'n Teoretiese grondslag vir die optimering van kernvolume in elektromagnetiese pulskompressors met versadigbare ferromagnetiese kerne

G.L. Bredenkamp* en P.H. Swart

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

Ontvang 3 Febr. 1988; aanvaar 3 Maart 1988

UITTREKSEL

Die werkingsteorie van die Melvillelyn-pulskompressor, waarin daar voorsiening gemaak word vir verliese in die stelsel, word hier aangebied. Die verbande tussen die totale magnetiese kernvolume, die totale kompressieverhouding en die aantal kompressorstadia toon dat die minimum kernvolume verkry word wanneer die kompressieverhouding per stadium $\delta_n = \sqrt{e}$, ongeag die vereiste totale kompressieverhouding.

ABSTRACT

A theoretical basis for the optimization of core volume in an electromagnetic pulse compressor with saturable ferromagnetic cores

The theory of operation, which takes into account the system losses, of the Melville line pulse compressor, is presented. The relationship between the total volume of magnetic material, the overall compression ratio and the number of stages show that a minimum volume of material is required when the compression ratio per stage $\delta_n = \sqrt{e}$, irrespective of the required overall compression ratio.

AGTERGROND

Daar bestaan vandag 'n steeds groeiende behoefte om elektriese energiepulse van etlike tiene joule aan 'n verskeidenheid van laste te lewer oor tydsduurtes van so kort as 'n paar honderd nanosekondes en minder. Die spannings en strome ter sprake bedra etlike tiene kilovolt en kilo-ampère en die piekdrywingsvlakke lê hoër as 1 Gigawatt. Die gemiddelde drywing mag egter nog steeds relatief laag wees (gewoonlik 'n paar kilowatt), afhangende van die herhalingsfrekwensie van bg. pulse.

Daar bestaan nie skakelaars soos bv. halfgeleiers of tiratronbuise wat sulke strome en spannings, veral teen herhalingsfrekwensies wat tot in die 1kHz-bereik mag strek, kan hanteer nie. Die vereiste pulse word verkry deur eerstens die "energiepakette" teen strome en spannings te genereer wat gemaklik met beskikbare skakelaars hanteer kan word. Hierna word hierdie laedrywingspulse deur 'n pulskompressor gestuur wat hulle tot die gewenste tye verkort en sodoende tot die vereiste drywingsvlakke verhoog.

Die skrywer, tesame met ander werkers op dié gebied, ontwikkel tans so 'n pluskompressor^{1,2} wat gebruik sal word om pulse aan die elektrodes van 'n gepulseerde koolstofdioksiedlaser, wat ook ontwikkel word, te lewer.

PULSKOMPRESSOR

Die tipe pulskompressor wat gebruik word, staan bekend as die Melvillelyn³ en lyk op die oog af na 'n leertipe filternetwerk of 'n diskrete transmissielyn (kyk fig. 1) met dié belangrike verskil dat die induktore L₁ tot L_N nie-lineêr is. Eenvoudigheidshalwe word aanvaar dat elke induktor slegs twee waardes aanneem, nl. sy onversadigde en versadigde induktansie L_{no} en L_{ns} onderskeidelik, wat ooreenstem met die magnetiese kern se onversadigde en versadigde toestand. Die verhouding $\frac{L_{no}}{L_{ns}}$ kan

so hoog as 'n paar duisend wees, afhangende van die kernmateriaal wat gebruik word. Wanneer parasitiese effekte verwaarloos word, is





FIGUUR 1: Die Melvillelyn-pulskompressor.

* Outeur aan wie korrespondensie gerig kan word



FIGUUR 2: Ekwivalente stroombaan van een lus.'

waar μ_o en μ_s onderskeidelik die permeabiliteit van die kernmateriaal in sy onversadigde en versadigde toestand is.

WERKING VAN PULSKOMPRESSOR

Verwys asb. na fig. 1. Aanvaar alle strome en spannings is aanvanklik nul. Skakelaar S word vir 'n gegewe tyd gesluit sodat kapasitor C_1 tot 'n voorafgekose spanning U_{a1} laai. Gedurende hierdie laaifase moet L_1 'n hoë waarde hê, nl. $L_1 = L_{10}$. Die stroom wat gedurende hierdie tyd deur L_1 opbou, is weglaatbaar klein relatief tot die laaistroom van C_1 en ons sê L_1 is in die onversadigde of spertoestand. L_1 kan gesien word as 'n skakelaar wat "oop" is.

Na afloop van dié laaifase sal die magnetiese vloed in L_1 opbou tot 'n punt waar sy kern versadig en sy induktansie vinnig daal tot $L_1 = L_{1s}$. Die kombinasie van C_1 , L_{1s} en C_2 vorm 'n resonante kring en mits $C_1 = C_2$, word die hele elektriese lading wat in C_1 gestoor is, d.m.v. resonante energieoordrag oorgeplaas na C_2 , op voorwaarde dat die volgende induktor, L_2 , tydens hierdie oordragsiklus sper. Sodra alle lading na C_2 oorgeplaas is, val die stroom deur L_1 terug na nul en L_2 keer terug na die spertoestand. Hierdeur word voorkom dat C_2 weer deur L_1 ontlaai. Op hierdie tydstip moet L_2 ophou sper of "aan"- skakel sodat die energie in C_2 soos hierbo na C_3 oorgedra word. Die proses hierbo vir C_1 , L_{1s} en C_2 beskryf, word nou vir C_2 , L_{2s} en C_3 herhaal en daarna vir C_3 , L_{3s} en C_4 ens. totdat die "energiepakket" wat aanvanklik in C_1 geberg is, in C_n verskyn en daarna in die las Z_1 gedissipeer word.

Indien die versadigde induktasie L_{1s} tot L_{ns} progressief kleiner gemaak word, sal die oordragperiode van elke opeenvolgende stadium kleiner as die vorige wees. Sodoende word die stroompulse wat beurtelings deur elke induktor vloei, progressief korter. Dit is dieselfde lading wat telkens oorgedra word, dus is die piekwaarde van elke opeenvolgende stroompuls ooreenstemmend hoër en die styg- en valtyd van die spanning oor elke opeenvolgende kapasitor, soos dit laai en dan weer ontlaai, ooreenstemmend korter. Tipiese golfvorms word in fig. 3 getoon.

Opsommend dus word die stroompulse, soos hulle in die lyn afbeweeg, steeds korter in tyd en hoër in amplitude terwyl die spanningsflanke korter word. Die piekspannings bly egter konstant teen die lyn af. Die Melvillelyn staan dus ook bekend as 'n stroomkompressor. Vir die geïdealiseerde, verlieslose geval soos in fig. 1 voorgestel, is dit wenslik dat alle kapasitore C_n dieselfde waarde moet besit om 'n volledige ladingsoordrag van die een na die ander te verseker.



FIGUUR 3: Stroom- en spanningsgolfvorms vir twee opeenvolgende kompressorstadia.

Die uitsluitlike doel van die kernmateriaal van elke induktor L_n is om hom te laat sper gedurende die laaisiklus van kapasitor C_n en gedurende die ontlaaisiklus van die kapasitor C_{n+1} . Eersgenoemde speraksie stel 'n hoër spervereiste aan die kern as laasgenoemde, a.g.v. die langer tye ter sprake.

ANALISE

In hierdie afdeling word die teorie van verwysings (1), (2) en (4) volledigheidshalwe herhaal.

Terwyl die energiepuls deur die kompressor propageer, is die las Z_L (wat gewoonlik nie-lineër is) effektief deur induktor L_N van die res van die stelsel gesper en het dit dus geen uitwerking op die kompressie-aksie nie.

In enige praktiese kompressor kom daar verliese voor, hoofsaaklik in die vorm van weerstands- of koperverliese, magnetiese histerese- en werwelstroomverliese, met die gevolg dat die energie wat aan die las gelewer word, kleiner is as die insetenergie. Die verliese veroorsaak verhitting van die komponente wat dikwels spesiale verkoelingsmaatreëls genoodsaak.

In die analise van die stelsel word daar vir verliese voorsiening gemaak deur elke lus te beskou asof daar 'n enkele serieweerstand R_n daarin voorkom, soos in fig. 2 getoon, waar die dissipasie in R_n gelyk sal wees aan die totale lusdissipasie.

Die werking van 'n enkele lus (lus n) word nou noukeuriger geanaliseer: Aanvaar dat L_n ophou sper by tydstip t = 0 wat voorgestel word deur die sluiting van skakelaar S_n in fig. 2. Op hierdie tydstip is $u_n(0) = U_{an}$ en $u_{n+1}(0) = 0$. Dit kan nou getoon word⁴ dat die stroom

$$\dot{u}_n(t) = \frac{U_{an}}{\omega L_{ns}} e^{-\alpha t} \sin \omega t$$
(2)

en die spannings oor C_n en C_{n+1} onderskeidelik

$$u_n(t) = U_{an} \left[1 - \frac{1}{L_{ns}C_n} \left(\frac{1}{\omega_o^2} - \frac{e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \emptyset)}{\omega \omega_o} \right) \right] \dots \dots (3)$$

$$\operatorname{en} u_{n+1}(t) = \frac{U_{an}}{L_{ns}C_{n+1}} \left(\frac{1}{\omega_o^2} - \frac{e^{-\alpha t}\cos(\omega t + \emptyset)}{\omega\omega_o} \right) \dots \dots \dots (4)$$

waar die dempingskonstante $\alpha = \frac{R_n}{2L_{ns}}$(5)

en die ossillasiefrekwensie $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ (6)

waar
$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_{ns}C_T}$$
 en $C_T = \frac{C_n C_{n+1}}{C_n + C_{n+1}}$

 ω_o is die ossillasiefrekwensie vir die ongedempte of verlieslose (R = O) geval en C_T die ekwivalente kapasitansie in die resonante kring.

Die beginfasehoek $\emptyset = \tan^{-1} \left(-\frac{\alpha}{\omega} \right)$ (7)

Die oordragtyd T_n is die tyd wat $i_n(t)$ neem om weer

volgens vergelyking (2) terug te val na nul sodat L_n uit versadiging kom (ekwivalent aan S_n wat oopgaan) en dus weer sper.

Dit word uitgedruk as
$$T_n = \frac{\pi}{\omega}$$
(8)

Aan die einde van die oordragsiklus is die kapasitorspannings

$$u_{n}(T) = U_{an}\left(1 - \frac{1 + e^{-\alpha T}}{1 + k}\right) en u_{n+1}(T) = U_{an}\frac{k(1 + e^{-\alpha T})}{1 + k} (9), (10)$$

Hieruit volg dat C_n volledig ontlaai sal wees $\{u_n(T) = 0\}$

indien
$$k = e^{-\alpha T}$$
, waar $\frac{C_n}{C_{n+1}} = k$ (11),(12)

Sodra daar dus verliese intree, soos in enige praktiese kompressor, word dit nodig om die kapasitorwaardes, in ooreenstemming met vergelykings (11) en (12), progressief te laat toeneem. In die vorige afdeling is dit gestel dat alle kapasitorwaardes dieselfde moet wees vir volledige ladingsoordrag wat net sal geld vir die verlieslose geval waar k = 1.

Tipiese golfvorms, in ooreenstemming met vergelykings (2) tot (12), word in fig. 3 getoon.

KOMPRESSIEVERHOUDING

In hierdie afdeling word nuwe verbande afgelei waarmee die kernvolume geoptimeer kan word.

Die kompressieverhouding van lus n kan gedefinieer word as

waar T_{n-1} die oordrag- of pulstyd van die vorige (n-1 de) lus is, wat kapasitor C_n insluit. So 'n definisie is geregverdig, aangesien die maksimum waarde wat T_{n-1} mag aanneem, deur die spervermoë van L_n beperk word. Hierdie spervermoë word soos volg bepaal:

Die magnetiese vloed in L_n , tydens die laaisiklus van C_n

$$\Phi_{n}(t) = \frac{1}{D} \int_{0}^{\tau} u_{n}(\tau) d\tau \qquad (14)$$

indien ons aanvaar dat $\Phi_n(0) = 0$ en $u_{n+1}(0) = 0$. D is die aantal draaie op L_n . Ons het met vergelyking (14) stilswyend aanvaar dat die tydsoorsprong (t = 0) na die begin van die vorige (n - 1 de) oordragsiklus teruggeskuif het.

Vir optimale werking moet $\Phi_n(t)$ sy maksimum waarde Φ_{nm} vir die onversadigde kern aan die einde van die n-1 de oordragsiklus bereik. Dit kan getoon word dat

$$\Phi_{nm} = \frac{1}{D} \int_{0}^{l_{n-1}} u_n(\tau) \cdot d\tau = \frac{k_{n-1}}{1+k_{n-1}} \cdot \frac{T_{n-1} \cdot U_{a(n-1)}}{D} = \frac{T_{n-1} U_{an}}{D(1+k_{n-1})}$$
(15)

waar alle parameters met onderskrif n-1 verwys na lus n-1 gedefinieer soos die ooreenstemmende parameters in lus n hierbo. Hieruit is die maksimum oordragtyd van stadium n-1 'n funksie van die parameters van stadium n:

waar A die effektiewe kernoppervlakte en ΔB_m die maksimum magnetiese vloeddigtheidsekskursie in die kernmateriaal is.

Die versadigde induktansie van die n de stadium kan uitgedruk word as

$$L_{\rm ns} = \frac{\mu_{\rm s} A D^2}{l_{\rm e}} \qquad (17)$$

waar le die effektiewe magnetiese padlengte is.

Uit vergelykings (5),(6),(8),(10),(11),(12),(13),(16) en (17) kan nou afgelei word dat:

$$V_{n} = \frac{2\mu_{s}E_{e}}{1+k-\frac{R_{n}^{2}C_{n}}{4L_{ns}}} \left(\frac{\pi}{(1+k)\Delta B_{m}}\right)^{2} \cdot \delta_{n}^{2} \dots (18)$$

waar V_n die volume van die magnetiese kern en E_t die gestoorde elektriese energie in C_n is. Verder word aanvaar dat daar uniforme belading oor alle stadiums is, d.w.s. alle $k_n = k$. Vergelyking (18) is baie belangrik, omdat dit o.a. die verband tussen die kompressiefaktor en die kernvolume aandui.

Hierdie uitdrukking vir die kernvolume V_n is bevestig deur praktiese metings wat gedoen is op 'n kompressorstadium met 'n kompressiefaktor $\delta_n = 2,33$, 'n pulsenergie $E_e = 3$ joule en 'n induktor met U-93 tipe ferrietkerne van N-27 materiaal. Daar is terselfdertyd vasgestel dat $\mu_s \approx 10\mu_o$. Vir 'n uniforme N-stadium-kompressor is die totale kompressieverhouding

$$\phi_{\rm T} = \phi_1 \phi_2 \dots \phi_n \dots \phi_N \quad (19)$$

en die totale kernvolume $V_t = N V_n$ (20)

Met alle d_n dieselfde waar n = 1, 2, ... N sal $d_n = d_T^{N}$ (21)

en van vergelyking.(18) kan geskryf word

$$V_{\tau} = \frac{2N\mu_{s}E_{e}}{1+k-\frac{R_{n}^{2}C_{n}}{4L_{rs}}} \left(\frac{\pi}{(1+k)\Delta B_{m}}\right)^{2} \quad \delta_{\tau}^{\frac{2}{N}} \triangleq KN \delta_{\tau}^{\frac{2}{N}}$$
(22)

Dit is hierbo duidelik wat die definisie van K is.

Vergelyking (22) word grafies in fig. 4 voorgestel.

Die verbande van vergelykings (21) en (22) lewer 'n minimum totale kernvolume V_t wanneer

$$\delta_n = \sqrt{e} = 1,6487$$
 (23)

Die aantal stadia benodig vir minimum kernvolume is dus

$$N_{\min} = 2 \ln \delta_{\mathrm{T}} \tag{24}$$

Hierdie verband word grafies in fig. 5 voorgestel waar N telkens afgerond is na die naaste heelgetal.

BESPREKING

Ons sien in vergelyking (22) dat die kernvolume eweredig aan die elektriese energie is, dat die versadigde permeabiliteit so laag as moontlik moet wees en bowe-al dat die vloedekskursie ΔB_m so hoog as moontlik moet wees vanweë die inverse kwadratiese verband daarmee, om V_t te minimeer.



FIGUUR 4: Kernvolume teen aantal stadia.



'n Kompressieverhouding volgens vergelyking (23) sal slegs toepaslik wees indien die minimering van kernvolume die enigste oorweging is. Aangesien daar in elke bykomende stadium 'n kapasitor benodig word, moet die afname in kernvolume met die byvoeging van so 'n ekstra stadium opgeweeg word teen die koste van die kapasitor, die (moontlike) ekstra koper wat benodig sal word, asook die verandering in dissipasie, die addisionele konstruksiekoste, ens. Uiteindelik is die optimering van 'n pulskompressorontwerp, wat o.a. die bepaling van die optimale aantal stadia insluit, 'n iteratiewe proses tussen teoretiese voorspellings, rekenaaranalise en praktiese metings, soos in verwysings 1 en 5 bespreek word.

VERWYSINGS

1. Bredenkamp, G.L., Swart, P.H. & Von Bergmann, H.M.

(1987). A Resonant Pulse Power Supply with Pulse Energy Regulation, 6th IEEE Pulsed Power Conference, Arlington, Virginia, 29 June – 1 July.

- 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, aangebied by die 6th IEEE Pulsed Power Conference, Arlington, Virginia, 29 June-1 July.
- 3. Melville, W.S. (1951). The Use of Saturable Reactors as Discharge Devices for Pulse Generators – Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Radio and Communications (London, England) Vol. 93(3), 185.
- 4. Swart, P.H. (1987). Elektromagnetiese Pulskompressie met behulp van Versadigbare Magnetiese Kerne. M.Ing.verhandeling, RAU, Julie.
- 5. Swart, P.H., Bredenkamp G.L. & Oberholzer, M.A. (1986). Digital Simulation of General Nonlinear Systems, *Proceedings* of the Twelfth South African Symposium of Numerical Mathematics. Umhlanga Rocks, July.