

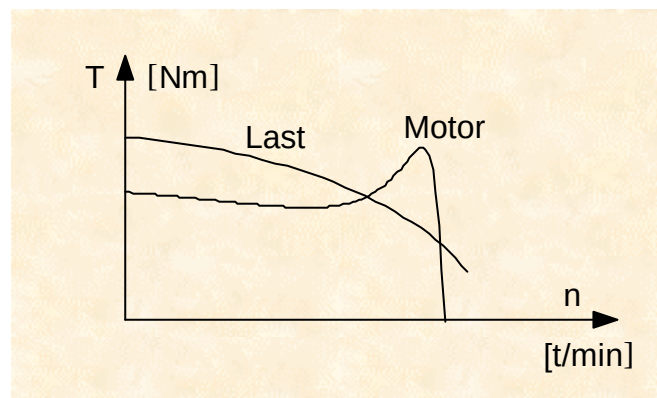
HOOFDSTUK 3

GEBRUIK VAN DE INDUCTIEMACHINE

3.1 Starten

Bij het starten van een inductiemotor vloeit een stroom die veel groter is dan de nominale. Als gevolg van de inwendige impedantie van het net treedt er een spanningsval op. Omdat deze spanningsval hinderlijk is voor andere verbruikers (bijv. daling van de lichtsterkte van gloeilampen), moet de inschakelstroom beperkt worden. Daarnaast moet deze intense stroom ook beperkt worden om beschadiging van de motorwikkeling te voorkomen.

Er is een toestemming van de stroomleverancier vereist, indien motoren worden geplaatst die veelvuldig starten of starten zonder aanloopinrichting. Indien de verbruiker over een eigen net beschikt, kan elke motor rechtstreeks gestart worden. Er moet altijd rekening worden gehouden met eventuele mechanische beschadigingen van de motor en met het tegenwerkend koppel. Indien dit groter is dan het aandrijvend koppel, loopt de motor niet aan (figuur 3.1).



figuur 3.1 *Aandrijfaggregaat met te hoog aanloopkoppel*

Om dit laatste tegen te gaan, worden speciale inductiemotoren met verhoogd aanloopkoppel gebouwd. De keuze van de motor en van de startmethode wordt vooral bepaald door de aard van de belasting (koppel-toerentalkarakteristiek). Deze ganse startproblematiek is sterk vereenvoudigd door de voeding van motoren met frequentie-omvormers. Indien dit immers het geval is, kan de machine belast aanlopen zonder een zware startstroom uit het net te trekken.

3.1.1 Directe aanloop

De startstroom is 4 tot 7 keer de nominale stroom. Grotere motoren (bijv. 10 kW) worden slechts op deze manier gestart, als ze op een net met een voldoende lage inwendige impedantie aangesloten zijn.

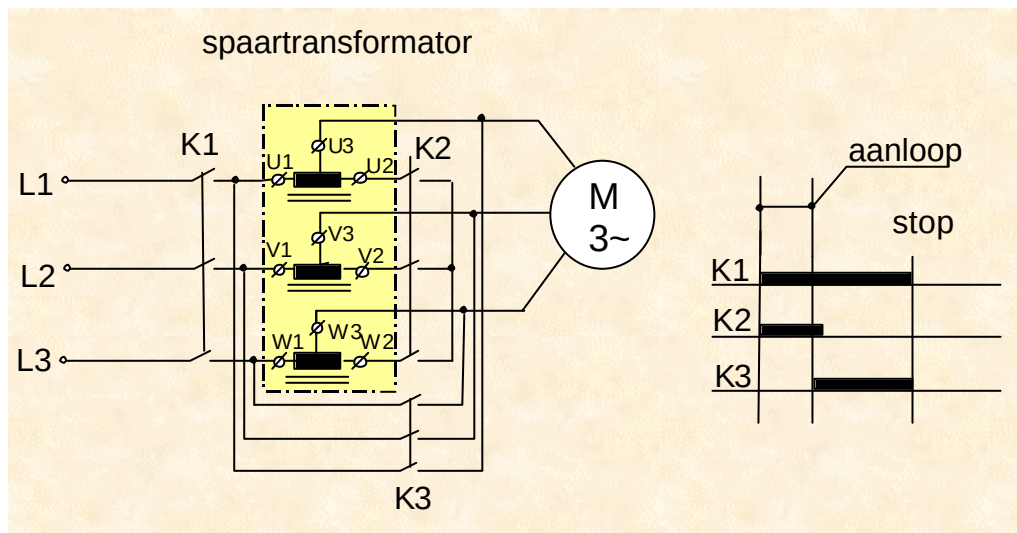
3.1.2 Aanloop onder verminderde spanning

De maatregelen om de aanloopstroom bij kooirotormotoren te beperken, komen meestal neer op voeding van de motor tijdens de aanloop met een verminderde spanning. Vermits het motorkoppel volgens (2.42) evenredig is met het kwadraat van de spanning, vermindert het aanloopkoppel in dit geval kwadratisch. Dit kan gewenst zijn om gevaarlijke koppelstoten te vermijden of om de versnelling te beperken. Omwille van de koppelvermindering kan men deze aanloopmethode enkel toepassen bij nullastanaanloop of aanloop met laag lastkoppel.

3.1.2.1 Aanloop met een spaartransformator

De schakeling is in figuur 3.2 weergegeven. Indien k_t de transformatieverhouding van de spaartransformator is en U_N de lijnspanning van het net, dan is de lijnspanning U_m aan de motorklemmen:

$$U_m = k_t U_N \quad \text{met} \quad k_t < 1 \quad (3.1)$$



figuur 3.2 *Aanloop met spaartransformator*

Indien Z_m de equivalente sterimpedantie van een motorfase is bij stilstaande rotor, gezien vanuit de statorklemmen, dan is de lijnstroom aan de motorzijde bij start:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{3} Z_m} = \frac{U_N k_t}{\sqrt{3} Z_m}. \quad (3.2)$$

Aan de netzijde bedraagt de stroom:

$$I_N = k_t I_m = k_t^2 I_{N1} \quad (3.3)$$

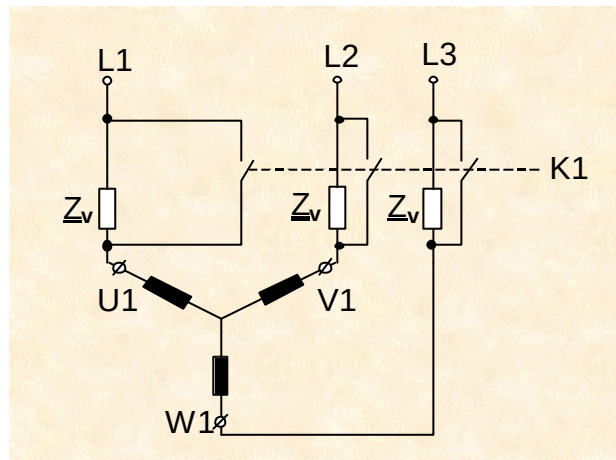
Hierbij is I_{N1} de netstroom bij het starten onder de volle spanning U_N .

De netstroom is k_t^2 maal kleiner dan bij directe aanloop. Daar het aanloopkoppel kwadratisch vermindert met de motorspanning, vermindert het eveneens met de factor k_t^2 ten opzichte van het startkoppel bij directe aanloop.

3.1.2.2 Aanloop met voorschakelimpedanties in de statorketen

Om de aanloopstroom te beperken kan men ook drie identieke impedanties Z_Y in de statorketen opnemen (figuur 3.3). Indien U_N de lijnspanning is van het net en U_m de lijnspanning aan de motorklemmen, geldt:

$$k_Z = \frac{U_m}{U_N} = \left| \frac{Z_m}{Z_m + Z_Y} \right| < 1 \quad (3.4)$$



figuur 3.3 *Aanloop met statorvoorschakelimpedantie*

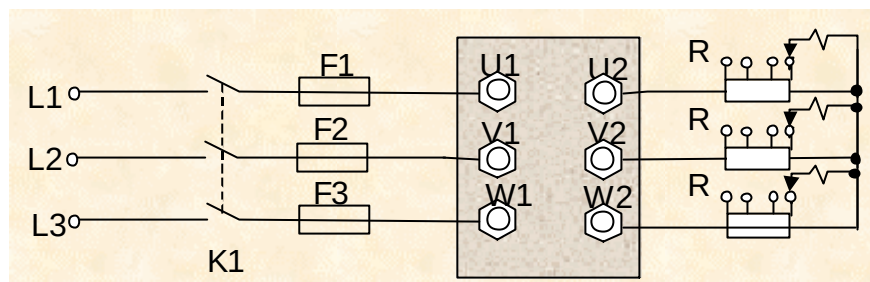
Z_m is de equivalente sterimpedantie van de motorfase bij stilstaande rotor en Z_Y de statorvoorschakelimpedantie. De stroom aan de netzijde is:

$$I_N = I_m = k_Z I_{N1} \quad (3.5)$$

De netstroom is k_Z maal kleiner dan bij directe aanloop. Het aanloopkoppel daalt met een factor k_Z^2 want het aanloopkoppel is evenredig met het kwadraat de spanning. Uit (3.5) blijkt dat bij hetzelfde aanloopkoppel, de aanloopstroom in het net minder daalt dan bij een spaartransformator.

Als voorschakelimpedanties kunnen zowel spoelen als weerstanden gebruikt worden. Het koppelverloop bij voorgeschakelde spoelen is gunstiger, maar spoelen zijn veel duurder dan weerstanden. Ondanks de verliezen in de voorschakelweerstand, wordt deze aanloop-methode veel toegepast bij kleinere motoren.

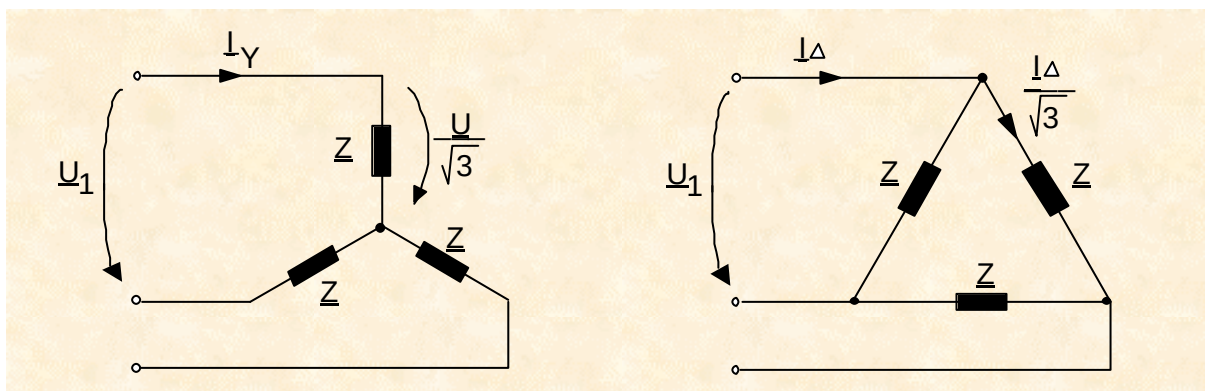
In figuur 3.4 staat de motor in ster. De supplementaire statorweerstand zijn aan de kant van het sterpunt opgenomen en kunnen in meerdere stappen uitgeschakeld worden.



figuur 3.4 Statorvoorschakelweerstand langs het sterpunt

3.1.2.3 Ster-driehoekaanloop

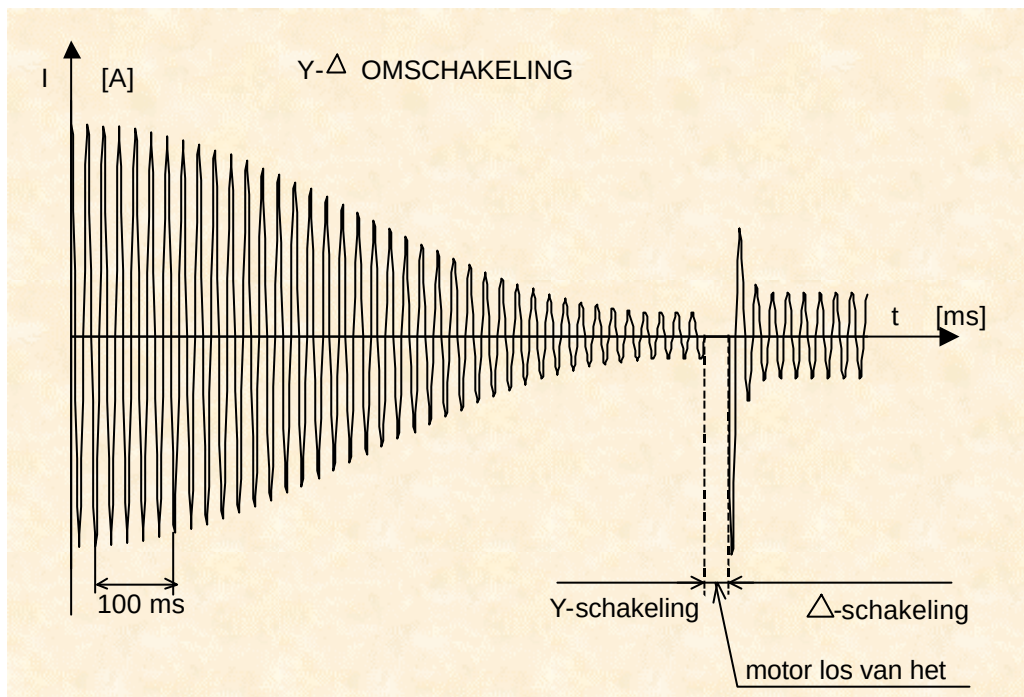
De motor loopt aan met de statorwikkeling in ster. Heeft de motor vrijwel het nominale toerental bereikt, dan wordt de statorwikkeling in driehoek geschakeld. Bij deze aanloopmethode worden het aanloopkoppel en de netaanloopstroom teruggebracht tot $1/3$ van de waarde die men zou krijgen bij directe inschakeling met de statorwikkeling in driehoek. Bij driehoekschakeling staat de volle netspanning over een fase en is de net- of lijnstroom $\sqrt{3}$ maal de fasestroom. Bij sterschakeling is de fasespanning $1/\sqrt{3}$ maal de netspanning, zodat de fasestroom en daarmee de netstroom $1/\sqrt{3}$ maal de fasestroom bij driehoekschakeling is, dat wil zeggen $1/3$ van de netstroom bij driehoek-schakeling (figuur 3.5).



figuur 3.5 Principe van de ster-driehoek aanloop

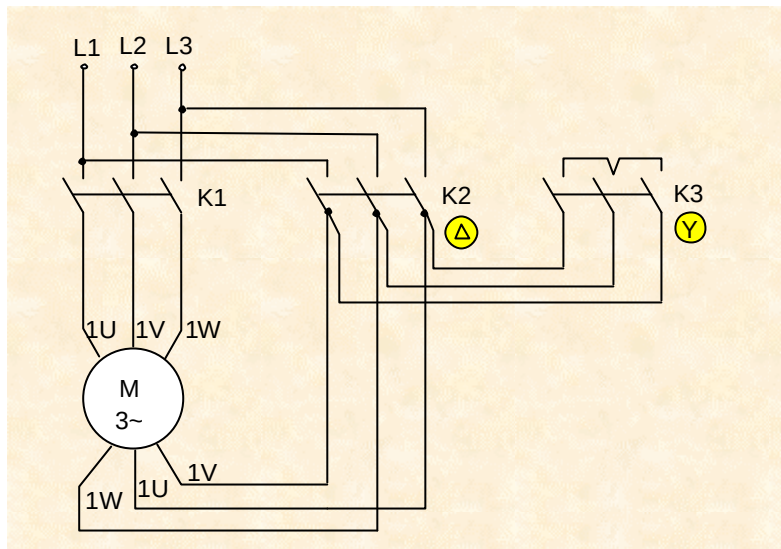
Daar het koppel evenredig is met het kwadraat van de fasespanning, bedraagt bij ster-schakeling het aanloopkoppel een derde van het aanloopkoppel bij driehoekschakeling.

In figuur 3.6 wordt het verloop van de lijnstroom weergegeven bij een motor, die in nullast met een ster-driehoekschakelaar wordt gestart. De startstroom is ongeveer 10 maal de regimestroom bij ster, en 4 maal de regimestroom bij driehoek. Het kleine tijdsinterval tijdens het omschakelen van ster naar driehoek, waarin geen stroom vloeit, heeft praktisch geen invloed op het toerental. Er treden wel grote stroompieken op juist na de overschakeling van ster naar driehoek.



figuur 3.6 Stroomverloop bij Y - Δ aanloop

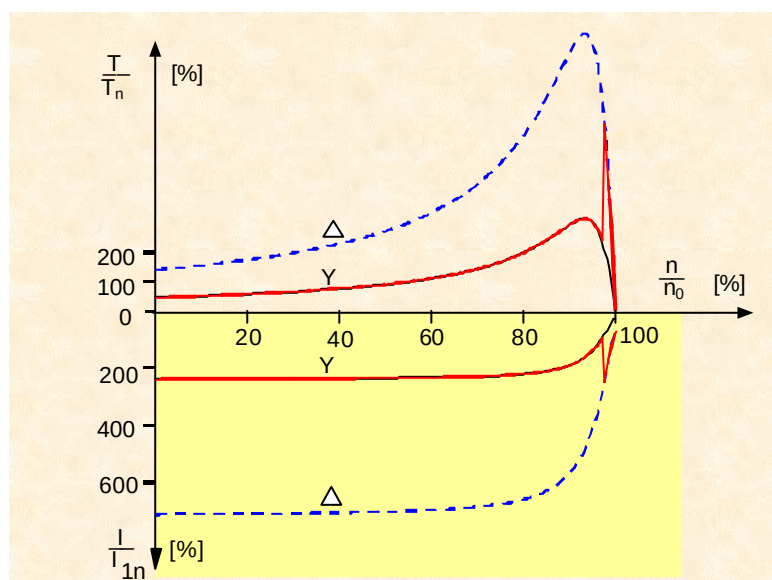
In figuur 3.7 is het schema van de ster-driehoekschakeling gegeven. Bij het starten worden de hoofdschakelaar K1 en de sterschakelaar K3 gesloten. Na een bepaalde tijd wordt K3 geopend. Vervolgens wordt de driehoekschakelaar K2 gesloten. De hoofdschakelaar K1 blijft gesloten.



figuur 3.7 Schakelschema voor de Y - D aanloop

Op de kenplaat van een driefasige motor wordt de nominale spanning gewoonlijk aangegeven in de vorm $U/U\sqrt{3}$ V (bijv. 230/400 V). Dit betekent dat men de motor in driehoekschakeling met een netspanning van U voedt. In sterschakeling is de spanning $U\sqrt{3}$. Indien men deze motor wil starten met een Y - Δ schakelaar, moet de netspanning U zijn, zowel in ster als in driehoek.

De koppel-toerentalkarakteristiek van een inductiemotor met Y - Δ schakeling is weergegeven op figuur 3.8. Onderaan op de figuur is het stroomverloop getekend. Bemerk de stroompiek bij het overschakelen van Y naar Δ.



figuur 3.8 Stationaire koppel-toerental en stroom-toerental karakteristiek bij Y - D aanloop

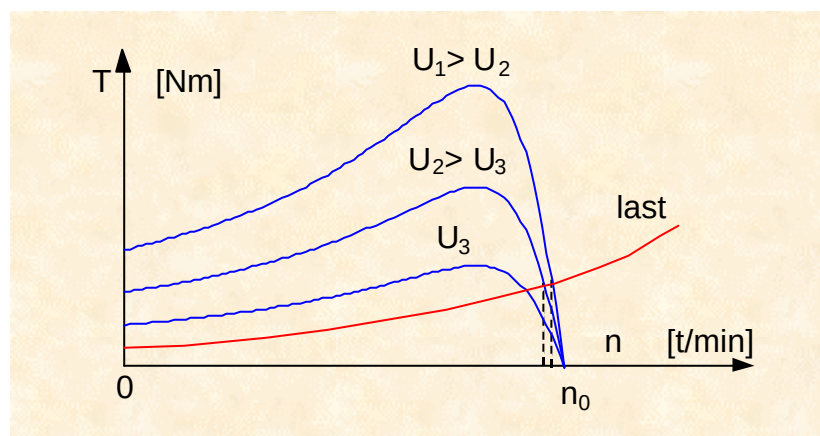
De overschakeling van ster naar driehoek moet gebeuren bij een toerental zo dicht mogelijk bij het nominaal toerental. Indien dit niet gebeurt, treedt bij overschakeling een enorme stroomstoot op die de thermische beveiligingen aanspreekt.

Soms is in ster het motorkoppel te klein om de combinatie motor-last op een voldoende hoog toerental te brengen. In plaats van dan vroeger over te schakelen naar driehoek en uitval te vermijden door de beveiligingen te verzwaren, is het beter het vereiste motoraanloopkoppel te verkleinen. Zo kan men bij ventilatoren en compressoren de luchtkleppen bij aanloop sluiten. Indien dit niet mogelijk is, moeten duurdere aanloopmethodes gebruikt worden.

3.1.2.4 Softstarters

Bij gelijkstroombmotoren kan de snelheid geregeld worden door de ankerspanning te regelen. Door bij een inductiemotor de statorspanning te verminderen, komt de koppel-toerentalkarakteristiek lager te liggen. De slip neemt een weinig toe, maar de snelheid daalt praktisch niet. Dit is zeker geen goede snelheidsregeling.

Deze regeling kan wel toegepast worden om de start- of aanzetstroom van een motor te beperken. Met vermogenelektronische schakelaars wordt de spanning geleidelijk en in functie van de gewenste aanzetstroom ingeschakeld (figuur 3.9). In de handel wordt dit toestel onder de naam softstarter verkocht.



figuur 3.9 *Koppel - toerentalkarakteristiek bij een softstarter*

Tot de wezenlijke functies van deze elektronische motorstarters behoren:

- soepel aanlopen,
- aanloopstroombegrenzing,
- soepel uitlopen,
- energie besparen tijdens deellast.

3.1.3 Aanloop met supplementaire rotorweerstand

De startstroom van een inductiemotor met bewikkelde rotor wordt beperkt door in de rotorketen een impedantie te plaatsen. Een reactantie beperkt weliswaar de stroom I_2 in de rotor, maar veroorzaakt een bijkomende faseverschuiving tussen de rotorstroom I_2 en de secundair geïnduceerde spanning E_2 . Aangezien het motorkoppel evenredig is met de cosinus van deze faseverschuiving, wordt een regelbare weerstand in de rotorketen geplaatst. Dit heeft een vermindering van de faseverschuiving tussen I_2 en E_2 tot gevolg. In dit geval kan het koppel, ondanks de verlaging van de rotorstroom I_2 , constant blijven of zelfs groter worden. Het kippkoppel is onafhankelijk van de rotorweerstand, de slip, waarbij dit kippkoppel optreedt, niet

$$s_{\text{kip}} = \frac{\beta}{\sigma} \cong \frac{R_2'}{X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}} \quad (3.6)$$

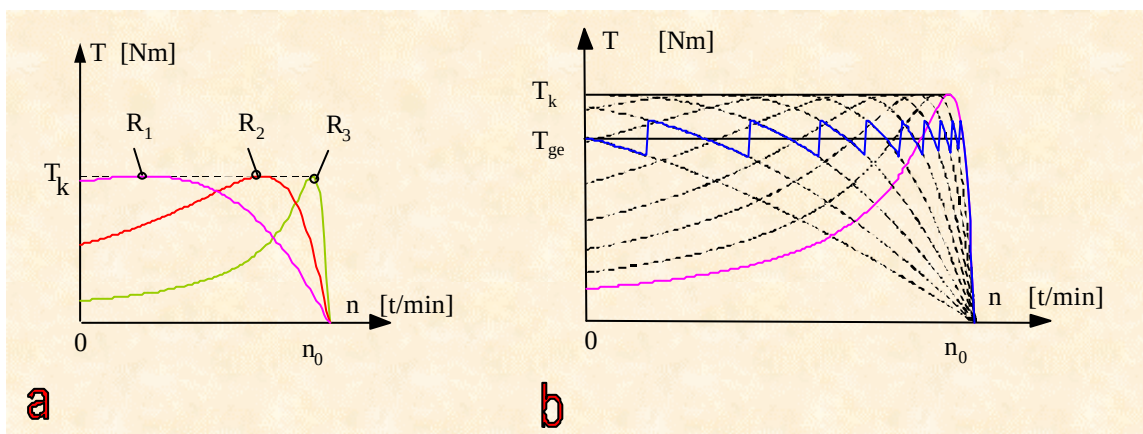
Door het plaatsen van een bijkomende rotorweerstand wordt s_{kip} groter. Het startkoppel wordt maximaal indien:

$$s_{\text{kip}} = 1$$

De koppel-slipkarakteristieken voor verschillende rotorweerstand zijn gegeven in

figuur 3.10a. In

figuur 3.10b is het verloop van de koppel-toerentalkarakteristiek gegeven, indien de rotorweerstand in verschillende stappen wordt uitgeschakeld.



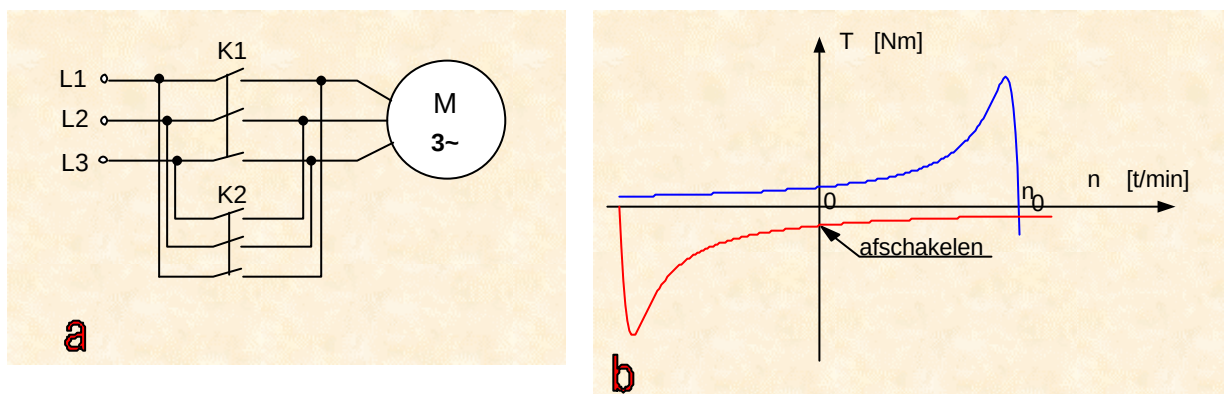
figuur 3.10 Koppel - toerentalkarakteristiek met rotor voorschakelweerstand

3.2 Remmen

3.2.1 Tegenstroomremming

Een inductiemotor heeft in normale bedrijfstoestand een kleine slip ($s \approx 0,5 \dots 5\%$). Als men twee netdraden omwisselt (figuur 3.11a), wordt de slip (2-s). Het koppel keert om en de motor wordt afgeremd. Bij het gebruik van deze remmethode moet er een "remwachter" geïnstalleerd worden; deze schakelt de machine van het net als de motor stilstaat. Indien dit niet gebeurt, loopt de motor in de omgekeerde zin aan.

De motor met sleepringrotor leent zich beter tot het gebruik van deze remmethode dan de motor met kooirotor. In dat geval kunnen weerstanden ingeschakeld worden in de rotorketen en kan een hoger remkoppel bekomen worden, zonder dat de stromen ontoelaatbaar groot worden. Wanneer deze remmethode wordt toegepast op de kooirotor, moet wel gelet worden op de warmteontwikkeling in de rotor.

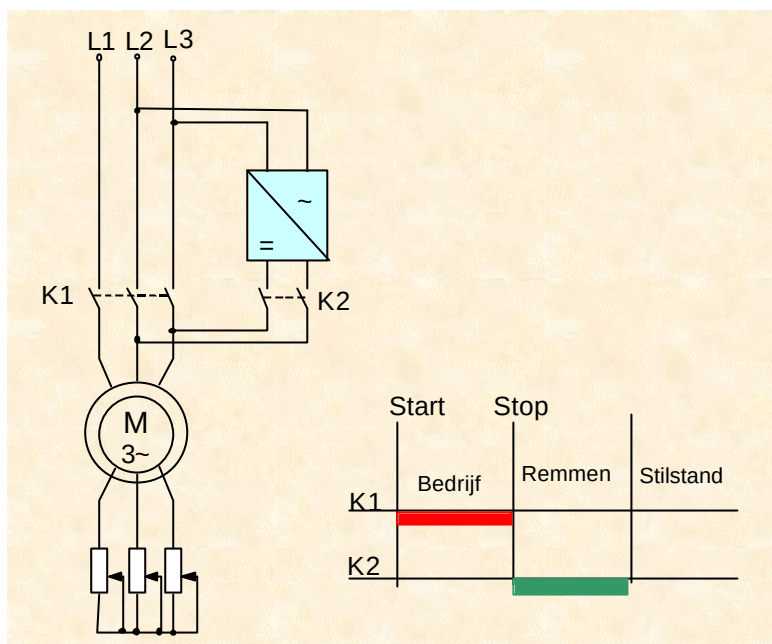


figuur 3.11 *Principe van tegenstroomremming, schakelschema (a) en koppel-toerentalkarakteristiek (b)*

3.2.2 Gelijkstroomremming

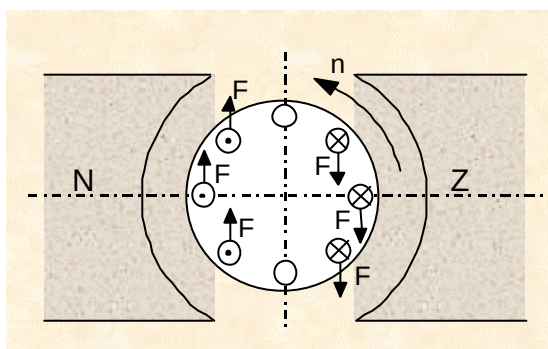
Omwille van de onstabiele remkarakteristiek bij tegenstroomremming van sleepringrotor-motoren en de grote stromen bij kooirotor-motoren zoekt men andere elektrische rem-methodes met een gunstigere koppel-toerentalkarakteristiek en een geringere thermische belasting. De gelijkstroomremming voldoet aan deze voorwaarden.

Bij gelijkstroomremming worden de statorwikkelingen eerst van het voedende net afgeschakeld en vervolgens verbonden met een gelijkstroomnet (figuur 3.12). Bij gebruik van een frequentie-omvormer kan door het gepast schakelen voor de snelheidsregeling (zie 3.3.3) van de omvormer direct een gepaste gelijkstroom bekomen worden.



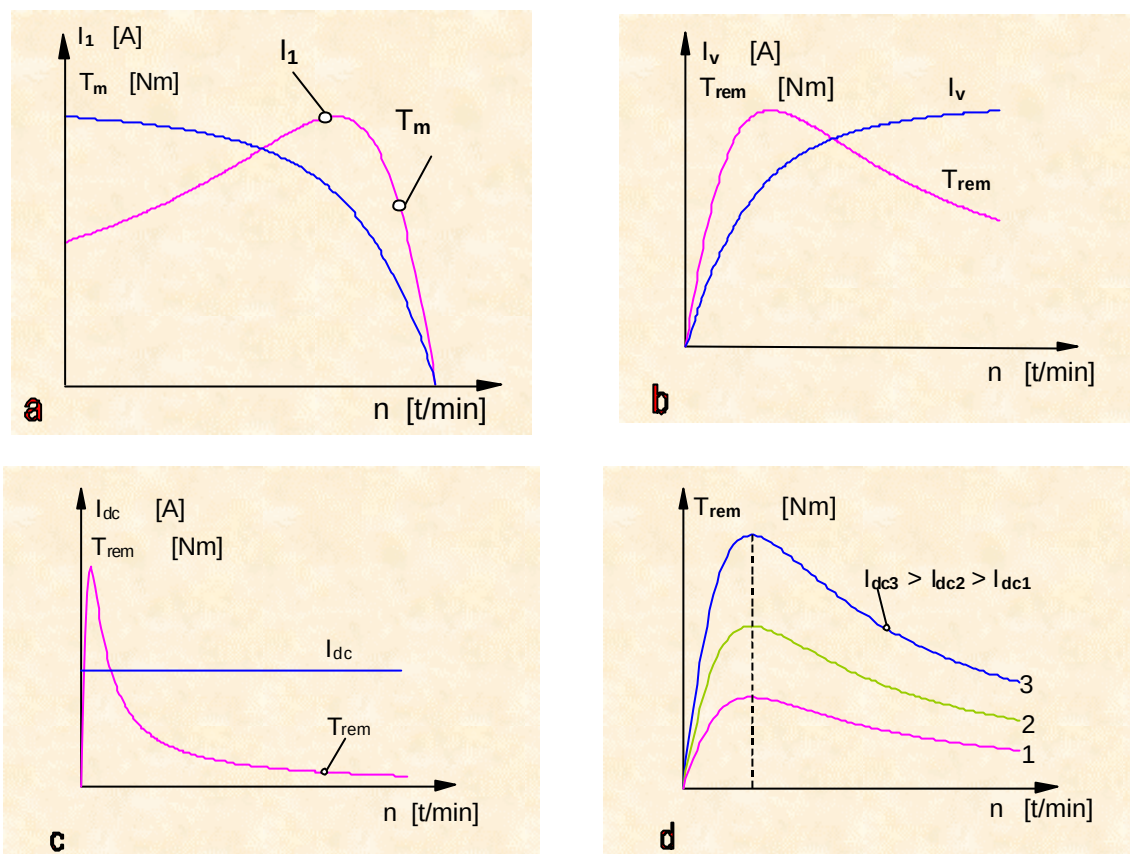
figuur 3.12 *Principeschema voor gelijkstroomremming bij een bewikkelde rotor*

Door het aansluiten aan een gelijkstroomnet wordt het draaiveld van de inductiemotor vervangen door een stilstaand veld. In de rotor worden spanningen geïnduceerd die door het stilstaand veld krachten ondervinden. De rotor wordt afgeremd (figuur 3.13).



figuur 3.13 *Principe van de gelijkstroomremming*

De normale stroom- en koppel-snelheidscurven zijn voorgesteld in figuur 3.14a. Tussen deze curven en de curven bij gelijkstroomremming bestaat een verband.



figuur 3.14 Verband tussen de normale karakteristiek (a) en de karakteristieken bij gelijkstroomremming

Tijdens de aanloop van een inductiemotor daalt de rotorfrequentie bij toenemende snelheid. Bij een gelijkstroomremming is de rotorfrequentie maximaal bij maximale snelheid. De rotorverschijnselen hebben een frequentie die evenredig is met het toerental. Het punt van stilstand en synchrone snelheid zijn bij gelijkstroomremming omgewisseld t.o.v. deze bij normale werking (figuur 3.14b).

Omdat bij het remmen de stroom constant is, is figuur 3.14b niet van toepassing. Indien I_v de met het toerental veranderlijke stroom is, en I_{dc} de constante gelijkstroom, dan is de verhouding van de koppels gelijk aan $(I_{dc}/I_v)^2$, vandaar het verloop van figuur 3.14c, dat zich bij gelijkstroomremming in de praktijk voordoet. Door de waarde van de gelijkstroom te veranderen, bekomt men de bundel curven van figuur 3.14d. Het remkoppel neemt met dalend toerental eerst toe en daarna af om bij stilstand nul te worden.

3.2.3 Oversynchrone remming-recuperatieremming

Recuperatieremming bij inductiemotoren is geen remming in de echte betekenis van het woord, vermits bij voeding vanuit het net de bewegende delen niet tot stilstand kunnen afgeremd worden. Bij kranen wordt deze remmethode gebruikt om lasten met een constante snelheid groter dan de synchrone snelheid te laten dalen. De last drijft de motor oversynchroon aan, waarbij de

inductiemachine bij kleine negatieve slipwaarden actief vermogen naar het net terug stuurt. Bij recuperatieremming werkt de machine als asynchrone generator. Vandaar dat deze methode soms ook generatorisch remmen wordt genoemd.

Een inductiemachine kan ook als generator gebruikt worden. Als een net aanwezig is, kan de machine over het synchrone toerental aangedreven worden en de mechanische energie in elektrische energie omzetten. Vele windenergiesystemen zijn op deze wijze gebouwd. Het is ook mogelijk om de inductiemachine als generator te gebruiken zonder dat een net aanwezig is. Men moet dan condensatoren in de statorkring opnemen om het statorveld op te bouwen. In de praktijk wordt dit weinig toegepast.

3.3 Toerentalregeling

In het domein van de toerentalgeregelde aandrijvingen krijgen de wisselstroommachines (inductiemotoren en synchrone machines) een stijgende belangstelling. Vergeleken met de conventionele toerentalgeregelde elektrische aandrijvingen met gelijkstroommachines, bieden ze het voordeel van een robuuste constructie van de motor en een kleinere roterende massa. De collector en borstels stellen bij gelijkstroommotoren een aantal bijkomende beperkingen en vragen veel onderhoud. De mechanische hoeksnelheid van een inductiemotor wijkt onder nominale werkings - voorwaarden slechts zeer weinig af van de synchrone hoeksnelheid:

$$\omega_m = \omega_0(1-s) = \frac{2\pi f_1}{p}(1-s) \quad (3.1)$$

Uit (3.1) volgt dat de snelheid van een inductiemotor kan gewijzigd worden door:

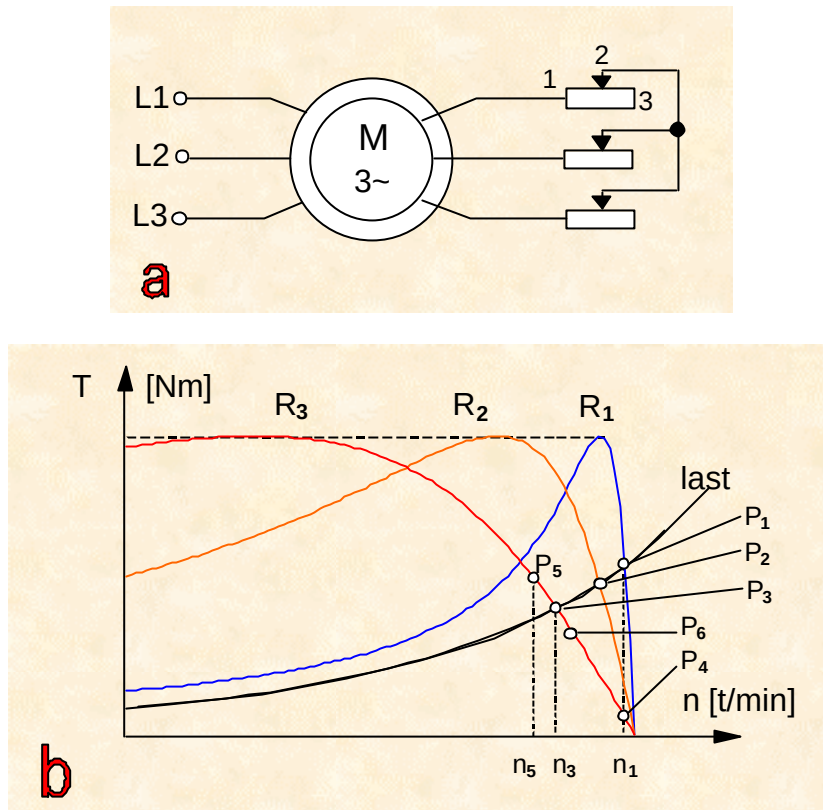
- variatie van het poolpaargetal p ,
- wijziging van de slip s ,
- verandering van de voedingsfrequentie f_1 ,
- regeling op de motoras (zuiver mechanisch).

Bij verdere behandeling van de toerentalregeling wordt een onderscheid gemaakt tussen regelingen alleen toepasbaar op sleeppringmotoren, regelingen toepasbaar op kooirotormotoren en regelingen toepasbaar op beide.

3.3.1 Sleeppringmotor

3.3.1.1 Weerstanden

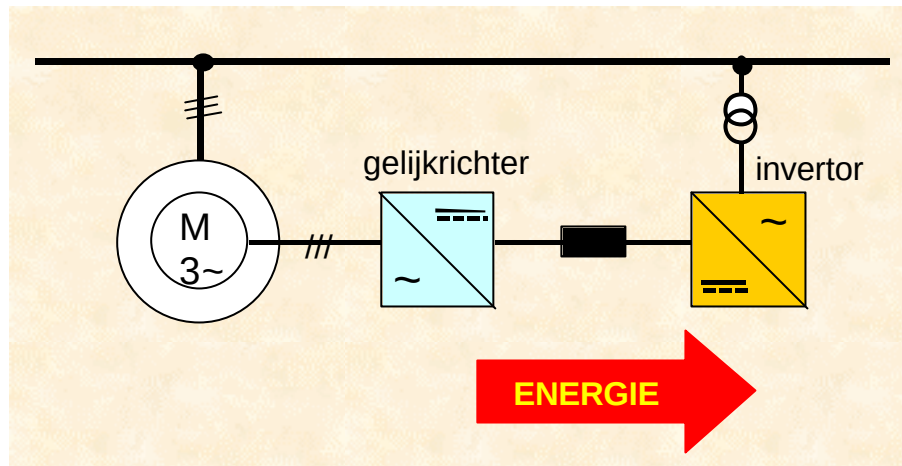
Deze methode is reeds gekend uit de aanloop met rotorweerstanden. In de figuur 3.15a is de schakeling voorgesteld en in figuur 3.15b zijn de motorcurven en het tegenwerkend koppel. De punten P_1 , P_2 en P_3 zijn werkingpunten van de motor. Door de rotorweerstand te vergroten van R_1 naar bijvoorbeeld R_3 vertraagt de motor en verandert het werkingpunt van P_1 naar P_3 . Dit gebeurt niet ogenblikkelijk: bij het veranderen van de rotorweerstand naar de waarde R_3 blijft de snelheid in eerste instantie gelijk aan n_1 en gaat men over naar het werkingpunt P_4 . Hier is het tegenwerkend koppel groter dan het motorkoppel zodat de motor vertraagt en het werkingpunt zich verplaatst op de motorcurve naar het punt P_5 . In dit punt is het motorkoppel groter dan het tegenwerkend koppel. De motorsnelheid neemt weer toe en het werkingpunt verplaatst zich naar bijvoorbeeld punt P_6 . Na een paar slingeren stelt zich een evenwicht in: het punt P_3 met een snelheid n_3 .



figuur 3.15 Toerentalregeling met rotorweerstand bij sleepringmotoren

3.3.1.2 Ondersynchrone cascadeschakeling

De snelheidsregeling met supplementaire rotorweer-standen gaat gepaard met energieverlies in de weerstanden. Indien deze gedissipeerde energie terug gestuurd wordt naar het net, stijgt het rendement van de opstelling. Een mogelijke methode is de ondersynchrone cascadeschakeling of Kramerschakeling (figuur 3.16). De diodegelijkrichter is verbonden met de rotor van de inductiemotor en neemt het vermogen op dat anders gedissipeerd wordt in de supplementaire rotorweerstand. De uitgang van deze gelijkrichter is via een tussenkring verbonden met een stuurbare invertor die werkt op netfrequentie. De resulterende driefasige spanning wordt via een transformator verbonden met het voedingsnet en men stuurt energie terug naar het net. Als men in plaats van een diodegelijkrichter een stuurbare gelijkrichter gebruikt, kan men aan de rotor ook energie toevoeren, zodat de snelheid groter wordt dan de synchrone snelheid. Men spreekt dan over een oversynchrone cascadeschakeling of Scherbiusschakeling.



figuur 3.16 Ondersynchrone cascadeschakeling

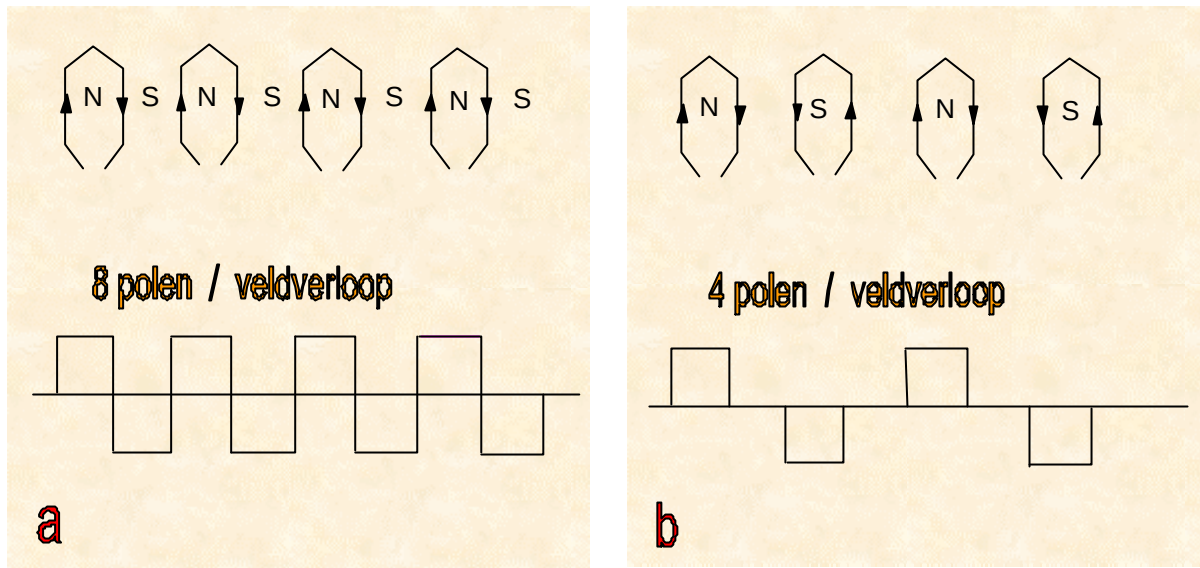
3.3.2 Poolpaartal omschakelen

Bij een vaste frequentie f_1 van het net kan de synchrone snelheid enkel gewijzigd worden door een verandering van het poolpaargetal p :

$$n_s = \frac{60 f_1}{p} \quad [\text{t/min}] \quad (3.2)$$

Bij poolomschakelbare motoren zijn twee verschillende uitvoeringen mogelijk: twee afzonderlijke, driefasige statorwikkelingen met een verschillend aantal polen of een enkele statorwikkeling waarvan de onderdelen op verschillende manieren kunnen geschakeld worden, zodat het aantal polen verandert. Deze methode wordt gebruikt voor motoren met twee snelheden. Door combinatie van de hoger vermelde uitvoeringen kan men motoren voor drie en vier snelheden construeren. Een dergelijke poolomschakeling kan enkel bij kooirotormotoren toegepast worden, omdat de kooirotor zich automatisch aan het aantal statorpolen aanpast.

De bekendste en eenvoudigste eenwikkelingsschakeling werd door de Zweedse ingenieur Dahlander in 1897 uitgedacht. Het principe bestaat hierin. Als men spoelen of spoelengroepen, die op eenzelfde afstand van elkaar gelegen zijn, in dezelfde zin met een stroom voedt, dan wekt iedere spoel of spoelengroep een flux met dezelfde polariteit op (figuur 3.17a). Het aantal polen is gelijk aan tweemaal het aantal spoelengroepen. Keert men nu in de tweede en in de vierde spoelengroep de stroomrichting om (figuur 3.17b), dan verandert de richting van de flux in deze spoelengroepen. Uit het veldverloop merkt men dat het aantal polen op de helft is teruggevallen.

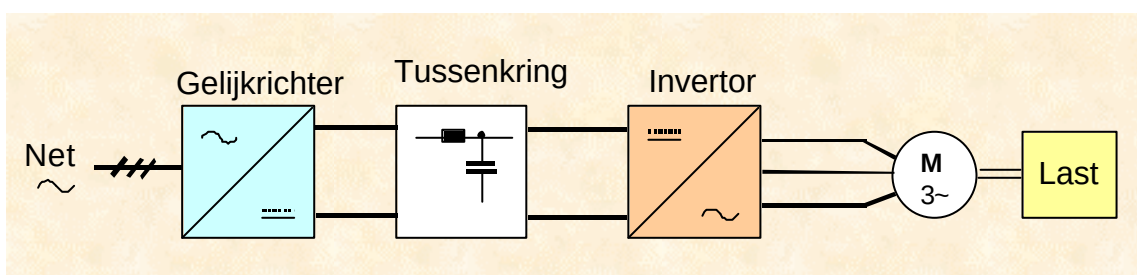


figuur 3.17 *Principe van de Dahlanderschakeling*

3.3.3 Frequentiesturing

Om de snelheid te regelen kan men ook ingrijpen op de voedingsfrequentie f_1 . Door deze variabele te maken, wijzigt het toerental van de machine. Het net levert een spanning met een constante frequentie van 50 Hz, zodat vermogenelektronica nodig is om de machine een frequentie aan te bieden die continu instelbaar is tussen 0 Hz en enkele honderden Hz. Men gaat ervan uit dat er een systeem bestaat dat een wisselspanning met vaste spanning en vaste frequentie omzet in een spanning met regelbare frequentie en grootte.

In principe bestaat een frequentie-omvormer uit een gelijkrichter, een tussenkring en een wisselrichter.



figuur 3.18 *Principiële voorstelling van een frequentie-omvormer met motor en last*

De gelijkrichter vormt de wisselspanning van het net om tot een constante gelijkspanning of constante gelijkstroom. De gelijkrichter is meestal een diodegelijkrichter. Soms wordt een gestuurde gelijkrichter gebruikt, waardoor de energie van de gelijkstroomtussenkring naar het net kan terugstromen. Het voedend net is voor kleine vermogens vaak eenfasig.

De tussenkring bestaat uit een condensator in parallel met de gelijkrichter indien het gaat om een spanningstussenkring. Bij een stroomtussenkring wordt de parallelcondensator vervangen door een spoel in serie met de gelijkrichter.

Uit de constante gelijkspanning of gelijkstroom wordt via een wisselrichter een wisselspanning bekomen die in grootte en frequentie regelbaar is.

3.3.3.1 Verhouding tussen spanning en frequentie

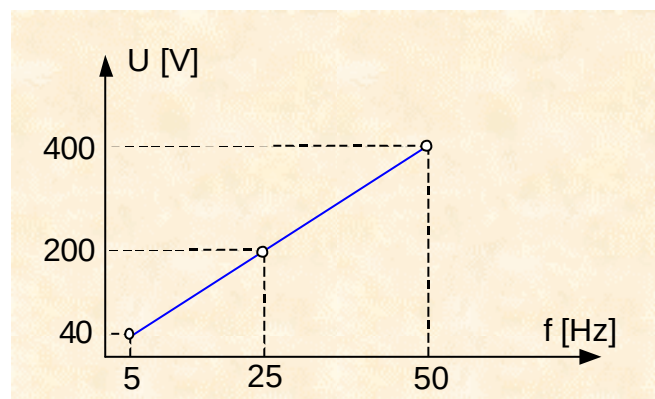
De snelheid van een inductiemachine kan geregeld worden door de frequentie van de aangelegde spanning te wijzigen met frequentie-omvormers. Bij de draaiveldtheorie werd het verband afgeleid tussen spanning, flux en frequentie:

$$U_f = 4,44 \cdot N_{\text{eff}} \cdot f \cdot \phi \quad (3.3)$$

Voor een goede werking van de motor mag de flux zijn nominale waarde niet overschrijden anders wordt de magnetisatiestroom te groot en wordt het blikpakket van de motor in verzadiging gestuurd. Indien men de motor aanstuurt met een frequentie lager dan de nominale, moet de aangelegde spanning dalen om de flux op zijn nominale waarde te houden. Met andere woorden bij frequenties lager dan de nominale frequentie moet de verhouding spanning-frequentie constant gehouden worden. Bij frequentiesturing moet normalerwijze voldaan zijn aan:

$$\frac{U_{f1}}{U_{f2}} = \frac{f_1}{f_2} \quad (3.4)$$

Dit verband wordt grafisch weergegeven in figuur 3.19 en wordt gerealiseerd in de frequentie-omvormer.



figuur 3.19 Verband tussen frequentie en spanning bij frequentie-omvormersturing

Indien men de motor wil aansturen met een frequentie hoger dan de nominale frequentie, kan men deze constante spannings-frequentieverhouding niet handhaven door de spanningsbegrenzing. De isolatie in een motor wordt berekend voor een maximale spanning gelijk aan de nominale. Indien de spanning hoger is dan deze nominale waarde, is er gevaar voor isolatiedoorslag. In het frequentiegebied boven de nominale frequentie wordt de spanning op zijn nominale waarde

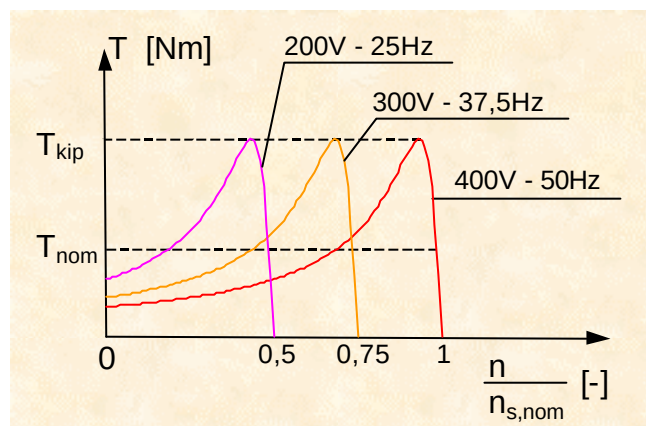
gehouden terwijl de frequentie verder stijgt. Uit (3.3) volgt dan dat de flux kleiner wordt dan de nominale flux: de machine werkt in het gebied van de veldverzwakking. Op het fenomeen van veldverzwakking en de gevolgen voor de motor wordt verder ingegaan. Er dient ook opgemerkt dat de aan de motor aangelegde frequentie niet oneindig kan stijgen, wegens de mechanische beperkingen.

3.3.3.2 Motorkarakteristieken in het gebied van constante flux

Koppel-toerental karakteristiek

De koppel-toerental karakteristiek die in 2.3.5 besproken wordt, geldt voor een motor gevoed met vaste spanning en vaste frequentie. De frequentie-omvormer variëert de spanning en de frequentie, en houdt de onderlinge verhouding constant.

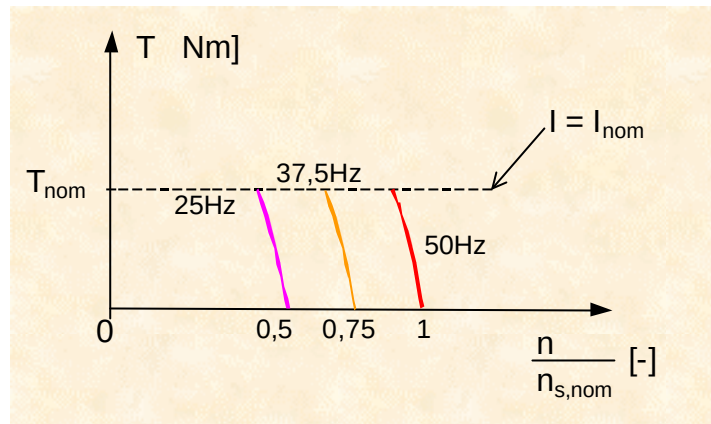
Afgezien van de snelheid van het draaiveld, blijven alle overige eigenschappen van de motor onveranderd. De vorm van de motorkarakteristiek is ongewijzigd, maar verschuift horizontaal, afhankelijk van de aangelegde frequentie (figuur 3.20).



figuur 3.20 *Koppel - toerental karakteristieken bij variabele frequentie en constante U/f verhouding*

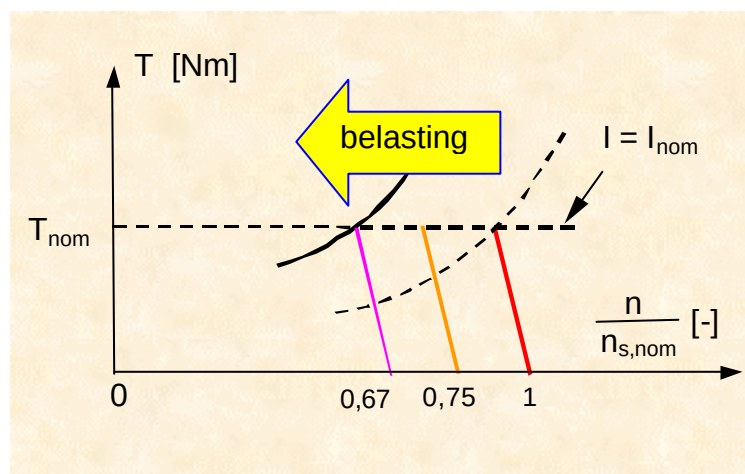
Koppel-toerental karakteristiek bij stroombegrenzing

Indien de frequentie-omvormer in staat zou zijn een stroom te leveren groter dan de nominale motorstroom, verlopen de koppel-toerental karakteristieken zoals in figuur 3.20. Dit betekent dat de frequentie-omvormer hiervoor moet gedimensioneerd zijn en zeer duur is. Dit is niet nodig omdat een motor nooit werkt in het gebied tussen kipkoppel en stilstand, daar dit een onstabiel gebied is. De door de omvormer geleverde stroom wordt begrensd op de nominale motorstroom (figuur 3.21). Daarmee worden zowel motor als frequentie-omvormer beveiligd.



figuur 3.21 Aanloop met stroombeperking op de nominale stroom

De stroombegrenzing heeft gevolgen. Veronderstel dat de stroombegrenzing van de omvormer is ingesteld op de nominale stroom van de motor. Indien de motor zwaarder belast wordt en de motorstroom hoger dan de nominale waarde wil stijgen, wordt de motorstroom afgeknepen. Dit gebeurt door de frequentie en de spanning van de omvormer te laten dalen. Als de belasting te groot is, vertraagt de motor. De curve schuift op naar links (figuur 3.22). Een nieuw werkingpunt vindt men waar het belastingskoppel gelijk wordt aan het nominaal motorkoppel. Valt de belasting bij afnemende snelheid niet terug onder T_{nom} , dan verschuift de kromme zover naar links tot de motor stil staat. Het volle koppel blijft echter gehandhaafd en de motor komt op zijn oorspronkelijke snelheid terug zodra het belastingskoppel weer onder de T_{nom} komt.

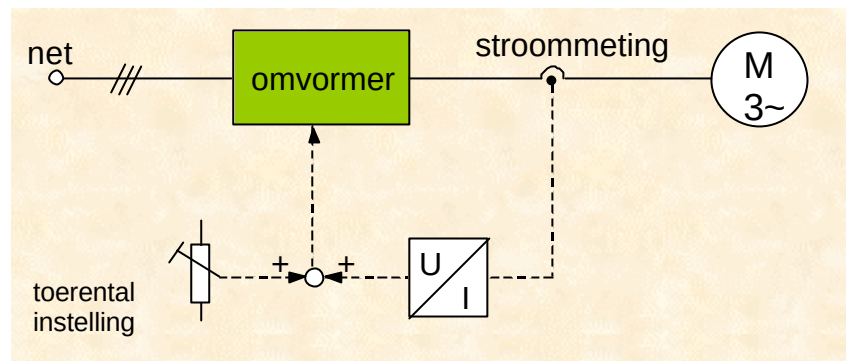


figuur 3.22 Invloed van de stroombegrenzing bij overschreden van de maximum stroom

Slipcompensatie

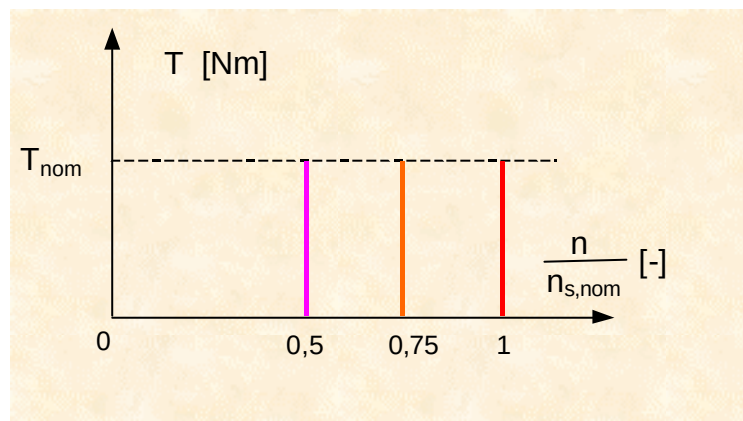
Naast de stroombegrenzing bezitten veel frequentie-omvormers een slipcompensatie. Daardoor wordt het toerental minder afhankelijk van de motorbelasting. Ook bij frequentiesturing neemt de slip

van een inductiemotor toe bij stijgende belasting. Is een constante snelheid gewenst bij elke last, dan moet een terugkoppeling voorzien worden (figuur 3.23).



figuur 3.23 *Principeschema voor slipcompensatie*

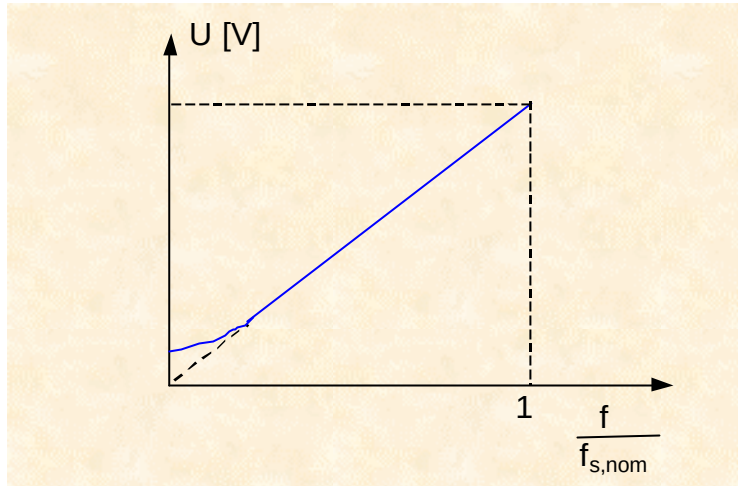
Men zou het toerental kunnen meten, en in functie van deze waarde de frequentie licht laten toenemen bij stijgende last. Een eenvoudiger oplossing is het meten van de motorstroom in de omvormer (figuur 3.23). Deze stijgt bij stijgende last. Het ingestelde toerental blijft quasi constant indien de frequentie-instelwaarde bij toenemende belasting wordt verhoogd. Deze regelprocedure noemt men slipcompensatie. De koppel-toerentalkarakteristiek van figuur 3.22 wordt gewijzigd. Bij een ideale compensatie staan de verschillende curven loodrecht op de horizontale as (figuur 3.24).



figuur 3.24 *Koppel - toerentalkarakteristiek met slipcompensatie*

3.3.3.3 Statorweerstand-compensatie

Bij lage frequenties speelt de statorweerstand R_1 een grote rol daar de invloed van de inductantie $X_\sigma = \omega L_\sigma$ daalt. Om de ohmse spanningsval te compenseren, wordt een verhoogde spanning aangelegd tijdens de start en bij laag toerental. Daar de stroom tijdens de aanloop afhankelijk is van de motorgrootte, wordt deze spanningverhoging regelbaar uitgevoerd. Deze instelling noemt men statorweerstandcompensatie, R_1 -compensatie of "spanningsboost" (figuur 3.25). Wordt de startspanning te hoog, dan gaat het blikpakket van de motor in verzadiging.



figuur 3.25 *Statorweerstandscompensatie*

3.3.3.4 Veldverzwakking

Frequentie-omvormers kunnen meestal het dubbele van de netfrequentie leveren. De spanning aan de uitgaande klemmen van de frequentie-omvormer is beperkt door de netspanning.

Bovendien mag aan de motor nooit een hogere dan de nominale spanning gelegd worden, daar dit de isolatie beschadigt. De spanning bij een frequentie $f_{\text{nom}} < f < 2 \cdot f_{\text{nom}}$ krijgt een vaste waarde. Hiervoor wordt de nominale motorspanning genomen. Hieruit volgt dat de verhouding spanning / frequentie afneemt bij werking boven de nominale snelheid van de machine. De flux is lager dan de nominale, vandaar de benaming veldverzwakking. Men noemt dit vaak oversynchroon bedrijf, maar is een foutieve aanduiding, vermits bij veranderende voedingsfrequentie ook het synchroon toerental van de machine wijzigt. Zolang de inductiemachine werkt als motor, draait ze trager dan het synchroon toerental, vermits bij gelijk welke frequentie, de motor nooit de nieuwe synchrone snelheid kan bereiken.

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

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.5)$$

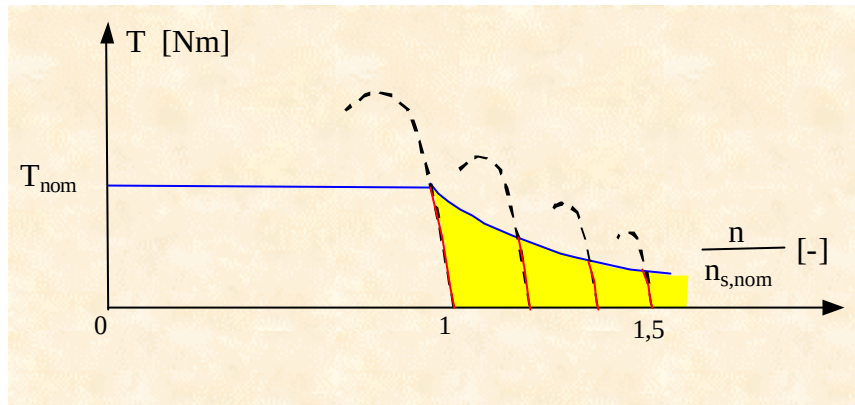
Bij toerentallen hoger dan het nominaal toerental zijn U en I constant en gelijk aan de nominale waarden. P_1 is constant, als de $\cos \varphi$ constant blijft. Het mechanisch vermogen is:

$$P_{\text{as}} = T \cdot \omega \quad (3.6)$$

Mits verwaarlozing van de verliezen is P_{as} gelijk aan P_1 en constant. Daaruit volgt het motorkoppel:

$$T = P_1 \cdot \frac{1}{\omega} = \frac{C}{n} \quad (3.7)$$

waarin C een constante is. Vanaf de nominale snelheid, en dit tot aan de maximaal toelaatbare snelheid wordt de motorkarakteristiek een hyperbool (figuur 3.26). Het koppel is bij nominale snelheid gelijk aan het nominaal koppel. Bij het dubbele van de nominale snelheid is het koppel gedaald tot 50% van het nominaal koppel.



figuur 3.26 *Koppel - toerentalkarakteristieken bij veldverzwakking*

Het maximum koppel of kippel neemt in het veldverzwakkingsgebied af. Uit vergelijking (2.50) volgt met (2.43) en (2.45):

$$T_{\text{kip}} = \frac{3p}{\omega_1} \frac{U_1^2}{X_1} \frac{X_{h1}^2}{2(X_1 X_2' - X_{h1}^2)}$$

Nu is $(X_1 X_2' - X_{h1}^2) \cong X_{h1} (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')$ en $X_1 \approx X_{h1}$, zodat

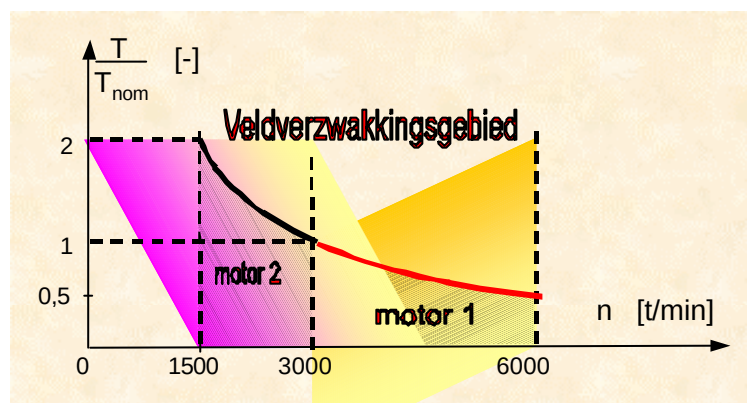
$$T_{\text{kip}} \approx \frac{3p}{\omega_1} \frac{U_1^2}{2(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')}$$

Bij heel hoge snelheden beperkt dit maximaal koppel het veld verzwakkingsgebied. Veldverzwakking biedt verschillende voordelen.

- Het toerental van een bepaalde opstelling kan opgevoerd worden tot boven het nominaal toerental van de motor. Hierbij dient wel opgemerkt dat bij veldverzwakking het koppel daalt, wat beperkingen met zich meebrengt in verband met de belasting.

- Indien een bepaalde toepassing een relatief hoog aanloopkoppel vraagt, terwijl het koppel nodig bij maximale snelheid eerder gering is, kan men een motor van eenzelfde vermogen, maar met lager nominaal toerental kiezen. Het koppel in het gebied van stilstand tot nominaal toerental wordt groter, terwijl het gewenste maximale toerental bij een hogere frequentie kan worden gekozen (figuur 3.27). Er kan bijvoorbeeld een vierpolige motor (motor 2) worden gekozen in plaats van een tweepolige (motor 1). Deze motor wordt tot aan het dubbele van zijn nominale snelheid aangewend (3000 t/min).
- In installaties waarin constant vermogen wordt gevraagd, dus een laag koppel bij hoge snelheden (werktuigmachine), of een hoog koppel bij lage snelheden (wikkelmachines), kan het snelheidsbereik aanmerkelijk worden vergroot. De motorkeuze is hier belangrijk.

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

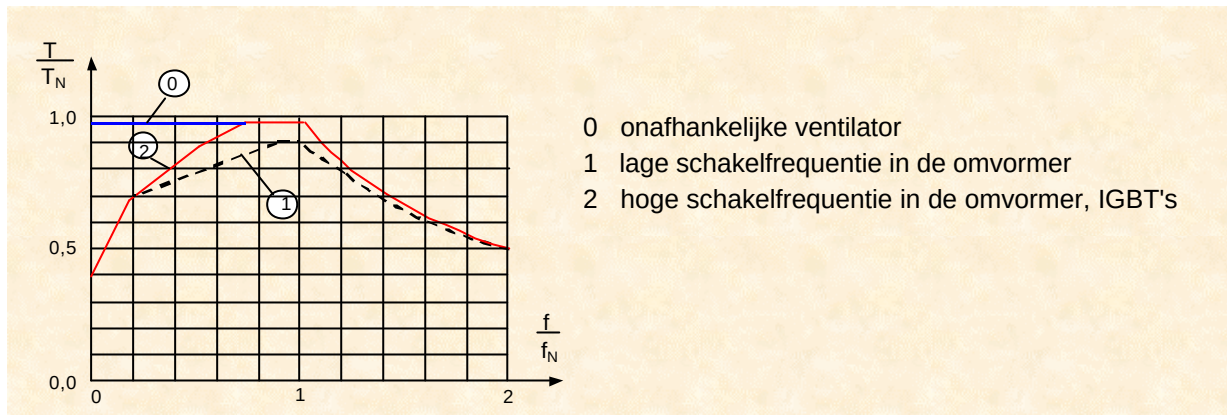


figuur 3.27 Vierpolige motor voor een aandrijving tot 3000 t/min

3.3.3.5 Motorbelasting, verliezen en koeling

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

- Bij lagere toerentallen neemt de eigen koeling af.
- De uitgangsspanning van de frequentie-omvormer is niet zuiver sinuïdaal maar bevat hogere harmonischen. Tengevolge van deze harmonischen produceert de motor meer verliezen.



figuur 3.28 Capaciteit van een inductiemotor

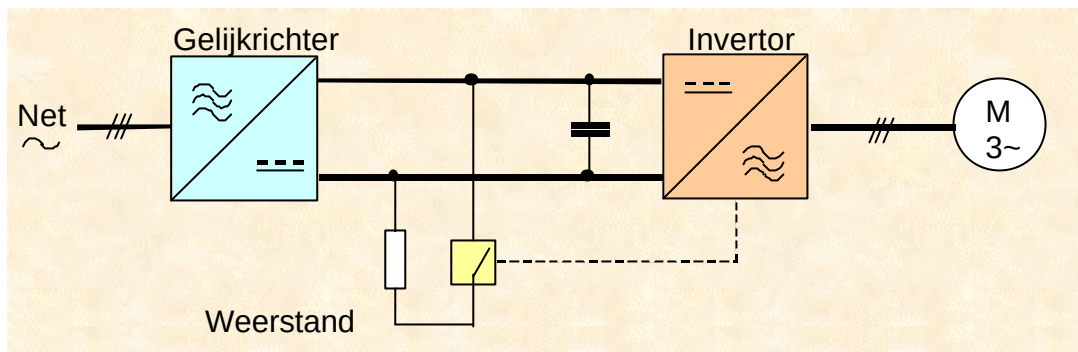
Indien de motor afzonderlijk wordt gekoeld, mag de motor het nominale koppel leveren tot aan het veldverzwakkingspunt. Een motor met eigen ventilator op de as, mag bij lage snelheden niet meer het nominale koppel leveren. De maximum waarde voor het koppel hangt af van het type frequentie-omvormer. Zo stelt curve 1 in figuur 3.28 de capaciteit voor van inductiemotoren (18,5 tot 1500 kW) met eigen ventilator gebruikt met een frequentiesturing met lage schakelfrequentie en veel harmonischen. Curve 2 stelt de capaciteit voor van inductiemotor (2,2 tot 2 MW) in een aandrijving met een frequentie-omvormer met hoge schakelfrequentie en minder harmonischen.

3.3.3.6 Remmen

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

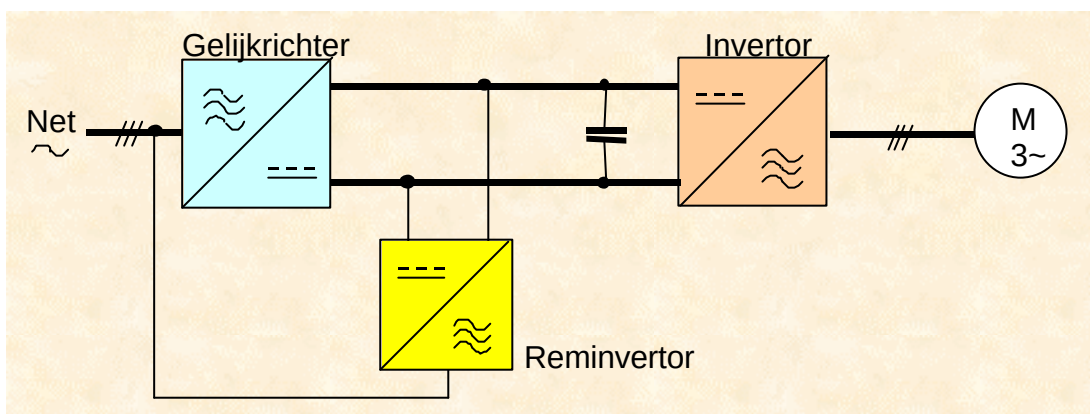
Indien een krachtige remwerking gewenst wordt, kan een keuze gemaakt worden uit een van de volgende remschakelingen.

- De goedkoopste en meest toegepaste oplossing is het plaatsen van remweerstand, parallel met de afvlakcondensator. Zij kunnen met een elektronische schakelaar ingeschakeld worden tijdens het rembedrijf (figuur 3.29).



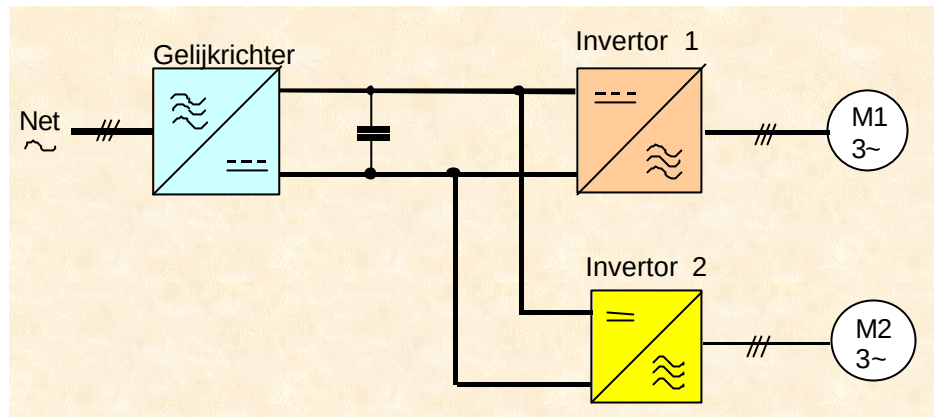
figuur 3.29 *Weerstandsremming*

- Bij veelvuldig remmen ontstaat er op deze wijze te veel energieverlies. De diodegelijkrichter wordt door een gestuurde gelijkrichter vervangen, of met een bijkomende invertor (wisselrichter) wordt de remenergie terug naar het net gestuurd (figuur 3.30). Indien het teruggestuurde vermogen naar het net altijd vrijwel gelijk is aan het in motormode geleverde vermogen, kan men de diodegelijkrichter vervangen door een gestuurde voor het volle vermogen.



figuur 3.30 *Remmen met energierecuperatie*

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



figuur 3.31 *Gemeenschappelijke gelijkspanningstussenkring voor recuperatie van energie*

3.3.3.7 Omkeren van de draaizin

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