

Navorsingsbriewe

'n Nie-lineêre afskakelgapser vir drywingselektroniese skakelaars

C.G. Steyn en J.D. van Wyk

Laboratorium vir Energie, Fakulteit Ingenieurswese, RAU, Johannesburg

OPSOMMING

'n Nuwe voorstel vir 'n nie-lineêre afskakelgapser is eksperimenteel gesimuleer met behulp van lineêre kapasitore en 'n elektroniese hulpskakelaar. Hierdeur word die beginsel en voordele van die voorgestelde nie-lineêre afskakelgapser ten dele geïllustreer, veral wat betref die vermindering in gestoorde reaktiewe energie vir dieselfde vermindering van skakeldissipasioe in die elektroniese skakelement. Die volledige voordele van die idee sal verwerklik indien geen hulpskakelaar gebruik word nie, maar 'n gapserkapasitor met nie-lineêre, spanningsafhanklike dielektrikum. Navorsing oor die genoemde oplossing word voortgesit.

ABSTRACT

A non-linear turn-off snubber for power electronic switches

A novel suggestion for a non-linear turn-off snubber is simulated experimentally with linear capacitors and an auxiliary power electronic switch. Thus the principle and advantages of this concept is partly illustrated, particularly concerning the important reduction of reactive stored energy for the same switching dissipation in the main power device. The full advantages of the concept will be realised when a snubber capacitor with non-linear, voltage dependent dielectric is used. The work on this part of the solution is being continued.

'N NIE-LINEÊRE AFSKAKELGAPSER VIR DRYWINGSELEKTRONIESE SKAKELAARS

Die toepassing van gapsers

Die hoë energierendement van drywingselektroniese skakelaars berus op die lae dissipasioe van drywing in die elektroniese skakelement tydens beide die geleidende en die nie-geleidende toestand. Tydens geleiding is die stroom deur die element wel tipies tussen 1 A en 500 A, maar die spannings is slegs van die orde van een volt. Tydens die nie-geleidende toestand is die spanning weer tussen 20 V en 1 000 V, maar die lekstroom is slegs enkele milliampère. Tydens die skakeloorgang van een toestand na 'n ander kom 'n hoë stroom en 'n hoë spanning egter gelyktydig voor, sodat die oomblikdissipasioe in die element van 1 kW tot 500 kW kan bedra. Alhoewel hierdie drywingspuls slegs 'n duur van enkele mikrosekondes het, kan die voorkoms of lei tot die vernietiging van die element¹ (weens sogenaamde "tweede deurbraak") of tot langsaamoplopende kristalskade.²

Die gebruik van gapsers (Eng "snubbers") vir die vermindering van hierdie drywingsdissipasioe in hoë-drywingskakelaars is reeds 'n aanvaarde praktyk in die drywingselektronika^{3,4,5}. Hierdie bestaande tegnologie het egter sekere nadele t.o.v. skakelementgedrag en skakelaareienskappe. Hierdie nota stel die gebruik van die een of ander vorm van nie-lineêre kapasitor voor om dié nadele op te hef.

Daar bestaan verskeie gapsertopologieë,⁶ maar normaalweg is die gapser wat tydens die skakelaar se

afskakeloorgang behulpsaam is – die afskakelgapser – te onderskei van die komplementêre aanskakelgapser. Die aanskakelgapser bestaan normaalweg uit 'n serieverbinde induktor wat tydens skakelaaraanskakeling die spanning oor die skakelement weggaps. Die afskakelgapser, daarenteen, bestaan uit 'n parallelverbinde kapasitor wat tydens die afskakeloorgang die stroom vanaf die skakelement weggaps. As gevolg van die weggapsing van of die spanning of die stroom, is daar tydens oorskakeling nie gelyktydig 'n groot spanning en groot stroom by die skakelement betrokke nie. Gevolglik is die drywingsverlies in die skakelaar tydens oorskakeling met 'n gapser aansienlik minder as in die geval sonder gapser.

Indien die gapserreaktansie (induktansie of kapasitansie) vergroot word, verbeter die gapserwerking – die skakelverlies neem dus af. Ongelukkig word daar energie in die reaktiewe elemente tydens gapserwerking gestoor. Vir herhalende gapserwerking moet die gestoorde energie telkens na gapserwerking verwyder word. Die verwydering van hierdie gestoorde energie begin normaalweg gedurende die komplementêre skakeloorgang. Dit het tot gevolg dat die skakelement tydens gapserontlading weer belas word, sodat die skakelverlies weer sal toeneem.⁷ Indien 'n kapasitor byvoorbeeld gebruik word om 'n skakeltransistor tydens afskakeling te beskerm, sal die kapasitor tydens transistor aanskakeling begin ontlai en die transistor weer belas. By 'n verkwistende (dissipatiewe) gapser word die gestoorde

energie in 'n weerstand verkwis, terwyl by 'n herwin-nende (regeneratiewe) gapser 'n gedeelte van die gestoorde energie herwin word. Die ontlaaiproses van die gapser duur 'n eindige tyd, en dit plaas weer 'n beperking op veral drywingskakelaars waarvan die puls wydte gemoduleer word. Om dus die genoemde beperkings te bowe te kom, moet die gapser se gestoorde energie so min as moontlik wees.

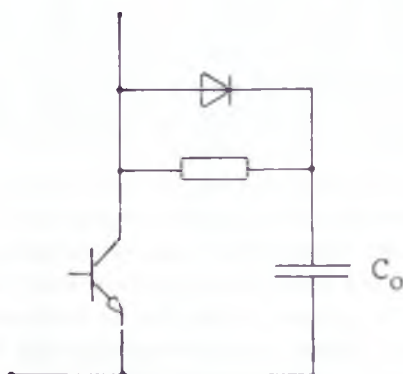
Tydens gapserwerking is daar dus 'n groot reaktansie nodig, terwyl die gestoorde energie tydens gapserontlading weer so min as moontlik moet wees. By normale lineêre reaktiewe elemente is hierdie twee vereistes egter teenstrydig.

Gelukkig bestaan daar 'n nie-lineêre aanskakel-gapser wat van 'n versadigbare induktor gebruik maak.^{7,8} Indien korrek ontwerp, sal die induktor tydens aanskakeling die spanning oor die skakelaar weggaps tot tyd en wyl die skakelement ten volle in geleiding is. Hierna versadig die spoel en verdwyn die effek van die gapser. Aangesien die versadigde induktansie van die induktor ordes laer as die aanvanklike induktansie is, is die gestoorde energie van 'n versadigde spoel ook heelwat minder as die energie wat in 'n vergelykbare lineêre induktor gestoor word. 'n Nie-lineêre reaktansie is dus uiters geskik as gapser-element.

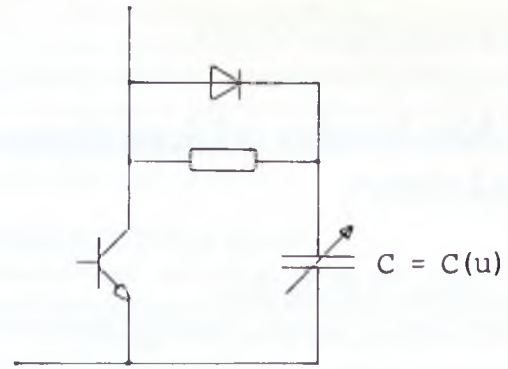
Aangesien daar 'n dualistiese verband tussen die aan- en afskakeloorgang bestaan, kan verwag word dat 'n nie-lineêre afskakelgapser, wat van 'n versadigbare kapasitor gebruik maak, net so 'n goeie gapser sal uitmaak. Ongelukkig bestaan daar tans nog nie so 'n praktiese versadigbare gapserkapasitor nie. Om egter hierdie nuwe beginsel van die nie-lineêre kapasitor aan te toon, is 'n eksperimentele simulasie van so 'n nie-lineêre kapasitor gedoen.

EKSPERIMENTELE SIMULASIE EN RESULTATE

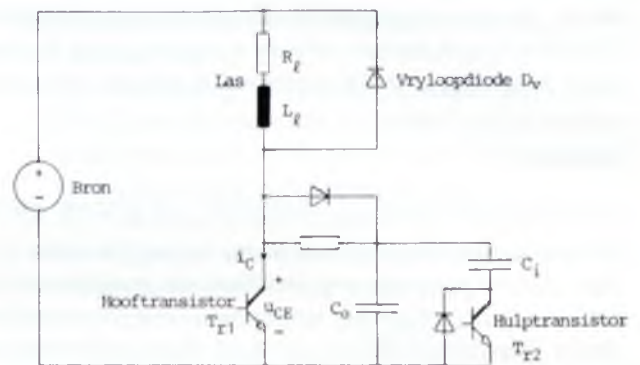
Die afskakelgapserkonfigurasie wat gebruik is, is die van die eenvoudige RCD-gapser.⁵ Vir die doeleindes van hierdie bespreking is die ontlading van die gapser as sulks nie belangrik nie, en word slegs die afskakeloorgang en die gestoorde energie in die kapasitor gevolglik beskou. Figuur 1 toon die stroombaandiagram, waar 'n bipolêre darlingtontransistor as voorbeeld van 'n drywingskakelement geneem is – die hoofskakelaar. Volledige eksperimentele besonderhede verskyn in verwysings 7 en 10.



FIGUUR 1(a): Konvensionele afskakelgapser.



FIGUUR 1(b): Voorgestelde afskakelgapser. $C(u_2) \ll C(u_1)$ vir $u_2 > u_1$.



FIGUUR 1(c): Stroombaandiagram van eksperimentele opstelling.

Vervolgens word die volgende drie gevalle beskou:

- (i) sonder afskakelgapser $C_1 = C_0 = 0$
- (ii) met groot lineêre kapasitor $C_0 = 1 \mu F$ volgens McMurray⁵
- (iii) met nie-lineêre kapasitor $C_1 = 1 \mu F, C_0 = 10 nF$

Soos gesien kan word, word die hulpskakelaar (wat ook 'n bipolêre darlingtontransistor is), slegs in die laaste geval bedryf – in die eerste twee gevalle is dit onaktief ('n oop baan). Op die volgende drie foto's is die afskakelkarakteristiek van die hoofskakelaar vir die genoemde drie gevalle getoon.

Van hierdie drie foto's is die afskakeldrywingsverlope bepaal en in Fig. 2 gestip. Die skakelaar se afskakelenergieverlies word deur die oppervlakte onder die drywing-tyd-grafiek gegee. In tabel 1 is al die verwerkte gegewens saamgevat.

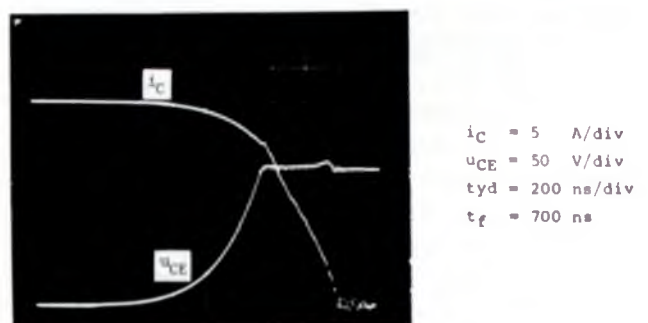
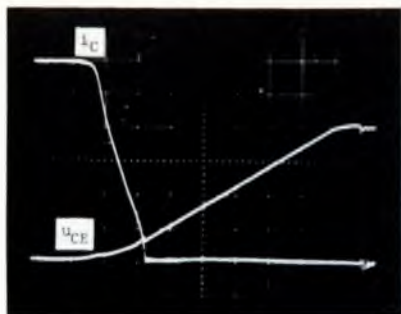
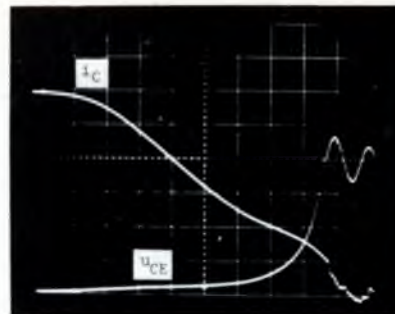


FOTO 1: Afskakelkarakteristiek van hoofskakelaar sonder enige gapser.

$i_C = 5 \text{ A/div}$
 $u_{CE} = 50 \text{ V/div}$
 $t_{yd} = 200 \text{ ns/div}$
 $\tau_f = 700 \text{ ns}$



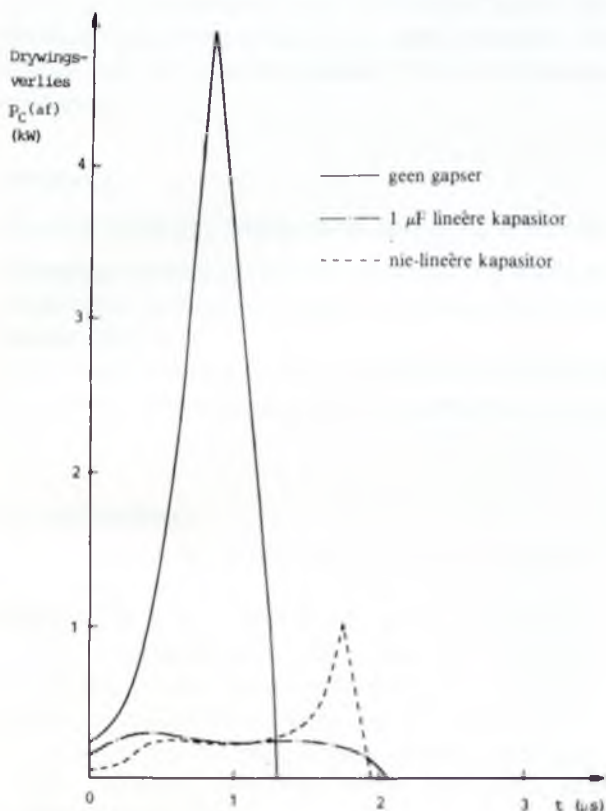
$i_C = 5 \text{ A/div}$
 $u_{CE} = 50 \text{ V/div}$
 $t_{yd} = 1 \text{ } \mu\text{s/div}$
 $t_f = 1,5 \text{ } \mu\text{s}$



$i_C = 5 \text{ A/div}$
 $u_{CE} = 50 \text{ V/div}$
 $t_{yd} = 200 \text{ ns/div}$
 $t_f = 1,35 \text{ } \mu\text{s}$

FOTO 2: Afskakelkarakteristiek met groot lineêre kapasitor $C_o = 1 \text{ } \mu\text{F}$.

FOTO 3: Afskakelkarakteristiek met nie-lineêre kapasitor.



FIGUUR 2: Drywingsverlope in hooftransistor tydens afskakeling met verskillende afskakelgapser.

BESPREKING

Soos verwag, en soos duidelik blyk uit die vorige tabel, is die nie-lineêre kapasitor die enigste afskakelgapser-element wat aan die gevraagde twee vereistes voldoen, naamlik:

- (i) Dit ontlaas die skakelaar voldoende tydens die afskakeloorgang; die dissipasie is slegs sowat 20% van die dissipasie sonder gapser.
- (ii) Dit stoor 'n relatiewe klein hoeveelheid energie tydens gapserwerking; die gestoorde energie is slegs sowat 2% van dié by 'n voldoende groot lineêre gapser.

Die gebruik van 'n hulpskakelelement T_{r2} is egter minder elegant, sodat C liewer 'n kapasitor met nie-lineêre (spanningsafhanklike) diëlektrikum moet wees.⁹ Dit is verder ook duidelik aangetoon dat die valtyd van die stroom tydens afskakeling van T_{r1} 'n komplekse funksie van die stygende kollektor-emittorspanning van T_{r1} is. Die vorm van die afhanklikheid tussen die kapasitansie van C en die kollektor-emittorspanning sal dus beide die vorm, duur en amplitude van die betrokke drywingspuls in Fig. 2 beïnvloed. Hierdie afhanklikheid beïnvloed dus die verkryging van 'n optimale gapser by gegewe begin- en eindwaardes van C.

SAMEVATTING

Die uitsluitlike doel van die simulasie wat uitgevoer is, was om die beginsel van die nie-lineêre kapasitor

TABEL 1
 Samevatting van gegewens t.o.v. afskakelgapser

Grootheid	Simbool	Eenheid			
			Geen gapser	1 μF	Nie-lineêr
Gapserkapasitor	C	μF			
Afskakelverlies in hooftransistor	$W_C(\text{af})$	mJ	2,5	0,45	0,55
Gestoorde energie in kapasitor(e)	W_k	mJ	—	20	0,4
Energieverlies in hulpransistor	$W_{C'}$	mJ	—	—	0,54
Totale Energie	W_{tot}	mJ	2,5	20	1,5

as afskakelgapserelement te illustreer. Die voordele van so 'n gapser kan duidelik gesien en waardeur word. Navorsing oor die realisering en implementering van so 'n eenvoudige praktiese versadigbare kapasitor word tans nog voortgesit.

VERWYSINGS

1. Schafft, H.A. & J.C. French. (1962). Second breakdown in transistors. *IRE Transactions on Electron Devices*, ED-9, p. 129-136.
2. Gaur, S.P. & G. Lowe, (1977). Power transistor crystal damage in inductive load switching. *Solid State Electronics*, 20, p. 1026-1027.
3. Knöll, H. (1977). High current transistor choppers. Tweede IFAC Simposium, Düsseldorf, p. 307-315.
4. Boehringer, A. & H. Knöll. (1979). Transistorschalter in Bereich hoher Leistungen und Frequenzen. *ETZ*, 100, p. 664-670.
5. McMurray, W. (1980). Selection of snubbers and clamps to optimize the design of transistor switching converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-16, p. 513-523.
6. Ferraro, A. (1982). An overview of low-loss snubber technology for transistor converters. *IEEE/PESC '82 Record*, p. 466-477.
7. Steyn, C.G. (1983). *Die optimale sturing van die skakellokus van elektroniese drywingskakelaars in bipolêre transistortegnologie*. M.Ing. – verhandeling, Randse Afrikaanse Universiteit, Hoofstukke 4, 6 & 7.
8. Paice, D.A. & P. Wood. (1967). Nonlinear reactors as protective elements for thyristor circuits. *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-3, p. 228-232.
9. Anderson, J.C. (1964). *Dielectrics*. Science Paperbacks, London, p. 132-142.
10. Steyn, C.G. (1983). Die nie-linieëre afskakelgapser. Interne verslag RAU-118-EI-74-2.