

Navorsingsbriewe

Elektromagnetiese pulskompressor met gelyktydige oordrag in aangrensende lusse en verminderde magnetiese kernvolume

ABSTRACT

Electromagnetic pulse compressor with simultaneous transfer in adjacent loops and reduced magnetic core volume

The inductor core volume of any loop in a Melville line pulse compressor may be reduced by allowing the inductor to saturate prior to complete charge transfer of the preceding loop.^{1,2,9} Two loops are thus active simultaneously and interactively, constituting a fifth order system. Hereby the core volume can be reduced to less than 30% of that of a comparable Melville line.

The behaviour and design parameters of such a simultaneous transfer compressor are investigated by means of a theoretical analysis, numerical simulation and physical modelling of the system.

1. SIMBOLELYS

- α_1, α_2 = reële komponente van natuurlike frekwensies van die vyfdeordestelsel
- A_n = kernoppervlakte van L_n (m^2) – ook gelyk-stroomkomponent van v_n
- B_m, C_m = beginamplitude van eerste en tweede natuurlike ossillasiefrekwensies van die strome van die vyfdeordestelsel
- B_n, C_n = beginamplitudes van die eerste en tweede natuurlike ossillasiefrekwensie van v_n in die vyfdeordestelsel
- C_n = Kapasitansie van primêre kapasitor in die n-de lus (farad)
- $C_m = \frac{C_n \cdot C_{n+1}}{C_n + C_{n+1}}$
- δ_n = kompressieverhouding van die n-de stadium
- E = energie oorgedra (joule)
- e = basis van natuurlike logaritmes = 2,7183
- i_m = stroomverlope van natuurlike responsie van vyfdeordestelsel
- k = vermenigvuldigingsfaktor < 1
- $\lambda = \frac{\tau_{n+1}}{\tau_n} = \frac{1}{\delta}$
- l_c = effektiewe kernlengte (m)
- L_n = Induktansie van n-de lus (henry)
- $L_{s,n}$ = versadigde induktansie in lus n (henry)
- τ_n = oordragtyd van n-de lus (sek.)
- t_s = spertyd van 'n induktor (sek.)
- U_n = piekspanning op C_n (volt)
- V_n = kernvolume van L_n (m^3)
- v_n = spanning oor kapasitor C_n (volt)
- ω_n = resonansiefrekwensie van lus n (rad/sek)
- μ_s = versadigde permeabiliteit van die magnetiese kernmateriaal (henry/meter)
- ΔB = verandering in magnetiese vloeddigtheid (tesla)

2. AGTERGROND

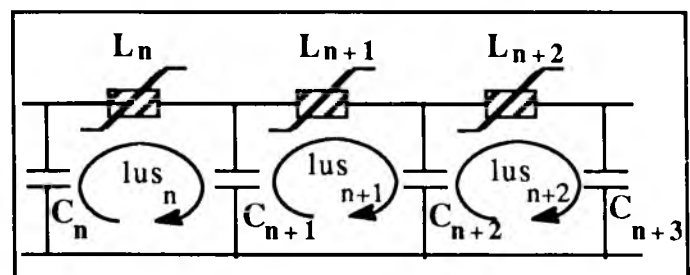
Die Melvillelyn-pulskompressor⁷ is alreeds deeglik geanaliseer^{8,9} en eksperimenteel ondersoek. So byvoorbeeld is, met die uitgangspunt dat die aantal stadia willekeurig verander kan word, sowel die teoretiese as praktiese perke vir die minimum kernvolume wat vir 'n gegewe kompressieverhouding en pulsenergie nodig is reeds bepaal.^{3,4}

Hierdie minimum kernvolume word behaal wanneer die kompressieverhouding per stadium $\delta_n = \sqrt{e}$, waar e die basis van natuurlike logaritmes is.

Laasgenoemde resultaat is behaal n.a.v. van die beperkings wat deur die beginsels van die werking van die Melvillelyn op die stelsel geplaas word, nl. dat energie-oordrag op enige tydstip slegs in 'n enkele lus (kyk fig. 1) mag plaasvind en dat elke primêre kapasitor C_n , aan die einde van die n-de oordragsiklus, volledig ontlaaie moet wees onmiddellik voordat die n+1ste oordragsiklus mag begin. Hierdie n+1ste siklus word aangebring deur die gelyktydige "onversadiging" en versadiging van die kerne van induktore L_n en L_{n+1} onderskeidelik.

Die doel van die kernmateriaal, in sy onversadigde toestand, is om die lusse van mekaar te isoleer sodat die gewenste begintoestande, d.w.s. 'n ten volle gelaaide kapasitor C_n , opgestel kan word voordat die n-de oordragsiklus begin. Gedurende die oordrag mag die teenwoordigheid van die versadigde kernmateriaal selfs 'n nadeel wees, aangesien die minimum lusinduktansie daardeur beperk word. Lg. is veral nadelig in die laaste stadium van 'n kompressor waar die lusinduktansie baie laag moet wees om die kortste moontlike pulswydtes te verkry. Verder word die totale verlies in die stelsel deur die teenwoordigheid van die kernmateriaal verhoog.

Die Melvillelyn bestaan dus uit 'n reeks geskakelde onafhanklike tweedeordelusse, wat elk ontwerp is om die gewenste begintoestande vir die daaropvolgende lus op te



FIGUUR 1: Veelvuldige lus pulskompressor.

stel. Hierdie beginsel kan nou uitgebrei word na 'n meer algemene stelsel, bestaande uit 'n reeks geskakelde hoërodestelsels, elk ontwerp om die gewenste begintoestande vir die volgende een op te stel en om uiteindelik die gewenste uitsetpuls te lewer. Die resultaat hiervan, wanneer dit met die Melvillelyn vergelyk word, is 'n verminderde kernvolumen.

Wanneer L_{n+1} se kernvolumen verminder word, sal dit gouer versadig en dus lus $n+1$ aanskakel voordat die oordrag in lus n voltooi is. Gedurende hierdie fase vorm die twee lusse dus 'n vyfdeordestelsel waarvan die begintoestande die spannings op C_n en C_{n+1} en die stroom deur L_n , op die tydstip van L_{n+1} se versadiging, is.

Dit is dus die ontwerper se taak om vas te stel wat hierdie begintoestande, tesame met die ander stroombaanparameters, behoort te wees om te verseker dat 'n soortgelyke stel begintoestande in C_{n+1} , L_{n+1} en C_{n+2} sal heers wanneer C_n en L_n volledig ontlaaie is. Op hierdie oomblik skakel L_n af en L_{n+2} skakel aan om die vorige vyfdeordeoordragsiklus te herhaal, maar een stap verder langs die lyn af. Hierdie proses herhaal homself dus totdat die finale stadium bereik word waar die toestande verander, in dié sin dat al die energie in die primêre elemente, d.w.s. C_n , L_n en C_{n+1} van hierdie finale vyfdeordestelsel, uiteindelik in die finale kapasitor (C_{n+2}) moet verskyn. Alternatiewelik moet, by hierdie laaste stadium, die karakteristieke van die las as deel van die stroombaanmodel ingevoer word en al die parameters wat sal verseker dat die totale energie in die gevraagde tyd in die las gedissipeer word, moet dan bepaal word.

Hierdie begrip van "gelyktydige oordrag"* word nou aan die hand van (a) 'n teoretiese analise, (b) 'n numeriese simulatie en (c) eksperimentele metings op 'n fisiese model, afgelei uit (a) en (b), ondersoek.

3. TEORETIESE ANALISE

3.1 Kernvolumen

Die benadering, soos gevolg in verwysings 3 en 4 vir die bepaling van die nodige kernvolumen vir 'n gegewe totale kompressieverhouding, word hier uitgebrei vir die meer algemene geval waar die spertyd t_s van induktor L_{n+1} , kleiner sal wees as die oordragtyd τ_n . In die geval van die Melvillelyn is $t_s = \tau_n$.

Twee opeenvolgende lusse van 'n kompressor, soos in fig. 1, word beskou. Aanvaar dat daar aanvanklik 'n tweedeorde-oordrag in lus n plaasvind, C_n ontlaaie en C_{n+1} laai dus deur L_n . Die spanning oor C_{n+1} en gevolglik ook oor L_{n+1} :

$$v_{n+1}(t) \approx \frac{U_n}{2} (1 - \cos \omega_n t) \dots \dots \dots (1)$$

waar U_n die beginspanning oor C_n , $\omega_n^2 = \frac{1}{L_n C_{Tn}}$, L_{sn}

die versadigde induktansie van

$$L_n \text{ en } C_{Tn} = \frac{C_n \cdot C_{n+1}}{C_n + C_{n+1}} \approx \frac{C_{n+1}}{2}, \text{ (omdat } C_n \approx C_{n+1}), \text{ is.}$$

Die verloop van $v_{n+1}(t)$ volgens vgl. (1) word in fig. 2 grafies uitgebeeld.

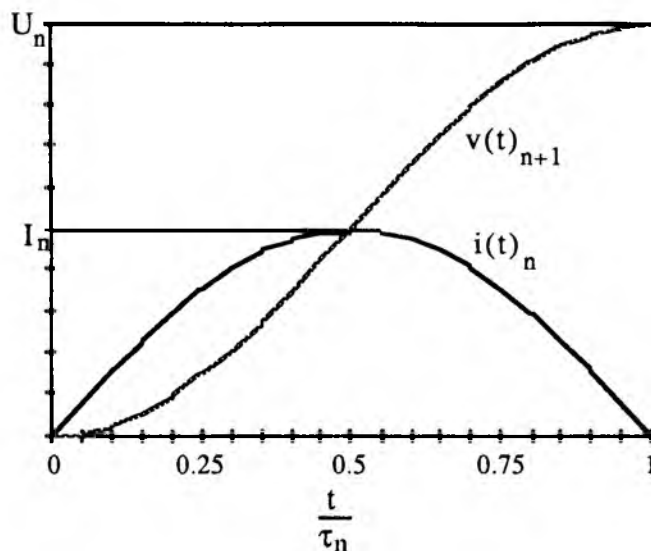
Op die aanskakeltydstip of versadigingspunt t_s van L_{n+1} heers die verband:

$$\Delta B A_{n+1} N_{n+1} = \frac{U_n}{2} \int_0^{t_s} (1 - \cos \omega_n t) dt \dots \dots \dots (2)$$

waar ΔB die vloeddigtheidsverandering in die kern, A_{n+1} die kerndeursnoppervlakte en N_{n+1} die aantal draaie op die kern van L_{n+1} is.

Vir Melvillelyn-werking moet

$$t_s = \tau_n = \frac{1}{\omega_n} = \pi \sqrt{L_{ns} \cdot C_{Tn}} \text{ wees} \dots \dots \dots (3)$$



FIGUUR 2: Spannings- en stroomgolfvorms.

* Afgelei van die (wan)-opvatting dat twee "tweeorde"-lusse "gelyktydig" energie oordra. Dit is moontlik 'n wanbenaming, aangesien die "twee tweedeorde-lusse" eintlik 'n enkele vyfdeordestelsel vorm.

Die versadigde induktansie van L_n , as 'n funksie van sy fisiese parameters, is

$$L_n = \frac{\mu_s A_{n+1} N_{n+1}^2}{l_c} \dots \dots \dots (4)$$

waar μ_s die versadigde permeabiliteit van die kern en l_c die effektiewe magnetiese padlengte is.

Uit die verbande hierbo kan getoon word dat die kernvolume van L_{n+1} , nl.

$$V_{n+1} = A_{n+1} l_c = \frac{\pi^2 \mu_s E}{2 \Delta B^2} \left\{ \frac{t_s}{\tau_n} - \frac{1}{\pi} \sin \frac{\pi t_s}{\tau_n} \right\}^2 \frac{1}{\lambda^2} \dots \dots \dots (5)$$

waar $E = \frac{1}{2} C_n U_n^2$ die energie is wat oorgedra word en

$\lambda = \frac{\tau_{n+1}}{\tau_n}$ is. τ_{n+1} word vir lus n+1 gedefinieer soos τ_n vir lus n gedefinieer word.

Vir Melvilleleyn-werking is τ_{n+1} die oordragtyd van lus n + 1 en λ die inverse van die kompressieverhouding. Vergelyking (5) word in sy genormaliseerde vorm in fig. 3 uitgebeeld.

Wanneer die versadigingstyd t_s met 'n hoeveelheid $k\tau_{n+1}$ (waar $k < 1$) verkort word, sal $t_s = \tau_n - k\tau_{n+1} = \tau_n (1 - k\lambda) \dots \dots \dots (6)$

wees. Wanneer lg. in vgl. (5) vervang word, is

$$V_{n+1} = \frac{\pi^2 \mu_s E}{2 \Delta B^2} \left\{ 1 - k\lambda - \frac{1}{\pi} \sin \pi (1 - k\lambda) \right\}^2 \frac{1}{\lambda^2} \dots \dots (7)$$

Wanneer $K = 0$, sal vgl. (7) reduceer na die uitdrukking vir die volume soos in verwysing [3] en [4] afgelei:

$$V_m = \frac{\pi^2 \mu_s E}{2 \Delta B^2} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \dots \dots \dots (8)$$

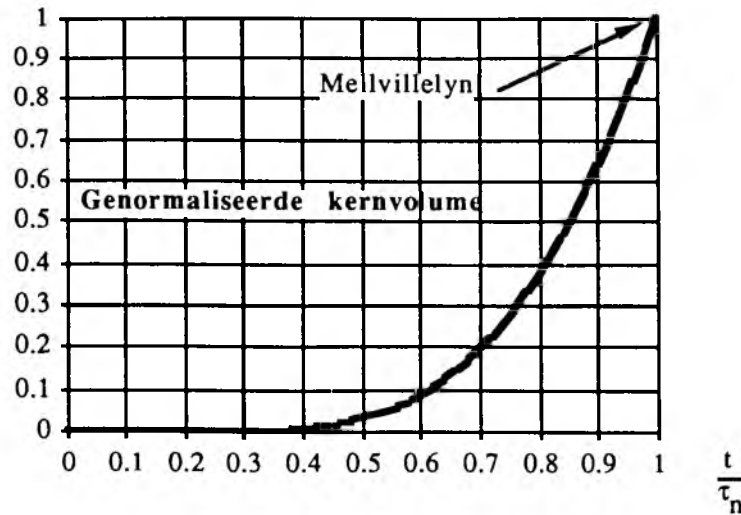
Die persentasie besparing in kernvolume

$$S = \left(1 - \frac{V_{n+1}}{V_m} \right) \times 100\% \dots \dots \dots (9)$$

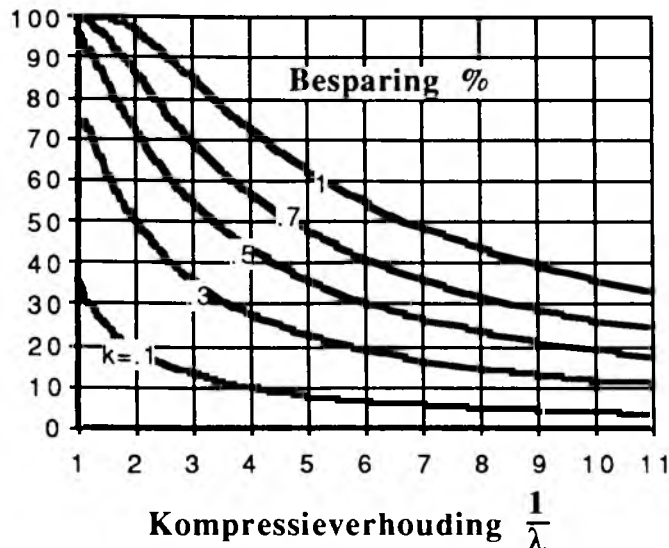
word in fig. 4 as 'n funksie van kompressieverhouding $\frac{1}{\lambda}$, met verskillende waardes van k, aangestip.

Daar moet op gelet word dat sodra L_{n+1} aansakel, die stroomverloop i_n nie meer sinusvormig sal wees nie, maar dat dit uitgerek word om op 'n latere tydstep, soos in fig. 5 getoon, 'n nulwaarde te bereik.

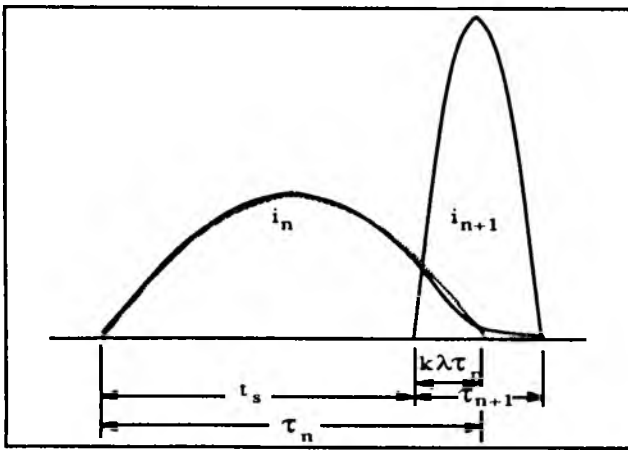
Die ontwerper moet hom dit dus ten doel stel om die stelselparameters so te verstel dat i_n , i_{n+1} , v_n en v_{n+1} op dieselfde oomblik nul word. Dit impliseer dan volledige energieoordrag na C_{n+2} :



FIGUUR 3: Kernvolume, genormaliseerd t.o.v. die Melvilleleyn, teen versadigingstyd, genormaliseerd t.o.v. τ_n .



FIGUUR 4: Persentasie besparing a.g.v. gelyktydige oordrag.



FIGUUR 5: Opeenvolgende lusstrome gedurende gelyktydige oordrag.

Hierdie doelwit kon slegs op 'n empiriese wyse bereik word, en nadat 'n mate van vaardigheid met die proses opgebou is, het dit geblyk dat dit betreklik eenvoudig was vir 'n waarde van $k = 0,5$. Die gewysigde induktor en kapasitorwaardes was nog steeds naby aan dié van die Melville-lyn, met die gevolg dat τ_n en τ_{n+1} feitlik dieselfde as voorheen was.

Daar blyk geen fundamentele beperking op die waarde van k te wees nie, maar ondervinding het geleer dat sodra k die waarde 1 nader, dit moeilik is om volledige energie-oordrag op so 'n empiriese wyse te verkry.

3.2 Toestandsruimte-analise

Die toestandsruimtemodel van die vyfdeordestelsel in fig. 6 is formeel geanaliseer ten einde die nulinsietresponisie daarvan te verkry.

Die resulterende spannings- en stroomverlope het die volgende algemene vorm:

$$v_n(t) = A_n + B_n e^{\alpha_1 t} \cos(\omega_1 t - \theta_n) + C_n e^{\alpha_2 t} \cos(\omega_2 t - \phi_n)$$

$$i_m(t) = B_m e^{\alpha_1 t} \cos(\omega_1 t - \theta_m) + C_m e^{\alpha_2 t} \cos(\omega_2 t - \phi_m) \dots (10)$$

waar $n = 1, 3 \text{ \& } 5$ en $m = 2 \text{ \& } 4$.

Die konstantes $A_x, B_x, C_x, \alpha_1, \alpha_2, \omega_1, \omega_2, \theta_x$ en ϕ_x is funksies van die komponentwaardes en die begintoestande $v_1(0), i_2(0)$ en $v_3(0)$ wat op hulle beurt afgelei word van die aanvanklike tweedeordeoordrag met $t = t_s$.

Die berekeninge van al die bg. konstantes is betreklik kompleks, aangesien dit talle vervangings behels, en sal derhalwe nie hier getoon word nie. Hierdie vervangings word egter gereedlik in 'n rekenvel ("spreadsheet") op 'n

rekenaar geïmplementeer wat dan ook gebruik word om vergelykings (10) grafies voor te stel. Hierdeur kan die gebruiker dan, op 'n empiriese wyse, die gewenste stel parameters bepaal.

4. Numeriese simulasie

Die stelsel van fig. 1 is aan die hand van sy toestandsruimtemodel met 'n 4de orde Runge-Kutta roetine met 'n rekenvel op 'n persoonlike rekenaar gesimuleer. Die induktore L_2 en L_4 is in terme van hulle fisiese afmetings en kernmateriaaleienskappe gespesifiseer.

Hieruit word die vereiste aantal draaie en die spervermoë dan bereken. Verder kan elke induktor in die model twee verskillende waardes aanneem, afhangende van die oomblikswaarde van die stroom daardeur, wat ooreenstem met sy versadigde en onversadigde toestand.

A.g.v. die baie klein bereik van stroom waaroor die induktore onversadig is, moes spesiale voorsorg getref word om te verhoed dat die stroom in 'n enkele iterasiestap oor hierdie gebied spring en sodoende die simulasie ongeldig maak.

5. Fisiese model

Hierdie model, waarvan die ontwerp uit afdelings 2, 3 en 4 verkry is, is gebou en getoets met kerne van amorf metaallint. Die oordragtye is doelbewus redelik lank gemaak om te verhoed dat parasitiese effekte die resultate oorskadu, wat die doel van die eksperiment, nl. die toetsing van die beginsels van gelyktydige oordrag, sou veryd.

Die oordragte τ_1 en τ_2 is onderskeidelik as $25 \mu s$ en $5,6 \mu s$ gekies, gevolglik is $\lambda = 4,46$. Verder is die oorvleuelingsfaktor $k = 0,5$ gekies.

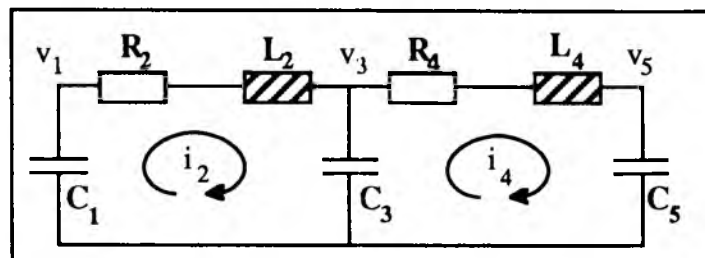
6. Resultate en besprekings

Die stroomgolfvorms wat d.m.v. die analitiese uitdrukking in vgl. (10) en die numeriese simulasie verkry is, verskyn as 'n enkele kromme in fig. 7 en is dus nie van mekaar te onderskei nie. Verder toon lg. teoretiese krommes 'n merkwaardige ooreenkoms met die ossillogram van fig. 8 wat die geldigheid van die model dus bevestig.

'n Besparing van 38% in kernvolume is m.b.v. die eksperimentele model gemeet, presies soos deur die grafiek van fig. 4 voorspel.

Die teorie oor die besparing in kernvolume is dus eksperimenteel bevestig.

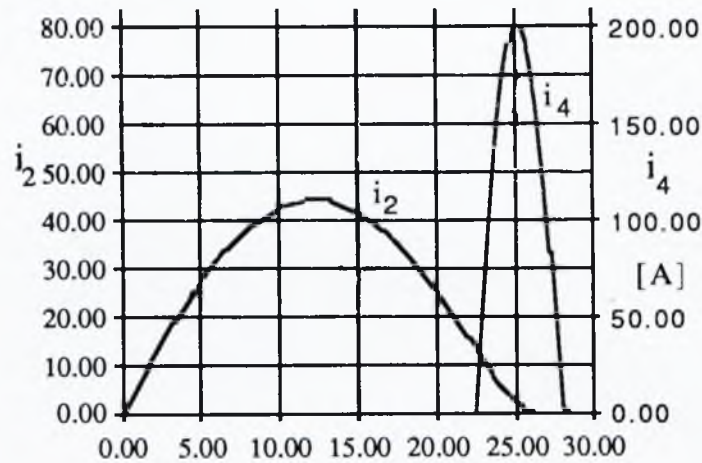
Die analitiese- en simulasiemodelle hierbo is komplementêrend tot mekaar en is baie nuttig in die oor en weer verifikasie van mekaar in die ontwerpproses van 'n gelyktydige oordragstelsel.



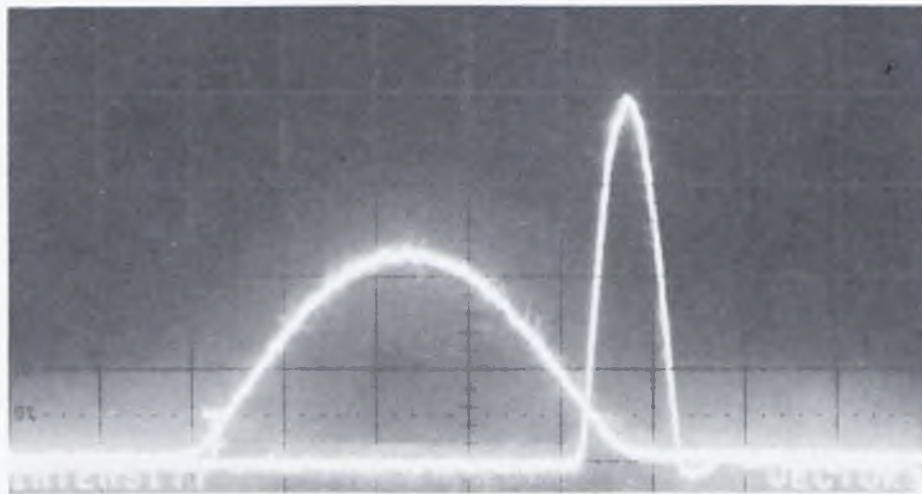
FIGUUR 6: Stelselmodel vir toestandsruimte-analise.

'n Tekortkoming van hierdie ontwerpprocedure is dat dit in wese nog 'n empiriese proses is, aangesien daar geen ontwerpformules in geslote vorm, waarmee die stroombaanparameters direk bereken kan word, bestaan nie.

Alhoewel daar oënskynlik geen fundamentele perk op die besparing in kernvolume in 'n gelyktydige oordragstelsel geplaas word nie, moet die praktiese perke daarvan nog vasgestel word.



FIGUUR 7: Voorspelde stroomgolfvorme.



Tydskaal: 5 μ s/div i_2 : 20A/div i_4 : 50A/div

FIGUUR 8: Gemete stroompulse, links i_2 en regs i_4 , soos in fig. 7.

G.L. BREDEKAMP* en J.J. NEL

Laboratorium vir Stelsels, Randse Afrikaanse Universiteit,
Posbus 524, Johannesburg 2000

Ontvang 16 November 1989; aanvaar 15 Mei 1990

*Outeur aan wie korrespondensie gerig kan word.

7. VERWYSINGS

1. Ball, S.E. (1988). Optimum switching time for magnetic switches, *IEEE 18th Power Modulator Symposium*, Hilton Head, South Carolina, 86-89.
2. Nel, J.J. (1989). Gelyktydige energieoordrag puls-kompressie, *Finale-jaar skripsie*, Randse Afrikaanse Universiteit.
3. Bredenkamp, G.L. & Swart, P.H. (1988). A theoretical basis for the optimization of electromagnetic pulse compressors using saturable ferromagnetic cores, *IEEE 18th Power Modulator Symposium*, South Carolina, 90-94.
4. Bredenkamp, G.L. & Swart, P.H. (1988). 'n Teoretiese grondslag vir die optimering van kernvolume in elektromagnetiese puls-kompressors, *Die Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Natuurwetenskap en Tegnologie*, 7 no. 3, 122-126.
5. Bredenkamp, G.L. (1987). The use of spreadsheets in electrical engineering, *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 3, no. 5, 27-35.
6. Swart, P.H. (1987). Elektromagnetiese puls-kompressie met behulp van versadigbare magnetiese kerne, *M.Ing. verhandeling*, Randse Afrikaanse Universiteit.
7. Melville, W.S. (1951). The use of saturable reactors as discharge devices for pulse Generators, *Handeling IEE*, Vol. 98, pt 3.
8. Swart, P.H., Bredenkamp, G.L. & Von Bergmann, H.M. (1987). Computer spreadsheet Design, Numerical Simulation and Practical Evaluation of a Lossy Series Pulse compressor, *6th IEEE Pulsed Power Conference*, Virginia, 680-683.
9. Bredenkamp, G.L. & Nel, J.J. (1989). A simultaneous transfer electromagnetic pulse compressor with reduced core volume, *IEEE 7th Pulsed Power Conference*, Monterey, California, 182-185.