewekte spanning zal nagenoeg constant en maximaal zijn. Voorbij de poolschoen zal er een geleidelijke vermindering van het aantal veldlijnen optreden en als gevolg hiervan zal de emk van zijn maximale waarde geleidelijk afnemen tot 0. Ter hoogte van de neutrale lijn worden geen veldlijnen gesneden, vandaar dat de opgewekte spanning op die plaats nul is. Vermits  $I$  en  $v$  constant zijn, is dit tevens de voorstelling van de opgewekte emk als functie van zijn ligging in het veld. Maximaal in de poolmiddellijn  $aa'$  en nul in de neutrale lijn  $bb'$ . Het verloop van de opgewekte spanning wordt dus bepaald door het verloop van de inductie, en dus van de vorm van de magneetpolen.

Worden in de algemene formule voor de opgewekte spanning, de inductie  $B$  en de omtreksnelheid  $v$  vervangen dan bekomt men

$$E = 2 \cdot \frac{\phi}{S} \cdot l \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot R \cdot n$$

$$E = k_1 \cdot \phi \cdot n$$

met  $k_1$  de machineconstante,  $\phi$  de magnetische flux (Wb),  $E$  de opgewekte spanning (V) en  $n$  het toerental (t/min). De waarde van de opgewekte spanning wordt dus - naast de machineconstante - enkel bepaald door de flux en het toerental. Dit is de algemene formule voor de emk, onafhankelijk van het type bekragting en geldig bij motor- en dynamowerking. Wil men de polariteit van de emk veranderen, dan moet men ofwel de polariteit van het veld wijzigen ofwel de draaizin omkeren.

### 3.6.3 Primair verschijnsel

Uitgaande van de aanwezige flux en de beweging, ontstaat er in de ankergeleiders een opgewekte spanning  $E$  ter grootte van  $B.l.v$  of  $2.B.l.v$ . De geïnduceerde ankerstroom  $I_a$  vloeit

als gevolg van de opgewekte spanning  $E$  door de ankergeleiders volgens de conventie van een bron.

### 3.6.4 Secundair verschijnsel

De door de ankergeleiders vloeiende stroom  $I_a$  bevindt zich tevens in het magnetisch veld, gekarakteriseerd door de flux  $\phi$  en de inductie  $B$ . Stroomvoerende geleiders die zich in een magnetisch veld bevinden, ondervinden een lorentzkracht volgens

$$F = B \cdot l \cdot I_a$$

en geven aanleiding tot een - tegenwerkend - koppel  $M$

$$M = k_2 \cdot \phi \cdot I_a$$

met  $k_2$  de tweede machineconstante; afhankelijk van de constructie van de machine. Deze constante wordt o.a. bepaald door de lengte en de diameter van de ankerwikkeling, het aantal windingen op het anker en het aantal poolparen. Het koppel is dus evenredig met de flux  $\phi$  en de ankerstroom  $I_a$ .

## 3.7 Vermogenverdeling motor

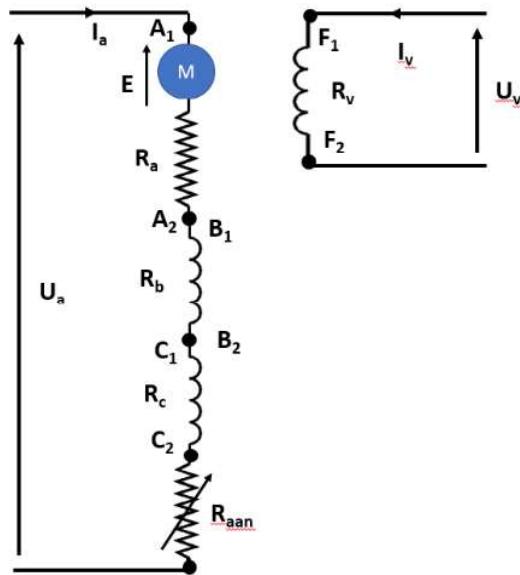
---

Bij de motorwerking wordt de elektrische energie omgezet in mechanische energie. Deze omzetting is uiteraard niet volledig. Een klein gedeelte van de elektrische energie wordt gedissipeerd en omgezet in thermische energie. Dit gedeelte vermogen bestaat uit koperverliezen, ijzerverliezen en wrijving- en ventilatieverliezen (cfr. asynchrone machines).

De vermogenverdeling voor de OB-motor wordt uitgewerkt uitgaande van onderstaand equivalent schema, waarin het vermogen gedeelte van de bekraftiging ( $U_v \cdot I_v$ ) buiten beschouwing gelaten wordt.

Het toegevoegd vermogen  $P_t$

$$P_t = U_a \cdot I_a$$



*Koperverliezen* treden op in de ankerwikkeling, de hulppoolwikkeling, de eventueel aanwezige compensatiewikkeling. De weerstand van deze wikkeling wordt in totaliteit  $R_{a,tot}$  genoteerd zodat

$$P_{Cu} = R_{a,tot} \cdot I_a^2$$

en zoals eerder vermeld, veranderen de koperverliezen kwadratisch met de stroom, hier ankerstroom. Vermits de belasting de grootte van de ankerstroom zal bepalen, is het duidelijk dat de koperverliezen afhankelijk zijn van de belasting.

Voor de seriemotor (zie verder) treden er ook koperverliezen op in de in serie geschakelde veldwikkeling.  $R_{a,tot}$  wordt dan de weerstand van de ankerwikkeling, de hulppoolwikkeling, de eventueel aanwezige compensatiewikkeling en de veldwikkeling.

Het *inwendig vermogen*  $P_i$  is het verschil tussen toegevoegd vermogen en het koperverlies, dus

$$P_i = P_t - P_{Cu}$$

$$P_i = E \cdot I_a$$

Het inwendig vermogen is het vermogen dat inwendig ter beschikking gesteld wordt in de ankerwikkeling en de oorzaak is dat het anker gaat draaien. Het hiermee overeenkomstig koppel, is het inwendig koppel

$$M_i = \frac{P_i}{\omega}$$

Vermits het anker draait, ontstaan er mechanische verliezen onder de vorm van ventilatie- en wrijvingsverliezen. De *ventilatieverliezen*  $P_{\text{vent}}$  treden op als gevolg van de luchtverplaatsing. De *wrijvingsverliezen*  $P_{\text{wrijv}}$  treden op in de lagers én door de wrijving tussen borstels en commutator.

Daarnaast treden er nog *ijzerverliezen*  $P_{\text{Fe}}$  op. De ijzerverliezen zijn (cfr. transformatoren) afhankelijk van de inductie. Deze treden op door het niet ideale karakter van het ferromagnetisch materiaal. De ijzerverliezen worden onderverdeeld in de hysteresis- en de wervelstroomverliezen.

De hysteresisverliezen treden op in het ferromagnetisch materiaal van het anker. Hoe sneller het magnetiseren en demagnetiseren gebeurt, dus hoe groter het toerental, hoe groter de hysteresisverliezen.

De wervelstroomverliezen treden op in het ferromagnetische materiaal van het anker als gevolg van de geïnduceerde wervelstromen. De opgewekte spanningen zijn evenredig met het toerental. De wervelstroomverliezen zijn kwadratisch afhankelijk van het toerental.

Er wordt besloten dat de ijzerverliezen belastingsafhankelijk zijn en dus niet als constant te beschouwen.

Het *nuttig vermogen*  $P_n$  dat uiteindelijk op de as in de vorm van mechanische energie vrijkomt, is

$$P_n = P_{\text{as}} = P_i - P_v$$

met

$$P_v = P_{\text{Fe}} + P_{\text{vent+wrijv}}$$

Het koppel op de as wordt gegeven door

$$M_n = M_{\text{as}} = \frac{P_n}{\omega}$$

terwijl het verlieskoppel bepaald wordt door

$$M_v = \frac{P_v}{\omega}$$

Het is duidelijk dat vermits

$$P_i = P_{\text{as}} + P_v$$

er voor de koppels onderstaande formule zal gelden

$$M_i = M_{as} + M_v$$

Het rendement wordt bepaald

$$\eta = \frac{P_n}{P_t} \cdot 100 \%$$

Normaliter staat het rendement vermeld op de kenplaat van de motor. Bij motoren wordt tevens het afgegeven vermogen, dus het asvermogen of mechanisch vermogen op de as, in W of kW vermeld op de kenplaat, en dit bij nominaal bedrijf.

### 3.8 Vermogenverdeling dynamo

---

De gelijkstroommachine die werkt als dynamo, zal aangedreven worden en via deze weg een mechanisch vermogen - hier toegevoegd vermogen  $P_t$  - toegevoerd krijgen op de as. Vermits het anker zal draaien, treden er ijzerverliezen  $P_{Fe}$  en mechanische verliezen  $P_{vent+wrijv}$ , met name ventilatie- en wrijvingsverliezen, op. Samen vormen ze terug  $P_v$ . Het mechanisch toegevoerd vermogen verminderd met  $P_v$  kan worden omgezet in elektrische energie; het inwendig vermogen van de dynamo. Het inwendig vermogen is tevens het product van de opgewekte spanning  $E$  met de ankerstroom  $I_a$ .

$$P_i = P_t - P_v = P_t - (P_{Fe} + P_v) = E \cdot I_a$$

met  $P_t$  hier het mechanisch toegevoerd vermogen ! Een gedeelte van dit opgewekte elektrische vermogen wordt gedissipeerd in de totale ankerweerstand en omgezet in warmte.

Het afgegeven of nuttig vermogen – nu elektrisch vermogen – wordt gegeven door

$$P_n = P_i - P_{Cu,anker} = U_a \cdot I_a$$

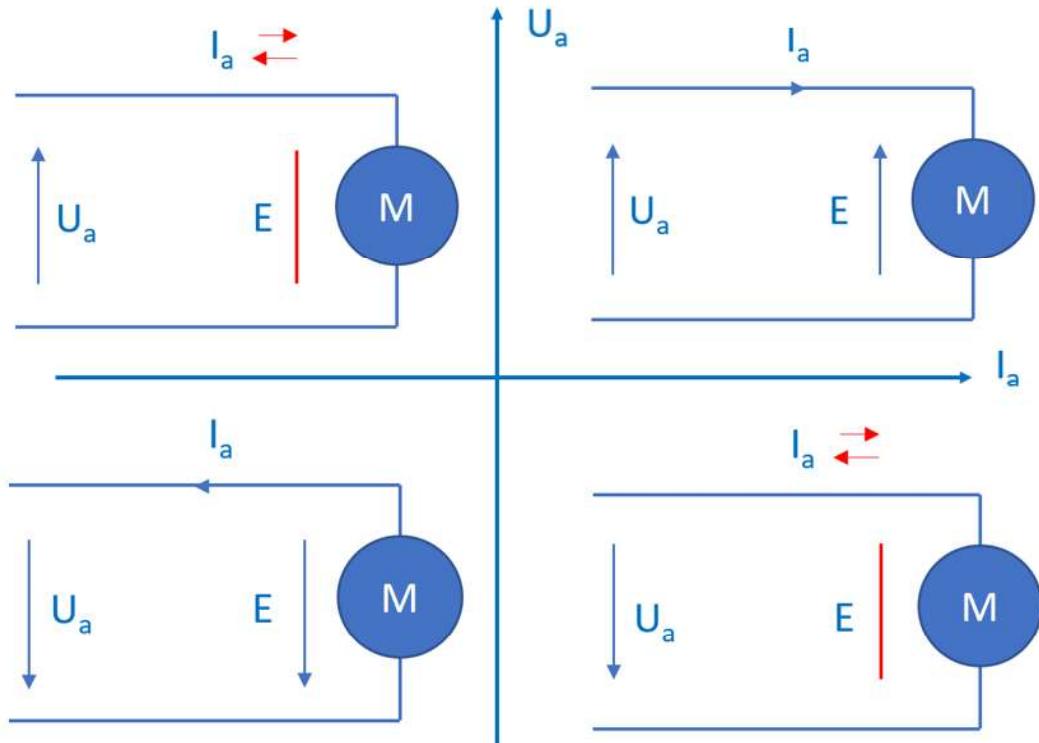
waaruit het rendement van de dynamo kan afgeleid worden

$$\eta = \frac{P_n}{P_t} \cdot 100 \%$$

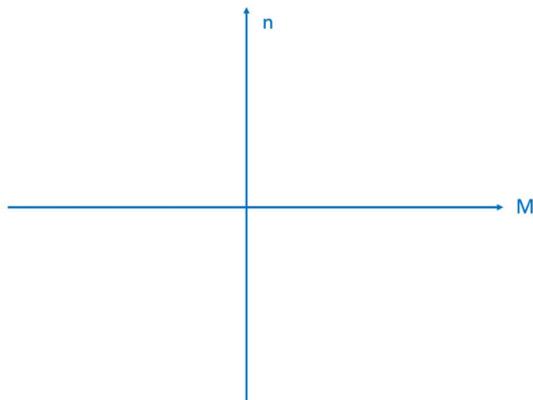
Let op dat  $P_n$  nu elektrisch vermogen ter hoogte van de klemspanning ( $U_a \cdot I_a$ ) is en  $P_t$  het toegevoerd mechanisch vermogen !! De respectievelijke koppels kunnen afgeleid worden door de resp. vermogens te delen door  $\omega$ .  $U_a$  is hierbij kleiner dan de opgewekte tegenemk  $E$ .

### 3.9 Kwadrantenwerking

De gelijkstroommachine kan als motor of als dynamo werken. Vul onderstaande figuur aan door de zin van  $I_a$  en  $E$  aan te duiden zodat kwadrant I en III motorkwadranten zijn en kwadrant II en IV dynamo kwadranten zijn.



Daarnaast kent de gelijkstroommachine 2 draairichtingen. Het werkingspunt kan zich dus in één van de 4 kwadranten bevinden. In welk kwadrant de motor (resp. de dynamo) werkzaam is, is afhankelijk van de draaizin van de machine en de zin van het geleverde koppel. Vul tevens onderstaande grafiek in qua kwadranten, positief of negatief toerental, positief of negatief koppel, positieve of negatieve energiestroom, motor- of dynamowerking in de samenvattende tabel.

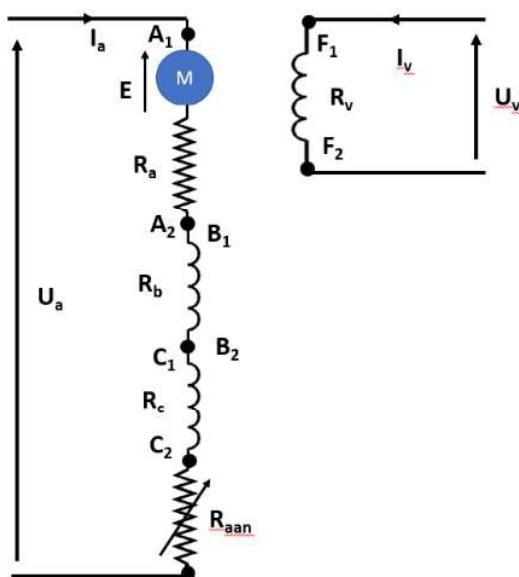


Kwadrant	M	n	Energiestroom	$U_a$	E	$I_a$	Verduidelijking
I	+	+	+	+	+	+	Motorwerking Motor neemt energie op Positieve energiestroom Opgewekte EMK is kleiner dan de klemspanning
II							
III							
IV							

### 3.10 Onafhankelijk bekraftigde gelijkstroommotor

#### 3.10.1 Equivalent schema

Onderstaande figuur geeft het equivalent schema weer van de onafhankelijk bekraftigde motor, voorzien van een voorschakelweerstand  $R_{aan}$  die dienst doet om de stroom te beperken bij het inschakelen of het starten.



### 3.10.2 Veldstroom

De veldwikkeling wordt aangesloten op een externe bron  $U_v$ , verschillend van de bron die de ankerspanning  $U_a$  levert. Bij de OB-motor bestaat de veldwikkeling uit veel windingen met geringe diameter. De veldwikkeling heeft dus een hoge ohmse weerstand en is, vanwege de vele windingen, sterk inductief. Aldus zal de bekraftigingsstroom (veldstroom)  $I_v$  relatief klein zijn maar kan er vanwege het groot aantal windingen, toch een relatief groot magnetisch veld opgewekt worden (cfr. Wet van Hopkinson)

$$I_v = \frac{U_v}{R_v}$$

### 3.10.3 Ankerstroom

De ankerstroom wordt gegeven door onderstaande formule. Hierin zijn  $U_a$  en  $R_{a,tot}$  constanten terwijl  $E$  een variabele is. De opgewekte tegenemk  $E$  is afhankelijk van de flux maar vooral afhankelijk van het toerental.

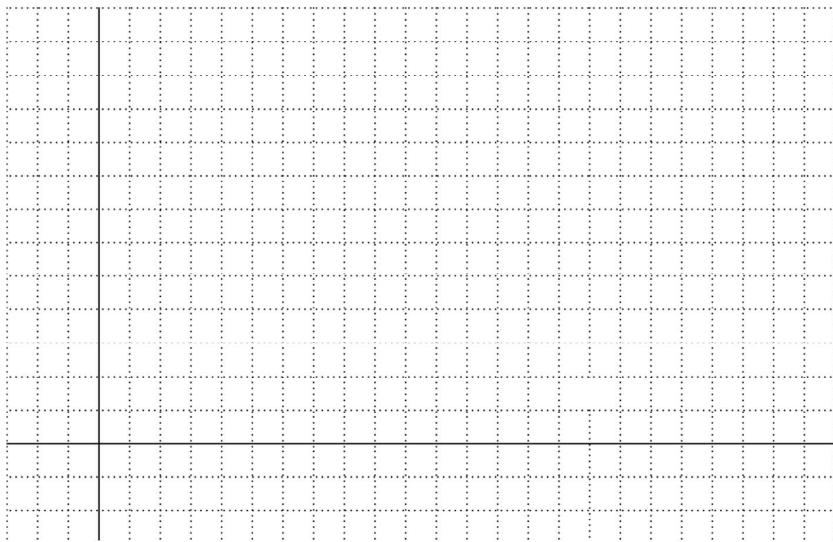
$$I_a = \frac{U_a - E}{R_{a,tot}}$$

### 3.10.4 Koppelkarakteristiek

Vertrekkende vanuit de formule van het koppel  $M = k_2 \cdot \phi \cdot I_a$  en veronderstellend dat de flux constant blijft vanwege een constante veldstroom, volgt dat het koppel evenredig is met de ankerstroom  $I_a$ . De grafiek is een rechte door de oorsprong (0,0). Indien men bij het aanlopen een grotere ankerstroom toelaat dan de nominale ankerstroom, dan zal het aanloopkoppel, evenredig met deze factor, groter zijn.

Duid op onderstaande grafiek de nominale ankerstroom, het nominale koppel, halflast en een aanloopsituatie aan. Duid tevens het nullastkoppel en de nullast ankerstroom aan.

Het omkeren van draaizin kan gewijzigd worden door ofwel de zin van het veld  $\phi$  (door de veldspanning  $U_v$  om te polen) ofwel door de zin van de ankerstroom  $I_a$  om te keren. Bij het laatste wordt de zin van de ankerspanning omgepoold.



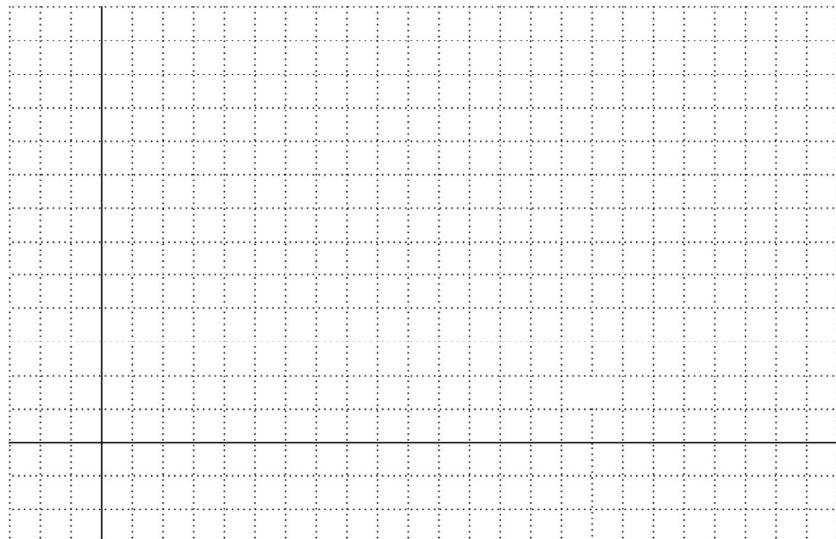
### 3.10.5 Toerentalkarakteristiek

Uitgaande van onderstaande formule,

$$n = \frac{U_a - R_{a,tot} \cdot I_a}{k_1 \cdot \phi}$$

blijkt dat indien de ankerspanning en de flux constant zijn, het toerental in functie van de ankerstroom verloopt volgens een rechte, vertrekende uit  $\frac{U_a}{k_1 \cdot \phi}$  en met een richtingscoëfficiënt  $-\frac{R_{a,tot} \cdot I_a}{k_1 \cdot \phi}$ . Men kan dus stellen dat het toerental bij de OB-motor lineair - maar relatief weinig in vergelijking met andere motoren zoals bv. de seriemotor - afneemt, bij stijgende belasting en dus bij een toenemende ankerstroom. Indien de motor bv. meer belast wordt door een groter tegenwerkend koppel of door een grotere belasting, zal daardoor de ankerstroom moeten stijgen. Als gevolg hiervan zal de inwendige spanningsval  $R_{a,tot} \cdot I_a$  toenemen, waardoor de tegenemk E daalt en dus het toerental n zal dalen.

Stel in onderstaande grafiek het toerental in functie van de ankerstroom voor. Duid het nominaal punt aan, halflast, aanlopen.



Is de ankerstroom 0 dan is het toerental maximaal en theoretisch gelijk aan  $\frac{U_a}{k_1 \cdot \phi}$ . Er is dus geen gevaar voor het op hol slaan van de OB-motor, uitgaande van een kleine belasting en dus van een kleine ankerstroom.

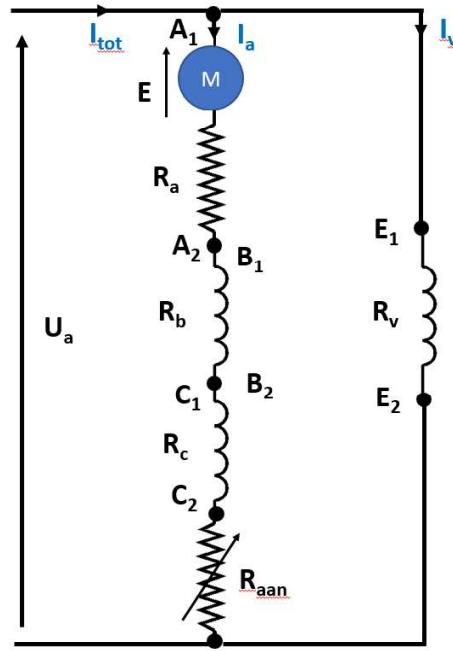
In nullast zal de motor  $I_{a,0}$  opnemen. De motor zal iets minder snel draaien dan het theoretisch toerental  $\frac{U_a}{k_1 \cdot \phi}$ . Dit toerental kan immers niet bereikt worden, enkel indien het  $M_v$  koppel gelijk zou zijn aan nul; enkel dan kan de ankerstroom 0 bedragen.

De motor kan echter wel op hol slaan als de flux  $\phi$  wegvalt, bv. door een spanningsonderbreking in de bekragtingekring. Let hierop in het labo door de veldbewaking in acht te nemen als bijkomend onderdeel in de stuurkring.

### 3.11 Shuntmotor

---

#### 3.11.1 Equivalent schema



#### 3.11.2 Veldstroom

De veldwikkeling is aangesloten op de ankerspanning. Bij de shuntmotor bestaat de veldwikkeling uit veel windingen met geringe diameter. De veldwikkeling heeft dus een hoge ohmse weerstand en is, vanwege de vele windingen, sterk inductief. Aldus zal de bekraftigingsstroom (veldstroom)  $I_v$  relatief klein zijn maar kan er een relatief groot magnetisch veld opgewekt worden (cfr. Wet van Hopkinson)

$$I_v = \frac{U_a}{R_v}$$

#### 3.11.3 Ankerstroom

De ankerstroom wordt gegeven door onderstaande formule. Hierin zijn  $U_a$  en  $R_{a,tot}$  constanten terwijl  $E$  een variabele is die afhankelijk is van de flux en het toerental.

$$I_a = \frac{U_a - E}{R_{a,tot}}$$

Ook hier zal voor het inschakelen gebruik gemaakt worden van een aanloopweerstand teneinde de ankerstroom in grootte te beperken.

De totaal uit het net opgenomen stroom is

$$I_{tot} = I_a + I_v$$

waarvan het grootste gedeelte de ankerstroom bedraagt. Slechts een betrekkelijk klein gedeelte vloeit door de bekraftigingsspoel.

#### **3.11.4 Koppelkarakteristiek**

Vermits het veld  $\phi$  constant is, volgt uit de formule  $M = k_2 \cdot \phi \cdot I_a$  dat het koppel recht evenredig is met de ankerstroom. Ook hier kan door het toelaten van een ankerstroom die groter is dan de nominale (bv. factor 1,5) een groter aanloopkoppel bekomen worden dan het nominale.

#### **3.11.5 Toerentalkarakteristiek**

In onderstaande formule zal de spanningsval over de totale ankerweerstand klein zijn ten opzichte van de ankerspanning. Vermits de ankerspanning en het veld constant zijn, zal het toerental lichtjes dalen volgens de negatieve richtingscoëfficiënt, in functie van de belasting.

$$n = \frac{U_a - R_{a,tot} \cdot I_a}{k_1 \cdot \phi}$$

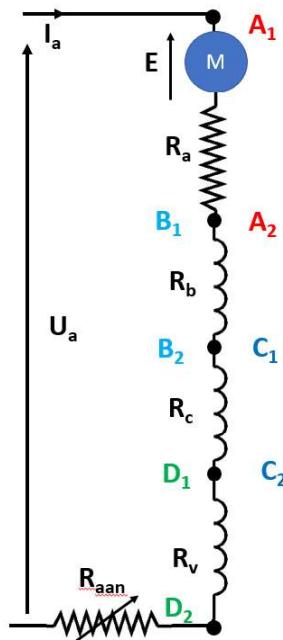
Het verloop van het toerental  $n$  in functie van de ankerstroom  $I_a$  is terug lineair met  $\frac{U_a}{k_1 \cdot \phi}$  als snijpunt op de y-as en  $-\frac{R_{a,tot}}{k_1 \cdot \phi}$  als richtingscoëfficiënt. Algemeen kan gesteld worden dat het toerental van de shuntmotor slechts zeer weinig verandert met de belasting en dus bijna onafhankelijk van de belasting is, of dus nagenoeg onafhankelijk van het gevraagde koppel. De karakteristieken zijn gelijklopend met deze van de onafhankelijk bekraftigde motor. Een

shuntmotor kan nooit op hol slaan, tenzij de flux wegvalt. Maak zelf de redenering hoe de draaizin van de shuntmotor kan omgekeerd worden.

### 3.12 Seriemotor

---

#### 3.12.1 Equivalent schema



#### 3.12.2 Ankerstroom

Bij de seriemotor wordt de veldwikkeling in serie geplaatst met het anker. De ankerstroom is identiek aan de veldstroom. De veldwikkeling kan doordat de ankerstroom erdoor loopt, gerealiseerd worden door weinig wikkelingen van grote diameter te voorzien

$$I_a = I_v$$

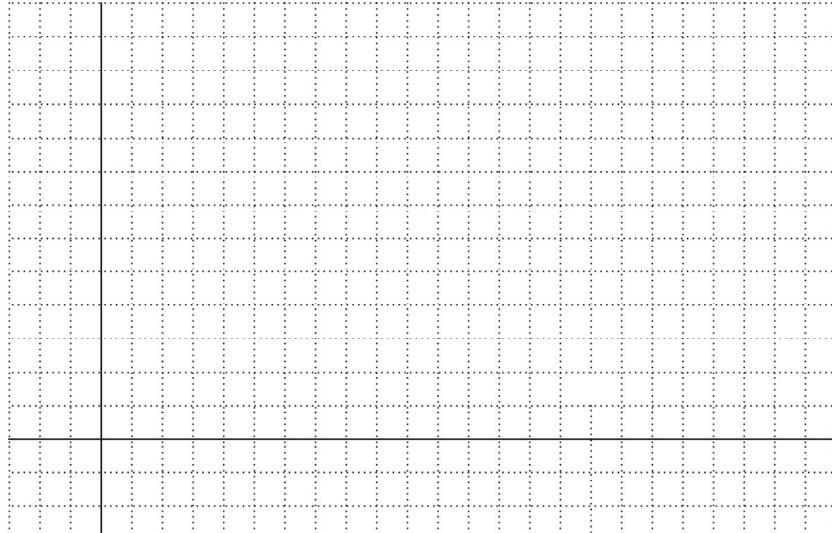
De totale ankerweerstand  $R_{a,tot}$  wordt nu de som van de ankerweerstand  $R_a$ , de weerstand van de hulppolen  $R_b$  en/of compensatiewikkeling  $R_c$  en de veldweerstand  $R_v$ . Een aanloopweerstand is voorzien om de inschakelstroom te beperken.

### 3.12.3 Koppelkarakteristiek

Uit de formule  $M = k_2 \cdot \phi \cdot I_a$  volgt dat het koppel kwadratisch afhankelijk is van de ankerstroom in het lineaire gedeelte van de magnetisatiekromme vermits in dit gedeelte de flux en de ankerstroom zich lineair gedragen.

$$M \cong k'_2 \cdot I_a^2$$

Wordt de ankerstroom groot, dan stijgt de flux weinig of niet meer, en zal het koppel lineair afhankelijk zijn van de ankerstroom. Algemeen kan gesteld worden dat bij eenzelfde ankerstroom, het koppel van de seriemotor groter is dan dat van bv. een overeenkomstige OB-motor. Een seriemotor kan dus toegepast worden waar hoge aanloopkoppels vereist zijn.



### 3.12.4 Toerentalkarakteristiek

Uit de formule van het toerental enerzijds en het – binnen het lineair gebied – lineair afhankelijk zijn van de flux van de ankerstroom anderzijds volgt

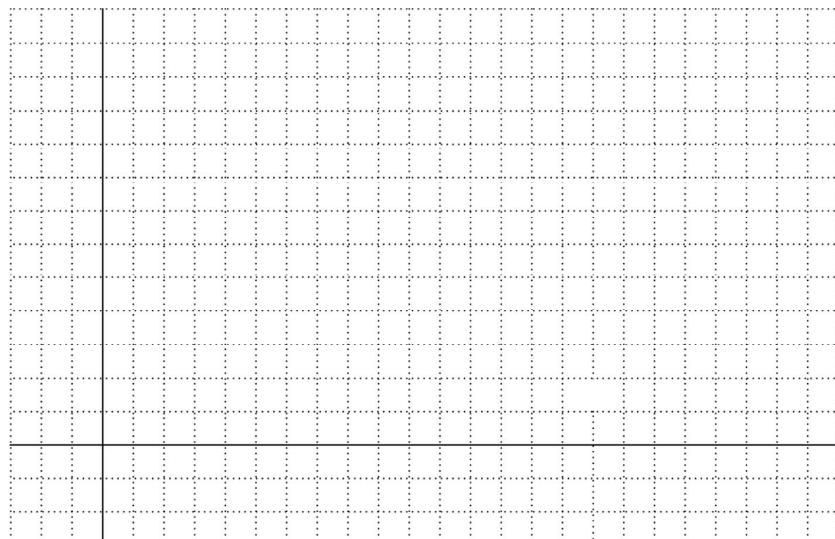
$$n = \frac{U_a - R_{a,tot} \cdot I_a}{k_1 \cdot \phi}$$

$$n = \frac{U_a - R_{a,tot} \cdot I_a}{k'_1 \cdot I_a}$$

en dus indien de ankerstroom niet 0 of oneindig is, zal

$$n = \frac{U_a}{k'_1 \cdot I_a} - \frac{R_{a,tot}}{k'_1}$$

Bij stijgende belasting zal de ankerstroom stijgen en dus het toerental dalen. De karakteristiek kent een hyperbolisch verloop. Bij een grote belasting is het toerental klein; bij een kleine belasting is het toerental groot. Het toerental is dus sterk afhankelijk van de belasting. Merk op dat bij nullast de ankerstroom klein is waardoor het toerental zeer groot wordt. Zonder belasting – dus in nullast – slaat de seriemotor op hol ! Met op hol slaan bedoelt men dat het toerental van de motor een ontoelaatbaar grote waarde kan bereiken waardoor de motor beschadigd wordt. Een seriemotor moet dus steeds belast zijn. Dit kan gerealiseerd worden door een directe koppeling te maken met de aan te drijven machine.



### 3.13 Toerentalvariatie van de OB-motor

---

Voor de onafhankelijk bekragtigde motor volgt uit

$$n = \frac{U_a - R_{a,tot} \cdot I_a}{k_1 \cdot \phi}$$

$$n = \frac{U_a}{k_1 \cdot \phi} - \frac{R_{a,tot} \cdot I_a}{k_1 \cdot \phi}$$

en uit

$$M = k_2 \cdot \phi \cdot I_a$$

volgt

$$I_a = \frac{M}{k_2 \cdot \phi}$$

zodat het toerental in functie van het koppel voldoet aan

$$n = \frac{U_a}{k_1 \cdot \phi} - \frac{R_{a,tot}}{k_1 \cdot \phi \cdot k_2 \cdot \phi} \cdot M$$

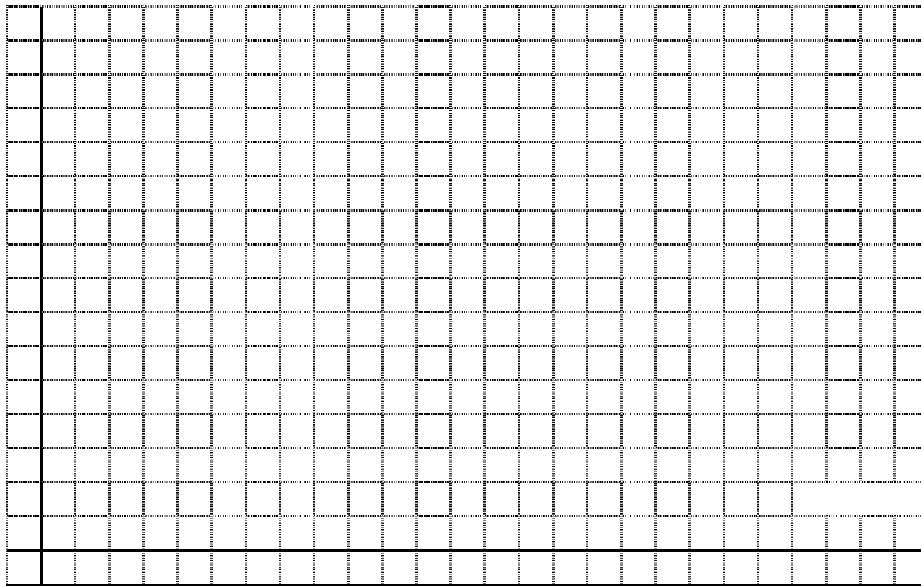
Het toerental in functie van het koppel kent dus een gelijkaardig verloop met de toerental-stroom karakteristiek vermits koppel en ankerstroom een lineair verband kennen bij de OB-motor. De toerentalkarakteristiek snijdt de Y-as in  $\frac{U_a}{k_1 \cdot \phi}$  en heeft een negatieve richtingscoëfficiënt  $- \frac{R_{a,tot}}{k_1 \cdot \phi \cdot k_2 \cdot \phi}$ .

Uit de bovenstaande formule volgt dat een conventionele snelheidsregeling op drie mogelijke manieren geïmplementeerd kan worden, nl. door de ankerspanning of door het veld of door de ankerweerstand te regelen.

### 3.13.1 Regeling van de ankerspanning

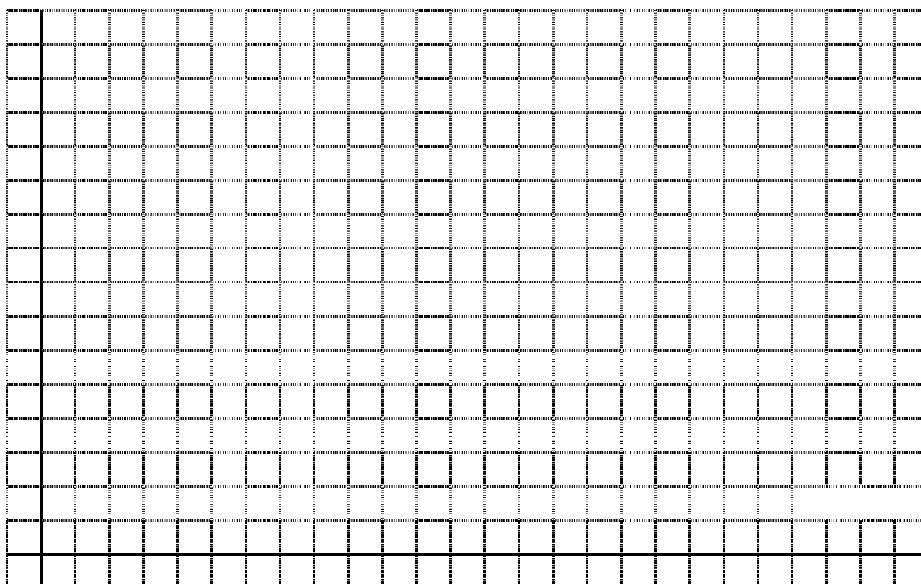
Stel in onderstaande grafiek het toerental voor in functie van het koppel. Wordt de flux  $\phi$  in grootte en zin constant gehouden én wordt de ankerweerstand eveneens constant gehouden, dan zal het toerental qua grootte en zin afhankelijk zijn van de grootte en de zin van de ankerspanning. Bij het verlagen van de ankerspanning, zal de rico gelijk blijven maar het snijpunt met de Y-as, nl.  $\frac{U_a}{k_1 \cdot \phi}$ , komt lager te liggen. De lijnen van constante ankerspanning verschuiven parallel.

Wordt de belastingskarakteristiek  $M_t$  op dezelfde figuur voorgesteld, dan zullen de opeenvolgende werkingspunten (snijpunten tussen beide karakteristieken) tonen dat het toerental daalt. Stel in onderstaande grafiek de oorspronkelijke grafiek toerental-koppel-karakteristiek voor onderhevig aan  $U_{a,n}$ , en de opeenvolgende  $U_{a,1}; U_{a,2}$ ; enz. samen met  $M_t$ . Beschouw  $U_{a,n} > U_{a,1} > U_{a,2}$ . Duid de resp. werkingspunten en de toerentalvariatie aan.



### 3.13.2 Regeling van de ankerweerstand

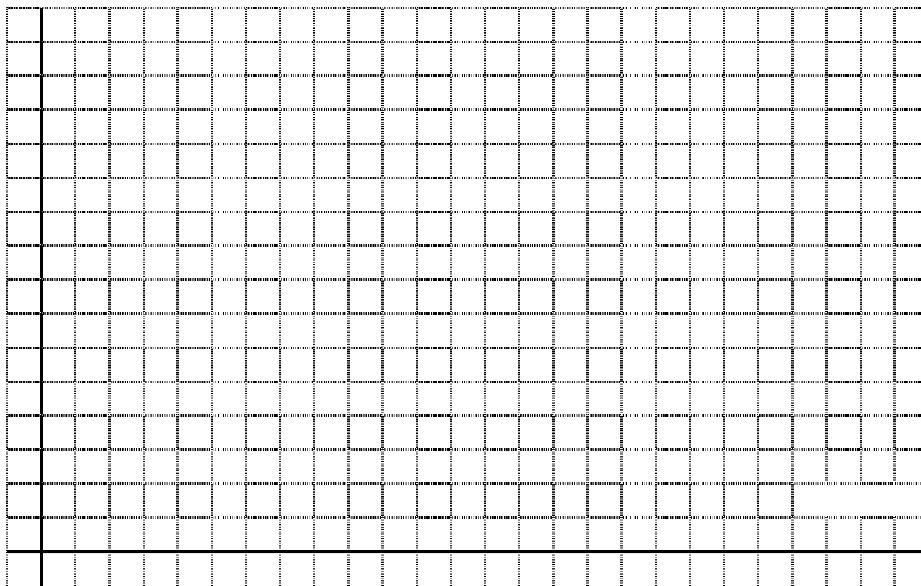
Stel in onderstaande grafiek het toerental voor in functie van het koppel. Bij het constant houden van de ankerspanning en de flux, zal bij het verhogen van de ankerweerstand - door middel van een voorschakelweerstand - de rico verhogen. Alle lijnen van constante ankerweerstand snijden de Y-as in hetzelfde punt, nl.  $\frac{U_a}{k_1 \cdot \phi}$ . Het toerental zal verlagen bij stijgende ankerweerstand. Duid de resp. werkingspunten en toerentalvariatie aan ( $R_{a,tot} < R_{a,tot1} < R_{a,tot2}$ ).



### 3.13.3 Regeling van de flux

Stel in onderstaande grafiek het toerental voor in functie van het koppel. Bij het constant houden van de ankerspanning en de ankerweerstand, zal bij het verlagen van de flux het snijpunt met de Y-as, nl.  $\frac{U_a}{k_1\Phi}$  hoger komen te liggen en de richtingscoëfficiënt zal toenemen.

Het toerental zal dus toenemen.



### 3.14 Aanloopstroombeperking

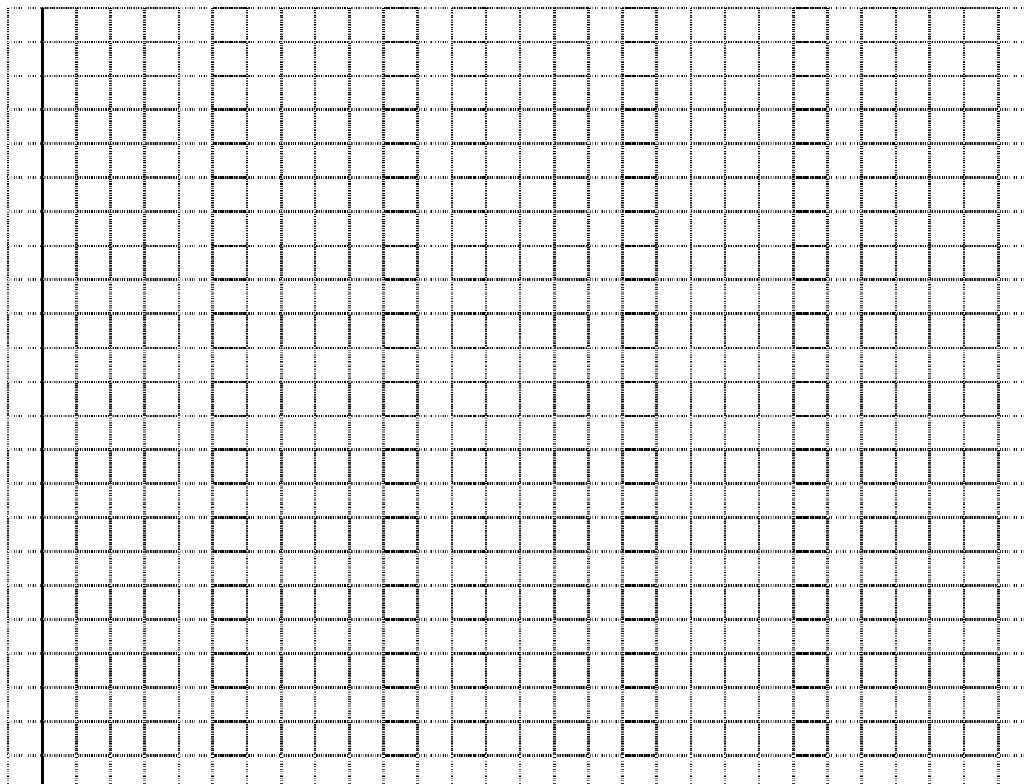
---

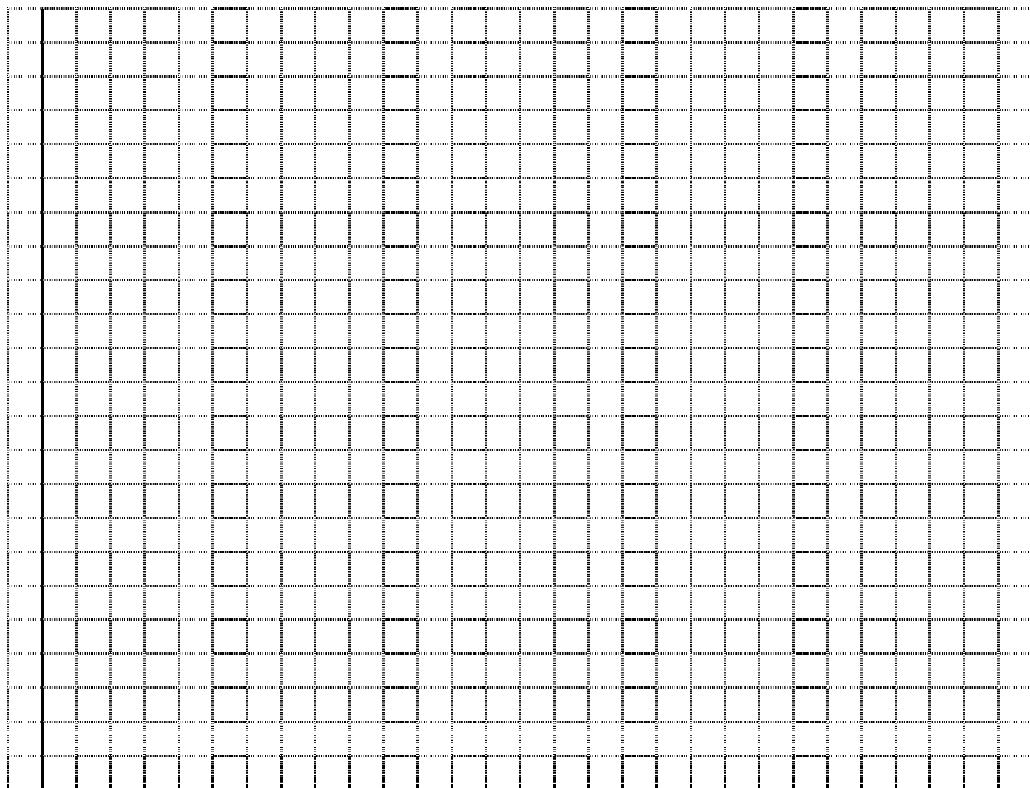
Indien een gelijkstroommotor ingeschakeld wordt op de nominale ankerspanning, dan zal op het ogenblik van starten, het toerental 0 bedragen. Hierdoor zal ook de tegenemk 0 zijn. De stroom zal op het ogenblik van starten dus zeer groot zijn enerzijds vanwege de afwezigheid van de tegenemk maar anderzijds vanwege de kleine, totale ankerweerstand. De aanloopstroom of inschakelstroom wordt dus bepaald door de verhouding van de ankerspanning tot de totale ankerweerstand. Enkel voor motoren van klein vermogen kan direct inschakelen toegepast worden.

De aanloopstroom wordt gegeven door

$$I_{a,aan} = \frac{U_a}{R_{a,tot}}$$

en kan dus gereduceerd worden door ofwel de ankerspanning te verlagen of door de totale ankerweerstand te verhogen d.m.v. een aanzetweerstand. Naarmate de motor op snelheid komt, kan de aanzetweerstand geleidelijk verminderd worden of de ankerspanning terug opgedreven worden. Stel beide mogelijkheden voor in onderstaande grafieken. Maak hierbij gebruik van de kennis van de paragrafen 1.13.1 en 1.13.2.





### 3.15 Oefeningen

---

#### 3.15.1 Oefening 1

**Gegeven :** Een gelijkspanningsdynamo met een klemspanning van 230 V levert een ankerstroom van 100 A. Het gedissipeerde kopervermogen bedraagt 3% van het afgegeven vermogen. Het aandrijvende werktuig geeft een vermogen af van 25,5 kW.

#### Gevraagd

0. Stel schematisch de vermogenverdeling voor.

1. Het rendement ( $\eta = 89,84\%$ )

2. Het inwendig vermogen (23,69 kW)

3. De ijzer- en wrijvingsverliezen (1,91 kW)

### 3.15.2 Oefening 2

**Gegeven :** Een dynamo wekt een emk op 110 V en levert een ankerstroom van 50 A. Het actief vermogen te wijten aan de koperwikkeling bedraagt 4 % van het inwendig vermogen. Het rendement van de machine is 84 %

**Gevraagd :**

**0.** Stel schematisch de vermogenverdeling voor.

**1.** Het inwendig vermogen (5,5 kW)

**2.** Het nuttig vermogen (5,28 kW)

**3.** De mechanische verliezen (0,788 kW)

### 3.15.3 Oefening 3

**Gegeven :** Een 230 V-gelyksstroommotor van 10 kW neemt een ankerstroom op van 50 A. Het actief vermogen dat gedissipeerd wordt in de koperwikkeling bedraagt 600 W.

**Gevraagd :**

0. Stel schematisch de vermogenverdeling voor.

1. Het rendement ( $\eta = 86,96 \%$ )

2. Het inwendig vermogen (10,9 kW)

3. De ijzer- en wrijvingsverliezen (0,9 kW)

### 3.15.4 Oefening 4

**Gegeven :** Een 4 kW - 110V-gelijkstroommotor neemt een ankerstroom op van 40 A. De tegenemk bedraagt 106 V.

**Gevraagd :**

**0.** Stel schematisch de vermogenverdeling voor.

**1.** De mechanische verliezen (0,24 kW)

**2.** De koperverliezen (0,16 kW)

**3.** Het rendement ( $\eta = 91\%$ )

### 3.15.5 Oefening 5

**Gegeven :** Gegeven : Een 110V-gelijkstroommotor heeft een totale ankerweerstand van 0,2 ohm. Het vermogen is 8 kW terwijl het rendement 84 % bedraagt.

**Gevraagd :**

0. Stel schematisch de vermogenverdeling voor.

1. De opgenomen stroom (86,6 A)

2. De koperverliezen (1,5 kW)

3. De ijzer- en wrijvingsverliezen (0,024 kW)

### 3.15.6 Oefening 6

**Gegeven :** Een OB-motor is aangesloten op 230 V. De ankerweerstand is 2 ohm. De nominale ankerstroom is 10 A. De toegelaten aanzetstroom is tweemaal de nominale stroom.

**Gevraagd :**

1. Som 1 of meerdere oplossingen op en maak de bijhorende berekening.

$$(R_a = 9,5 \text{ ohm ofwel } U_a = 40 \text{ V})$$

### 3.15.7 Oefening 7

**Gegeven :** Een OB-motor is aangesloten op 750 V. De ankerweerstand is 0,1 ohm en de veldweerstand 55 ohm. De veldwikkeling is aangesloten op 110 V. De nominale ankerstroom is 100 A. Het vollastrendement is 84 %.

**Gevraagd :**

1. De tegenemk (740 V)

2. Het asvermogen (63 kW)

3. Het askoppel bij 500 tpm ( $M_n = 1203 \text{ Nm}$ )

4. De aanzetweerstand als de aanzetstroom 1,5 keer de nominale stroom is ( $R_a = 4,9 \text{ ohm}$ )

5. De veldstroom ( $I_v = 2 \text{ A}$ )

### **3.15.8 Oefening 8**

**Gegeven :** Een OB-motor heeft een nominale ankerspanning van 440 V, het nominale vermogen van 30 kW bij 500 tpm. De ankerweerstand is 0,4 ohm. De nominale vollastankerstroom is 75 A.

## Gevraagd :

1. De ankerstroom bij het aanzetten als de spanning verlaagd werd naar 50 V ( $I_a = 125$  A)
  2. Het nominale askoppel ( $M_n = 573$  Nm)
  3. Het aanzetkoppel als het inwendig koppel en het askoppel aan elkaar mogen gelijkgesteld worden ( $M_{st} = 955$  Nm )

### 3.15.9 Oefening 9

**Gegeven :** Een OB-motor heeft een nominale ankerspanning van 230 V. De ankerweerstand is 0,2 ohm en de veldweerstand is 110 ohm. De motor neemt een ankerstroom op van 50 A en draait aan 1000 tpm. Het rendement bij deze belasting is 85 %.

**Gevraagd :**

1. De tegenemk (220 V)

2. Het inwendig koppel (105,04 Nm)

3. Het uitwendig koppel (93,34 Nm)

4. Het toerental als de motor nu minder belast wordt en slechts nog 30 A opneemt (1018,18 tpm)

**3.15.10 Oefening 10**

**Gegeven :** Als de OB-motor aangesloten is op een spanning van 230 V bedraagt het toerental 600 tpm bij een opgenomen ankerstroom van 190 A. De ankerweerstand is 0,05 ohm en de veldweerstand is 22 ohm.

**Gevraagd :**

1. De tegenemk bij deze belasting (220,5 V)
  
2. De tegenemk indien de belasting afneemt en de ankerstroom nog 90 A is (225,5 V)
  
3. Het toerental bij de tweede belasting (613,61 tpm). Geef tevens de grafische voorstelling.
  
4. De verhouding der inwendige koppels (2,11). Geef de grafische voorstelling.

**3.15.11      Oefening 11**

**Gegeven :** De OB-motor is aangesloten op een spanning van 230 V. Bij een ankerstroom van 60 A is het toerental 1070 tpm. De ankerweerstand is 0.1 ohm en de veldweerstand is 55 ohm. De motor wordt meer belast waardoor het toerental daalt tot 1050 tpm.

**Gevraagd :**

1. Welke ankerstroom wordt nu door de motor opgenomen ? (101,9 A)

**3.15.12 Oefening 12**

**Gegeven :** De OB-motor is aangesloten op een spanning van 230 V. Bij een ankerstroom van 60 A is het toerental 800 tpm. De ankerweerstand is 0,3 ohm en de veldweerstand is 110 ohm.

**Gevraagd :**

1. Bereken het toerental wanneer de motor onbelast draait. De anker nullaststroom bedraagt 4A (863,4 tpm)

**3.15.13 Oefening 13**

**Gegeven :** De OB-motor is aangesloten op een spanning van 230 V. De veldspanning is 230 V. Bij 800 tpm is de ankerstroom 18 A. De ankerweerstand is 0,5 ohm en de veldweerstand is 110 ohm. Het anker en het veld worden nu op een lagere spanning van 110 V aangesloten. De ankerstroom bedraagt 11 A.

**Gevraagd :**

**1.** Het toerental bij 11 A als de flux 75 % is van zijn oorspronkelijke waarde (504,37 tpm)

**2.** De verhouding der inwendige koppels (2,18)

**3.15.14 Oefening 14**

**Gegeven :** De OB-motor is aangesloten op een spanning van 230 V. Het nullasttoerental is 500 tpm. De veldspanning is 230 V en de veldweerstand is 115 ohm. Het verband tussen veldstroom en flux wordt gegeven door :

Veldstroom (A)	0,5	1,0	1,5	1,75	2,0
Flux (Wb)	6,0	9,0	11,0	11,7	12

**Gevraagd :**

1. De weerstand die in de veldketen moet worden geschakeld om een toerental van 1000 tpm te bekomen (345 ohm)

**Gegeven :** De OB-motor is aangesloten op een spanning van 230 V. Het nullasttoerental is 500 tpm. De veldspanning is 230 V en de veldweerstand is 115 ohm. Het verband tussen veldstroom en flux wordt gegeven door :

Veldstroom (A)	0.5	1.0	1.5	1.75	2.0
Flux (Wb)	6.0	9.0	11.0	11.7	12

**2.** Het toerental bij nullast als in de veldketen een weerstand van 36,8 ohm wordt opgenomen (545 tpm)

**3.15.15 Oefening 15**

**Gegeven :** De OB-motor heeft een nominale spanning van 440 V. De ankerweerstand is 0,3 ohm. De OB-motor met een nominaal toerental van 500 tpm drijft een werktuig aan waarvan het koppel constant is. De opgenomen ankerstroom is 100 A.

**Gevraagd :**

1. Het toerental als de ankerspanning wordt ingesteld op 100 V ( 85 tpm ). Stel grafisch voor.

**3.15.16 Oefening 16**

**Gegeven :** Een OB-motor heeft volgende kenmerken :  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 6$ ,  $R_{a,tot} = 1 \text{ ohm}$ ,  $\phi_{nom} = 100 \text{ mWb}$ ,  $U_{a,nom} = 150 \text{ V}$ ,  $I_{a,nom} = 10 \text{ A}$ . De motor drijft een werktuig aan met een lineaire karakteristiek die gegeven wordt door de vergelijking  $M = 0,0025 n$ .

**Gevraagd :**

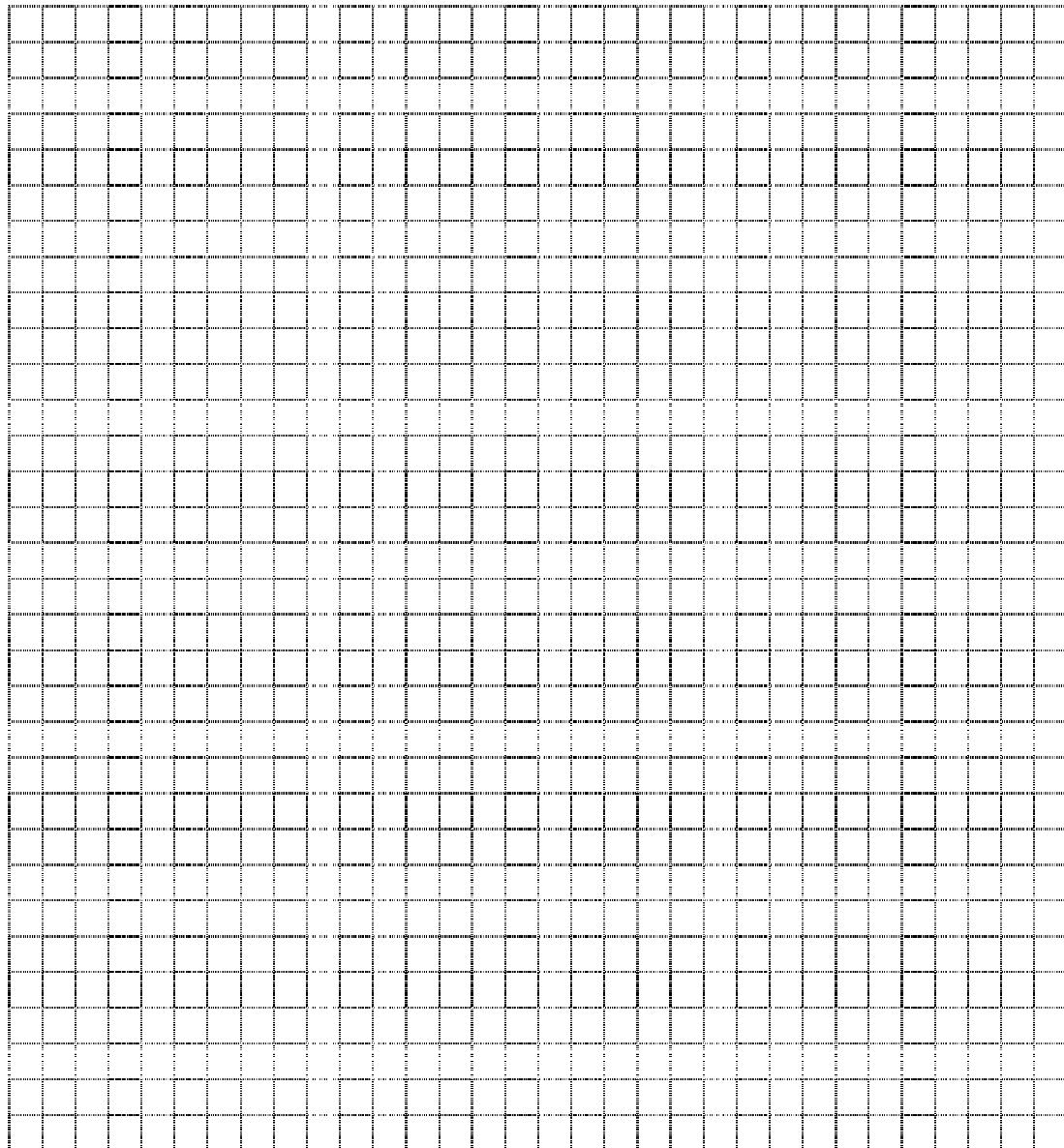
1. Het nominaal toerental (1400 tpm)

2. Het nominaal koppel (6 Nm)

3. De coördinaten van het werkingspunt (3,6 Nm, 1440 tpm)

4. De ankerstroom en ankerspanning als het werktuig aan 800 tpm draait (3,33 A ; 83,3 V)

5. De grafische voorstelling in het (M,n)-assenstelstel van beide bedrijfstoestanden.



---

**Hoofdstuk 4 Aanbevolen handboeken elektrische machines - Literatuurlijst**


---

Enkele aanbevolen boeken zijn op de volgende pagina opgesomd. De boeken zijn in mijn bezit. Op aanvraag kunnen deze eens ontleend worden.

Titel	Auteur(s)	Uitgeverij
-------	-----------	------------

<b>Algemene Elektrotechniek</b>	Prof. Dr. Ir. W. Geysen Prof. Dr. Ir. G. Belmans	Garant Leuven
---------------------------------	---	------------------

<b>Elektrische Machines en Aandrijvingen</b>	Prof. Dr. Ir. W. Geysen Prof. Dr. Ir. G. Belmans	Garant Leuven
--	---	------------------

Boek 1 Transformatoren

Gelijkstroommachines

Boek 2 Wisselstroommachines

<b>Serie Elektrotechniek</b>	L. Claerhout	Plantyn
<b>Elektriciteit II</b>	H. Cooreman M. De Bruyn	Antwerpen

<b>Serie Elektrotechniek +Elektriciteit 3</b>	L. Claerhout V. Dekelver F. de Schepper	Plantyn Antwerpen
---	---	----------------------

<b>Elektrotechniek</b>	Ing. W. Dekie	Story-Scientia
2. Wisselstroommachines		Gent-Leuven-
a. Transformatoren en Driefasen-inductiemotoren		Antwerpen- Brussel

<b>Elektrische energie-omzetting</b>	Ing. E.H. Knol	Nijgh
1. Basisprincipes	Ing. Th.P. van Pelt	Van Ditmar
2a Gelijkstroommachines		Rijswijk NL
2b Energietechniek voor elektronici		
3 Wisselstroommachines		

**Elektriciteit**

M.A.J. op 't Roodt

J. Van In

Elektrische Machines

**Elektrische Machines**

H. Vandenheede

Die Keure

D1 Gelijkstroomgeneratoren

L. Verschaeve

Brugge

D2 Gelijkstroommotoren

**Elektrische Machines**

H. Vandenheede

Die Keure

D3 Wisselstroomgeneratoren

L. Verschaeve

Brugge

D4 Distributiesystemen

D5 Transformatoren

**Elektriciteit & Lab**

Ivan Maesen

Plantyn

Omvormers

Jo Hovaere

Eenfasige en driefasige wisselstroomnetten en verbruikers

Actuatoren