

Navorsings- en Oorsigartikels

Analise en optimering van lineêre regeneratiewe gapsers

C.G. Steyn

Fakulteit Ingenieurswese, RAU, Posbus 524, Johannesburg 2000

UITTREKSEL

In hierdie artikel word die algemene lineêre regeneratiewe aanskakelgapsers en afskakelgapsers afsonderlik beskou en geoptimeer in terme van minimum totale energieverlies. Die dissipatiewe gapsers – wat tot dusver die enigste gapsers was wat geoptimeer is – word dan slegs 'n spesiale geval van hierdie algemene regeneratiewe gapsers. Vergelykings wat die belangrikste groothede beskryf, word in tabelvorm, en sommige energieverlope in grafiekvorm, weergegee.

ABSTRACT

Analysis and optimization of linear regenerative snubbers

In this article both the general linear regenerative turn-on and turn-off snubbers are analysed and optimized independently from one another, in terms of minimum energy losses. The dissipative snubber – which was up to now the only optimized snubber – now becomes merely a special case of this general regenerative snubber. Equations describing the most important parameters are presented in tables, while some energy versus snubber size graphs are also shown.

Gebruik van gapsers by drywingselektroniese skakelaars

Wanneer halfgeleierelemente as elektroniese skakelaars gebruik word in drywingselektroniese bane, kom daar hoë drywingspieke in die skakelement(e) voor gedurende elke aan-af- en af-aan-skakeloorang.^{1,2} Alhoewel die omskakeltydsduur slegs etlike mikrosekondes duur, is die drywingspiek tientalle kilowatt. Dié drywingsverlies verhoog nie net die skakelement se gemiddelde temperatuur nie, maar die hoë drywingspieke kan lei tot stadig-toenemende degradering van die halfgeleierelement as gevolg van termiese skokke.³ In halfgeleierelemente soos bipolêre transistors kan dit ook katastrofiese gevolge hê, deurdat dit kan lei tot tweede-deurbraak.^{4,5}

Dit is gebruikelik om gapserbane (Eng. “snubber circuits”) te benut om die halfgeleierskakelemente te beskerm tydens aanskakeling (af-aan-skakeling) sowel as afskakeling (aan-af-skakeling). In eersgenoemde geval word 'n induktor in serie met die skakelement geplaas en word die spanning (potensiaalverskil) oor die skakelaar tydens aanskakeling deur hierdie induktor weggegap.^{6,7,8} Terselfdertyd beperk die induktor die stygtempo van die skakelaarsstroom. So 'n gapsers staan dan bekend as 'n aanskakelgapsers, seriegapsers, spanningsgapsers of di/dt -beperker. 'n Afskakelgapsers bestaan weer uit 'n kapasitor, wat tydens die afskakeloorang parallel met die skakelement verbind is, wat die stroom deur die skakelaar weggaps en terselfdertyd die stygtempo van die skakelaarspanning beperk. Die benaming afskakelgapsers, parallelgapsers, stroomgapsers en du/dt -beperker is dus sinonieme in hierdie verband.

Gedurende gapserswerking word die gapsersinduktor en -kapasitor egter opgelaaie sodat daar ná

gapsing 'n sekere hoeveelheid energie in hierdie gapserelemente gestoor is. Vir 'n lineêre (konstante) gapsersinduktansie en -kapasitansie is die gestoorde energie

$$W_L = \frac{1}{2} LI_L^2, \quad (1a)$$

$$W_C = \frac{1}{2} CU_C^2, \quad (1b)$$

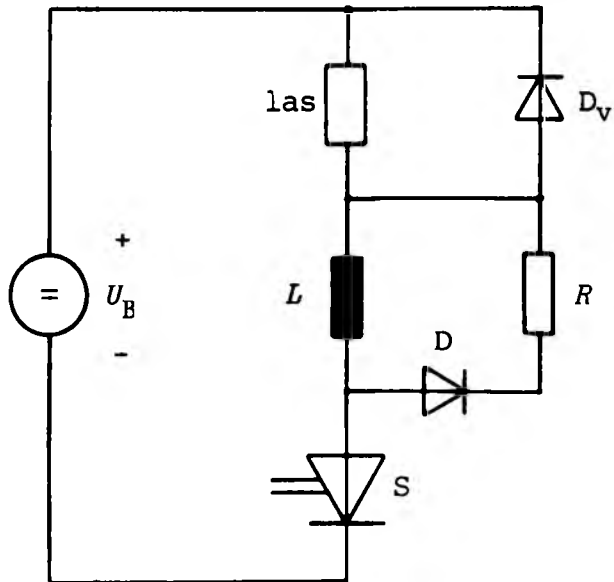
waar I_L die finale stroom deur die induktor en U_C die finale spanning oor die kapasitor is. Die stroom I_L en spanning U_C word bepaal deur die elektriese belasting, toevoerspanning en topologie van die stroombaan. Indien die induktor slegs oplaai tot by die lasstroom (I_d) en die kapasitor oplaai tot by die bronspanning (U_B), is die uiteindelijke gestoorde energie

$$W_L = \frac{1}{2} LI_d^2, \quad (2a)$$

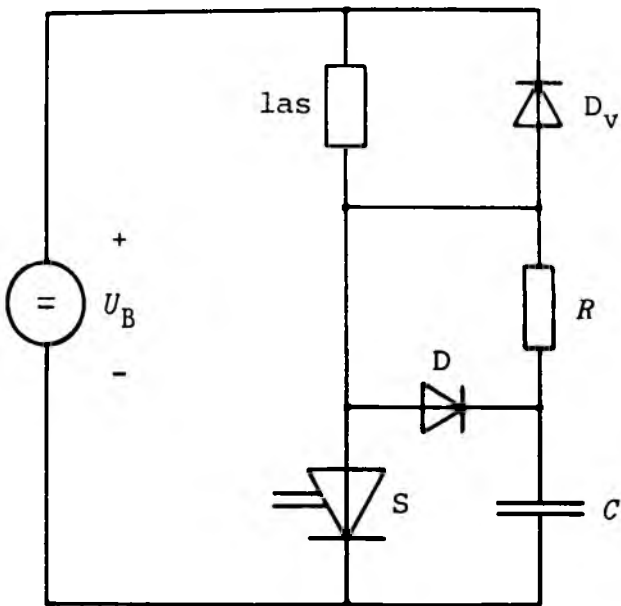
$$W_C = \frac{1}{2} CU_B^2. \quad (2b)$$

Ten einde voortdurende gapserswerking te verseker, moet die gestoorde energie telkens ná gapserswerking uit die gapsersinduktor/-kapasitor verwyder word. Die eenvoudigste manier om die gapserelement te ontlaai is deur gebruikmaking van 'n weerstandselement waarin die gestoorde energie verkwis word. So 'n gapserskonfigurasie staan dan bekend as 'n *verkwistende* of *dissipatiewe* gapsers. 'n Voorbeeld van 'n eenvoudige dissipatiewe aanskakelgapsers word skematies in figuur 1(a) getoon, terwyl figuur 1(b) 'n dissipatiewe afskakelgapsers toon.

Indien die aanname gemaak word dat daar tydens gapsersontlading geen van die gestoorde energie van die induktor of die kapasitor in die skakelaar verlore gaan nie, is die gemiddelde drywingsverlies in die weerstand, vir die aanskakelgapsers en afskakelgapsers



(a)



(b)

FIGUUR 1: Drywingselektroniese skakelaar met dissipatiewe gapser: (a) Lineêre RLD-aanskakelgapser; (b) Lineêre RCD-afskakelgapser.

onderskeidelik:

$$P_R = W_L \cdot f_s = \frac{1}{2} L \cdot I_L^2 \cdot f_s, \quad (3a)$$

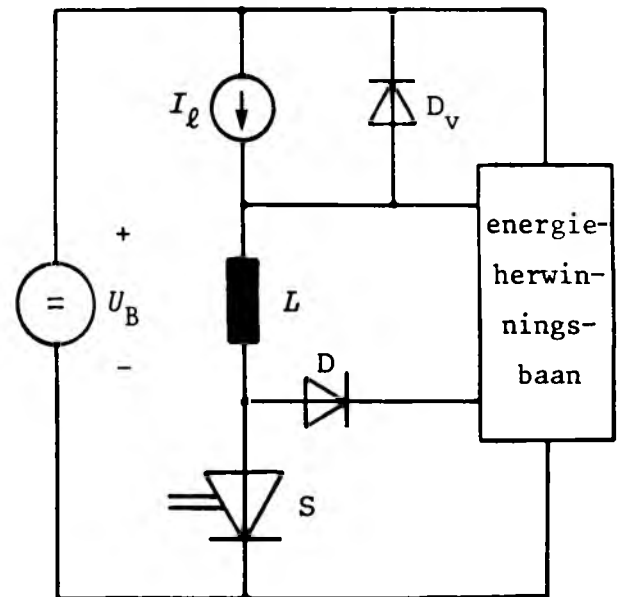
$$P_R = W_C \cdot f_s = \frac{1}{2} C \cdot U_B^2 \cdot f_s, \quad (3b)$$

waar f_s die skakelherhalingsfrekwensie van die drywingskakelaar is.

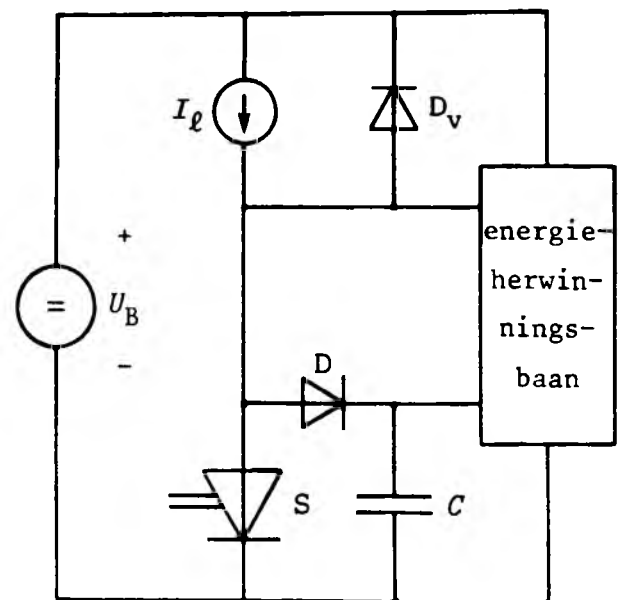
Vir goeie gapserwerking – d.w.s. min skakelverlies in die skakelement – word 'n groot gapserinduktansie of -kapasitansie benodig, wat weer die drywingsverlies in die gapserweerstand verhoog. McMurray⁸ het aangetoon dat daar 'n optimum waarde van gapsergrootte bestaan waar die totale energieverlies – dit is die som van die skakelaar se skakelverlies en die weerstand se verlies – 'n minimum is.

By verhoogde toevoerspannings (U_B), lasstrome (I_l) en skakelfrekwensies (f_s), raak die gemiddelde drywingsverlies in die gapserweerstand onprakties groot, veral omdat 'n groot drywingsverlies die termiese uitleg en hitteputontwerp kompliseer en die koste verhoog. Dit is gevolglik gebruiklik om by hoër drywingsvlakke en skakelfrekwensies eerder van herwinnende of regeneratiewe gapserbane gebruik te maak, waar ('n gedeelte van) die gestoorde energie van die gapserinduktor/-kapasitor herwin word, deur dit na byvoorbeeld die toevoerbron terug te voer.^{9,10,11}

In figuur 2(a) en 2(b) is die diagrammatiese voorstelling van 'n algemene regeneratiewe aanskakelgapser en afskakelgapser, onderskeidelik. Hierdie stroombaandiagramme is slegs 'n voorstelling van



(a)



(b)

FIGUUR 2: Drywingselektroniese skakelopstelling met lineêre regeneratiewe gapser: (a) Aanskakelgapser (b) Afskakelgapser.

sulke regeneratiewe gapsers en impliseer geen spesifieke topologie, stroombaanverbinding of tipe element wat gebruik word nie.

'n Dissipatiewe gapser kan egter beskou word as die spesiale geval van die regeneratiewe gapser waar geen energie herwin word nie. Indien die algemene regeneratiewe gapser dus ontleed en geoptimeer word, sal die resultate ook vir die dissipatiewe gapser geld. Die hoofdoel van hierdie artikel is om die algemene regeneratiewe gapser (aanskakelgapser en afskakelgapser) te ontleed en te optimeer.

Aannames en definisies

Met verwysing na figuur 2(a) en 2(b) word die volgende aannames gemaak:

- (a) Die bronspanning en lasstroom bly konstant by 'n waarde U_B en I_L onderskeidelik.
 (b) Tydens aanskakeling neem die spanning oor die skakelelement (u_S) lineêr af gedurende die spanningsvaltyd (t_{fv}). Dus geld die volgende gedurende aanskakeling:

$$u_S = U_B(1 - t/t_{fv}). \quad (4a)$$

- (c) Tydens afskakeling neem die stroom deur die skakelelement (i_S) lineêr af gedurende die stroomvaltyd (t_f). Dus geld die volgende tydens afskakeling:

$$i_S = I_L(1 - t/t_f). \quad (4b)$$

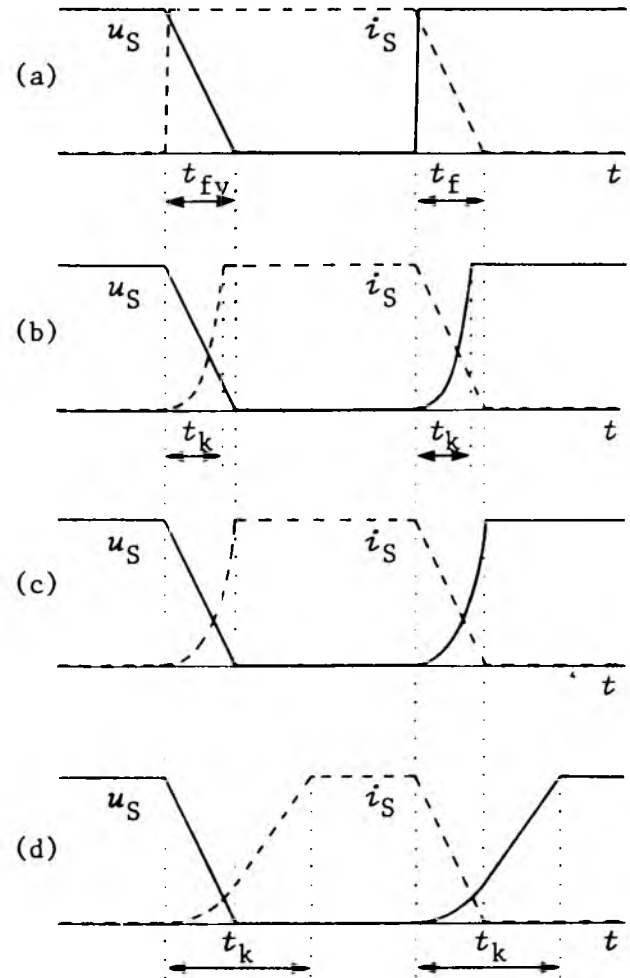
- (d) Die skakelaarspanningsvaltyd (t_{fv}) en skakelaarstroomvaltyd (t_f) is vas en nie 'n funksie van die grootte van die gapserelemente nie.
 (e) Alle spreidingsinduktansies en -kapasitansies in die stroombaan is nalaatbaar.
 (f) Alle diodes is ideaal.
 (g) Die aanskakelgapser en afskakelgapser word onafhanklik van mekaar beskou en ontleed. Daar is dus geen onderlinge beïnvloeding t.o.v. energieverlies of oorgangsgedrag nie.
 (h) Slegs die gedrag van die gapser tydens gapserwerking (gapserlaaiing) word beskou. Die ontlading van die gapser word dus vir hierdie ontleiding nalaat.
 (i) Die lekstroom en geleispanning van die skakelelement is nul, en die gapserinduktansie en -kapasitansie word tydens elke siklus volledig ontlaa. Gevolglik is die aanvangstroom deur die serie-induktor nul aan die begin van die aanskakeloorgang:

$$i_L(0) = 0, \quad (5a)$$

en die aanvangspanning van die parallel-kapasitor nul aan die begin van die afskakeloorgang:

$$u_C(0) = 0. \quad (5b)$$

In figuur 3 word die verloop van die skakelaarspanning en skakelaarstroom getoon vir verskillende gapsergroottes. Die dualisme tussen die aanskakelgapser/-oorgang en die afskakelgapser/-oorgang wat reeds deur McMurray⁸ aangetoon is, is ook sigbaar uit hierdie figuur.



FIGUUR 3: Spannings- en stroomverlope van die drywingskakelaar tydens aan- en afskakeling, vir verskillende gapsergroottes: (a) geen gapsers, (b) klein gapsers, (c) basisgrootte gapsers, (d) groot gapsers.

Vanuit figuur 3 is dit duidelik dat daar 'n skeidslyn is ten opsigte van skakelgedrag by 'n sekere gapsergrootte, te wete die basisinduktansie, L_b (aanskakelgapser), en die basiskapasitansie, C_b (afskakelgapser). Uit verdere vergelykings sal dit duidelik blyk dat die basisinduktansie en -kapasitansie gegee word deur

$$L_b = \frac{U_B t_{fv}}{2 I_L}, \quad (6a)$$

$$C_b = \frac{I_L t_f}{2 U_B}. \quad (6b)$$

Die kommutasietyd t_k word voorts gedefinieer as die tydverloop vanaf die begin van oorskakeling ($t=0$), tot op die tydstip dat die gapserinduktor/-kapsitor volgelaai is. Dus:

$$t_k = t(i_L = I_L) \text{ (aanskakeling)}, \quad (7a)$$

$$t_k = t(u_C = U_B) \text{ (afskakeling)}. \quad (7b)$$

Enige gapserinduktor/-kapsitor, met grootte ongelik aan die basisgrootte, kan dus beskou word as of 'n klein gapser of 'n groot gapser, relatief tot die basisgapser:

klein gapser

$$L < L_b, \text{ of } t_k < t_{fv} \text{ (aanskakelgapser),} \quad (8a)$$

$$C < C_b, \text{ of } t_k < t_f \text{ (afskakelgapser);} \quad (8b)$$

groot gapser:

$$L > L_b, \text{ of } t_k > t_{fv} \text{ (aanskakelgapser),} \quad (9a)$$

$$C > C_b, \text{ of } t_k > t_f \text{ (afskakelgapser).} \quad (9b)$$

Net soos L_b en C_b as verwysing vir die gapserinduktor en -kapasitor onderskeidelik gebruik word, kan die skakelenergieverlies in die skakelement, sonder gapser, as norm vir energie geneem word:

$$W_o = \frac{1}{2} U_B I_t t_{fv} \text{ (aanskakelenergieverlies),} \quad (10a)$$

$$W_o = \frac{1}{2} U_B I_t t_f \text{ (afskakelenergieverlies).} \quad (10b)$$

Optimale gapsers

Voordat daar enige optimering gedoen kan word, moet die optimale gapsergrootte eers gedefinieer word. In hierdie konteks sal die optimale gapser daardie grootte (en konfigurasie) van gapser wees waarvoor die totale energieverlies (W_{tot}) 'n minimum is.

Definieer die volgende:

W_L : gestoorde energie in aanskakelgapserinduktor, per skakelsiklus

W_C : gestoorde energie in afskakelgapserkapasitor, per skakelsiklus

W_g : energieverlies in gapser tydens gapserontlading

W_h : energie wat tydens gapserontlading herwin word

η_h : herwinningsrendement van die gapserbaan:

$$\eta_h = W_h / W_L \text{ (aanskakelgapser),} \quad (11a)$$

of

$$\eta_h = W_h / W_C \text{ (afskakelgapser).} \quad (11b)$$

Dus is

$$W_h = W_L - W_g \text{ (aanskakelgapser),} \quad (12a)$$

of

$$W_h = W_C - W_g \text{ (afskakelgapser).} \quad (12b)$$

Die herwinningsrendement van die gapserbaan kan dus nou ook soos volg uitgedruk word:

$$\eta_h = 1 - W_g / W_L \text{ (aanskakelgapser),} \quad (13a)$$

of

$$\eta_h = 1 - W_g / W_C \text{ (afskakelgapser).} \quad (13b)$$

Aangesien die gapser – per aanname – slegs die energieverlies in die skakelaar beïnvloed tydens die betrokke skakeloorgang, word, sover dit die skakel-element se energieverlies betref, slegs na dié skakel-energieverlies gekyk. Die geleidingsverlies en skakel-verlies tydens die komplementêre skakeloorgang word dus vir hierdie ontleding nagelaat. Dus, met W_S die skakelverlies in die skakelaar tydens skakeling (aanskakeling óf afskakeling) en W_{tot} die totale energieverlies onder beskouing, is:

$$W_{tot} = W_S + W_g, \quad (14)$$

of in terme van die herwinningsrendement:

$$W_{tot} = W_S + (1 - \eta_h) W_L \text{ (aanskakelgapser),} \quad (15a)$$

of

$$W_{tot} = W_S + (1 - \eta_h) W_C \text{ (afskakelgapser).} \quad (15b)$$

Vir die optimeringsproses word praktiese oorwegings soos koste, kompleksiteit, betroubaarheid, ens. nagelaat en word aanvaar dat hierdie twee eerste-orde gapsers onafhanklik van mekaar geoptimeer kan word, en ook slegs op grond van energieoorwegings. Die optimale gapsergrootte is dus daardie waarde van gapserinduktor/-kapasitor waarvoor die totale energieverlies 'n minimum is:

$$L = L_{opt} \text{ indien } W_{tot} = W_{tot}(\text{min}) \text{ (aanskakelgapser),} \quad (16a)$$

of

$$C = C_{opt} \text{ indien } W_{tot} = W_{tot}(\text{min}) \text{ (afskakelgapser).} \quad (16b)$$

TABEL 1
Algemene vergelykings

Grootheid	Aanskakelgapser	Afskakelgapser	Vgl.
Skakelaargedrag tydens skakeling	$u_S = U_B(1 - t/t_{fv})$	$i_S = I_t(1 - t/t_f)$	(4)
Basisgrootte gapser	$L_b = \frac{U_B t_{fv}}{2 I_t}$	$C_b = \frac{I_t t_f}{2 U_B}$	(6)
Skakelverlies in skakelement, sonder gapser	$W_o = \frac{1}{2} U_B I_t t_{fv}$	$W_o = \frac{1}{2} U_B I_t t_f$	(10)
Herwinningsrendement	$\eta_h = \frac{W_h}{W_L}$	$\eta_h = \frac{W_h}{W_C}$	(11)
Totale energieverlies	$W_{tot} = W_S + (1 - \eta_h) W_L$	$W_{tot} = W_S + (1 - \eta_h) W_C$	(15)

TABEL 2
Vergelykings vir klein gapsers

Grootheid (genormaliseerd)	Aanskakelgapsers	Afskakelgapsers	Vgl.
Definisie van klein gapsers	$\frac{L}{L_b} < 1$	$\frac{C}{C_b} < 1$	(16)
	of $\frac{t_k}{t_{fv}} < 1$	of $\frac{t_k}{t_f} < 1$	(17)
Kommutasietyd	$\frac{t_k}{t_{fv}} = \sqrt{\frac{L}{L_b}}$	$\frac{t_k}{t_f} = \sqrt{\frac{C}{C_b}}$	(18)
Energieverlies in skakelement tydens skakeling	$\frac{W_S}{W_o} = 1 + \frac{1}{2} \frac{L}{L_b} - \frac{4}{3} \sqrt{\frac{L}{L_b}}$	$\frac{W_S}{W_o} = 1 + \frac{1}{2} \frac{C}{C_b} - \frac{4}{3} \sqrt{\frac{C}{C_b}}$	(19)
Piekdrywing in skakelement	$\frac{\hat{P}_S}{W_o/t_{fv}} = 2(1 - \frac{L}{L_b})$	$\frac{\hat{P}_S}{W_o/t_f} = 2(1 - \frac{C}{C_b})$	(20)
Tydstip waarop piekdrywing voorkom	$\frac{t_p}{t_k} = 1$ vir $0 \leq \frac{t_k}{t_{fv}} \leq \frac{2}{3}$	$\frac{t_p}{t_k} = 1$ vir $0 \leq \frac{t_k}{t_f} \leq \frac{2}{3}$	(21)
	$\frac{t_p}{t_{fv}} = \frac{2}{3}$ vir $\frac{2}{3} \leq \frac{t_k}{t_{fv}} \leq 1$	$\frac{t_p}{t_f} = \frac{2}{3}$ vir $\frac{2}{3} \leq \frac{t_k}{t_f} \leq 1$	(22)
Gestoorte energie in gapsers	$\frac{W_L}{W_o} = \frac{1}{2} \frac{L}{L_b}$	$\frac{W_C}{W_o} = \frac{1}{2} \frac{C}{C_b}$	(23)
Energieverlies in gapsers	$\frac{W_g}{W_o} = \frac{1}{2}(1 - \eta_h) \frac{L}{L_b}$	$\frac{W_g}{W_o} = \frac{1}{2}(1 - \eta_h) \frac{C}{C_b}$	(24)
Totale energieverlies	$\frac{W_{tot}}{W_o} = 1 + (1 - \frac{1}{2}\eta_h) \frac{L}{L_b} - \frac{4}{3} \sqrt{\frac{L}{L_b}}$	$\frac{W_{tot}}{W_o} = 1 + (1 - \frac{1}{2}\eta_h) \frac{C}{C_b} - \frac{4}{3} \sqrt{\frac{C}{C_b}}$	(25)
Optimale gapsersgrootte	$\frac{L_{opt}}{L_b} = \frac{4}{9(1 - \frac{1}{2}\eta_h)^2}$	$\frac{C_{opt}}{C_b} = \frac{4}{9(1 - \frac{1}{2}\eta_h)^2}$	(26)
Waardes van herwinningsrendement waarvoor optimale gapsersgrootte geld	$0 \leq \eta_h \leq \frac{2}{3}$	$0 \leq \eta_h \leq \frac{2}{3}$	(27)
Minimum totale energieverlies (vir optimale gapsersgrootte)	$\frac{W_{tot}(\min)}{W_o} = 1 - \frac{4}{9(1 - \frac{1}{2}\eta_h)}$	$\frac{W_{tot}(\min)}{W_o} = 1 - \frac{4}{9(1 - \frac{1}{2}\eta_h)}$	(28)
Energieverlies in skakelement (vir optimale gapsersgrootte)	$\frac{W_S(L=L_{opt})}{W_o} = \frac{12 - 20\eta_h + 9\eta_h^2}{36(1 - \frac{1}{2}\eta_h)^2}$	$\frac{W_S(C=C_{opt})}{W_o} = \frac{12 - 20\eta_h + 9\eta_h^2}{36(1 - \frac{1}{2}\eta_h)^2}$	(29)
Energieverlies in gapsers (vir optimale gapsersgrootte)	$\frac{W_g(L=L_{opt})}{W_o} = \frac{2(1 - \eta_h)}{9(1 - \frac{1}{2}\eta_h)^2}$	$\frac{W_g(C=C_{opt})}{W_o} = \frac{2(1 - \eta_h)}{9(1 - \frac{1}{2}\eta_h)^2}$	(30)

TABEL 3
Vergelykings vir groot gapsers

Grootheid (genormaliseerd)	Aanskakelgapsers	Afskakelgapsers	Vgl.
Definisie van groot gapsers	$\frac{L}{L_b} > 1$	$\frac{C}{C_b} > 1$	(31)
	of $\frac{t_k}{t_{fv}} > 1$	of $\frac{t_k}{t_f} > 1$	(32)
Kommutasietyd	$\frac{t_k}{t_{fv}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{L}{L_b} \right)$	$\frac{t_k}{t_f} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{C}{C_b} \right)$	(33)
Energieverlies in skakelement tydens skakeling	$\frac{W_S}{W_o} = \frac{1}{6} \frac{L_b}{L}$	$\frac{W_S}{W_o} = \frac{1}{6} \frac{C_b}{C}$	(34)
Piekdrywing in skakelement	$\frac{\hat{P}_S}{W_o/t_{fv}} = \frac{8}{27} \frac{L_b}{L}$	$\frac{\hat{P}_S}{W_o/t_f} = \frac{8}{27} \frac{C_b}{C}$	(35)
Tydstip waarop piekdrywing voorkom	$\frac{t_p}{t_{fv}} = \frac{2}{3}$	$\frac{t_p}{t_f} = \frac{2}{3}$	(36)
Gestoorte energie in gapsers	$\frac{W_L}{W_o} = \frac{1}{2} \frac{L}{L_b}$	$\frac{W_C}{W_o} = \frac{1}{2} \frac{C}{C_b}$	(37)
Energieverlies in gapsers	$\frac{W_g}{W_o} = \frac{1}{2} (1 - \eta_h) \frac{L}{L_b}$	$\frac{W_g}{W_o} = \frac{1}{2} (1 - \eta_h) \frac{C}{C_b}$	(38)
Totale energieverlies	$\frac{W_{tot}}{W_o} = \frac{1}{6} \frac{L_b}{L} + \frac{1}{2} (1 - \eta_h) \frac{L}{L_b}$	$\frac{W_{tot}}{W_o} = \frac{1}{6} \frac{C_b}{C} + \frac{1}{2} (1 - \eta_h) \frac{C}{C_b}$	(39)
Optimale gapsersgrootte	$\frac{L_{opt}}{L_b} = \frac{1}{\sqrt{3(1 - \eta_h)}}$	$\frac{C_{opt}}{C_b} = \frac{1}{\sqrt{3(1 - \eta_h)}}$	(40)
Waardes van herwinningsrendement waarvoor optimale gapsersgrootte geld	$\frac{2}{3} \leq \eta_h \leq 1$	$\frac{2}{3} \leq \eta_h \leq 1$	(41)
Minimum totale energieverlies (vir optimale gapsersgrootte)	$\frac{W_{tot}(\min)}{W_o} = \sqrt{\frac{1}{3}(1 - \eta_h)}$	$\frac{W_{tot}(\min)}{W_o} = \sqrt{\frac{1}{3}(1 - \eta_h)}$	(42)
Energieverlies in skakelement (vir optimale gapsersgrootte)	$\frac{W_S(L=L_{opt})}{W_o} = \sqrt{\frac{1}{12}(1 - \eta_h)}$	$\frac{W_S(C=C_{opt})}{W_o} = \sqrt{\frac{1}{12}(1 - \eta_h)}$	(43)
Energieverlies in gapsers (vir optimale gapsersgrootte)	$\frac{W_g(L=L_{opt})}{W_o} = \sqrt{\frac{1}{12}(1 - \eta_h)}$	$\frac{W_g(C=C_{opt})}{W_o} = \sqrt{\frac{1}{12}(1 - \eta_h)}$	(44)

Resultate

Die verwerkte vergelykings vir beide die aanskakel- en afskakelgapsers word gesamentlik in tabelvorm getoon. Sodoende word die dualistiese verband tussen hierdie gapsers ook weer eens beklemtoon.

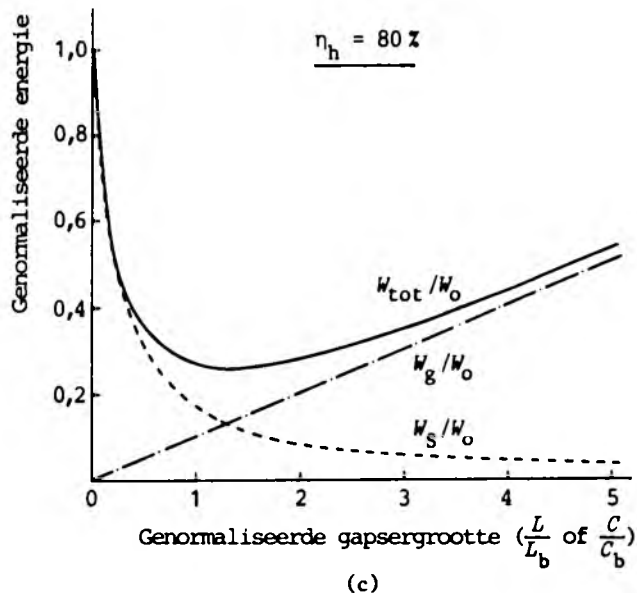
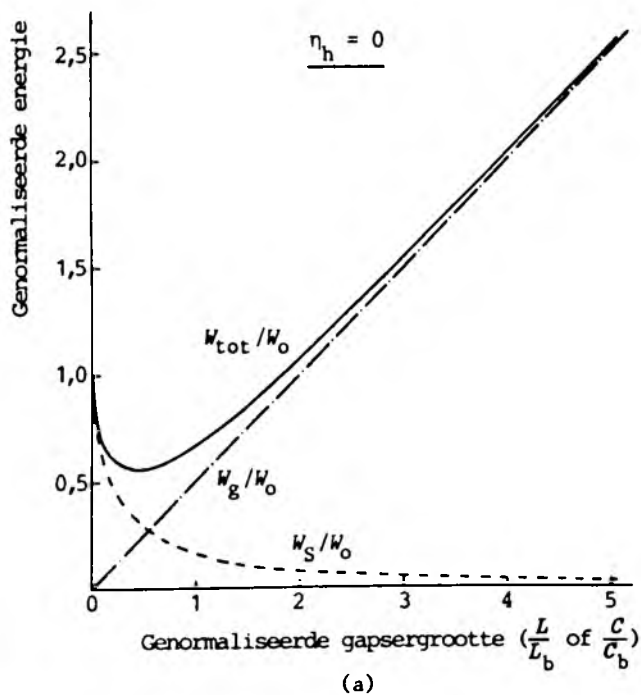
Ten einde 'n beter insig in die voorafgaande vergelykings te verkry, is die verlope van die belangrikste energieë as funksie van gapsersgrootte gestip, vir verskillende waardes van die herwinningsrendement. In figuur 4 is die genormaliseerde skakelaarverlies

TABEL 4

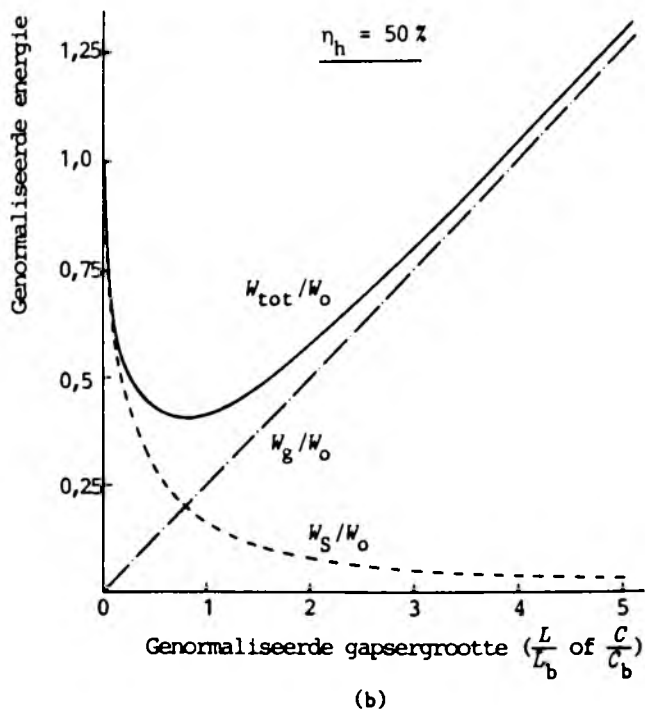
Optimale gapsergrootte en minimum totale energieverlies, vir gekose herwinningsrendement-waardes

Grootheid (genormaliseerd)	Herwinningsrendement		
	$\eta_h = 0$	$\eta_h = 50\%$	$\eta_h = 80\%$
Optimale gapsergrootte (L_{opt}/L_b of C_{opt}/C_b)	0,44	0,79	1,3
Minimum totale energieverlies ($W_{tot(min)}/W_o$)	0,56	0,41	0,26

(W_s/W_o), gapserverlies (W_g/W_o) en totale energieverlies (W_{tot}/W_o) gestip vir die volgende drie gevalle: (a) $\eta_h = 0$ (dissipatiewe gapsergeval),^{6,8} (b) $\eta_h = 50\%$, (c) $\eta_h = 80\%$.



FIGUUR 4: Genormaliseerde energie as funksie van genormaliseerde gapsergrootte, vir verskillende herwinningsrendement-waardes: (a) $\eta_h = 0$, (b) $\eta_h = 50\%$, (c) $\eta_h = 80\%$.



Die genormaliseerde optimale gapsergrootte (L_{opt}/L_b of C_{opt}/C_b) en ooreenstemmende genormaliseerde minimum totale energieverlies ($W_{tot(min)}/W_o$), is voorts bepaal vir die genoemde drie waardes van herwinningsrendement ($\eta_h = 0$; 50%; 80%), en word in tabel 4 getoon.

Samevatting

Die optimalisering van die algemene eerste-orde lineêre aanskakelgapser en afskakelgapser is uitgevoer, omdat dit baie wyer toepasbaar is as die bestaande optimalisering van slegs die dissipatiewe gapser. Die dissipatiewe gapser word nou slegs 'n spesiale geval van hierdie algemene regeneratiewe gapser.

Soos verwag, verlaag die minimum totale energieverlies wanneer die herwinningsrendement vergroot, terwyl die optimale gapsergrootte ook terselfdertyd toeneem. 'n Groot gapser word verkies bo 'n klein gapser, aangesien daar dan gapserwerking voorkom gedurende die volle valtyd van die skakelement se spanning/stroom. Indien die optimale gapsergrootte

beskou word, is dit uit die resultate duidelik dat daar net aan die vereiste van 'n groot gapser voldoen kan word indien die herwinningsrendement groter as 2/3 is. Soos reeds genoem, word die keuse van herwinningsrendement prakties bepaal deur die hoeveelheid moeite, tyd en geld wat die stroombaanontwerper bereid is om aan die herwinningsrendement af te staan. Daar moet dus die (normale) kompromis aangegaan word tussen energieverlies en moeite/koste.

Lys van simbole

C	lineêre (konstante) kapasitansie
C_b	basiskapasitansie ($C_b = \frac{1}{2} I_t \cdot t_f / U_B$)
C_{opt}	optimale gapserkapasitansie
D	gapserdiode
D_v	vryloopdiode
f_s	skakelfrekwensie van drywingskakelaar
i_C	kapasitorstroom
i_L	induktorstroom
I_t	konstante lasstroom
I_L	finale waarde van die induktorstroom ($I_L = I_t$)
$i_L(0)$	induktorstroom aan die begin van die aanskakeloorgang
i_S	stroom deur skakelement
L	lineêre (konstante) induktansie
L_b	basisinduktansie ($L_b = \frac{1}{2} U_B \cdot t_{fv} / I_t$)
L_{opt}	optimale gapserinduktansie
P_R	gemiddelde drywingsverlies in gapserweerstand
\hat{P}_S	piekdrywing in skakelement tydens skakeling
R	gapserweerstand van dissipatiewe gapser
S	elektroniese drywingskakelaar
t	tyd
t_f	valtyd van die skakelaarstroom (100% - 0)
t_{fv}	valtyd van die skakelaarspanning (100% - 0)
t_k	kommutasietyd
t_p	tydstip tydens skakeling, waar die piekdrywing voorkom
U_B	bronspanning
u_C	kapasitorspanning
U_C	finale waarde van die kapasitorspanning ($U_C = U_B$)
$u_C(0)$	kapasitorspanning aan die begin van die

	afskakeloorgang
u_L	induktorspanning
u_S	skakelaarspanning
W_C	finale gestoorde energie in gapserkapasitor
W_g	energieverlies in gapserbaan, per skakel-siklus
W_h	energie herwin deur die gapserbaan, per siklus
W_L	finale gestoorde energie in die gapserinduktor
W_o	energieverlies in skakelement tydens skakeling, sonder gapser
W_S	energieverlies in skakelement tydens 'n skakeloorgang
W_{tot}	totale energieverlies ($W_{tot} = W_S + W_g$)
$W_{tot}(\min)$	minimum totale energieverlies
η_h	herwinningsrendement van die gapsbaan ($\eta_h = W_h / W_L$ of $\eta_h = W_h / W_C$)

Ontvang 25 Julie 1986; aanvaar 20 Augustus 1986.

VERWYSINGS

1. Steyn, C.G. (1983). *Die optimale sturing van die skakellokus van elektroniese drywingskakelaars in bipolêre transistortegnologie*, M.Ing.-verhandeling, Randse Afrikaanse Universiteit, Hoofstuk 1.
2. Rischmuller, K. (1982). Have a closer look at switching losses, *PCI'82 Record*, Geneve, pp. 176-185.
3. Gaur, S.P. & Lowe, G. (1977). Power transistor crystal damage in inductive load switching, *Solid State Electronics*, 20, pp. 1026-1027.
4. Schafft, H.A. & French, J.C. (1962). Second breakdown in transistors, *IRE Transactions on Electron Devices*, ED-9, pp. 129-136.
5. Krishna, S. & Hower, P.L. (1973). Second breakdown of transistors during inductive turn-off, *Proceedings of the IEEE*, pp. 393-395.
6. Calkin, E.T. & Hamilton, B.A. (1976). Circuit techniques for improving the switching loci of transistor switching regulators, *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-12, pp. 364-369.
7. Peter, J.M. (1979). Switching aid networks. In *The power transistor in its environment* (Graphic Express, Malakoff) Hoofstuk VIII.
8. McMurray, W. (1980). Selection of snubbers and clamps to optimize the design of transistor switching converters, *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-16, pp. 513-523.
9. Boehringer, A. & Knöll, H. (1979). Transistorschalter im Bereich hoher Leistungen und Frequenzen, *ETZ*, 100, pp. 664-670.
10. Knöll, H. (1977). High-current transistor choppers, Tweede IFAC Symposium, Düsseldorf, pp. 307-315.
11. Ferraro, A. (1982). An overview of low-loss snubber technology for transistor converters, *IEEE PESC'82 Record*, pp. 466-477.