

## Navorsingsbriewe

# Spanningsverdeling tussen seriegekoppelde hoogspanningskakelemente tydens oorgangstoestand

Ontvang 28 Oktober 1991; aanvaar 11 Desember 1991

### ABSTRACT

#### *Transient voltage sharing in series-coupled high voltage switches*

For switching voltages in excess of the maximum blocking voltage of a switching element (for example, thyristor, MOSFET or bipolar transistor) such elements are often coupled in series<sup>1,2</sup> and additional circuitry has to be provided to ensure equal voltage sharing.<sup>3</sup> Between each such series element and system ground there is a certain parasitic capacitance that may draw a significant current during high-speed voltage transients. The "open" switch is modelled as a ladder network. Analysis reveals an exponential progression in the distribution of the applied voltage across the elements. Overstressing thus occurs in some of the elements at levels of the total voltage that are significantly below the design value.<sup>4,5</sup> This difficulty is overcome by grading the voltage sharing circuitry, coupled in parallel with each element, in a prescribed manner, as set out here.

### 1. Hoogspanningskakelaars

Wanneer hoogspanningskakelaars wat in minder as  $1 \mu\text{s}$  aan en af moet skakel nodig is, is die neiging deesdae om seriegekoppelde halfgeleiers eerder as gasontladingsbuis, soos bv. tiratrons, te gebruik.

Die maksimum blokkeerspannings van dié halfgeleiers is tipies 1 000 volt.

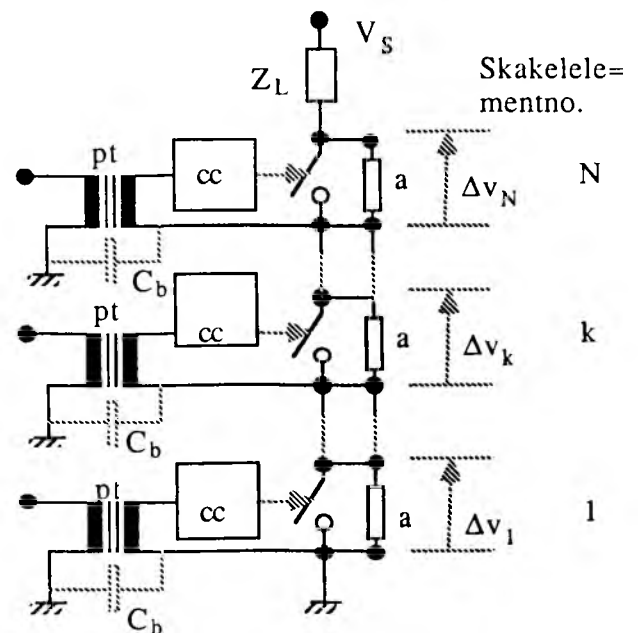
Die onvermydelike wanaanpassing tussen die elemente, asook die effekte van die fisiese uitleg veroorsaak ongelike potensiaalverskille oor die elemente. Die hele "stapel" elemente kan egter net tot sy volle potensiaal benut word wanneer die aangelegde spanning eweredig verdeel is. Laasgenoemde kan bereik word deur die effekte van die verskille in gelykstroomkonduktansies, parasitiese kapasitanse, ens. met veel groter eksterne komponente te verswelg. Perfek eweredige distribusie word egter nooit bereik nie en daar word gevolglik altyd 'n kompromis tussen die wandistribusie en die gepaardgaande verlaging in skakelsnelhede aangegaan.

### 2. Die probleem: ongelike spanningsverdeling gedurende hoëspoedoorgange

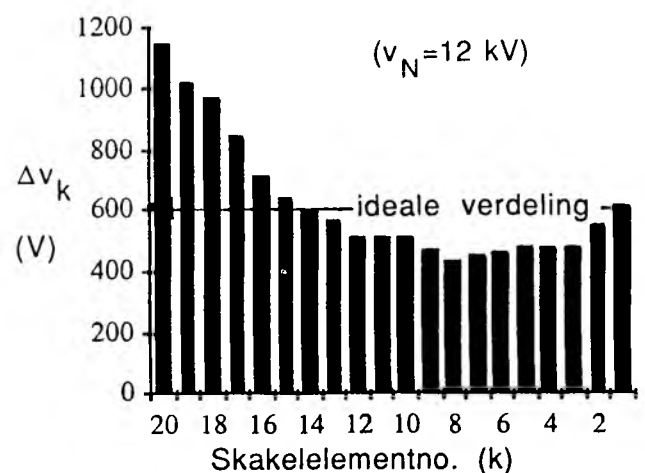
'n Tipiese skakelaar met N-elemente word in figuur 1 getoon. Elke element besit in sy "af" toestand 'n ekwivalente admittansie  $a$  wat opgemaak word uit die interne kapasitanse en konduktansie van die skakelaar, sowel as die eksterne komponente soos spanningsverdeelweerstande, gapserbane, parasitiese struktuurkapasitanse, ens. Verder bestaan daar 'n parasitiese admittansie tussen elke element en die stelselaarde, wat as kapasitor  $C_b$  aangedui word. Hierdie kapasitanse mag bv. hoofsaaklik uit die tussenwindingskapasitanse van die pulstransformator van die beheerbaan, waarmee die element aan- en afgeskakel word, bestaan.

Al sou daar gelyke spanningsvalle  $\Delta V_k$  gedurende stadige oorgange of gelykspanningstoestand gemeet word, word ongelike  $\Delta V_k$ -waardes tydens vinnige skakeling waargeneem. Figuur 2 toon in foto 1 'n wanverdeling oor die tiristorstapel gedurende 'n  $40 \mu\text{s}$ -spanningstyging, wat relatief stadig is.

Gewoonlik ondervind die skakelaar naaste aan die bron, d.w.s. element no. N, die hoogste spanning, waarvandaan

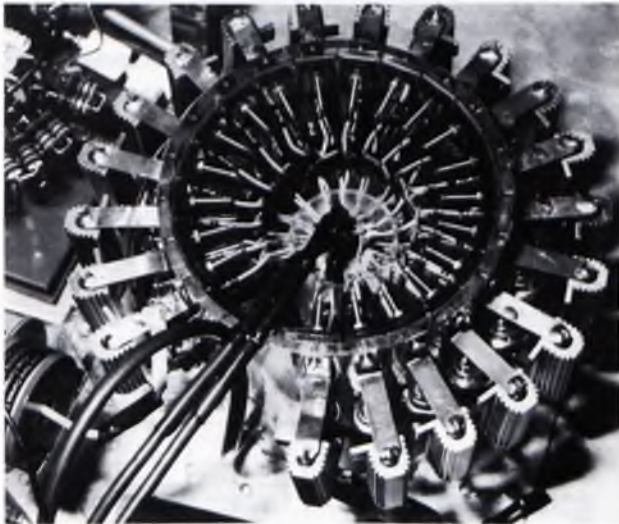


FIGUUR 1: Serieskakelaar.



FIGUUR 2: Gemete oorgangspanningsverspreiding van 'n 20-elementseriestapel.

dit dan benaderd eksponensieel afneem om sy laagste waarde by element no. 1 te bereik. Wanneer  $\Delta V_N$  dus tot sy maksimum toegelate waarde beperk word, sal die res van die elemente "onderbelas" wees.

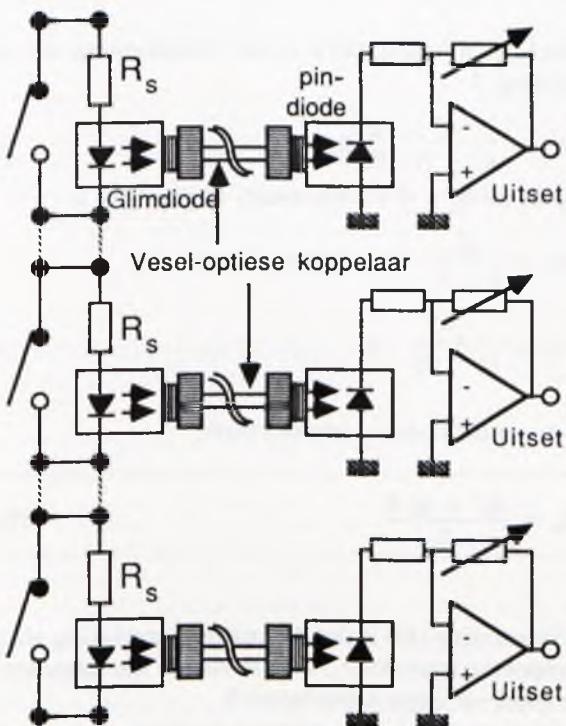


FIGUUR 2.1: 'n 20-elementtiristorskakelaar.

**3. Meting van differensiële spannings**

A.g.v. die hoë spannings, hoë gemenemodusspannings, parasitiese kapasitansie van ossilloskoopstasters, ens. is die meting van hierdie differensiële spannings moeilik.

Die meetprobleem is oorkom deur 'n optiese meetstelsel, bestaande uit 1 mm plastiekvesel- optiese komponente te ontwikkel (kyk figuur 3). Strome wat deur die statiese spanningsverdeelweerstande  $R_s$  vloei, moduleer die liguitset van die glimdiodes (LED). PIN-diodes aan die ontvangkant van die optiese vesels skakel die lig weer na strome, eweredig aan die spanning oor elke element, om. Laasgenoemde strome word dan weer m.b.v. die operasionele versterkers na spannings omgeskakel.

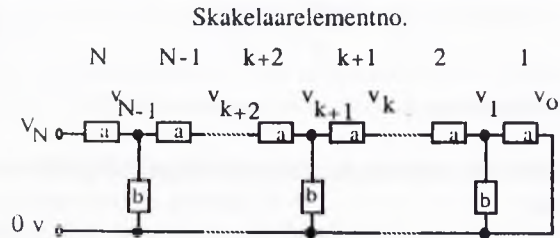


FIGUUR 3: Optiese meetstelsel.

Die meetbane word individueel gekalibreer deur 'n bekende gelykspanning oor elke skakelelement aan te lê en dan die uitset na die vereiste vlak te verstel. Die lineariteit (2%) sowel as die dinamiese bereik van die stelsel was voldoende vir die toepassing.

**4. Analise van die probleem**

Die skakelaarstapel word, soos in figuur 4 getoon, as 'n leernetwerk gemodelleer. Die "oop" admittansie van elke element is  $a$  en dié van die parasitiese kapasitansie is  $b$ .



FIGUUR 4: Ekwivalente stroombaanmodel van serieskakelaar.

Die Kirchoff-vergelyking vir node  $k + 1$  wat die aansluiting tussen skakelelemente  $k + 1$  en  $k + 2$  vorm is

$$a(v_{k+1} - v_{k+2}) + a(v_{k+1} - v_k) + bv_{k+1} = 0 \text{ wat reduceer na:}$$

$$(2a + b)v_{k+1} - a(v_{k+2} + v_k) = 0 \dots\dots\dots(1)$$

Met  $v_o = 0$  en die gebruik van z-transformasietegnieke, word  $v_k$  in terme van  $v_1$  verkry:

$$v_k = (p^k - q^k) \frac{v_1}{p - q} \dots\dots\dots(2)$$

waar  $p, q = 1 + \frac{b}{2a} \pm \left\{ \frac{b}{a} \left( 1 + \frac{b}{4a} \right) \right\}^{\frac{1}{2}}$  en

deur  $k = N$  in vergelyking (2) te vervang, word  $v_1$  in terme van  $v_N$  en  $N$  verkry:

$$v_1 = \frac{(p - q)v_N}{p^N - q^N} \dots\dots\dots(3)$$

'n Geslotevorm-uitdrukking vir spanning  $v_k$  as 'n funksie van insetspanning  $v_N$ , die aantal skakelelemente  $N$  en die posisie in stapel  $k$  word verkry deur vergelyking (3) in vergelyking (2) te vervang:

$$v_k = \frac{p^k - q^k}{p^N - q^N} \cdot v_N \dots\dots\dots(4)$$

Die spanning wat oor element  $k$  verskyn, word dus van vergelyking (4) verkry as:

$$\Delta v_k = v_k - v_{k-1} = \frac{p^k \left( 1 - \frac{1}{p} \right) - q^k \left( 1 - \frac{1}{q} \right)}{p^N - q^N} v_N \dots\dots\dots(5)$$

Die waardes van  $\Delta v_k$  vir  $k = 0$  tot 22 word in figuur 5 aangestip. Vir 'n a/b-verhouding van 100 (bv. 'n skakelelementkapasitansie van 1 nF en 'n parasitiese parallelkapasitansie van 10 pF), aantal skakelaars  $N = 20$  en  $v_N = 1$  volt, sal die  $N$ 'de skakelelement 'n spannings-

verskil van 0,1 volt ondervind wat dubbel die ideale waarde vir eweredige verspreiding, nl. 0,05 V is.

'n Oorspanningsverhouding  $r_{ov}$  kan vir hierdie  $N$ 'de skakelelement gedefinieer word as die verhouding van  $\Delta v_N$  tot die ideale spanning per element wat die totale spanning  $V_N$  is,

gedeel deur die aantal elemente  $N$ , d.w.s.  $\frac{V_N}{N}$ .

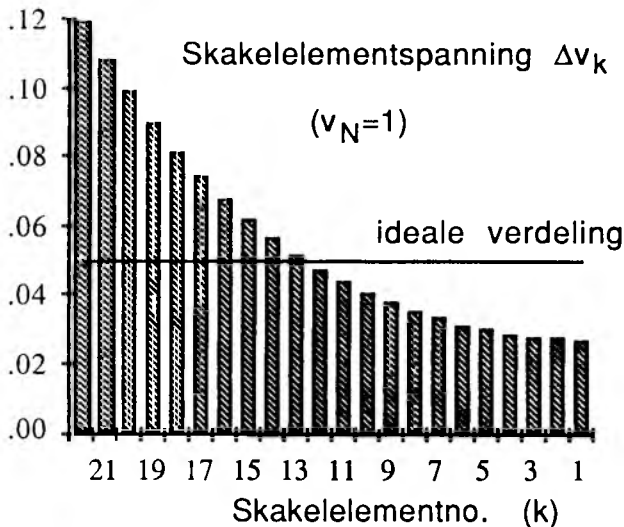
Dus is

$$r_{ov} = \frac{\Delta v_N \cdot N}{V_N} = \left\{ 1 - \frac{p^{N-1} - q^{N-1}}{p^N - q^N} \right\} N \dots\dots\dots (6)$$

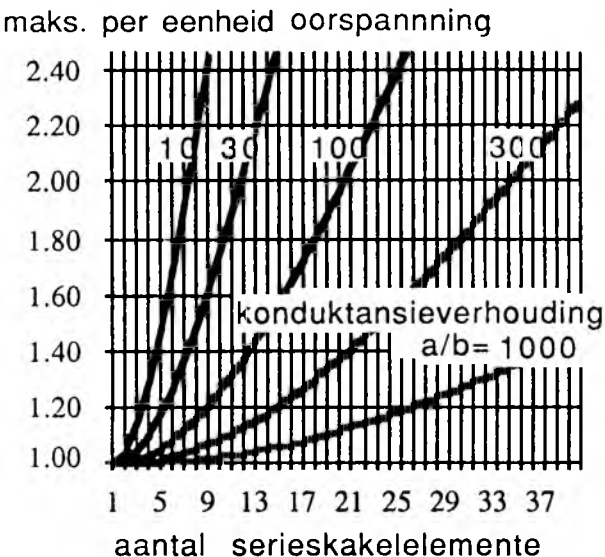
uit vergelyking 5.

$r_{ov}$  word vir verskillende a/b-verhoudings in figuur 6 aangestip.

Die oorspanningsverhouding  $r_{ov}$  styg eksponensieel met die aantal skakelaars  $N$  en word drasties deur hoë parallelkapasitansiewaardes, d.w.s. lae a/b-verhoudings vererger.



FIGUUR 5: Teoretiese spanningsverspreiding in 'n 20-element lineêre stapel.

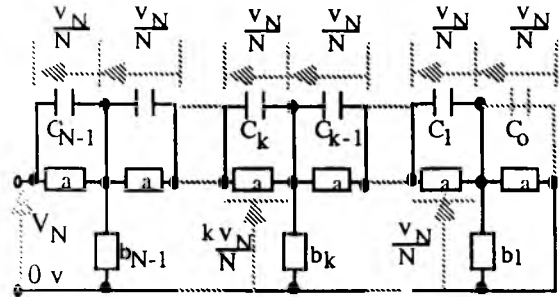


FIGUUR 6: Oorspanningsverhouding  $r_{ov}$  teen aantal skakelaars  $N$  in verskillende a/b-verhoudings.

**5. Die oplossing: 'n skakelstapel met gegradeerde kompenseerkapasities**

Laer oorspanningsverhoudings word bereik deur 'n koppelkapsitor oor elke element te skakel. So iets word gewoonlik in elk geval gedoen vir afskakel-gapseraksie, om die skakelelemente teen hoë spanningsgradiënte te beskerm.

Vinnige skakeltye vereis egter kleiner "verswelgingskapsitore" wat dan weer lei tot groter oorspanningsverhoudings. Die probleem kan egter geheel en al opgelos word deur veel kleiner kapasitore, maar met gegradeerde waardes, oor die elemente te skakel. Hierdie kapasitore moet die addisionele strome, wat deur die parasitêre kapasities vloei, kompenseer. So 'n stelsel word in figuur 7 getoon en word as volg geanaliseer:



FIGUUR 7: Gekompenseerde skakelaarstapel.

Spanning  $V_N$  word oor die stapel van  $N$  elemente aangelê. Vir gelyke verspreiding is die spanning per element  $\frac{V_N}{N}$  volt. 'n Konstante stroom  $i_o$  vloei dus deur die admittansie  $a$  van elke element.

Die Kirchoff-vergelyking vir die node tussen elemente  $k$  en  $k - 1$  is:

$$\frac{V_N}{N} \cdot c_k - \frac{V_N}{N} c_{k-1} = \frac{kV_N}{N} \cdot b_k$$

dus is  $c_k - c_{k-1} = Kb_k \dots\dots\dots (7)$

Met  $b_k$  as 'n funksie van  $k$ , is die z-transformasie van vergelyking 7:

$$C(z) = \frac{-z^2}{(z - 1)} \cdot \frac{d}{dz} B(z) \dots\dots\dots (8)$$

Tipies sal  $b_k = b$  ('n konstante) en gevolglik is

$$B(z) = \frac{zb}{z - 1} \cdot \text{Vergelyking (8) word dus}$$

$$C(z) = \frac{z^2}{(z - 1)^3} \cdot b \dots\dots\dots (9)$$

waarvan die inverse z-transformasie

$$c_k = \frac{(k^2 + k) b}{2} \dots\dots\dots (10)$$

is.

Vergelyking (10) is dus die ontwerpvergelyking vir die kompenseerkapasitor  $c_k$ , wat die waarde van laasgenoemde lewer vir enige kapasitansie  $b$ .

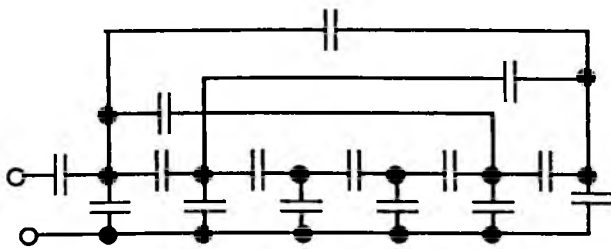
Dit is opvallend dat  $c_k$  suiwer 'n funksie van  $b$  en posisie  $k$  is, terwyl dit totaal onafhanklik van  $a$  is. Admittansie  $a$

mag dus uit enige kombinasie van kapasitansie, weerstand en induktansie bestaan en mag selfs ook nie-lineêr wees. Die enigste vereiste is dat alle a's identies sal wees.

### 6. Praktiese resultate en oorwegings

Met 'n lineêre skakelaaruitleg en uniforme komponentwaardes kan kompensasiëkapasitore baie noukeurig volgens die voorgaande teorie bereken word. Met 'n ander uitleg mag dit gebeur dat die probleem nie so eenvoudig opgelos word nie. Uit figuur 2 is dit duidelik dat die spanningsverspreiding vir die besondere gekose voorbeeld, veral naby die onderkant van die stapel, nie baie goed met die teoretiese waardes van figuur 5 ooreenstem nie.

Die ringvormige uitleg (kyk figuur 2.1) is hiervoor verantwoordelik. Daar bestaan in dié geval addisionele direkte parasitiese kapasitiewe koppelings tussen die bokant en die onderkant van die stapel, soos in figuur 8 uitgebeeld.



FIGUUR 8: Parasitiese kapasitansieverspreiding van sirkelvormige konstruksie.

Die kompleksiteit van so 'n praktiese stelsel maak dikwels die analitiese hantering van die probleem onmoontlik. 'n Suiwer empiriese benadering is nou die enigste moontlikheid. Die veiligste en effektiëste manier om die probleem

te hanteer, is waarskynlik deur 'n rekenaarsimulasie van die stelsel. Parasitiese en ander komponentwaardes word eerstens verstel totdat die simulasiëresultate goed met die praktiese gemete waardes ooreenstem, waarna kompensasiëkapasitore ingevoeg en verstel word totdat 'n eweredige spanningsverdeling verkry word.

Vir 'n suiwer leernetwerkmodel soos in figuur 4, maar met verskillende *a*- en *b*- waardes, werk die empiriese tegniek die beste, d.w.s. met die minste iterasies, indien daar aan die onderkant van die skakelaar by element no. 2 begin word met die invoeging van die kompenseërkapasitansie.

Hierdie empiriese tegniek is met die stelsel op foto 1 gevolg en gelyke spanningsverdeling (binne 5%) is bereik.

**G.L. BREDEKAMP\*, J.J. NEL en D.J. MULDER**  
Laboratorium vir Stelsels, RAU,  
Posbus 524, Johannesburg 2000

\*Outeur aan wie korrespondensie gerig kan word.

### LITERATUURVERWYSINGS

1. Vitins J., Steiner J.L. & Schweizer A. (1987). Reverse conducting thyristors replace thyratrons in sub-micro second pulse generation, *6th IEEE Pulsed Power Conference*, Virginia.
2. Vitins J., Steiner J.L. & Lawatsch H. (1988). Power semiconductor devices for sub-microsecond laser pulse generation, *18th IEEE Power Modulator Symposium*, South Carolina.
3. Nel J.J., Mulder D.J. & Bredenkamp G.L. (1990). A series thyristor switch driving a multi-stage ferrite pulse compressor for copper-vapour-Laser Application, *19th IEEE Power Modulator Symposium*, San Diego.
4. Mulder D.J. (1991). Submikrosekondeskakeling van hoogspanningspulsse met seriegeskakelde tiristors, *M. Ing-verhandeling*, RAU.
5. Nel J.J. (1990). Ferrietkern elektromagnetiese pulskompessors met gelyktydige energie-oordrag, *M. Ing-verhandeling*, RAU.