

'n Driefasewisselrigter met selektief geprogrammeerde pulswydtemodulasie vir 'n elektriese voertuig met batteryvoeding

L. van der Merwe* en J.D. van Wyk

Lab. vir Energie, Fakulteit Ingenieurswese, R.A.U., Posbus 524, Johannesburg 2000

UITTREKSEL

Die ontwikkeling en evaluasie van 'n 15-kVA-wisselrigter met pulswydtemodulasie en 144-V-batteryspanning vir 'n elektries-hidrouliese hibriede voertuig word bespreek. Die voertuig is toegerus met 'n induksiemasjien met kourotor as traksiemasjien. Daar word aandag gegee aan die uitleg van die wisselrigter, die gebruik van bipolarêre Darlington-transistorskakelaars, die beskerming van die skakelaars, basissturing van die transistors en beheer van die wisselrigter. Die wisselrigter en rendement van die aandrywing word geëvalueer en die installering van die wisselrigter in die voertuig word bespreek.

ABSTRACT

A three-phase inverter with selectively programmed pulse width modulation for an electric vehicle with battery supply

The development and evaluation of a 15 kVA inverter with 144 V battery voltage and pulse width modulation for an electric-hydraulic hybrid road vehicle are discussed. The vehicle is equipped with a squirrel cage induction traction machine. This article covers the configuration of the inverter, the use of integrated bipolar Darlington power transistors, protection of the power switches, base drive of the transistors and control of the inverter. The inverter and drive energy efficiency are evaluated, and the installation of the inverter in the vehicle is discussed.

*Tans verbonde aan die NNEI, WNNR, Pretoria.

1. INLEIDING

Die wisselrigter wat ontwikkel is, maak deel uit van 'n aandryfstelsel wat rondom 'n nuwe konsep vir die aandrywing van elektriese voertuie getoets is.¹ Alhoewel die eenheid in 'n eksperimentele padvoertuig – 'n Volkswagen Passat – getoets is, as deel van die program van die Nasionale Elektriesevoertuigkomitee, is dit ook geskik vir installering in ander soortgelyke voertuie, byvoorbeeld ondergrondse mynlokomotiewe met batteryvoeding.

1.1 Beskrywing van die voertuigaandrywing

Die elektriese traksiemasjien (figuur 1 – ETM) se rotor en stator kan ten opsigte van mekaar roteer. Geen spoedbeheer word benodig nie. 'n Elektromagnetiese koppelaar (figuur 1 – EK) kan die rotor en stator van die traksiemasjien aan mekaar koppel indien die masjien se stator nie opgewek word nie en direkte hidrouliese aandrywing of remming gewens is.

Albei die roterende komponente van die elektriese masjien is gekoppel aan hidrostatische masjiene (figuur 1 – HMA, HMB) met konstante slag. Die rotor-as is ook direk deur die dryfas aan die voertuigwiele gekoppel (figuur 1 – DA). Twee hidrouliese ak-

kumulators (figuur 1 – HA) is deur 'n elektriese beheerde aan/afklep (figuur 1 – AAK) aan die hoë-drukkant van die hidrouliese baan gekoppel.

Die olietoevoer na elk van die hidrostatische masjiene word deur drierigtingkleppe beheer (figuur 1 – KA, KB) wat voorsiening maak vir oliestroom in die trurigting, asook vir die olie om omgelei te word sodat die hidrostatische masjiene onder nullas kan roteer. Die werking van die hidrouliese stelsel word volledig in (1) uiteengesit.

1.2 Die elektriese traksiemasjien

'n Driefasige kourotorinduksiemasjien met stator gewikkel vir 'n effektiewe fasespanning van 75 V word gebruik. (Hierdie spanning word deur middel van die wisselrigter uit 'n 144-V-battery verkry). Sowel die stator as die rotor van die masjien loop in laers, en is vry om te roteer. Die driefasetoevoer na die stator geskied via drie sleepringe met koolstofborsels.

1.3 Eienskappe waaraan die wisselrigter-masjienkombinasie moet voldoen

Die wisselrigter wat ontwikkel is (figuur 1 – WR), dien as energie-aanpasser tussen die gelykspanningsbron (figuur 1 – A) en wisselspanningsmasjiene. Aangesien geen snelheidsbeheer onder lastoestande verlang word nie en die snelheid van die induksiemasjien deur die aangelegde frekwensie bepaal word, is dit op die oog af nie nodig dat die wisselrigter oor 'n verstelbare frekwensie beskik nie. Die induksiemasjien moet egter vanaf stilstand tot die nominale werksnelheid versnelbaar wees. Vir 'n optimale versnelling by minimum stroom moet die wisselrigter van 'n verstelbare frekwensie- en verstelbare spanningskarakteristiek (VFVS) voorsien word.

Dit beperk piekdrywing tydens versnelling tot 'n minimum. Die gevolglike gebruik van kleiner skakeltransistors (laer piekstrom-spesifikasie) dra by tot 'n verlaging in komponentkoste en vermindering van die volume en gewig van die eenheid. Verder moet daar ook gebruik gemaak word van basisdryfbane en beskerming wat so eenvoudig moontlik is.

2. ONTWERP VAN DIE WISSELRIGTER

Ten einde die wisselrigter geskik te maak vir gebruik in voertuie, is die ontwerp daarvan aan baie spesifieke eise onderworpe wat betref die massa, volume, konstruksie, onderhoud en beskerming teen wanbelasting.

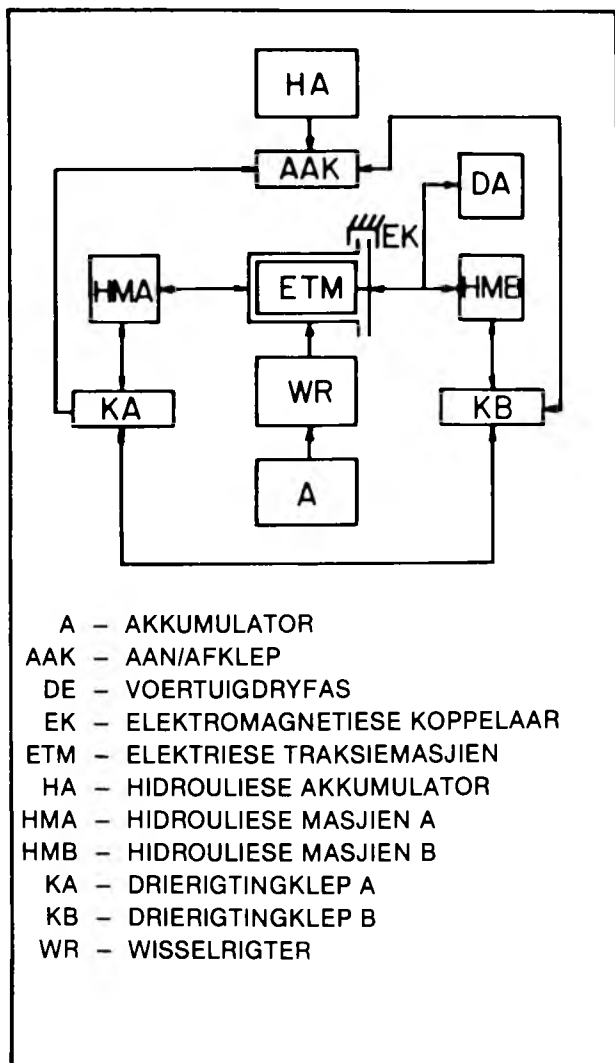
Sommige van hierdie vraagstukke word kortliks in die onderstaande bespreking behandel.

2.1 Ontwerpfilosofie

Die ontwerpfilosofie berus op die volgende kriteria:

- maksimum drywingsdigtheid;
- lae koste;
- minimum kompleksiteit; en
- voldoende beskerming teen wanbelasting.

Maksimum drywingsdigtheid word verkry deur van bipolêre transistors as drywingskakelaars²

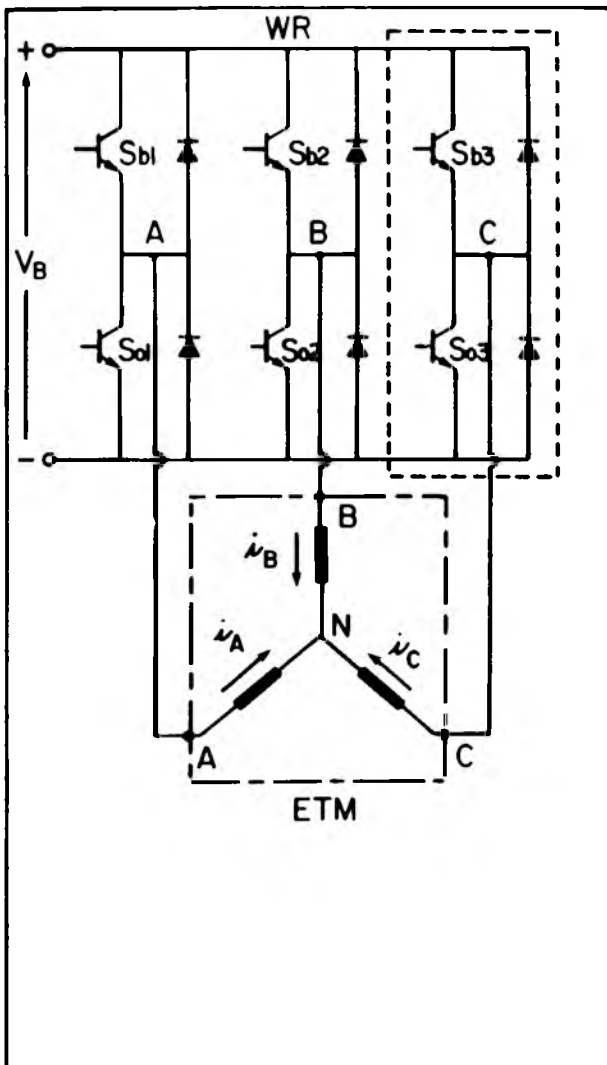


FIGUUR 1: Blokdigram van die voertuigaandrywingstelsel.

gebruik te maak. Dit skakel die gebruik van dwing-kommutasiestroombane uit en lewer lae skakel- en geleidingsverliese. Dit verseker dat 'n drywingsrendement van 93% deur die wisselrigter behaal word by die relatief lae batteryspanning van 144 V. Minder verkoeling is nodig vanweë die laer verliese en 'n hittepunt met 'n kleiner volume kan gevolglik gebruik word, wat ook die koste en volume van die wisselrigter verminder. Aangesien geforseerde verkoeling gebruik word, is 'n hoë drywingsdigtheid (316 W/l) in die finale prototipe moontlik (figuur 15(a)).

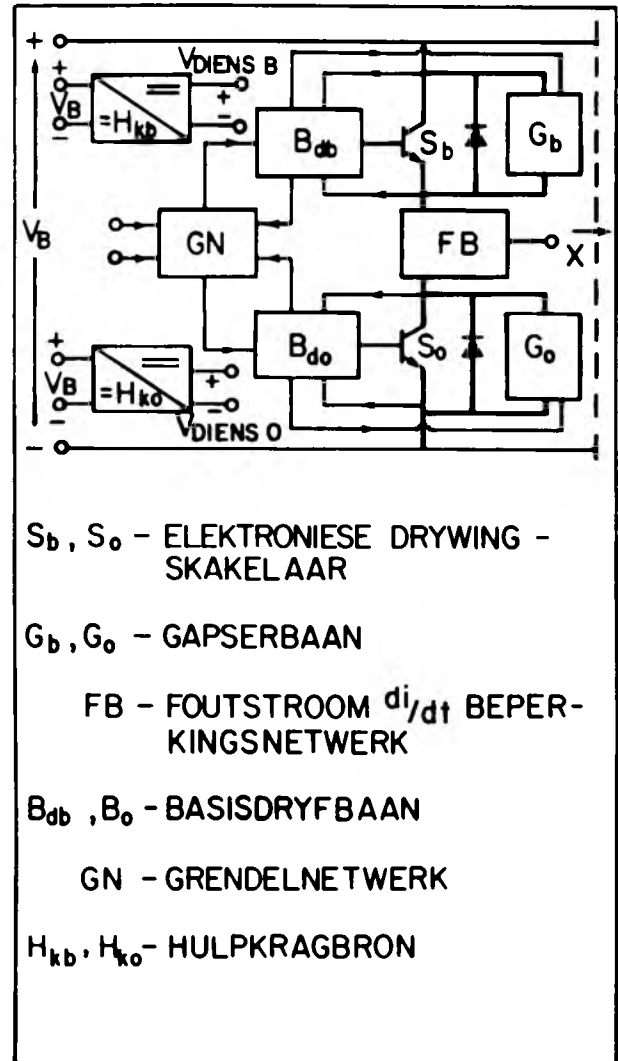
2.2 Die wisselrigterarm

Figuur 2 toon die algemene konfigurasië van 'n spanningsgevoerde transistorwisselrigter (WR) belas met 'n traksiemasjien (ETM). 'n Driefasige wisselrigter word uitgebeeld. In hierdie geval bestaan die wisselrigter uit drie arms, waarvan een vir elke fase benodig word. 'n Enkele arm word deur die stippellyne aangedui. Oor die algemeen kan 'n n-fasige wisselrigter verkry word deur van n arms gebruik te maak, met die uitsetgolfvorms se fundamentele komponent $360^\circ/n$ ten opsigte van mekaar verskuif.



FIGUUR 2: Algemene driefasige transistorwisselrigterkonfigurasië.

Die wisselrigterarm in figuur 2 is vereenvoudig om illustrasië te vergemaklik. Figuur 3 is 'n blokdiagrammatiese voorstelling van 'n praktiese transistorwisselrigterarm, met die nodige ondersteunende netwerke aangedui. Elke substelsel, soos in figuur 3 uitgebeeld, word in stelselverband bespreek.



S_b, S_o - ELEKTRONIESE DRYWING - SKAKELAAR

G_b, G_o - GAPSERBAAN

FB - FOUTSTROOM di/dt BEPERKINGSNETWERK

B_{db}, B_o - BASISDRYFBAAN

GN - GREDELNETWERK

H_{kb}, H_{ko} - HULPKRAGBRON

FIGUUR 3: Praktiese wisselrigterarm: blokdiagramvoorstelling.

Die wisselrigterarm bestaan uit die volgende:

- Twee elektroniese drywingskakelaars (S_b en S_o). In dië geval is elkeen saamgestel uit 'n geïntegreerde bipolêre Darlingtone-drywingstransistor met vryloopdiode in anti-parallel. Die skakelaars het bipolêre stroom- en monopolêre spanningsvermoë. Twee skakelaars per arm is nodig om 'n bipolêre lastroom te verkry.
- Twee gapsernetwerke (G_b en G_o). Die gapsernetwerke verseker dat die skakellokusse van die elektroniese drywingskakelaars tydens aan- en afskakeling binne veilige spannings-, stroom- en drywingsgrense bly.³
- Foutstroombeperkingsnetwerk (FB). In wisselrigters met bipolêre stroomvermoë kan 'n kritieke stroompad identifiseer word. Uit figuur 4(a) kan gesien word dat, indien S_b en S_o gelyktydig sou

aanskakel, die bron V_B gekortsluit sal wees. 'n Kortsluitstroom deur S_b en S_o sal ontstaan wat beide skakelaars kan vernietig. Hierdie fouttoestand moet herken en die nodige beskermingsmaatreëls getref word. 'n Eindige tydverloop vind plaas vandat die fout opgespoor is, totdat enige van die beskermingsmaatreëls in werking kan tree, hoofsaaklik vanweë die drywingskakelaars se stoortyd (enkele mikrosekondes). Gedurende hierdie tyd moet die foutstroom se piekwaarde beperk word sonder om ekstra verliese in die stelsel te veroorsaak. Die foutstroombeperkingsnetwerk is hiervoor verantwoordelik. Soos in figuur 4(b) aangedui, neem dit die vorm aan van 'n lineêre tussenfase-induktor per wisselrigterarm.

- Basisdryfbane (B_{db} , B_{do}). Elke elektroniese drywingskakelaar beskik oor 'n eie basisdryfbaan wat as versterker dien tussen die stuursein (lae drywingsvlak) en die skakelaar, om aan laasgenoemde se stuurvereistes te voldoen. 'n Uiteenlopende versameling stuurtegnieke is moontlik.³ In die ontwerp van die basisdryfbaan word die verkryging van 'n optimale stuursein nagestreef om skakelverliese in die drywingstransistor so laag moontlik te hou. Minimum aan- en afskakeltyd van die dry-

wingstransistor is ook 'n belangrike ontwerpouerwering, terwyl sorg gedra moet word dat verliese in die basisdryfbaan steeds tot 'n minimum beperk word. Sodra 'n foutstroom herken word, moet die basisdryfbaan ook die drywingstransistor se basisstroom vinnig genoeg inhibeer (tipies $< 5 \mu s$) om die foutstroompiek binne veilige grense te hou.

Die ontwerp van die basisdryfbaan in hierdie toepassing word vergemaklik deur die gebruik van Darling-ton-transistors vir die drywingskakelaar.

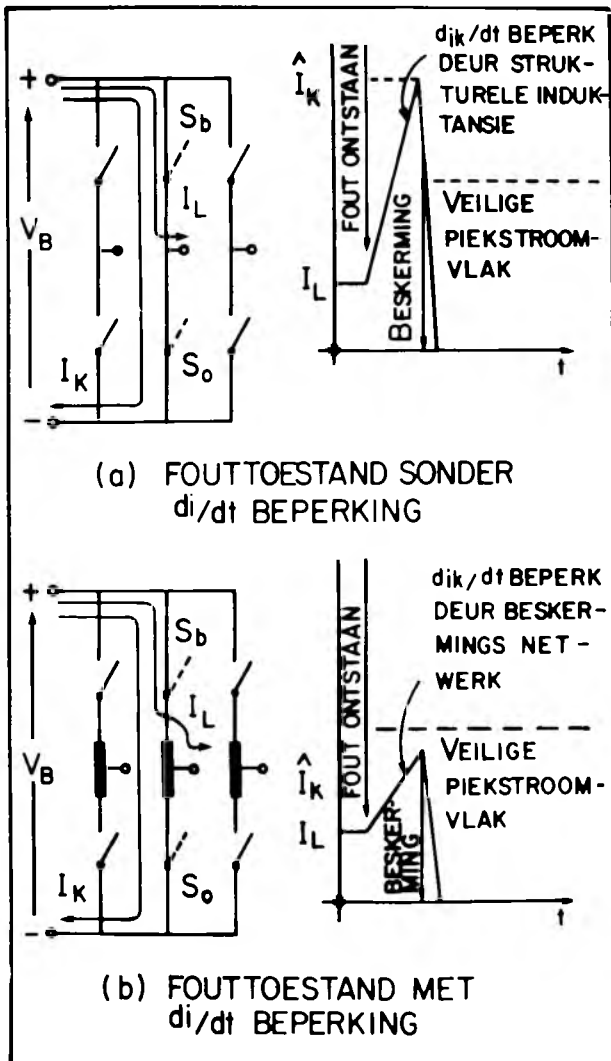
- Grendelnetwerk. Die grendelnetwerk (GN) verseker dat S_b en S_o tydens normale bedryf nie gelyktydig aangeskakel word nie. Die elektroniese grendelnetwerk neem onder meer die stoortyd van die drywingstransistors in ag.

- Hulpkrabron (H_{kb} , H_{ko}). Die hulpkrabron voorsien die basisstuurbaan asook die grendelnetwerk direk vanaf die 144-V-batteryspanning. Afhangende van die isolasietegniek wat toegepas word, kan elke drywingstransistor oor sy eie hulpkrabron beskik of kan 'n enkele hulpkrabron al die skakelaars bedien.

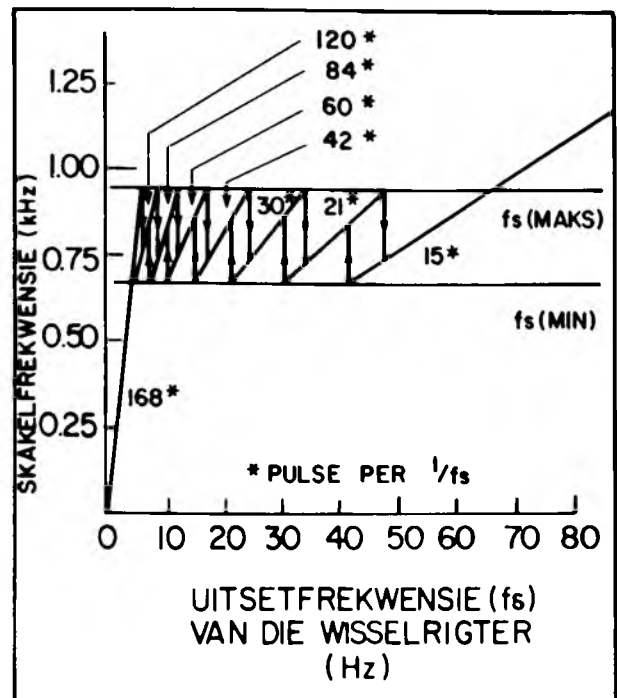
2.3 Beheerstrategie

Die VFVS-karakteristiek word verkry deur gebruik te maak van 'n eenvoudige stuurbaan, ontwerp om 'n enkele grootskaalse geïntegreerde stroombaan.

Selektief geprogrammeerde pulswydtemodulasie word gebruik.⁴ In hierdie metode word 'n vooraf geprogrammeerde geheue-element op só 'n wyse aangewend dat harmonieke van die uitsetgolfvorm se grondfrekwensie selektief elimineer word. Die stuurseingenerator is meer kompleks as dié vir sinusvormige pulswydtemodulasie, maar dieselfde resultate kan behaal word met 'n skakelfrekwensie van drie tot tien maal laer, afhangende van die eienskappe wat



FIGUUR 4: Die funksie van die foutstroom- di/dt -beperkingsnetwerk.



FIGUUR 5: Wisselrigterskakelfrekwensie as funksie van die uitsetfrekwensie.

nagestreef word. Vir dieselfde bronspanning word die effektiewe waarde van die grondkomponent van die wisselrigter se uitsetspanning egter verminder.

Om te verhoed dat die skakelfrekwensie met toenemende uitsetfrekwensie te hoog word, word die frekwensieverhouding p aangepas, waar

$$p = \frac{f_{\text{draer}}}{f_{\text{uit}}} \quad (1)$$

Figuur 5 toon 'n tipiese verandering van draerveelvoud (aantal pulse per uitsetgolferiode) met uitsetfrekwensie wat in 'n geïntegreerde stuurseingenerator voorkom.⁴

Die skakelfrekwensie (f_{draer}) verander binne 'n band van 265 Hz.

Histerese is ingebou, om te verhoed dat daar tussen twee draerveelvoude ossileer word.

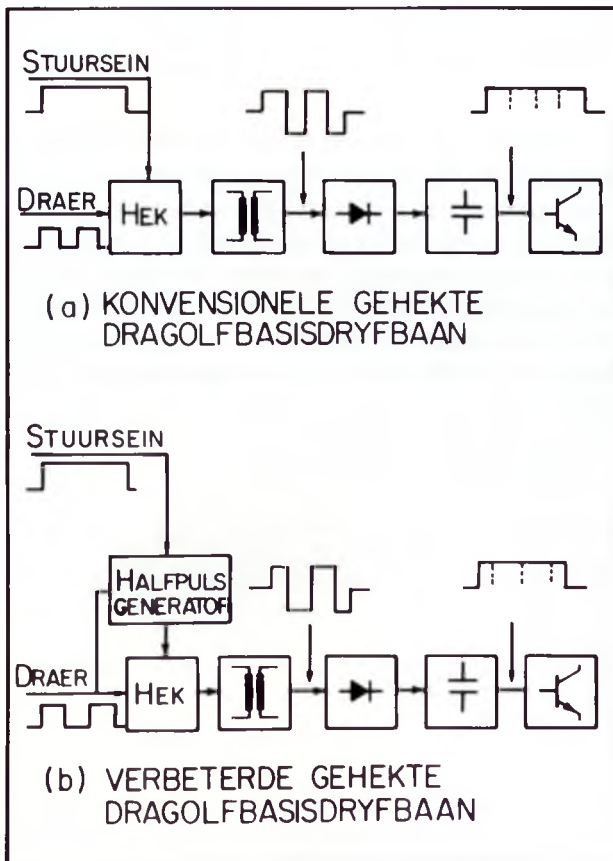
2.4 'n Unieke basisdryfbaan met dragolftegniek en magnetiese isolasie

Figuur 6(a) toon 'n gehekte dragolfbasisdryfbaan.⁵ 'n Draer met vaste frekwensie word deur 'n hek gestuur wat by wyse van die verlangde stuursein beheer word. Na transformasie vind gelykriktig plaas. As gevolg van die lekinduktansie van die transformator is die gelykgerigte sekondêre spanning nie konstant nie.⁵ Alhoewel 'n filter aangebring kan word om die spanning konstant te hou, kan die stoortyd van die transistor van die hoofskakelaar dit onnodig maak. Die uitsetfilter kan ook vermy word deur gebruik te maak van twee transformators waarvan die

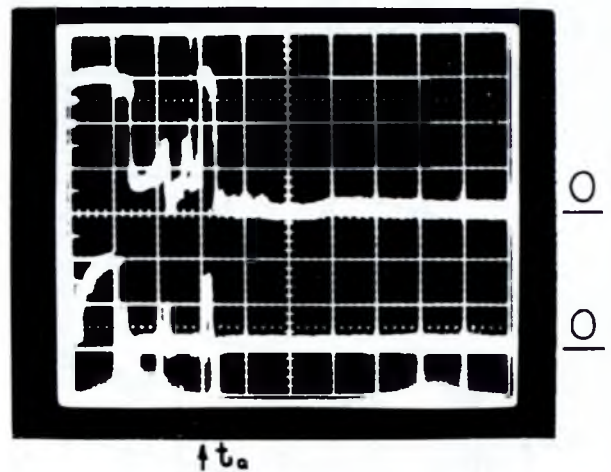
golfvorms oorvleuel.⁵ Hierdie oplossing sou egter te ingewikkeld wees vir die huidige toepassing.

Tydlike wegval van die basisstroom kan toegelaat word, mits dit nie te lank duur nie. Die hoofskakelaars wat in die wisselrigter van figuur 2 gebruik word, is geïntegreerde Darlington-pare. Aangesien die uitgangstransistor in hierdie konfigurasie nooit diepversadig word nie, is die stoortye oor die algemeen korter as vir diepversadigde enkele bipolêre en gekompenseerde Darlington-transistors⁸ en gevolglik kan die filter só gekies word dat die gedrag van die hoofskakelaar steeds aanvaarbaar is.

Die hekfunksie moet met die draer gesinchroniseer wees ten einde suksesvolle afskakeling te verkry. (Afskakeling moet plaasvind tydens 'n nuldeurgang van die vloed). Sonder sinchronisasie kan enige oorblywende energie in die stuurbaan se transformator kern deur die sekondêre winding uitloop en kan die transistor weer van 'n ongewenste positiewe basisstroom voorsien word op tydstip t_a , getoon in figuur 7(a). Dit

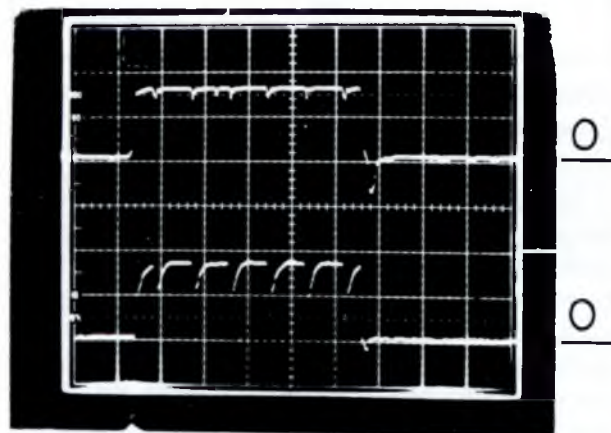


FIGUUR 6: (a) Konvensionele gehekte dragolfbasisdryfbaan en (b) verbeterde gehekte dragolfbasisdryfbaan.



FIGUUR 7(a): Ossilogram van die basisspanning en -stroom wat foutiewe heraanakeling (t_a) toon.

Bo: $v_{BE} = 0,5 \text{ V/cm}$
 Onder: $i_B = 2 \text{ A/cm}$
 Tydbasis: $20 \mu\text{s/cm}$

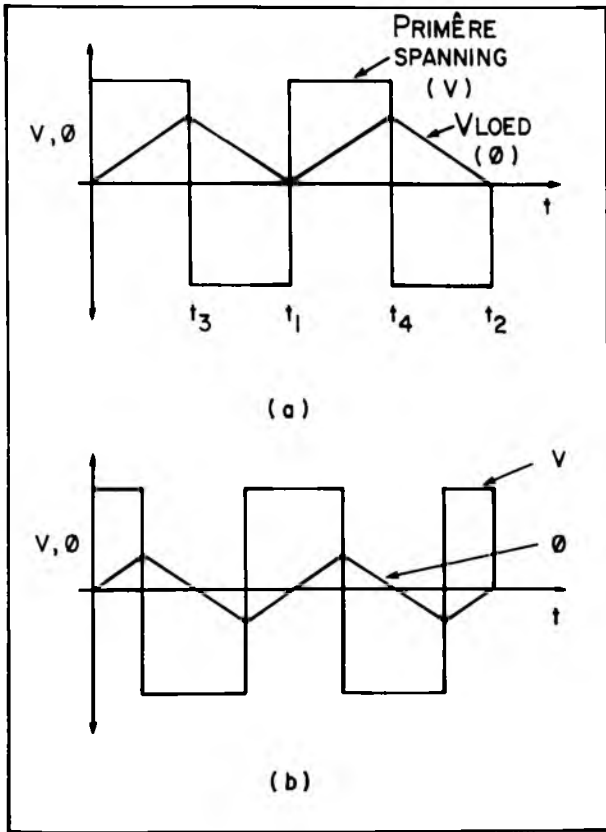


FIGUUR 7(b): Ossilogram van die basisspanning en -stroom vir 'n verbeterde gehekte dragolfbasisaan-drywing.

Bo: $v_{BE} = 1 \text{ V/cm}$
 Onder: $i_B = 2 \text{ A/cm}$
 Tydbasis: $50 \mu\text{s/cm}$

kan heraanakeling en gevolglik faling van die hooftransistor tot gevolg hê.

'n Eenvoudige hekfunksie, soos dié in figuur 6(a), het egter die nadeel van onderbenutting van die transformator kern deurdat slegs die helfte van die kernvloedvermoë benut word. Die eerste en laaste puls moet elk 'n halwe periode duur. 'n Gesinchroniseerde hekfunksie wat deur 'n halfpulsgenerator aangedryf word, is ontwikkel. Dit word blokdiagrammaties in figuur 6(b) voorgestel en in figuur 8 verduidelik. Hierdeur word beide die beoogde maksimum benutting van die stuurtransformator en minimering van die vloed in die transformator kern by afskakeling verkry, sodat ongewenste aanskakeling nie weer plaasvind nie. Die resultaat kan in figuur 7(b) gesien word, met die verbetering ten opsigte van figuur 7(a) duidelik geïllustreer.



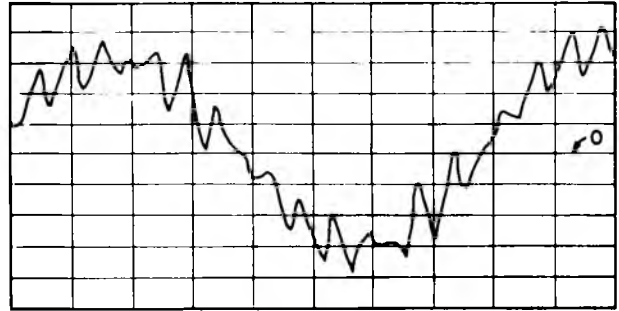
FIGUUR 8: Vloedverloop in die pulstransformator. (Sien teks.)

Die basisaandrywing maak verder gebruik van 'n tweede pulstransformator om die stoortyd en afskakeltyd van die transistor te verklein deur 'n negatiewe basis- en emittorspanning te voorsien. Daar is geen voorsiening gemaak vir 'n aanskakelpiek in die basisstroom nie, aangesien die spesifieke toepassing nie die addisionele kompleksiteit vereis nie. Voorbeelde van meer ingewikkelde basisdryf tegnieke is bekend⁷ vir ander toepassings.

3. EKSPERIMENTELE RESULTATE VIR DIE AANDRYWING

Figuur 9 toon 'n tipiese fasestroomgolfvorm (i_A in figuur 2), terwyl die ooreenstemmende lyn-tot-lynspanning (V_{AB} in figuur 2) in figuur 10 getoon word.

Besonderhede van die meetprosedure word in die bylae verskaf. In albei die gevalle was die wisselrigter belas met die traksiemasjien soos gebruik in die elektriese voertuig.

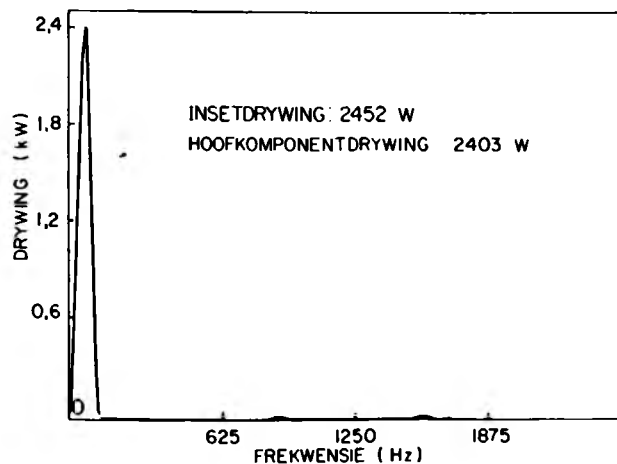


FIGUUR 9: Wisselrigterfasestroom, i_A (Sien figuur 2).
 i_A : 4 A/div
Tydbasis: 1 ms/div



FIGUUR 10: Wisselrigterlyn-tot-lynspanning, V_{AB} (Sien figuur 2).
 V_{AB} : 40 V/div
Tydbasis: 1 ms/div

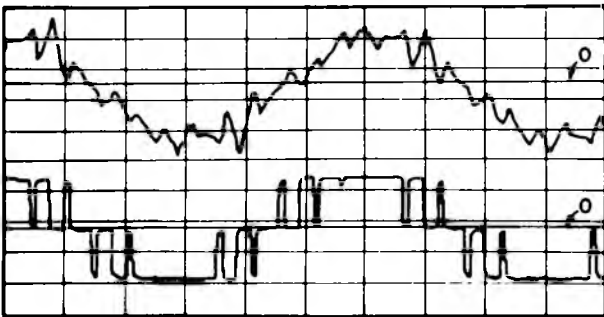
Wanneer golfvorme soos dié van figure 9 en 10 gebruik word om draaiveldmasjiene op te wek, word daar gepoog om die bofrekwensiedrywing te minimeer ten einde bofrekwensieverliese en ossillasies in die uitsetdraaimoment te vermy. Normale 50-Hz-instrumentasie is ook nie geskik om die drywing by hoër frekwensies te bepaal nie. 'n Tipiese drywing-spektrum van die stelsel, soos in figuur 11, toon egter



FIGUUR 11: Drywingspektrum van die uitset van die wisselrigter.

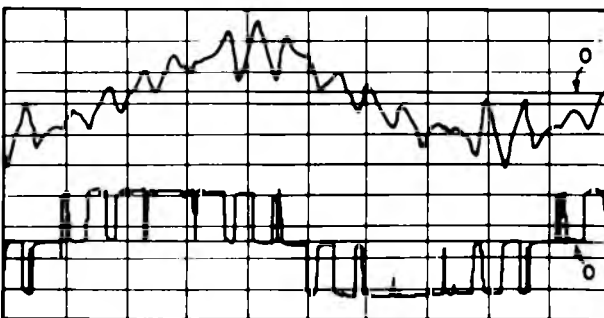
dat 98% van die drywing in die grondkomponent geleë is. Vir drywingstoestande hoër as in figuur 11 kan die bestaande meetproses nie beduidende bofrewensiedrywing bepaal nie. Dit beklemtoon die goeie resultate van die selektief geprogrammeerde puls wydtemodulasie. Gevolglik kan geen onnodige vermindering in die traksiemasjien se rendement of groot foute in konvensionele metings (metings met 50-Hz-instrumentasie) in hierdie geval verwag word nie.

Ten einde die skakelfrekwensie van die wisselrigter konstant te hou, word die aantal pulse in een periode van die uitsetgolfvorm, met toename in die uitsetfrekwensie, deur die stuurbaan verminder, soos uitgebeeld in figuur 5. Die effek hiervan op die uitsetgolfvorme van die wisselrigter word in figuur 12 getoon.



FIGUUR 12(a): Fasestroom en lyn-tot-lynspanning vir 'n uitsetfrekwensie van 82 Hz.

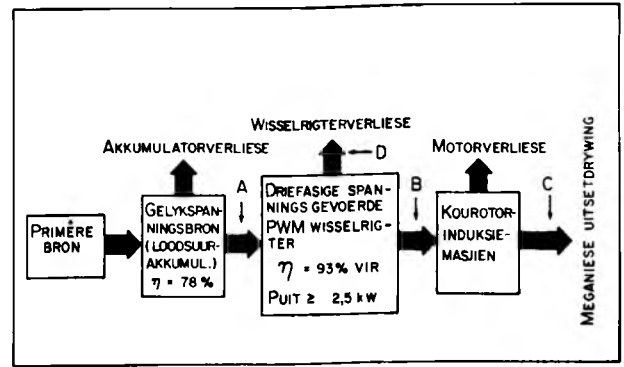
i_A : 16 A/div
 V_{AB} : 80 V/div
 Tydbasis: 2 ms/div



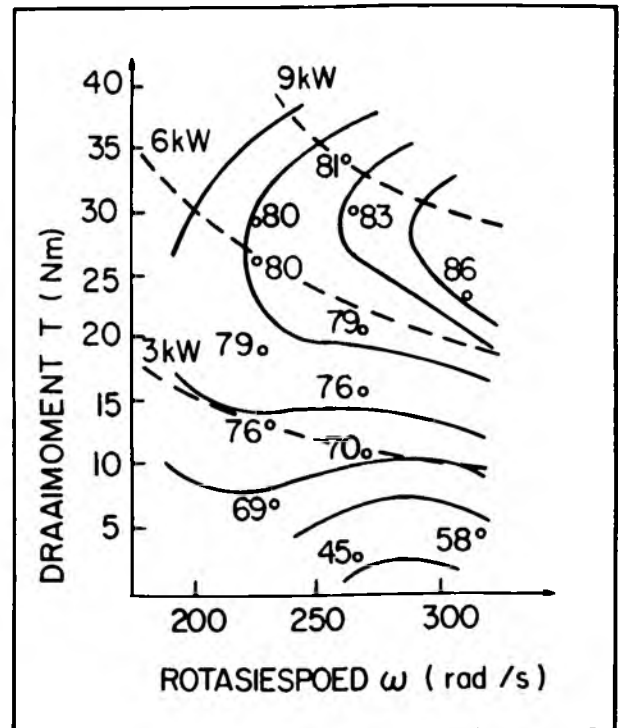
FIGUUR 12(b): Fasestroom en lyn-tot-lynspanning vir 'n uitsetfrekwensie van 61 Hz.

i_A : 16 A/div
 V_{AB} : 80 V/div
 Tydbasis: 2 ms/div

Die stelselrendement word ook bepaal. (Die meetopstelling verskyn in die bylae.) Resultate word blokdiagrammaties en in die draaimoment-snelheidsvlak respektiewelik in figure 13 en 14 getoon. 'n Termiese meettegniek, wat in (3) beskryf word, word gebruik om die wisselrigter se verliesdrywing te meet.



FIGUUR 13: Blokdiagram van die stelsel met rendementmetings aangedui.



FIGUUR 14: Rendement- (—) en drywingskontoure (---) in die T/ω -vlak vir die wisselrigter-masjienstelsel.

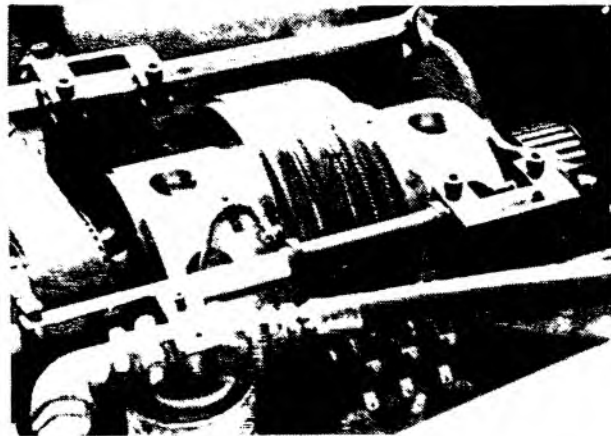
4. GEVOLGTREKING

Die wisselrigter het 'n rendement groter as 93% vir uitsetdrywings tussen 2,5 en 11 kW, wat aanvaarbaar is vir toepassing in elektriese voertuie. Bofrewensiedrywing is min, sodat oordimensionering van die traksiemasjien, vanweë bofrewensieverliese, nie nodig is nie. 'n Spesifieke drywing van 344 W/kg en 'n drywingsdigtheid van ongeveer 316 W/l is aangeteken, wat goed vergelyk met die beste bestaande internasionale standaarde, naamlik ongeveer 200–400 W/l.

Die ontwerp van die basisdryfbaan is eenvoudig maar tog geskik vir toepassing in 'n wisselrigterarm, terwyl die konstruksie maklike toegang tot die drywingselektronika verleen. Die beheerstelsel is om een geïntegreerde stroombaan gesentreer, wat dit eenvoudig en betroubaar maak.



FIGUUR 15(a): Foto wat die installasie van die wisselrigter van binne die voertuig toon.
W – wisselrigter.

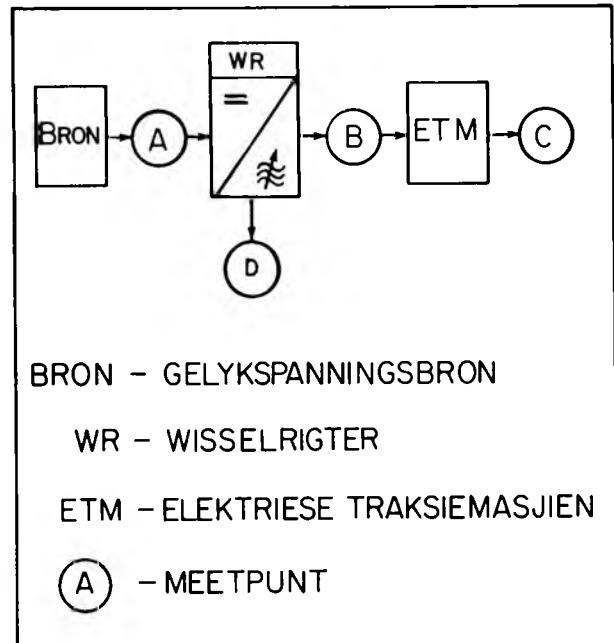


FIGUUR 15(b): Foto van die traksiemasjien voor in die voertuig.
T – traksiemasjien.

Figuur 15(a) toon die wisselrigter, geïnstalleer in die voertuig, en figuur 15(b) die traksiemasjien. Veldtoetse het bewys dat die wisselrigter suksesvol met die aandrywing geïntegreer is. Die wisselrigter kan ook met goeie gevolg in 'n normale elektriese padvoertuig angewend word.

5. BYLAE: MEETOPSTELLING EN PROSEDURE

Die meetopstelling word blokdiagrammatis in figuur 16 getoon. By punt A word die insetdrywing na die wisselrigter bepaal. Die uitset van die wisselrigter by punt B se golfvorms (figuur 12) is met stoorinstrumentasie in syfertegnisk verkry.³ By punt C is masjiensnelheid en draaimoment gemeet om die rendementkrommes van figuur 14 te verkry. Masjiensnelheid is met 'n tachometer gemeet en die draaimoment met 'n lasarm en skaal. Alle metings het gemiddelde waardes gelever. Om metings te kontroleer is wisselrigterverliese termies by D bepaal.³



FIGUUR 16: Meetopstelling vir die verkryging van die eksperimentele resultate.

6. ERKENNING EN DANKBETUIGING

Die Nasionale Elektriesevoertuig-komitee en die WNNR/NNEI word bedank vir finansiële steun en die geleentheid om die navorsing en ontwikkeling te kon onderneem. Verdere dankbetuiging aan die WNNR vir beursondersteuning aan L. van der Merwe.

Ontvang op 1 Aug. 1986; aanvaar op 27 Jan. 1987.

LITERATUURVERWYSINGS

- Hunt, M.S. (1981). *The D-9 regenerative partial hydrostatic transmission*, Interne verslag ME 1687/3, Nasionale Navorsingsinstituut vir Meganiese Ingenieurswese, WNNR.
- Van Wyk, J.D. & Schoeman, J.J. (1977). The application of transistorised switches to DC and AC machines for the control of battery vehicles up to 30 kW, *Handelinge van die tweede IFAC-simposium oor Beheer in Drywingelektronika en Elektriese Aandrywings*, Düsseldorf, Oktober 1977, 841-852.
- Van der Merwe, L. (1985). *Aandrywingstelsels vir elektriese padvoertuie met draaiveldmasjiene gevoed uit wisselrigters met pulswydtemodulasie*, M.Ing.-verhandeling. Fakulteit Ingenieurswese, RAU, 100-104; 169-183.
- Houldsworth, J.A. & Rosink, W.B. (1980). Introduction to PWM speed control for 3-phase AC motors. *Electronic components and applications*, Vol. 2, No. 2, 66-79.
- Van Wyk, J.D. (1969). On carrier frequency gating systems for static switching circuits. *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-5, No. 2, 140-142.
- Starr, B.G. & Van Loon, J.C.F. (1980). LSI circuit for AC motor speed control. *Electronic components and applications*, Vol. 2, No. 4, 219-299.
- Boehringer, A. & Knöll, H. (1979). Transistorschalter im Bereich hohe Leistungen und Frequenzen, *ETZ*, Bd. 100, Heft 13, 664-670.
- Van der Broeck, H.W., Van Wyk, J.D. & Schoeman, J.J. (1985). On the steady state and dynamic characteristics of bipolar transistor power switches in low loss technology, *IEE Proceedings*, Vol. 132, Pt.B., No. 5, 251-259.