

Aandrijving van elektrische voertuigen

Citation for published version (APA):

Dongen, van, L. A. M. (1980). Aandrijving van elektrische voertuigen. *Elektrotechniek*, 58(8), 493-502.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1980

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Aandrijving van elektrische voertuigen

SUMMARY

During the development of propulsion systems for electric vehicles the components of the drive system have to be brought in line with one another in order that the consumption of stored energy should be as low as possible. Hence a thorough knowledge of the energy requirements of the vehicle and the characteristics of the component parts of the propulsion train is indispensable. In this paper particular attention is paid to the motor. Starting from various control systems for a separately excited DC motor all suitable propulsion trains for electric vehicles are described.

door ir. L. A. M. van Dongen¹⁾

INLEIDING

Tegen de huidige vorm van gemotoriseerd wegverkeer kunnen tal van bezwaren naar voren worden gebracht. Deze kunnen worden samengevat onder de volgende punten: verkeersonveiligheid, overmatig gebruik van ruimte, lawaai, uitlaatgassen en overmatig gebruik alsook afhankelijkheid van één primaire energiesoort (aardolie). De positieve eigenschappen, zoals van deur-tot-deur transport, privacy, directe beschikbaarheid en onder gunstige omstandigheden korte wachttijden onderweg, blijken voor de meeste mensen toch tegen de genoemde bezwaren op te wegen. Een aantal van de genoemde problemen kan worden opgelost door voertuigen te gebruiken, die elektrisch worden aangedreven.

— Lawaai- en uitlaatgasproductie kunnen aanzienlijk worden gereduceerd. Uiteraard wordt daarmee het probleem naar de elektriciteitscentrale verschoven, maar daar kan met minder kosten meer en beter gereinigd worden.

— Voor een minder kieskeurig brandstofgebruik is de elektrische aandrijving een oplossing. Voor de opwekking van elektriciteit kan namelijk een grote verscheidenheid van primaire energiesoorten worden gebruikt, te weten: aardolieproducten, aardgas, steenkool, kernenergie en eventueel waterkracht, windkracht en directe zonnestraling.

Met betrekking tot de verplaatsingsproblemen en speciaal die problemen, die in verband staan met de auto, is het erg moeilijk om een stap terug te doen: het publiek wenst hetzelfde niveau van onafhankelijkheid, dat gerealiseerd is door het individuele voertuig, te handhaven.

De auto met een verbrandingsmotor wordt al sinds de laatste eeuwwisseling geproduceerd en ontwikkeld, zodat bij de ontwikkeling van de elektrische auto, waaraan nu internationaal serieus wordt gewerkt, een grote achterstand moet worden ingehaald om ten minste kwalitatief te kunnen concurreren met voertuigen, die uitgerust zijn met een verbrandingsmotor. Om deze redenen moet men zich vooralsnog niet tot doel stellen om dit type auto te verdringen, maar men moet proberen het elektrische voertuig in de daarvoor in aanmerking komende sectoren tussen de huidige voertuigen te introduceren, handhaven en verbeteren.

¹⁾ Technische Hogeschool Eindhoven

Hoewel de elektrische auto nadelen heeft, zoals vereiste aanpassing van de infrastructuur, geringe actieradius, hoog gewicht en hoge aanschafkosten door de prijs van motorregelsysteem en batterij, moet deze auto worden beschouwd als een mogelijke optie voor de toekomst. Door verdere ontwikkelingen is het niet ondenkbaar, dat een aantal van deze nadelen een minder grote rol gaat spelen of zelfs verdwijnt. Om een bijdrage te leveren aan deze potentiële oplossing voor een onderdeel van de huidige milieu- en energieproblemen wordt aan de Technische Hogeschool Eindhoven door de Interafdelingswerkgroep Elektrische Auto een elektrische stadsauto ontwikkeld. In dit project wordt samengewerkt door de afdelingen Scheikundige Technologie, Elektrotechniek en Werktuigbouwkunde: de vakgroep Elektrochemie doet onderzoek aan accu's, de vakgroep Elektromechanica ontwikkelt verschillende stuur- en regelsystemen voor de elektromotor en de werkeenheden Vervoerstechniek behartigt de werktuigbouwkundige aspecten van de auto.

Een kritiek punt in de elektrische auto is het gedeelte van de aandrijflijn tussen motor en wielen. Daarin gaat relatief veel vermogen verloren, zeker als bij het remmen energie wordt teruggewonnen, daar het remvermogen in beide richtingen de lijn doorloopt. In verband met de actieradius en het gebruik van primaire energie met bij de ontwikkeling van aandrijflijnen voor elektrische voertuigen een optimale lay-out en afstemming van de componenten van de aandrijflijn worden nagestreefd om een zo gunstig mogelijk gebruik van de bij deze voertuigen beperkte hoeveelheid opgeslagen energie te bewerkstelligen. In dit artikel wordt een overzicht gegeven van de meest in aanmerking komende aandrijflijnen.

ENERGETISCHE ASPECTEN VAN ELEKTRO-VOERTUIGEN

Lastproces

In de ontwerpfase van een voertuig is een juiste analyse van het lastproces belangrijk. Het lastproces wordt gevormd door verschijnselen, die de aandrijfkracht bepalen en wordt gedefinieerd als combinatie van elementaire deellastprocessen:

- luchtweerstand, die een voertuig ondervindt
- rolweerstand van de wielen
- kracht voor overwinning van de terreinhelling

— traagheidskracht, die wordt ondervonden bij het versnellen van het voertuig.

De weerstand, die een voorwerp bij beweging door lucht ondervindt, ontstaat door twee verschijnselen:

a. oppervlaktewrijving: de lucht hecht aan het voorwerp, waardoor een grenslaag ontstaat, waarin door de viscositeit energie verloren gaat.

b. vormweerstand, die een gevolg is van de stuwdruk.

Bij voertuigen overweegt de vormweerstand zodanig, dat de oppervlaktewrijvingsweerstand wordt opgenomen in de experimenteel bepaalde vormweerstandscoefficiënt, die slechts afhankelijk is van de vorm van het voertuig. De luchtweerstand, die het voertuig moet overwinnen wordt bepaald volgens:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho * V_{res}^2 * A_F * C_X \quad (1)$$

F_L	luchtweerstand	[N]
ρ	dichtheid van de lucht	[kg m ⁻³]
V_{res}	relatieve snelheid van voertuig ten opzichte van de lucht	[m s ⁻¹]
A_F	frontaal oppervlak van voertuig	[m ²]
C_X	experimenteel bepaalde vormweerstandscoefficiënt	[-]

De vormweerstandscoefficiënten variëren van ongeveer 0.35 voor goed gestroomlijnde voertuigen tot 0.50 voor slecht gestroomlijnde personenautomobielen. Bij hogere snelheden gaat de luchtweerstand een steeds grotere rol spelen. Bovendien ondervindt een voertuig, indien de lucht niet zuiver evenwijdig aan de hartlijn aanstroomt, een dwarskracht en een verticale kracht, die echter voor het lastproces slechts van secundair belang zijn.

In de elastische deformatietoestand van een stilstaande band treedt verandering op, zodra het wiel gaat rollen. De gewijzigde drukspanningsverdeling leidt tot een voorwaartse verplaatsing van de normaalkracht over een bepaalde lengte ten opzichte van de verticale hartlijn van het wiel. Ten gevolge hiervan ontstaat een moment, dat de beweging van het wiel afremt. Deze rolweerstand wordt beschreven door:

$$F_r = f_r * F_N \quad (2)$$

F_r	rolweerstand	[N]
f_r	rolweerstandscoefficiënt	[-]
F_N	normaalkracht op het wiel	[N]

Wat betreft de rolweerstandscoefficiënt is in de achter ons liggende tijd door de ontwikkeling van de radiaalbanden een zekere winst geboekt. De rolweerstandscoefficiënt bedraagt ongeveer 0.015 en wordt door verscheidene grootheden beïnvloed, zoals wegdek, bandtemperatuur en voertuigsnelheid.

Als een voertuig een helling oprijdt, is $m * g * \cos \alpha$ dat deel van het eigengewicht, dat de druk van de wielen op de grond bepaalt. De rolweerstand is bij het stijgen en dalen dus steeds kleiner dan in het geval, dat overeen vlak terrein wordt gereden. $m * g * \sin \alpha$ is die component van het eigengewicht, die een remmende of aandrijvende kracht-helling afwaarts vormt. Aan deze kracht moet bij het stijgen een overeenkomstige kracht worden gezet in tegen-gestelde richting. De kracht ten gevolge van de terreinhelling wordt dus bepaald door:

$$F_{st} = m * g * \sin \alpha \quad (3)$$

F_{st}	hellingweerstand	[N]
m	voertuigmassa	[kg]
g	aardgravitatieversnelling	[m s ⁻²]
α	hellingshoek	

Het stationaire gedeelte van het lastproces wordt bepaald door de rolweerstand, de luchtweerstand en de weerstand door terreinhelling, zodat geldt (afb. 1):

$$F_{stat} = \frac{1}{2} \rho * V_{res}^2 * A_F * C_X + m * g * f_r * \cos \alpha + m * g * \sin \alpha \quad (4)$$

Het instationaire gedeelte van het lastproces wordt bepaald door de kracht, die nodig is om het voertuig te versnellen. Er wordt weerstand ondervonden door de translerende massa, die wordt versneld en de roterende massa's, die bovendien in hun draairichting worden versneld. Voor de versnellingsweerstand geldt de volgende relatie:

$$F_v = \lambda * m * a \quad (5)$$

F_v	versnellingsweerstand	[N]
λ	factor om versnelling van roterende delen te verrekenen (1.06 - 1.45)	[-]
a	versnelling	[m s ⁻²]

De totale rijweerstand wordt nu:

$$F = \frac{1}{2} \rho * V_{res}^2 * A_F * C_X + m * [g * f_r * \cos \alpha + g * \sin \alpha + \lambda * a] \quad (6)$$

Actieradius

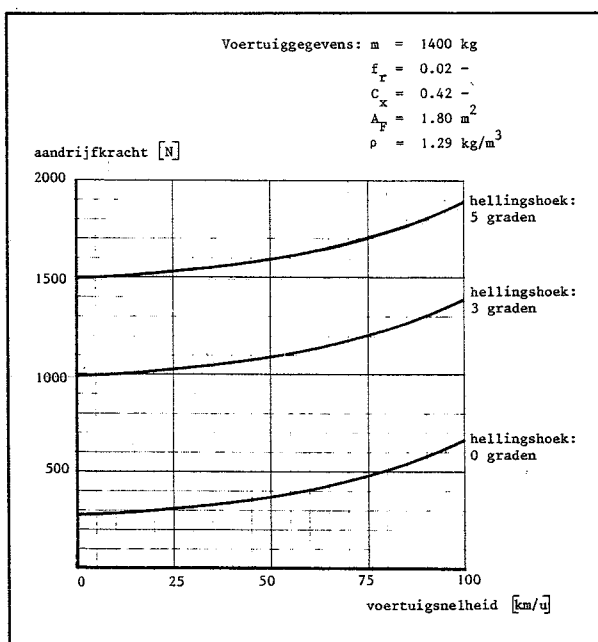
Nu kan een eenvoudige betrekking voor de actieradius bij een constante snelheid worden opgesteld:

$$S = \frac{W * \eta}{F_{stat}} \quad (7)$$

S	actieradius	[m]
W	energie in de accu	[Nm]
η	rendement van accu en aandrijving	[-]

Uit deze vergelijking volgt dat een verbetering van het rendement de actieradius in even sterke mate vergroot als een verhoging van de accucapaciteit of een vermindering van de rijweerstand.

In het geval van een instationair rijpatroon wordt bij iedere versnelling op de vlakke weg chemisch gebonden ener-



Afb. 1 Stationaire aandrijfkracht voor elektrisch voertuig

gie omgezet in kinetische energie en bij het remmen wordt de kinetische energie weer omgezet in chemisch gebonden energie op voorwaarde dat energierecuperatie mogelijk is. Door energierecuperatie kan het energiegebruik van een voertuig worden gereduceerd (afb. 2). Dit transformeren van de ene naar de andere soort energie gaat echter gepaard met verliezen.

Voor het energiegebruik van een bepaalde ritcyclus kan, als de snelheid een functie van de tijd is en het rendement 100% bedraagt, de volgende relatie worden opgesteld:

$$W = \int_0^{t_{\text{eind}}} \left[\frac{1}{2} \rho \cdot A_F \cdot C_x \cdot v^3 + m \cdot g \cdot f_r \cdot v + m \cdot \frac{dv}{dt} \cdot v \right] dt \quad (8)$$

De actieradius wordt nu bepaald voor een ritcyclus, waarin ritten met een constante snelheid, V_{max} , en lineair van de tijd afhankelijke snelheidsvariaties (van V_{max} tot stilstand en daarna weer tot V_{max}) elkaar afwisselen. Als in de ritcyclus n snelheidsvariaties optreden en het gemiddelde rendement van de aandrijving in beide energiestroomrichtingen gelijk is aan η , inclusief het laad- en ontlaadrendement van de accu, dan wordt vergelijking (8) bij goede benadering:

$$\begin{aligned} W \cdot \eta - \frac{1}{2} (1 - \eta^2) \cdot n \cdot m \cdot V_{\text{max}}^2 &= \\ = \left(\frac{1}{2} \rho \cdot A_F \cdot C_x \cdot V_{\text{max}}^3 + m \cdot g \cdot f_r \cdot V_{\text{max}} \right) \cdot t_{\text{stat}} + \\ + \left(\frac{1}{4} \rho \cdot A_F \cdot C_x \cdot V_{\text{max}}^3 + m \cdot g \cdot f_r \cdot V_{\text{max}} \right) \cdot \frac{t_{\text{instat}}}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

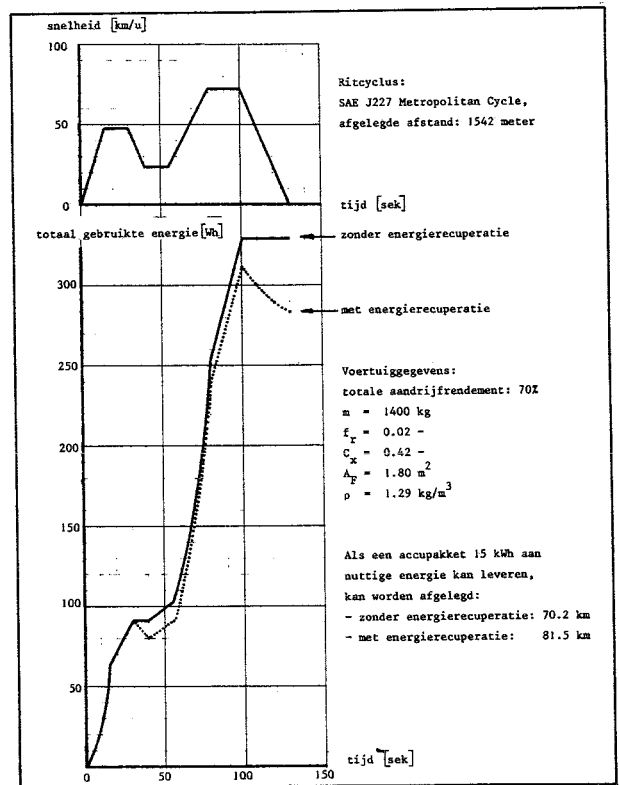
t_{stat} totale tijd, dat met constante snelheid V_{max} gereden wordt [sec]
 t_{instat} totale tijd van snelheidsvariaties [sec]

Als de hoeveelheid voor de voortstuwing van het voertuig bestemde energie bekend is, kan met behulp van de onderstaande vergelijkingen via t_{stat} de actieradius worden uitgerekend als functie van het aantal snelheidsvariaties met de verhouding $t_{\text{instat}}/t_{\text{stat}}$ als belangrijkste parameter (afb. 3). Er moet wel rekening worden gehouden met het feit, dat t_{instat} bij een bepaald aantal snelheidsvariaties niet willekeurig klein mag zijn vanwege de maximale acceleratie, die een voertuig kan verwezenlijken. (Zie verg. 10).

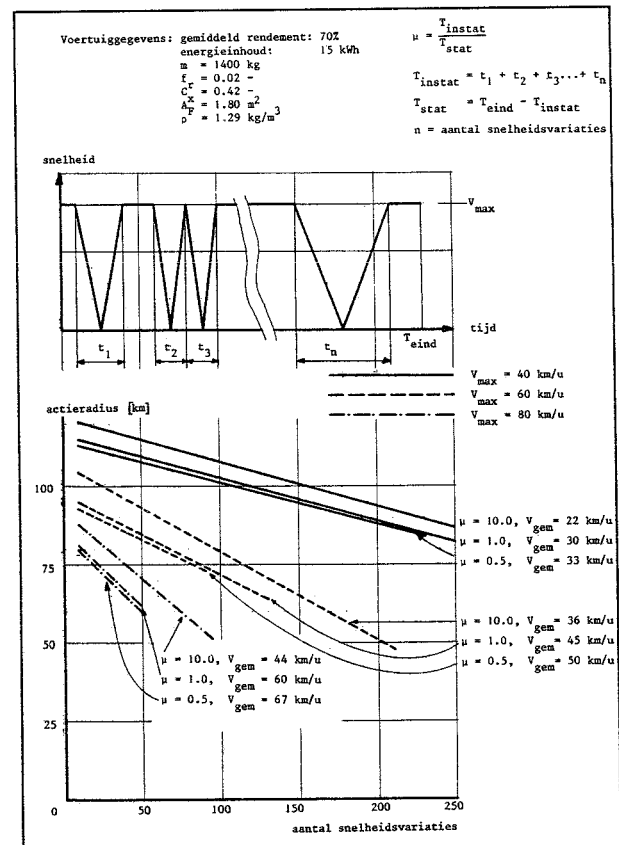
$$S = V_{\text{max}} \cdot \left(1 + \frac{t_{\text{instat}}}{2t_{\text{stat}}} \right) \cdot t_{\text{stat}} \quad (11)$$

Bij gelijkblijvende energie-inhoud van de accu kan de actieradius worden vergroot (het energiegebruik dus worden verminderd) door:

- zo weinig mogelijk te accelereren en te remmen
- het voertuig te optimaliseren, zodat een lage luchtweerstandscoefficiënt een klein frontaal oppervlak en een laag gewicht wordt verkregen
- de gemiddelde snelheid laag te houden
- de aandrijflijn zodanig te optimaliseren, dat een zo hoog mogelijk gemiddeld aandrijfrendement wordt verkregen.



Afb. 2 Energiegebruik van een elektrovoertuig met en zonder energierecuperatie



Afb. 3 Invloed van stops op actieradius

$$t_{\text{stat}} = \frac{W \cdot \eta - \frac{1}{2} (1 - \eta^2) \cdot n \cdot m \cdot V_{\text{max}}^2}{\frac{1}{2} \rho \cdot A_F \cdot C_x \cdot V_{\text{max}}^3 + m \cdot g \cdot f_r \cdot V_{\text{max}} + \left(\frac{1}{8} \rho \cdot A_F \cdot C_x \cdot V_{\text{max}}^3 + \frac{1}{2} m \cdot g \cdot f_r \cdot V_{\text{max}} \right) \cdot \frac{t_{\text{instat}}}{t_{\text{stat}}}} \quad (10)$$

MOTOR

Voor elektrische wegtractie worden tot op heden vanwege de aanwezige gelijkstroombron, de grote systeembetrouwbaarheid en de aanschafkosten praktisch uitsluitend gelijkstroommotoren in de aandrijving gebruikt.

Deze motoren voldoen uitstekend aan de door het voertuig vereiste koppeltoerenkarakteristiek en kunnen tot aan stilstand energie terugwinnen. Bij de vroeger vaak gebruikte seriemotor heeft een variatie van het koppel ook een relatief grote variatie van het toerental tot gevolg, omdat de anker- en de statorstroom aan elkaar gelijk zijn en iedere variatie van de ankerstroom dus tegelijkertijd een versterking of verzwakking van het veld veroorzaakt, zodat het motortoerental daalt respectievelijk stijgt.

Bij de onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommotor kunnen de ankerstroom en veldstroom onafhankelijk van elkaar worden geregeld, zodat de bedrijfspunten gemakkelijk in te stellen zijn. De ankerstroom van de onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommotor kan bij ieder toerental in afhankelijkheid van de last tot zijn maximale waarde worden vergroot zonder een variatie van dat toerental. De geïdealiseerde onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommachine wordt, als het ijzer in de magnetische circuits lineair is, in stationair bedrijf beschreven door de volgende vergelijkingen:

$$U_k = U_{rot} + R_a \cdot I_a = G \cdot I_s \cdot \omega + R_a \cdot I_a \quad (12)$$

$$U_s = I_s \cdot R_s \quad (13)$$

$$T = G \cdot I_s \cdot I_a \quad (14)$$

Uitwerking van deze vergelijkingen levert:

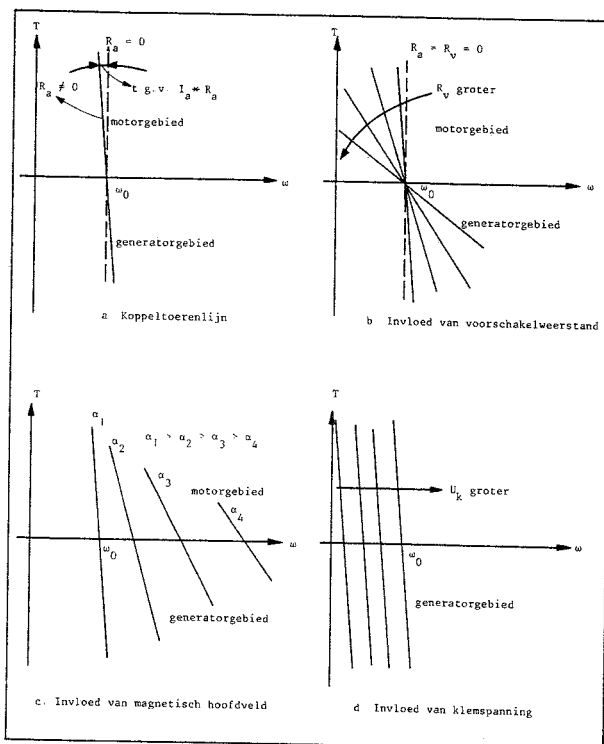
$$T = G \cdot \frac{I_s}{R_a} (U_k - G \cdot I_s \cdot \omega) \quad (15)$$

$$\omega = \frac{U_k}{G \cdot I_s} - \frac{R_a \cdot T}{(G \cdot I_s)^2} \quad (16)$$

U_k	rotorklemspanning	[V]
U_{rot}	opgewekte spanning in rotor	[V]
R_a	weerstand in rotorketen	[Ω]
I_a	rotorstroom	[A]
G	machineconstante	[Nm A ⁻²]
I_s	statorstroom	[A]
ω	hoeksnelheid van motoras	[s ⁻¹]
U_s	statorspanning	[V]
R_s	weerstand in statorwikkelingen	[Ω]
T	machinekoppel	[Nm]

Als wordt verondersteld, dat U_k , G , I_s en R_a constant zijn, dan zal het grafische verloop van het koppel als functie van het toerental lineair zijn. De daling van het toerental bij toename van het koppel wordt veroorzaakt door het Ohmse spanningsverlies in het anker; bij niet te kleine machines is dit verlies klein en verandert het toerental bij variatie van het belastingskoppel dus maar weinig. Bij een positief koppel fungeert de gelijkstroommachine als motor en bij een negatief koppel als generator, als wordt aangenomen dat de hoeksnelheid steeds positief is.

Beïnvloeding van het motortoerental kan plaatsvinden door variatie van de ankerspanning, de veldstroom en de weerstand in de rotorketen, zoals **afb. 4** aangeeft. Opname van een voorschakelweerstand R_v in het ankercircuit heeft tot gevolg, dat de totale ankerketenweerstand groter wordt. Vergelijking (16) wordt dan:



Afb. 4 Karakteristieken van een onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommachine

$$\omega = \frac{U_k}{G \cdot I_s} - \frac{(R_a + R_v) \cdot T}{(G \cdot I_s)^2} \quad (17)$$

Door het inschakelen van de voorschakelweerstand zal alleen de richtingscoëfficiënt van de koppeltoerenlijn veranderen. Als de motor bij stilstand op een constante klemspanning zou worden aangesloten, zou de inschakelstroom zonder voorschakelweerstand zeer groot zijn, omdat aanvankelijk de in de rotor opgewekte spanning nul is. Om de inschakelstroom te beperken kan men een weerstand R_v in serie met het anker schakelen, zodat de stroom dan gelijk wordt aan:

$$I_a = \frac{U_k - U_{rot}}{R_a + R_v} \approx \frac{U_k}{R_a + R_v} \quad (18)$$

Voor maximale versnelling kiest men R_v zodanig dat I_a gelijk wordt aan de maximaal toelaatbare waarde, terwijl het hoofdpoolveld zo groot mogelijk wordt gemaakt. Als nu de machine aanloopt, groeit de rotatiespanning en neemt de stroom I_a af. De weerstand R_v kan nu worden verkleind, waardoor de stroom weer toeneemt. De motor versnelt, de rotatiespanning wordt hoger, de stroom neemt af, etc. Als de weerstand R_v er thermisch op is ontworpen om gedurende langere tijd stroom te voeren, kan hij ook worden gebruikt voor toerensturing. Een nadeel van het gebruik van deze toepassing is de grotere vermogensdissipatie, die zal optreden: $I_a^2 \cdot (R_a + R_v)$ in plaats van $I_a^2 \cdot R_a$.

Een tweede methode van sturing is: veldverzwakking. Als bij een constante klemspanning het magnetische hoofdveld wordt verzwakt door de statorstroom te verkleinen, dan zal het nullastpunt naar een grotere hoeksnelheid verschuiven. Tevens zal de koppeltoerenkromme een vlakker verloop krijgen, want differentiatie van vergelijking (15) naar ω levert:

$$\frac{\delta T}{\delta \omega} = - \frac{(G \cdot I_s)^2}{R_a} \quad (19)$$

De verhouding tussen het heersende magnetische veld en het maximale magnetische veld wordt α genoemd. De stroom door de veldwikkelingen is laag en daarom op eenvoudige wijze te variëren met een goedkope transistorchopper. Aangezien het magnetische veld verbonden is aan een maximale waarde, door verzadiging van het ijzer en aan een minimale waarde, door het maximaal toelaatbare motortoerental in verband met vonkloze commutatie en mechanische belasting van de rotor door centrifugaalkrachten, zal een variatie van het motortoerental door veldregeling slechts in beperkte mate mogelijk zijn. Door veldregeling is een regelbereik van 1 op 3 à 4 haalbaar zonder dat het nodig is een machine met compensatiewikkelingen toe te passen.

Ten slotte is het als derde methode van toerentalsturing mogelijk om bij een constant magnetisch hoofdveld de klemspanning van de motor te variëren. Indien de Ohmse spanningsverliezen klein zijn ten opzichte van de in de rotor opgewekte spanning, mag op grond van vergelijking (12) worden aangenomen, dat het toerental bij een constant magnetisch veld evenredig is met de klemspanning. Door de klemspanning te variëren kan de koppeltorenlign dus horizontaal worden verschoven. Het is mogelijk om door het verlagen van de klemspanning het toerental tot lage waarden te regelen.

De klemspanning kan traploos worden gevarieerd door een hoofdstroomchopper, terwijl het ook mogelijk is om de klemspanning in een aantal stappen te variëren, via opdeling van het accupakket en serie-/parallelschakeling van deze delen door middel van schakelaars (afb. 5).

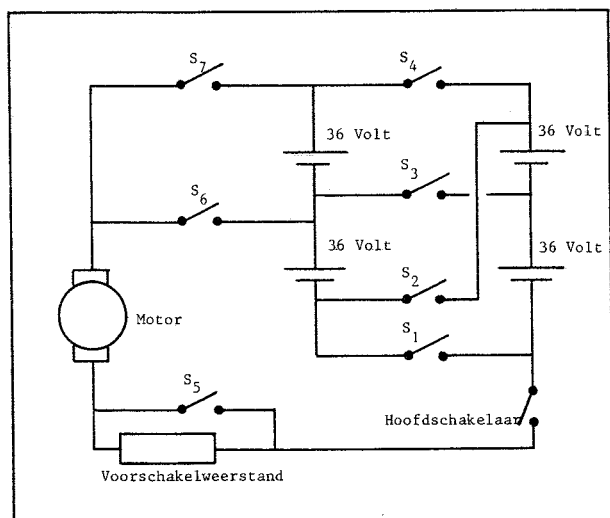
Een chopper is een gelijkspanningsomzetter, die de energiestroom van een voedingsbron naar de belasting varieert. De verandering van de grootte van de energiestroom vindt plaats door periodiek aansluiten en afschakelen van de belasting, waarbij zowel de periodes als de verhouding van de aansluit- en afschakeltijd kunnen worden gevarieerd (afb. 6). De spanning U wordt slechts gedurende de periodiek herhaalde tijdsintervallen, T_{in} , op de motorklemmen aangesloten. Als de schakelaar open staat, zal de diode geleiden en de spanning over de motorklemmen zal nul zijn. De tijd, dat de schakelaar open is, is T_{uit} en de periodes T is gelijk aan $T_{in} + T_{uit}$. De gemiddelde spanning over de motor is dan gelijk aan:

$$\bar{U}_a = \frac{T_{in}}{T} * U \quad (20)$$

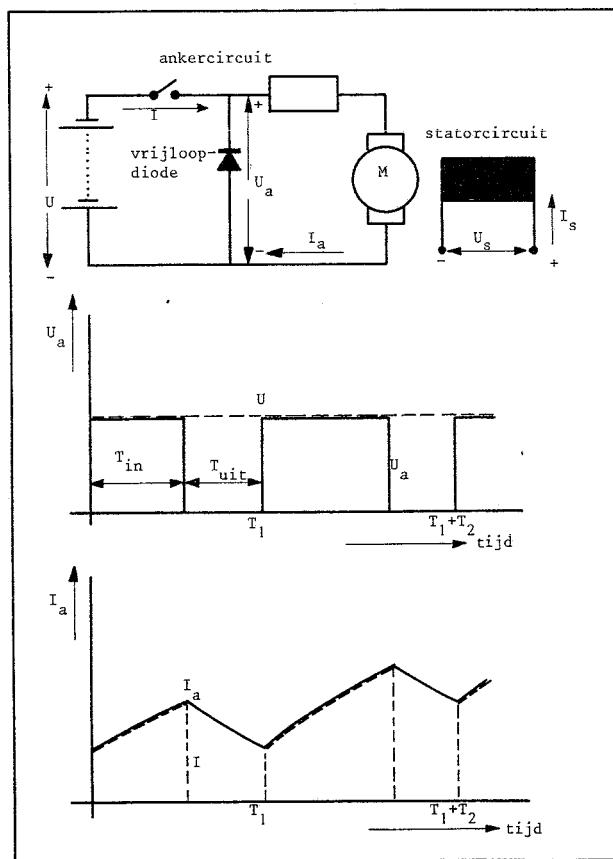
Als de motorklemmen zijn aangesloten op de voedingspanning, neemt de motorstroom bij quasi-constante hoeksnelheid toe volgens een e-macht en als de schakelaar open is zorgt vrijlooptiode ervoor, dat de stroom kan blijven lopen. De werkfrequentie van de onderbreker ligt meestal tussen 50 en 1000 Hz, zodat de schakelaar alleen elektronisch uit te voeren is. Voor de schakelaar van de chopper kunnen vermogenstristoren of thyristoren worden gebruikt.

Eigenschappen van de transistorchopper:

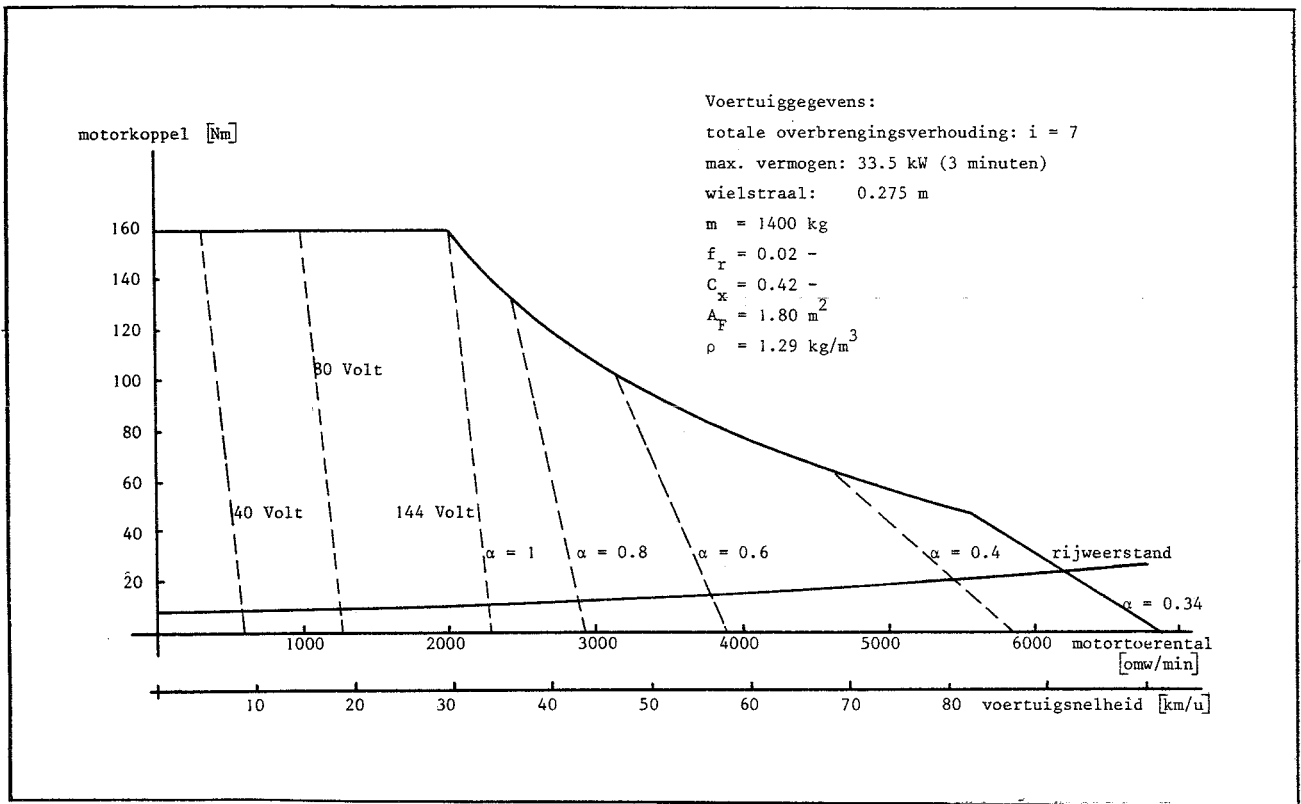
- door de stuurspanning aan te brengen of weg te nemen beheerst men de geleiding en blokkering.
- met transistoren kunnen snelle circuits worden geconstrueerd.
- een hoog rendement is haalbaar.
- de transistor kan geen hoge stromen verdragen (tot 100A).
- er is geen overbelasting mogelijk.
- parallelschakeling van meerdere transistoren levert nog problemen op.
- voor geleiding is blijvende sturing nodig.



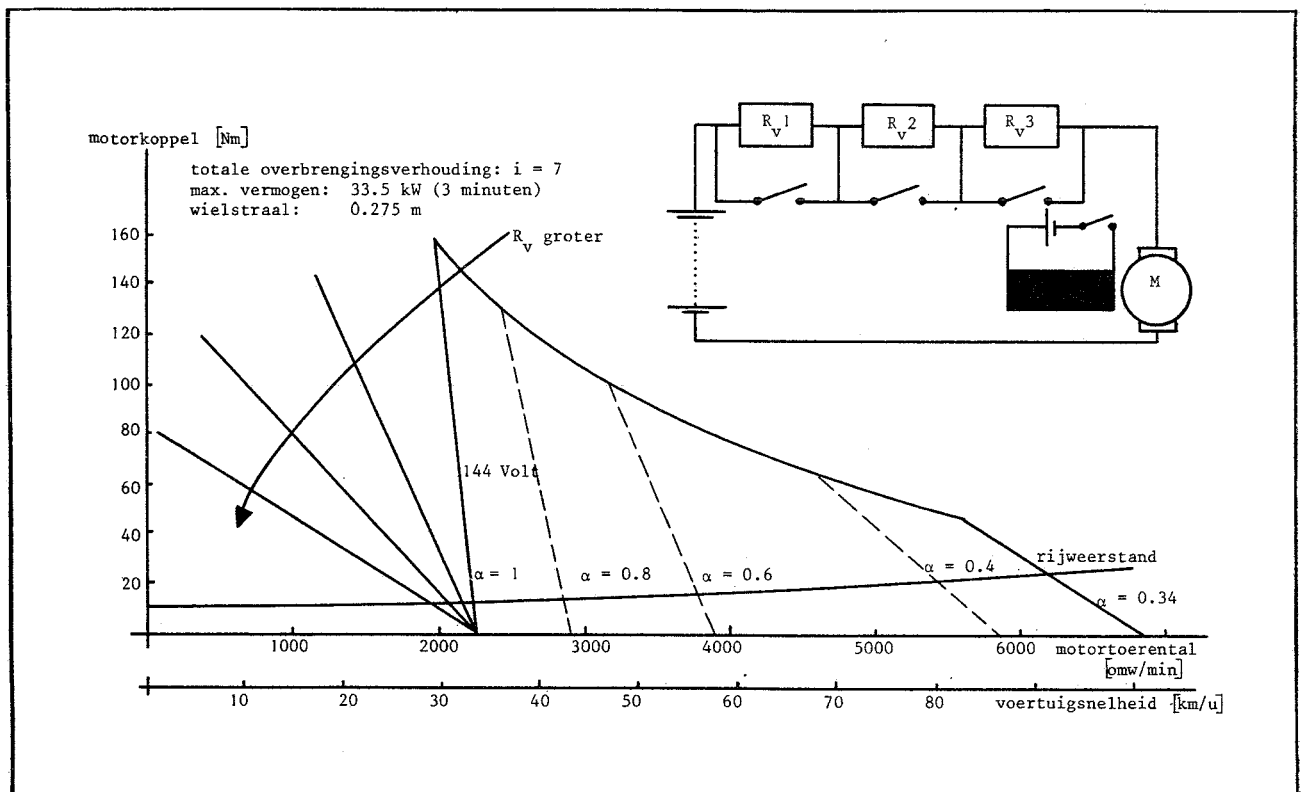
Afb. 5 Getrapte spanningssturing voor anker-circuit



Afb. 6 Spanningen en stromen van een chopper



Afb. 8 Volledig elektronische motorregeling



Afb. 9 Elektrische weerstandsregeling in het anker-circuit

Kenmerken van de thyristorchopper:

- hoge stromen zijn mogelijk (100 - 2000 A).
- één hoofdthyristor is voldoende voor de hoofdstroom.
- snelle schakeltijden zijn te realiseren.
- er is momentane overbelasting mogelijk.
- een hoog rendement is haalbaar.
- er is een ingewikkeld doofcircuit nodig.

De rendementen van de transistorregeling en de thyristorregeling zijn gelijk en bedragen ongeveer 97%. Wegens hogere toelaatbare stroomsterkten lijkt de thyristorregeling voorlopig aantrekkelijker dan de transistorregeling. Toch mag voor de moderne elektrische auto de transistorregeling niet als mogelijkheid worden verworpen, omdat hij door ontwikkelingen op het gebied van de vermogens-transistor te zijner tijd kan concurreren.

Samenvatting:

Het koppeltoerenvlak van de motor kan in twee gebieden worden verdeeld (afb. 7). In gebied I wordt bij constante veldbekrachtiging de ankerspanning geregeld:

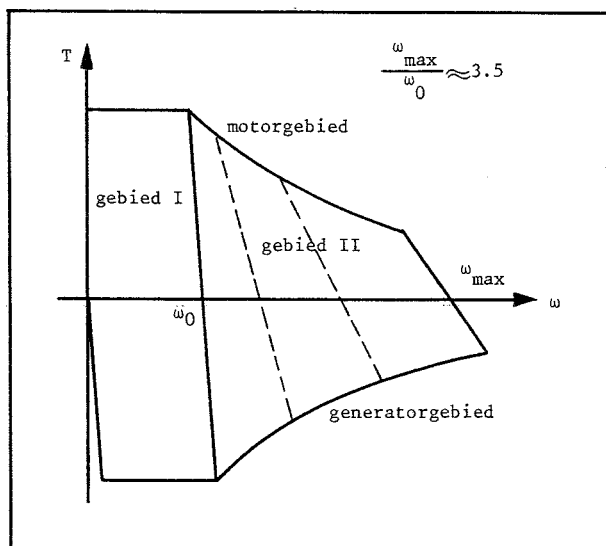
- of traploos door de hoofdstroomchopper, zodat het gehele gebied kan worden gebruikt
- of in een aantal stappen door serie-/parallelschakeling van accudeelten, zodat een gedeelte van dat gebied kan worden gebruikt.

In gebied II wordt bij constante ankerspanning de veldbekrachtiging traploos geregeld door de veldchopper, zodat in dat hele gebied bedrijfspunten van de motor kunnen liggen. ω_0 wordt bepaald door de verzadiging van het ijzer en ω_{max} wordt bepaald door de mechanische belasting van de motor (centrifugaalkrachten) en door de vereiste vonkloze commutatie.

MOGELIJKE AANDRIJFLIJNEN

Aan een elektrisch wegvoertuig dienen met betrekking tot de aandrijving de volgende eisen te worden gesteld:

- eenvoudige en veilige bediening



Afb. 7 Instelbare bedrijfspunten van een onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommachine

- acceleratie- en remprestaties, aangepast aan het overige verkeer
- voldoende koppel om hellingen te overwinnen
- voldoende actieradius
- beperkt lawaai in verband met comfort
- lage aanschaf- en gebruikskosten.

Een auto vereist in principe een regelbereik van 1 op oneindig, omdat alle snelheden tussen stilstand en maximale snelheid moeten kunnen worden bereikt. Snelheden tussen 0 en 5 à 10 km/u komen echter zo kortstondig voor, dat een regelbereik van 1 op 20 met een hoog rendement voldoende is. Bij voertuigen met een verbrandingsmotor geschiedt dit door toepassing van motortoerentalvariëaties van 1 op 6 en een versnellingsbak met overbrengingsverhoudingen van 1 tot 4. Bij de onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommotor wordt meestal een transistorregeling voor de veldbekrachtiging toegepast, omdat die eenvoudig en goedkoop is. De motor heeft in het toereengebied, waarin regeling door de thyristorchopper plaatsvindt, bovendien een hoog rendement.

Omdat door veldregeling slechts een regelbereik van 1 op 3 à 4 kan worden gerealiseerd, is verdere aanpassing door variatie van de ankerspanning, door middel van voorschakelweerstand of variabele overbrengingsverhoudingen noodzakelijk.

Volledig elektronische motorregeling

De chopper voor de ankerspanning is aantrekkelijk, omdat het mogelijk is om de effectieve ankerspanning van de motor verliesarm aan te passen aan het lastproces van de auto, binnen zekere grenzen onafhankelijk van de accu-spanning. Samen met de veldbekrachtiging, die geheel onafhankelijk van het ankercircuit werkt, kan ieder bedrijfspunt in het koppeltoerenvlak worden ingesteld en is een regelbereik van 1 op oneindig haalbaar, zodat met een vaste reductie tussen de motor en de wielen zou kunnen worden volstaan (afb. 8). Deze choppers maken zonder veel bijkomende kosten binnen het gehele toereengebied van de motor een directe overgang mogelijk van voortstuwing naar regeneratieve remwerking. Als voordelen van dit systeem kunnen worden genoemd het uitstekende bedieningsgemak, goed comfort en hoog rendement, omdat de choppers een hoog rendement hebben en energierecuperatie mogelijk is.

Als tussen de motor en het differentieel een vaste tandwieloverbrenging is aangebracht, moet de motor alle toerentalen tot en met het maximale toerental doorlopen. Omdat onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommotoren in het aanloopgebied en bij maximale veldverzwakking een minder goed rendement hebben, kan een handgeschakelde/automatische versnellingsbak of een continu variabele transmissie misschien toch aantrekkelijk zijn, omdat de motor dan vaker in zijn optimale bedrijfsgebied werkt, waardoor het totale rendement van de aandrijflijn gemiddeld beter kan worden, ofschoon het rendement van de transmissie aan het geheel wordt toegevoegd. Een nadeel van de toepassing van een van deze overbrengingen is het feit, dat de aandrijflijn in dat geval nog duurder wordt dan hij al was door de hoge aanschafkosten van de ankerchopper en de omvangrijke hoeveelheid regelelektronika.

Weerstandsregeling in het ankercircuit

Bij de onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommotor

kan het veld worden geregeld door middel van een chopper, terwijl in het ankercircuit uitschakelbare weerstanden kunnen worden opgenomen (afb. 9). Dit was in het verleden de populairste regeling, die werd gebruikt vanwege de lage kosten en de eenvoudige en redelijk gelijkmatige werking. Het motortoerental wordt aangepast door de voorschakelweerstand in een aantal stappen te variëren. Wanneer de verandering van de stroomsterkte bij het in- of uitschakelen van een weerstand te groot is, zullen de personen in de auto dit merken in een stapvormige verandering van de aandrijfkracht. Het is daarom van belang om een voldoende groot aantal weerstandsstappen te gebruiken, opdat een gelijkmatige acceleratie wordt verkregen.

Bij hoge snelheden komt de regeling van de motor geheel voor rekening van het veld, dat maximaal zal zijn bij de ondergrens van dit regelgebied en bij nog lagere snelheden op die maximale waarde wordt gehouden; bij lage snelheden verrichten de voorschakelweerstand hun werk. Dan gaat echter voor aandrijving bestemde energie verloren door omzetting in warmte en energierecuperatie is niet mogelijk in het regelgebied, waarin de voorschakelweerstand worden gebruikt (aangenomen, dat de accudelen niet verschakelbaar zijn).

Tussen de motor en het differentieel kan een vaste of een variabele reductie worden aangebracht. Met een vaste reductie kan in principe worden volstaan, maar het rendement van de aandrijflijn met weerstandsregeling kan aanzienlijk worden verbeterd door een variabele reductie toe te passen, zoals bijvoorbeeld een continu variabele transmissie. De motor kan dan voornamelijk in een gunstige rendementsgebied draaien en bovendien kan worden bereikt, dat de aanloopweerstand over een zo klein mogelijk gedeelte van het snelheidsbereik van de auto worden gebruikt, waardoor ook bij het remmen meer energie kan worden teruggewonnen.

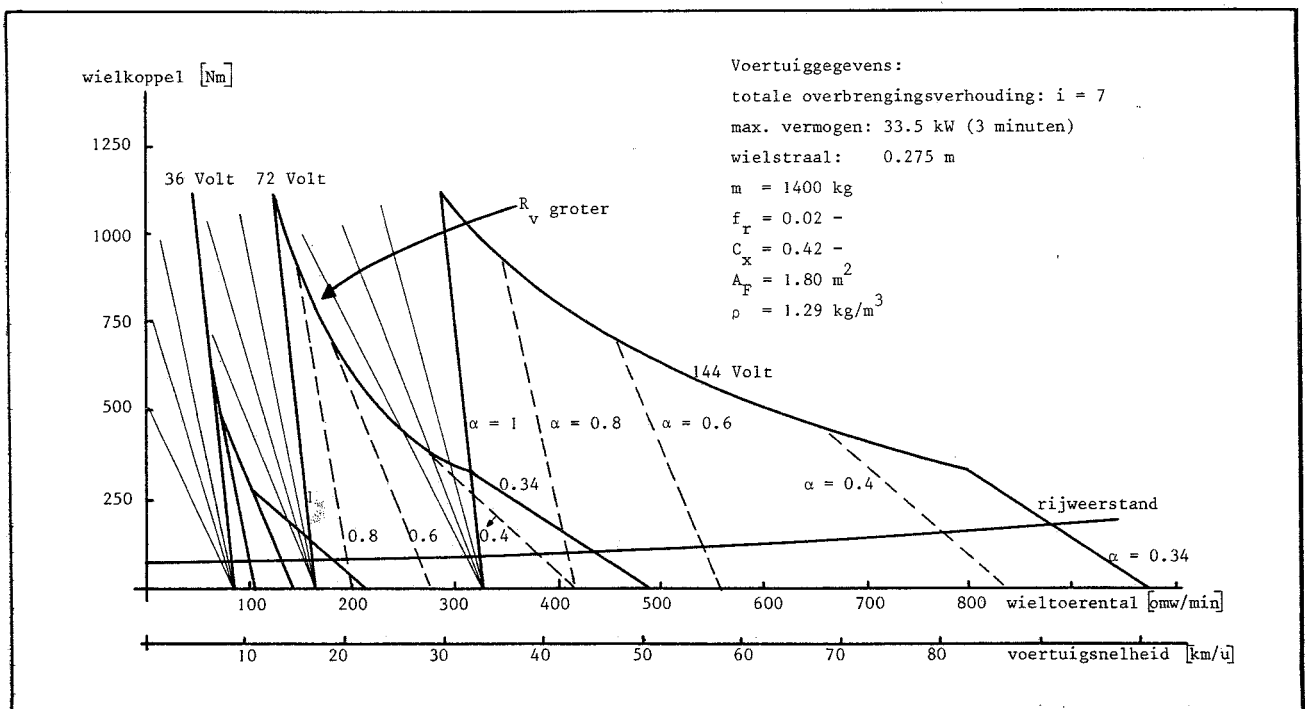
Vanwege de grote verliezen is de weerstandsregeling, zeker in het geval van een vaste reductie, een oplossing, die

voor de moderne elektrische auto niet in aanmerking komt. Het inschakelen van een voorschakelweerstand mag slechts over een zeer beperkt gedeelte van het snelheidsbereik van de auto plaatsvinden.

Getrapte spanningssturing in het ankercircuit

De ankerspanning kan in een aantal stappen worden gevarieerd door het accupakket in groepen te verdelen, die door middel van schakelaars parallel of in serie kunnen worden geschakeld. Als veldverzwakking mogelijk blijft en de spanning van het anker op deze wijze wordt gevarieerd, verplaatst het gebied, waarin de motorregeling plaatsvindt door veldregeling, zich horizontaal in het koppelhoerenvlak. Is het aantal mogelijk in te schakelen waarden klein, dan ontstaan in het koppelhoerenvlak verzamelingen bedrijfspunten, die niet kunnen worden bereikt, waardoor bij het schakelen van de spanning de aandrijfkracht sprongsgewijze verandert. Bovendien valt de aandrijfkracht tijdens het schakelen even weg, indien men stroomloos wenst te schakelen om inbranden van de contactpunten voor de schakelaars te voorkomen.

Als de accu's ongelijkmatig worden belast, kan dit o.a. problemen opleveren bij het opladen van het accupakket, doordat de accu's die niet veel energie hebben geleverd sneller zullen zijn opgeladen en daardoor eerder de gaspanning bereiken. Bij deze spanning, waarbij waterstof en zuurstof in gasvorm worden ontwikkeld, dient explosiegevaar door ventilatie van de accukoker vermeden te worden. Om een gelijkmatige belasting zeker te stellen is bij 144 Volt een dergelijke schakeling in drie trappen eenvoudig te verwezenlijken (afb. 5). Deze motorregeling heeft een hoog rendement, omdat de spanningsverliezen over de schakelaars klein zijn en er een directe overgang mogelijk is van motorbedrijf naar rembedrijf. Om een soepele snelheidsregeling mogelijk te maken kan men de verzamelingen van niet te bereiken bedrijfspunten verkleinen door voorschakelweerstand in het ankercircuit op te nemen, waardoor de richtingscoëfficiënt van de



Afb. 10 Getrapte spanningssturing in het ankercircuit

koppeltoerenlijn kan worden veranderd. Door deze voorschakelweerstand wordt het rendement van de aandrijflijn wel nadelig beïnvloed, maar het rendement is in ieder geval beter dan dat van de aandrijflijn, waarin alleen voorschakelweerstand in combinatie met veldstroomregeling worden gebruikt.

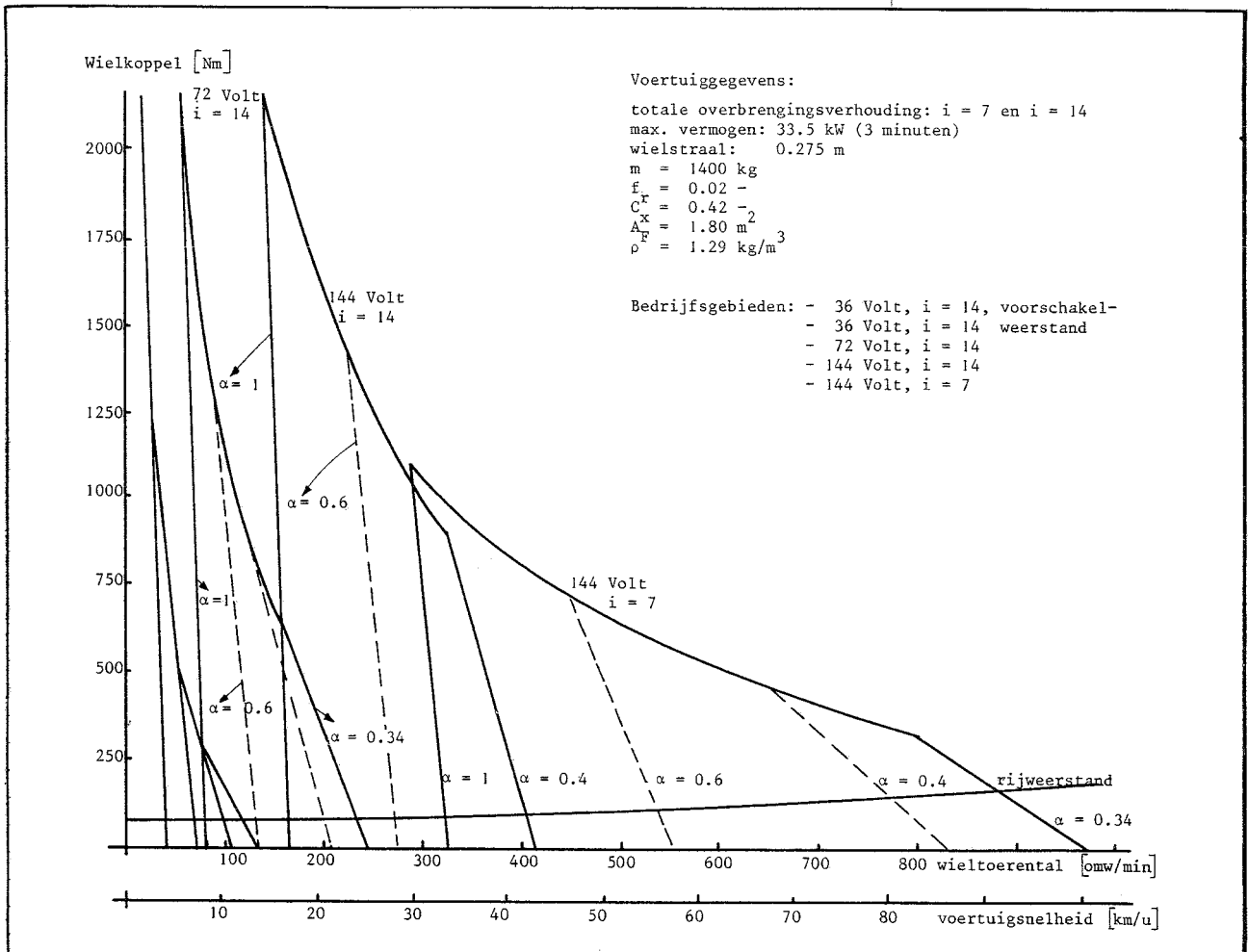
In de aandrijflijn kan de functie van de voorschakelweerstand worden overgenomen door een koppelomvormer, die bij het aanlopen en bij het schakelen van de spanning voor een soepele aandrijving zorgt. De koppelomvormer maakt de koppeling tussen de aangedreven as en de aandrijvende as minder vast, waardoor de schokken, die door de getrapte spanningssturing optreden worden beperkt. Het regelbereik van de koppelomvormer maakt het mogelijk om bij spanningssturing slechts enkele stappen toe te passen. De slip in de koppelomvormer dissipeert echter ook energie, juist in het geval van de stadsauto, die vaak rijdt onder instationaire bedrijfscondities. De totale kosten van deze aandrijflijn zijn echter gunstig en het comfort is te vergelijken met dat van een auto met een verbrandingsmotor en een automatische versnellingsbak. Ook door een variabele reductie toe te passen kan het aantal niet-instelbare bedrijfspunten in het koppeltoerenvlak van de wielen kleiner worden gemaakt. Als de totale overbrengingsverhouding van de motor naar de wielen ongeveer 7 bedraagt, dan zien de wielen de bronkarakteristiek van **afb. 10**. Wanneer nu aan deze overbrengingsverhouding nog een reductie van 14 als

mogelijkheid wordt toegevoegd, dan worden de verzamelingen van niet-bereikbare koppeltoerencombinaties kleiner (**afb. 11**). Bij het op snelheid komen van het voertuig, worden achtereenvolgens de volgende deelgebieden doorlopen:

- 36 Volt met voorschakelweerstand en overbrengingsverhouding 14
- 36 Volt met overbrengingsverhouding 14
- 72 Volt met overbrengingsverhouding 14
- 144 Volt met overbrengingsverhouding 14
- 144 Volt met overbrengingsverhouding 7.

Er hoeft dus maar één keer mechanisch geschakeld te worden, als het voertuig vanaf stilstand zijn snelheidsgebied doorloopt. Door meer dan twee reducties in de versnellingsbak in te bouwen wordt het aantal niet-bereikbare koppeltoerencombinaties nog kleiner. Deze overbrengingsverhoudingen moeten zo worden gekozen, dat:

- zoveel mogelijk bedrijfspunten kunnen worden bereikt,
 - de motor in het gunstigste rendementsgebied werkt en
 - zo weinig mogelijk geschakeld wordt bij snelheden en snelheidsvariëaties, die in de stad vaak voorkomen.
- Een hoog rendement en een grote actieradius zijn met dit systeem haalbaar, omdat de voorschakelweerstand slechts nodig is om de motor aan te laten lopen (de auto



Afb. 11 Getrapte spanningssturing met twee overbrengingsverhoudingen

even op gang te brengen), waarna de motor verder in gebieden met hoge rendementen werkt. Deze aandrijflijn heeft als nadeel, dat de trekkracht om twee redenen wordt onderbroken:

- de ankerspanning wordt stroomloos geschakeld
- een andere overbrengingsverhouding wordt ingeschakeld bij onbelaste motor.

Als een continu variabele transmissie wordt gebruikt, vindt echter alleen trekkrachtonderbreking plaats door elektrisch schakelen, want deze transmissie varieert de overbrengingsverhouding onder belasting.

Door de Interafdelingswerkgroep Elektrische Auto is een automatische getrapte spanningssturing in het ankercircuit van de motor ontworpen, die het accupakket zodanig schakelt, dat 36, 72 of 144 Volt aan de motorklemmen ontstaat. De gebruikte motor is een onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommotor van het fabrikaat Siemens, die speciaal voor voertuigen is ontwikkeld:

nominaal toerental	2200	omw/min
nominaal vermogen	17	kW
maximaal toerental	6700	omw/min
maximaal vermogen	33.5	kW.

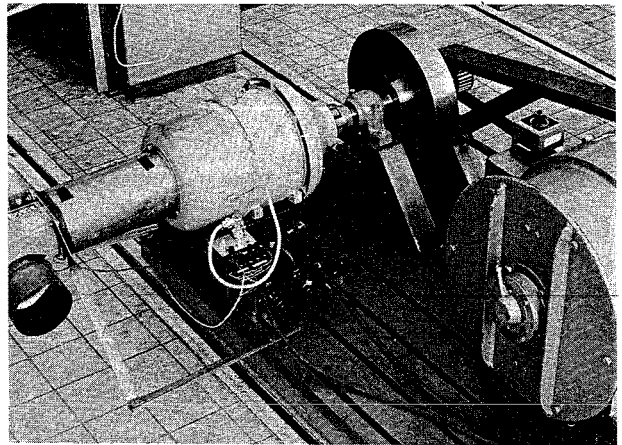
Om deze automatische spanningssturing onder instationaire bedrijfscondities te testen is een vliegwielproefstand opgebouwd (afb. 12). Aan de motor is een vliegwiel gekoppeld, waarvan het massatraagheidsmoment overeenkomt met de massatraagheid van de auto. De rolweerstand en de luchtweerstand van de auto worden nagebootst door een elektrische rem, die via een tandriemoverbrenging aan de as van het vliegwiel is gekoppeld.

Tussen de motor en de wielen wordt in het voertuig een automatische planetaire versnellingsbak met drie reducties geconstrueerd. Om de verliezen in deze automatische versnellingsbak te beperken wordt geen koppelvormer toegepast, hetgeen mogelijk is door een goede motor-synchronisatie.

CONCLUSIE

Door de diverse automobielfabrikanten worden in allerlei voertuigen verschillende aandrijflijnen toegepast en getest. De lastprocessen en belastingscondities bij de beproevingen van deze voertuigen zijn zelden gelijk, waardoor het moeilijk is om de uitkomsten van deze onderzoeken te gebruiken voor een betrouwbare vergelijking van de onderzochte aandrijflijnen.

De Interafdelingswerkgroep Elektrische Auto heeft zich onder andere tot doel gesteld om diverse aandrijfconcepten in eenzelfde voertuig te construeren en te beproeven. Omdat de rendementen van de verschillende onderdelen van een aandrijflijn niet constant zijn, maar afhankelijk van het bedrijfspunt, waarin de desbetreffende component zich bevindt, variëren, is het moeilijk om het gemiddelde rendement van een aandrijflijn te bepalen. Er is daarom een begin gemaakt met de ontwikkeling van een gedetailleerd simulatieprogramma voor het elektrisch voertuig om het grote aantal mogelijke aandrijflijnen wat betreft rendement te kunnen vergelijken onder gelijke omstandigheden. Het programma moet in staat zijn om de onafhankelijk bekrachtigde gelijkstroommotor met verschillende regelingen, accu's en transmissies bij diverse ritcycli (belastingscycli) van de auto door te rekenen. Het feit, dat een voertuig en een aandrijflijn kunnen wor-



Afb. 12 Proefopstelling voor automatische spanningssturing

den gegeneerd uit opgeslagen modellen, waarin de aan de diverse onderdelen gemeten rendementswaarden voor verschillende bedrijfsomstandigheden worden bewaard, maakt een dergelijk rekenprogramma uiterst flexibel.

Als eenmaal een voertuig, een aandrijflijn en een ritcyclus zijn uitgekozen, kan die auto met kleine stappen in de tijd vorderen op zijn weg en kan per stap het energiegebruik van het voertuig en de aandrijfelementen worden bepaald. Als met behulp van het simulatieprogramma de mogelijke oplossingen kunnen worden beoordeeld, zullen enige aandrijflijnen in de auto worden beproefd om de theorie te toetsen en de aandrijflijnen op praktische aspecten te beoordelen. De gedachten gaan daarbij uit naar:

- een aandrijflijn met getrapte spanningssturing in het ankercircuit, elektronische veldstroomregeling en een automatische versnellingsbak
- een aandrijflijn met volledig elektronische motorregeling en eventueel een versnellingsbak
- een aandrijflijn met alleen elektronische veldstroomregeling en een continu variabele transmissie.

Gehoopt wordt op deze wijze een zinvolle bijdrage te leveren aan het tot stand komen van elektrische personenauto's, waarmee (in kleine aantallen) ervaring kan worden opgedaan, voordat de toepassing door toenemende benzineschaarste actueel wordt.

LITERATUUR

- [1] Koumans, W. A., Vervoerstechniek. T. H. Eindhoven, diktaat.
- [2] Schot, J. A., Electromechanica voor W. T. H. Eindhoven, diktaat.
- [3] Ratcliff, J. F., Torque converters make electric vehicles competitive. Electric Vehicle Symposium Düsseldorf.
- [4] Griffith, J. T., Performance of an electric van fitted with a hydrodynamic torque converter transmission. Electric Vehicle Symposium Düsseldorf.
- [5] Electrics' star is rising on battery advances. Automotive News, 10 april 1978.
- [6] Peter, J. M., L'évolution des semi-conducteurs de puissances. Application à la propulsion électrique. Ingenieurs de l'automobile, juni 1975.
- [7] Bader, C., Elektrische und hybride Antriebe für Nutzfahrzeuge. Automobiltechnische Zeitschrift, juni 1979.

De auteur dankt prof. ir. W. A. Koumans en prof. ir. J. A. Schot voor de bijdrage die zij hebben geleverd aan het tot stand komen van dit onderzoek.