

Sturing van een gelijkstroom-seriemotor door middel van halfgeleiderschakelementen

Citation for published version (APA):

Zeeuw, de, W. J., Polak, M. M., & Versfeld, L. R. G. (1964). Sturing van een gelijkstroom-seriemotor door middel van halfgeleiderschakelementen. *Elektrotechniek*, 42(20), 467-471.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1964

Document Version:

Andere versie

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.

Sturing van een gelijkstroom-seriemotor door middel van halfgeleiderschakelementen

door ir. W. J. DE ZEEUW, M. M. POLAK en L. R. G. VERSFELD

Summary

A method of pulse control of a series-wound d.c. motor by means of a semi-conductor switch is discussed and the results of calculation and measurement are given.

1. Inleiding

Bij de tot nu toe gebruikelijke sturing van tractiemotoren worden veelal aanloopweerstand voorgeschakeld, die tragsgewijs kunnen worden kortgesloten. Een groot deel van de toegevoerde energie wordt hierbij in deze weerstanden in warmte omgezet. Deze verliezen voeren tot een aanzienlijke rendementsverlaging, wat bij een via een rijdraad en pantograaf gevoed systeem wordt geaccepteerd, doch wat bij systemen gevoed uit accumulatoren (zoals elektrowagens) de actieradius sterk beperkt en daarom niet acceptabel is. Dit geldt vooral voor voertuigen die veel optrekken en afremmen. In dit artikel wordt een elektronische pulssturing beschreven waarmee het motortoerental en het motorkoppel nagenoeg verliesvrij kunnen worden ingesteld en waarmee, na een zekere modificatie, de bij het remmen vrijkomende elektrische energie in het net of de accumulator kan worden teruggeleverd.

2. Principe

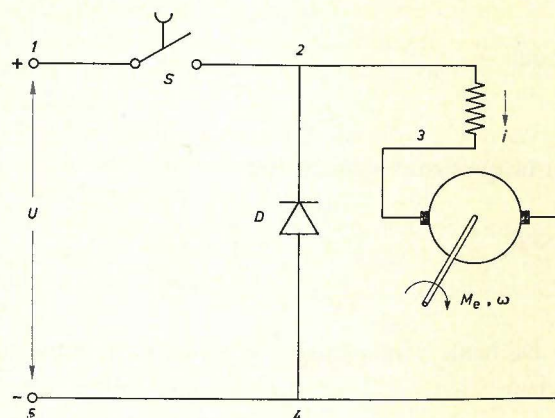
Bij deze sturing van een seriemotor wordt de gemiddelde waarde van de aangelegde spanning gevarieerd doordat de machineklemmen gedurende een variabele tijd periodiek met de spanningsbron worden verbonden. De principiële schakeling is in afb. 1 gegeven. De schakelaar S wordt met constante periodiciteit, doch gedurende een variërende tijdsduur, gesloten en geopend. De spanning tussen de punten 2 en 4 gemeten dankzij de aanwezigheid van diode D een rechthoekige puls vorm. Bij het openen van schakelaar S kan de in de machine aanwezige magnetische energie zich immers „ontladen” via de weg 2 - 3 - 4 - 2 waardoor er geen overspanningen over de schakelaar S optreden.

* Dit onderzoek werd uitgevoerd in de vorm van een tweetal stageopdrachten voor het eerste gedeelte van het ingenieursexamen van de afdeling Elektrotechniek der Technische Hogeschool te Eindhoven binnen de groep Elektromechanica (groepsleider prof. dr. ir. J. G. Niesten).

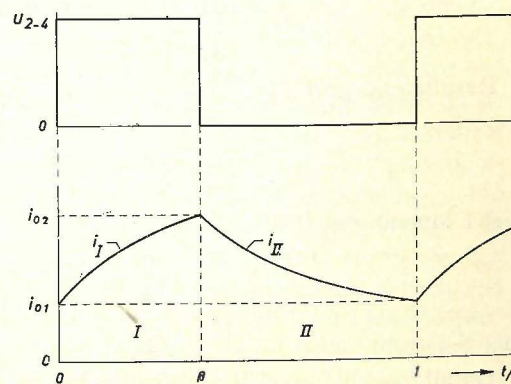
3. Verband tussen koppel, toerental en relatieve pulsduur

Bij deze berekening wordt verondersteld dat de periode T van de pulsen zodanig kort is ten opzichte van de mechanische tijdconstante dat de mechanische hoeksnelheid ω constant blijft binnen één periode: $\omega = \Omega$.

In afb. 2 is geschetst het verloop van de spanning tussen de punten 2 en 4 en het uit fysische overwegingen te verwachten



Afb. 1 Principe schakeling van de pulsgestuurde gelijkstroom-seriemotor



Afb. 2 Verloop van de spanning tussen de punten 2 en 4 en van de motorstroom i , beide als functie van de tijd in quasi-stationair bedrijf

verloop van de motorstroom i , beide als functie van de tijd in quasi-stationair bedrijf. Teneinde het verloop van de motorstroom als functie van de tijd te berekenen wordt uitgegaan van de spanningsbetrekkingen die gelden voor de beide standen van schakelaar S. Hierbij wordt aangenomen dat het magnetisch circuit van de motor geen hysteres- en verzadigingsverschijnselen vertoont en dat het ventiel D ideaal is.

Spanningsevenwicht

Gebied I (S dicht)

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + E_{rot.}$$

met $E_{rot.} \sim \Omega$
en $E_{rot.} \sim i$ } $E_{rot.} = k\Omega i$
levert dit

$$U = (R + k\Omega) i + L \frac{di}{dt} = L \left(ai + \frac{di}{dt} \right).$$

Gebied II (S open)

$$0 = (R + k\Omega) i + L \frac{di}{dt} = L \left(ai + \frac{di}{dt} \right).$$

Hierin is:

R = totale weerstand van het circuit;

L = totale zelfinductiviteit van het circuit;

$$\alpha = \frac{R + k\Omega}{L} = \frac{R}{L} \left(1 + \frac{k}{R} \Omega \right).$$

Oplossing

Stel de oplossingen voor i_I en i_{II}

$$i_I = C_1 \varepsilon^{-\alpha t} + \frac{U}{\alpha L}$$

$$i_{II} = C_2 \varepsilon^{-\alpha t'}$$

nu moet gelden

$$(i_I)_{t=\beta T} = (i_{II})_{t'=0}$$

zodat:

$$C_1 \varepsilon^{-\alpha \beta T} + \frac{U}{\alpha L} = C_2$$

en in quasi-stationair bedrijf

$$(i_I)_{t=0} = (i_{II})_{t'=(1-\beta)T}$$

zodat:

$$C_2 \varepsilon^{-\alpha(1-\beta)T} = C_1 + \frac{U}{\alpha L}$$

De beide vergelijkingen in C_1 en C_2 leveren nu:

$$C_1 = -\frac{U}{\alpha L} \left\{ 1 - \frac{\varepsilon^{\alpha \beta T} - 1}{\varepsilon^{\alpha T} - 1} \right\}$$

$$\text{en } C_2 = \frac{U}{\alpha L} \left\{ 1 - \frac{\varepsilon^{\alpha(1-\beta)T} - 1}{\varepsilon^{\alpha T} - 1} \right\}$$

Resultierend geeft dit:

$$i_I = \frac{U}{\alpha L} \left[1 - \left\{ 1 - \frac{\varepsilon^{\alpha \beta T} - 1}{\varepsilon^{\alpha T} - 1} \right\} \varepsilon^{-\alpha t} \right] \quad (1)$$

met t lopend van 0 tot βT

$$i_{II} = \frac{U}{\alpha L} \left\{ 1 - \frac{\varepsilon^{\alpha(1-\beta)T} - 1}{\varepsilon^{\alpha T} - 1} \right\} \varepsilon^{-\alpha t'} \quad (2)$$

met t' lopend van 0 tot $(1-\beta)T$

De uitdrukking voor de verhouding tussen de stromen i_{02} en i_{01}

(zie afb. 2) komt overeen met de verhouding $\frac{(i_{II})_{t'=0}}{(i_I)_{t=0}}$; zij kan aan de hand van de betrekkingen (1) en (2) worden gegoten in de vorm

$$\frac{i_{02}}{i_{01}} = \varepsilon^{\alpha(1-\beta)T}.$$

De waarde van het elektromagnetische koppel, gemiddeld over één pulsperiode, wordt in het onderhavige geval gegeven door de uitdrukking:

$$\bar{M}_e = \frac{1}{T} \int_0^T k i^2 dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\beta T} k i_I^2 dt + \int_0^{(1-\beta)T} k i_{II}^2 dt' \right].$$

Deze relatie gaat na substitutie van de uitdrukkingen (1) en (2) voor i_I , resp. i_{II} en na herleiding, over in

$$\bar{M}_e = \chi \cdot [M_e] \beta = 1$$

met

$$[M_e] \beta = 1 = k \left[\frac{U}{\alpha L} \right]^2$$

waarin:

$$\alpha = \frac{R}{L} \left(1 + \frac{k}{R} \Omega \right)$$

$$\text{en } \chi = \beta \left[1 - \frac{1}{\frac{1}{2} \beta A (\operatorname{coth} \frac{1}{2} \beta A + \operatorname{coth} \frac{1}{2} (1-\beta) A)} \right]$$

waarin $A = \alpha T$.

Bovenstaande koppelbetrekking heeft voor zeer kleine waarden van A de waarde:

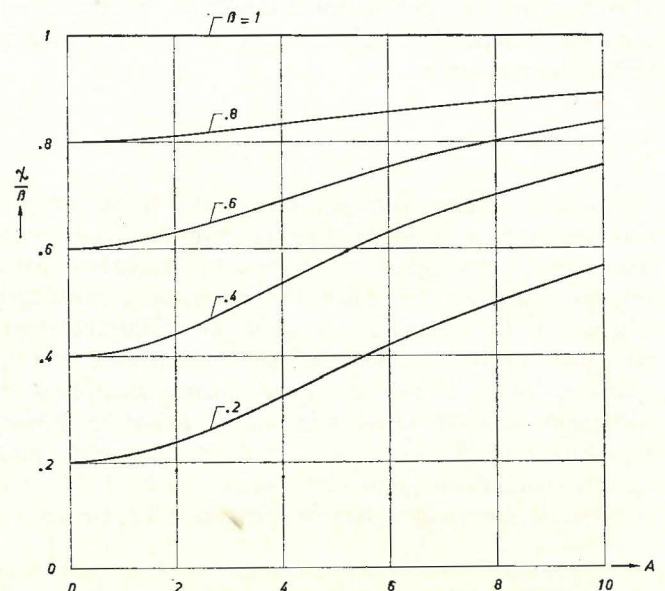
$$M_e = k \left(\frac{U}{\alpha L} \right)^2 \beta^2 = \beta^2 [M_e] \beta = 1$$

en voor zeer grote waarden van A de waarde:

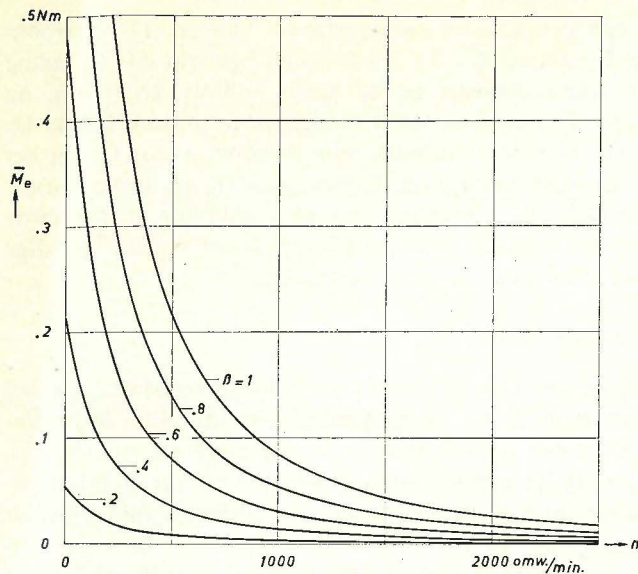
$$M_e = k \left(\frac{U}{\alpha L} \right)^2 \beta = \beta [M_e] \beta = 1$$

In afb. 3 is de functie χ/β in afhankelijkheid van de grootheid A voor verschillende waarden van β getekend.

Met de in het voorafgaande omschreven theorie zijn voor een seriemotor, die zodanig is gedimensioneerd en gevoed dat geen verzadiging optreedt, en waarvan alle grootheden nauwkeurig



Afb. 3 Het verloop van de functie χ/β in afhankelijkheid van de grootheid $A = \alpha T$ met β als parameter



Afb. 4 Berekende koppel-toerenkrommen van een pulsgestuurde seriemotor met β als parameter

bekend zijn, de te verwachten koppel-toerenkrommen berekend en in afb. 4 als getrokken lijnen weergegeven.

4. Praktische uitvoering

Het principeschema overeenkomstig afb. 1 kan slechts voor zeer kleine vermogens met behulp van een mechanische schakelaar S worden gerealiseerd, daar vooral bij grotere vermogens de schakelaar niet met de vereiste frequentie kan schakelen en, zo hij dit wel zou kunnen, deze dan slechts een beperkte levensduur zou hebben.

De als schakelaars te gebruiken elektronische componenten worden nu op hun gebruiksmogelijkheden onderzocht.

— De hoogvacuum-triode is onbruikbaar wegens de te geringe toelaatbare kathodestroom en het slechte rendement vanwege de grote resterende anode-kathodespanning, het benodigde gloei-stroomvermogen en de mechanische kwetsbaarheid.

— Met gas gevulde trioden (thyratrons) hebben een aanzienlijk kleiner anode-kathodespanningsverlies dan de hoogvacuum-trioden, doch de geringe toelaatbare kathodestroom, de mechanische kwetsbaarheid en de relatief lange deïonisatietijd met de daarvoor benodigde zeer grote commutatiedensatoren (zie onder 4.2.) maken deze componenten ongeschikt.

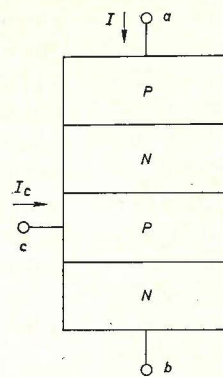
— Ignitrons e.d. hebben, behalve een betrekkelijk klein anode-kathodespanningsverlies, een grote toelaatbare kathodestroom. De aanwezigheid van vloeibaar kwik en de relatief lange deïonisatietijd maken echter ook deze componenten bij inbouw in voertuigen minder geschikt voor elektrische tractie.

— Transistors kunnen bij kleine vermogens tot bijvoorbeeld 1 kW worden gebruikt voor elektronische pulssturing.

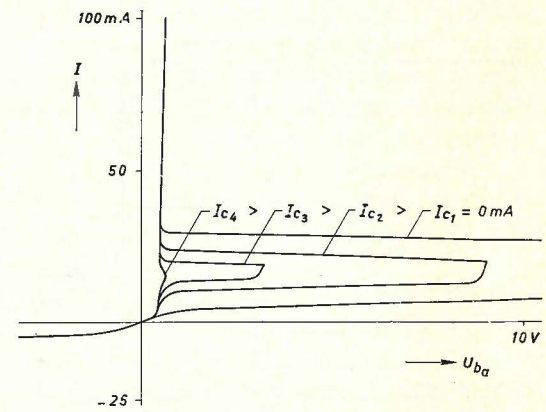
— Thyristors, deze betrekkelijk nieuwe halfgeleidercomponenten, maken het mogelijk elektronische pulssturingen te ontwerpen voor grote vermogens en zullen daarom nader worden beschouwd.

4.1. De thyristor¹

Dit gelijkrichtelement bestaat uit vier lagen silicium, afwisselend van het type P en het type N (afb. 5). Er zijn twee hoofdelektrodes: de anode a, en de kathode b en één stuur-elektrode c. Mits de spanning tussen a en b een bepaalde waarde (max. 400, à 500 V, afhankelijk van het type) niet overschrijdt, is de thyristor in de rusttoestand niet geleidend (behoudens een zeer kleine lek-



Afb. 5 Schematische opbouw van een thyristor



Afb. 6 Karakteristiekenschaar van een thyristor met I_c als parameter

stroom van ten hoogste enkele mA); dit geldt voor beide polariteiten van de spanning tussen a en b.

Zonder schade kan nu het element in één richting, nl. de doorlaatrichting (met a positief ten opzichte van b), geleidend worden gemaakt door een stroominjectie gedurende enkele μ sec in de stuur-elektrode. De spanningsval over de thyristor is nu bij de nominale stroom slechts 1 à 1,5 V, hetgeen ongeveer tien maal geringer is dan bij gasontladingsbuizen zoals thyratrons en ignitrons het geval is.

De niet-geleidende toestand keert pas terug wanneer de hoofdstroom I daalt tot beneden een zekere lage grenswaarde (enkele tientallen mA), de zg. houdstroom. De spanning in doorlaatrichting kan nu na onderschrijding van de houdstroom weer worden aangelegd, echter niet dan nadat de sperlaag zich volledig heeft geregenereerd, hetgeen enkele μ sec vergt. Deze regeneratietijd is ongeveer 1/10 van de deïonisatietijd bij thyratrons en ignitrons, zodat de commutatiedensatoren ook ongeveer tien maal kleiner kunnen zijn.

Ook mag in doorlaatrichting de spanning niet zo snel aangroeien dat de daardoor veroorzaakte capacatieve stroom in de P-N-overgangen de minimale waarde van de stuurstroom, nodig voor ontsteking, overtreft. De grenswaarde van de verschillende grootheden is afhankelijk van de temperatuur in het inwendige van de thyristor en van de aard en de dimensionering van de schakeling. Doorslag in de sperrichting van de gelijkrichter leidt tot blijvende beschadiging.

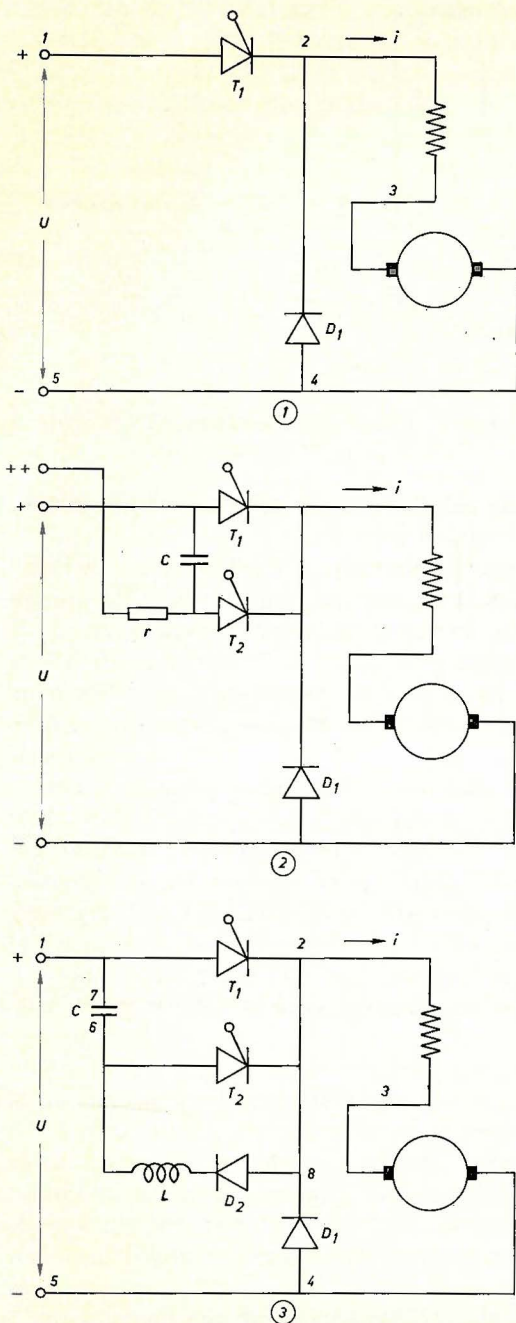
In afb. 6 is een karakteristiekenschaar van een thyristor weergegeven. Men ziet dat de doorslag in de doorlaatrichting bij lagere spanning optreedt naarmate de stuurstroom I_c toeneemt.

De thyristor is mechanisch zeer robuust. Als nadeel kan de geringe overbelastbaarheid worden genoemd, wat evenwel bij juiste dimensionering en beveiliging nauwelijks meer als nadeel kan worden beschouwd.

4.2. Het gebruik van de thyristor als elektronische schakelaar in het schema overeenkomstig afb. 1

Indien in het principeschema overeenkomstig afb. 1 de schakelaar S als halfgeleider-schakelelement (T_1) wordt uitgevoerd (afb. 7-1), mag niet uit het oog worden verloren dat een thyristor wel kan worden ingeschakeld door middel van een stroompuls in de stuur-elektrode, doch praktisch niet op deze manier uitschakelbaar is. De enige op het ogenblik goede methode om het gelijkrichtelement uit te schakelen is het gedurende voldoende lange tijd nul maken van de hoofdstroom. In afb. 7-2 is hiervoor een oplossing geschetst. De condensator C wordt hier steeds via een weerstand r opgeladen terwijl thyristor T_2 na het ontvangen van een stuurimpuls (doofimpuls) zorgt voor het niet-geleidend worden van thyristor T_1 . De ontladestroom van de condensator C kan nu immers gedurende voldoende lange tijd de hoofdstroom i over-

¹ Andere namen hiervoor zijn: SCR (Silicon Controlled Rectifier) transistor, vaste-stofthyatron enz.



Afb. 7 Opbouw van de elektronische schakelaar

nemen van T_1 en tevens een spanning in de sperrichting over T_1 aanleggen zodat het aantal vrije ladingdragers in de hoofdstroomthyristor zodanig wordt verminderd, dat na het afbreken van de stroom door T_2 de doving van T_1 wordt gehandhaafd. Deze schakeling vereist een extra spanningsbron voor de lading van de commutatiecondensator C . De weerstand r dient verder zo groot te zijn dat de stroom hierdoor altijd kleiner is dan de houdstroom van T_2 . De vereiste hoeveelheid lading in de condensator, benodigd voor de doving, en de grootte van weerstand r leiden nu tot een onbruikbaar grote tijdconstante rC .

Een methode voor het laden van condensator C zonder het nadeel van een grote tijdconstante wordt gegeven in afb. 7-3. Teneinde de condensator met de juiste polariteit te laden wordt gebruik gemaakt van een L-C-keten. Om de werking uiteen te zetten is het verstandig uit te gaan van een totaal stroomloze en spanningsloze toestand van het systeem.

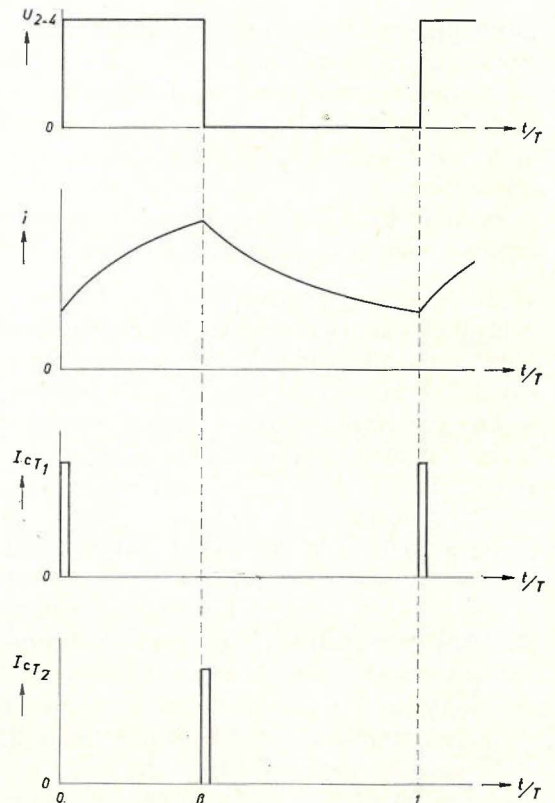
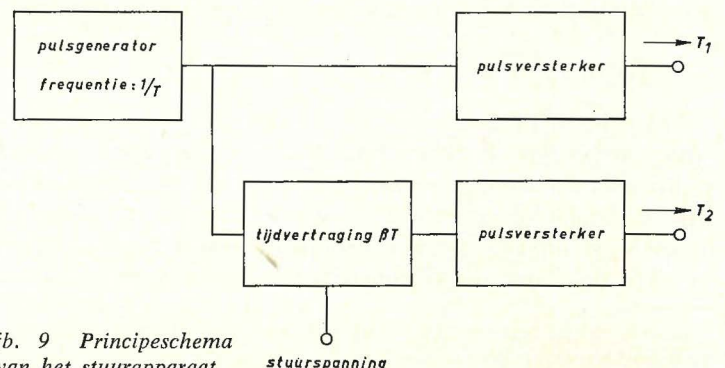
Na het aanleggen van de voedingsspanning U wordt de doofthyristor T_2 ontstoken. Condensator C wordt nu geladen met klem 7 positief ten opzichte van klem 6. Thyristor 2 zal doven nadat de laadstroom kleiner is geworden dan de houdstroom. Wordt vervolgens thyristor 1 ontstoken, dan zal hierdoor behalve de stroom

i ook nog een condensator-ontlaadstroom vloeien. Deze stroom vloeit in de L-C-keten 6 - 7 - 2 - 8 - 6 en bewerkt dat de lading van C van teken omkeert en de juiste richting krijgt om, na ontsteken van T_2 , doving van T_1 mogelijk te maken. Diode D_2 voorkomt het voortijdig ontladen van de condensator C . Bij het ontsteken van thyristor T_2 dooft vervolgens T_1 en tevens wordt de condensator weer opgeladen tot een spanning met waarde U en met klem 7 positief ten opzichte van klem 6. Een volledige ontsteek- en doofcyclus is nu beschreven.

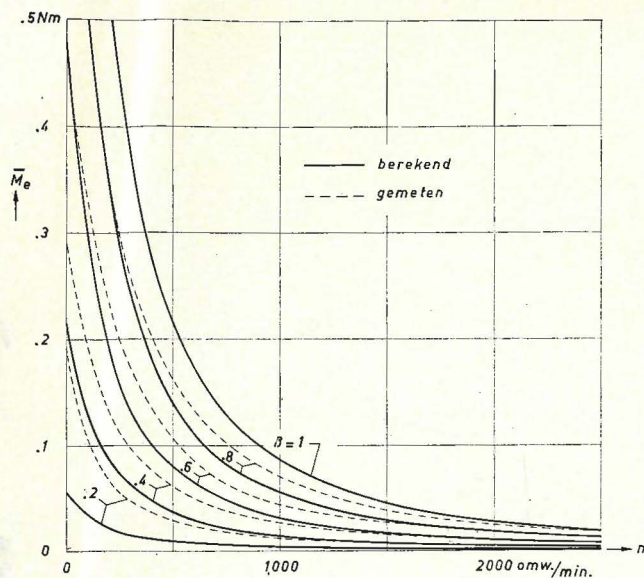
4.3. Het stuurapparaat

Teneinde de thyristors T_1 en T_2 in de juiste volgorde, met het juiste tijdsinterval βT en de herhalingsfrequentie $1/T$ te ontsteken (afb. 8) is een getransistoriseerd stuurapparaat ontwikkeld. Het principeschema van het stuurapparaat is in afb. 9 geschetst.

De pulsgenerator is uitgevoerd als een astabiele multivibrator met een frequentie van ca. 100 Hz. De pulsversterkers zijn uitgevoerd als monostabiele multivibratoren die aan de transformator gekoppelde uitgangsklemmen een puls kunnen afgeven (ca. $\frac{1}{2}$ A amplitude en 100 μ sec breedte). De tijdsvertragingseenheid bestaat uit een op de pulsgenerator gesynchroniseerde zaagtandgenerator en een vergelijkingsorgaan. In dit vergelijkingsorgaan wordt de uitgangsspanning van de zaagtandgenerator vergeleken met een instelbare gelijkspanning. Wordt de zaagtandspanning

Afb. 8 Het verloop van de motorklemspanning U_{2-4} , de motorstroom i , de ontsteekpuls I_{cT1} en de doofpuls I_{cT2} als functie van de tijd

Afb. 9 Principeschema van het stuurapparaat



Afb. 10 Berekende en gemeten koppel-toerenkrommen van een pulsgestuurde seriemotor met β als parameter

groter dan deze instelbare gelijkspanning, dan geeft het vergelijkingsorgaan een puls af aan de pulsversterker van thyristor T_2 . Door variatie van de instelbare gelijkspanning (de stuurspanning) is de pulsbreedte van de motorstroom (dus βT) te sturen.

Het stuurapparaat is eenvoudig, bevat een tiental goedkope transistors en kan zeer compact worden gebouwd.

5. Waarnemingen

De hiervoor beschreven apparatuur is gebruikt bij de pulssturing van een kleine seriemotor. De schakeling is zodanig gedimensioneerd en gevoed, dat er tijdens het meten van de koppel-toerenkrommen geen stromen konden optreden die verzadiging zouden kunnen geven van het magnetisch circuit van de motor.

De gegevens van de machine luiden als volgt: $R = 34,8\Omega$,

$k = 0,99 \text{ H}$, $L = 1,05 \text{ H}$, $\frac{1}{T} = 108 \text{ Hz}$. Met deze gegevens zijn ook de krommen in afb. 4 berekend.

Afb. 10 geeft de berekende koppel-toerenkrommen (getrokken) en de waargenomen koppel-toerenkrommen (gestippeld). Het valt hierbij direct op dat de krommen voor $\beta = 1$ nauwkeurig met elkaar samenvallen, zodat bij de berekening met grote waarschijnlijkheid voldoende nauwkeurig en met de juiste machineparameters is gewerkt. De andere krommen geven bij kleine koppels afwijkingen; de gemeten koppels liggen hoger dan de berekende. Een verklaring voor dit feit wordt gevonden in een eigenschap van de schakeling in afb. 7-3.

Bij het ontsteken van de doofthyristor T_2 ontladst C zich na het doven van T_1 over de motor. Daar C is berekend voor het uitschakelen van de grootst mogelijke hoofdstromen van T_1 , zal er bij kleine stromen een relatief grote extra motorstroom vloeien. Hierdoor moet het werkelijk optredende koppel groter zijn dan het volgens de formules, geldig voor afb. 1, berekende.

6. Conclusie

Zoals uit de krommen van afb. 4 en 10 moge blijken, is met de schakeling overeenkomstig afb. 7 een goede, nagenoeg verliesvrije sturing van een gelijkstroom-seriemotor mogelijk. Het ligt voor de hand om te veronderstellen, dat de beschreven methode met name in aanmerking zal komen voor de sturing van de tractiemotoren van voertuigen die hun eigen energiebron met zich voeren.

De beschreven experimenten werden uitgevoerd aan een — hier als seriemotor geschakelde — universele machine voor demonstratiedoeleinden (vermogen ongeveer $\frac{1}{2} \text{ kW}$). Voorbereidingen worden nu getroffen om de experimenten te herhalen aan grotere opstellingen, waaronder de demonstratie-opstelling van de PCC-car. (De PCC-car is hier te lande in gebruik bij de N.V. Gemengd Bedrijf Haagse Tramweg Mij).

Het ligt dan tevens in de bedoeling de invloed van de ijzerverzadiging in de beschouwingen te betrekken. Ook zal verder het optreden van bovenharmonischen in de motorstroom en de netstroom worden onderzocht.

Literatuur

- H. Friebe — *AEG-Mitt.* 52(1962)(3/4)53.
A. C. Stumpe — *ETZ-A* 83(1962)81.