

Schakelen in de Energienetten, H. 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 16, 17, 18, 19

Citation for published version (APA):

Smeets, R. P. P. (2002). *Schakelen in de Energienetten, H. 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 16, 17, 18, 19*. PATO.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2002

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

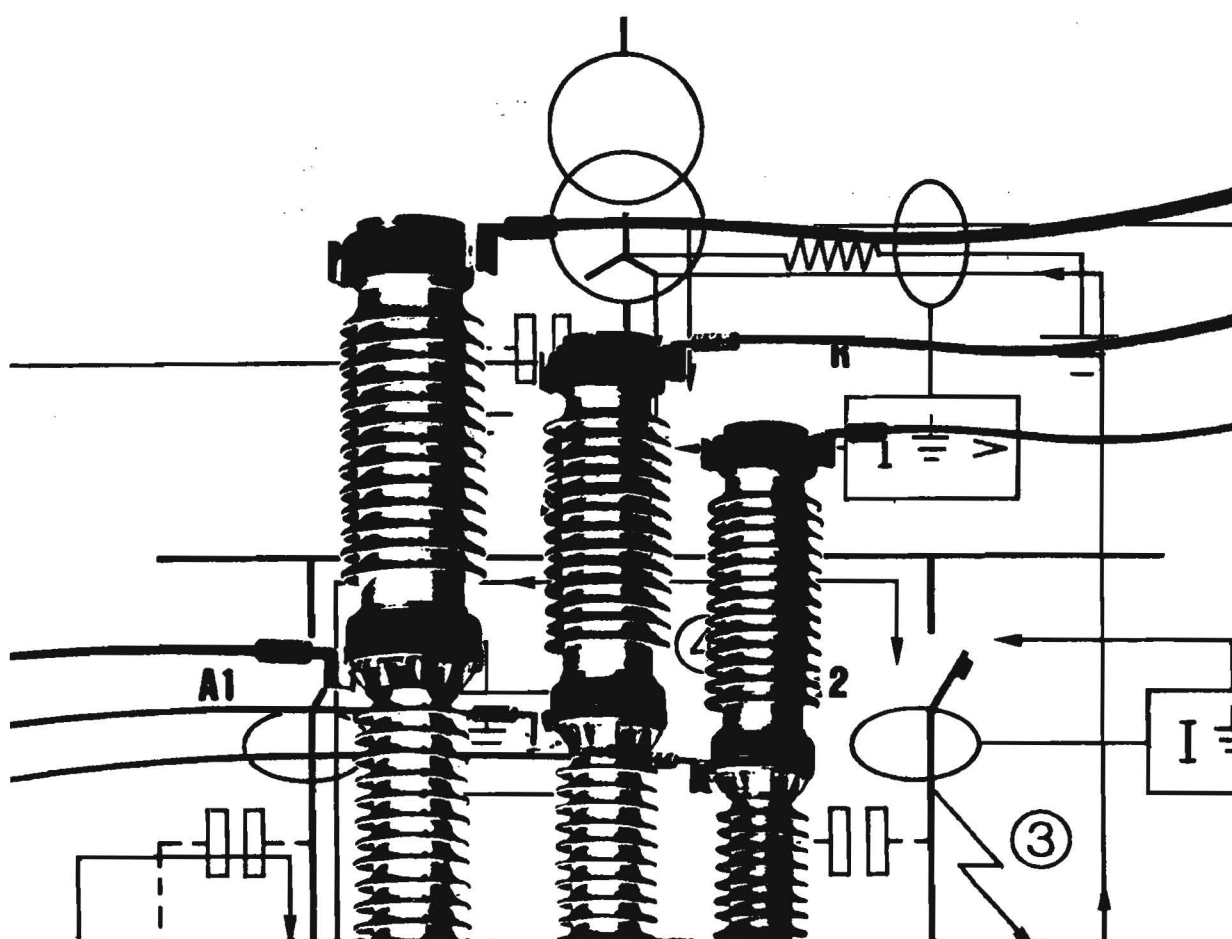
If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

SCHAKELEN IN ENERGIENETTEN

Principes van moderne schakelende componenten
en hun toepassing in elektriciteitsnetten



HANDBOEK PATO CURSUS

TU/e



Technische Universiteit Eindhoven, 13 - 14 juni 2002

Programma PATO cursus "Schakelen in Energienetten"

Donderdag 13 juni 2002

09.30 - 10.00	Ontvangst	PATO
10.00 - 10.15	Kennismaking	Smeets / Cursisten
10.15 - 11.15	Problematiek van het schakelen	Smeets
11.15 - 11.30	Pauze	
11.30 - 12.30	Schakeltransiënten en TRV's	van der Sluis
12.30 - 13.30	Lunch	
13.30 - 14.15	Inschakeltransiënten	Smeets
14.15 - 14.45	Herontstekingen en failure modes	van der Sluis
14.45 - 15.15	Boogmodellering en nuldoorgang	van der Sluis
15.15 - 15.30	Pauze	
15.30 - 16.00	Stroombegrenzing en smeltveiligheden	Damstra
16.00 - 17.00	Hoogspanningsschakelmaterieel	de Meulemeester

Vrijdag 14 juni 2002

09.30 - 10.30	Middenspanningsschakelaars en –installaties	Schoonenberg
10.30 - 11.00	Generatorschakelaars en transiënten	Smeets
11.00 - 11.15	Pauze	
11.15 - 12.30	Operationele en bedrijfskundige aspecten	van Riet
12.30 - 13.30	Lunch	
13.30 - 14.45	Tendensen, ontwikkelingen, toekomst	Janssen
14.45 - 15.00	Pauze	
15.00 - 16.00	Voorschriften en beproeving	te Paske
16.00 - 16.30	Discussie en vragen	

VOORWOORD

Vermogensschakelaars zijn het laatste en daarom onmisbare redmiddel om bij calamiteiten in de energienetten de schade te beperken. Verder is het kunnen beheersen en sturen van (zeer) grote energie stromen in energie netten - kortom het schakelen - een operationele voorwaarde voor het kunnen 'handelen' met die netten.

De privatisering en deregulering van de energie sector hebben er o a. toe geleid dat:

- technische kennis en kunde minder aandacht krijgt dan economie, handel, bedrijfsvoering etc.;
- het gebruik van netten en componenten geoptimaliseerd wordt, hetgeen in de meeste gevallen betekent dat de belasting (electrisch, mechanisch etc.) tot dichtbij of soms tot voorbij het toelaatbare opgevoerd wordt;
- onderhoud aan componenten op een meer kosten-effectieve wijze plaats vindt;
- de structuur van netten verandert, waardoor de problemen van het schakelen verschuiven.

In dit spanningsveld, waarbij betrouwbaarheid, kwaliteit van levering en leveringszekerheid tevens van toenemend belang wordt, is kennis van zaken ook hier de noodzakelijke voorwaarde op de golven van de veranderde inzichten in de energie wereld mee te balanceren.

Omdat de aard van storingen en de netconfiguraties eveneens zeer divers zijn, is het noodzakelijk voor de energie-technisch ingenieur inzicht te hebben in de specifieke moeilijkheden die zich voor kunnen doen bij het schakelen in zowel fout- maar ook normale bedrijfssituaties. Vaak wordt ten onrechte verondersteld dat alleen de kortsluiting een moeilijke onderbreking vormt, maar een groot aantal van de zich voordoende onacceptabele transiënten in netten zijn het gevolg van schakelhandelingen in "lastige" netten. Het bekend zijn met deze problematiek is een wezenlijk hulpmiddel in geval van storing sneller de oorzaak ervan te achterhalen.

Het steeds toenemen van het vereiste (en ook gerealiseerde) afschakelvermogen, de vervanging van olie- en persluchtschakelaars door de nieuwste generatie SF₆ en vacuümschakelaars, de wens lichtere aandrijvingen toe te kunnen passen, de toevoeging van steeds meer lokale opwekking in de netten en dit alles met behoud van de betrouwbaarheid spelen op een steeds grote rol. De beheersing van de elektrische lichtboog in de vermogensschakelaar heeft op elk spanningsniveau tot een veelheid van schakelaarontwerpen en blusmedia geleid.

Deze cursus beoogt in compacte vorm inzicht te verschaffen in de achtergronden, toepassing en de principes van het schakelen in de netten, met veel aandacht voor de schakelende componenten zelf. Een bijzondere plaats hierin heeft de interactie van de vermogensschakelaar met het net en de gevolgen hiervan voor de stroom-onderbreking met diverse soorten schakelaars.

Hoewel de nadruk ligt op schakelaars in hoogspanningsnetten en de moeilijke schakelopdrachten in deze netten, zullen ook specifieke problemen van het schakelen in midden- en laagspanningsnetten behandeld worden.

prof.dr.ir.R.P.P. Smeets
Eindhoven, juni 2002

DOCENTEN:

Algemeen

prof.dr.ir. R.P.P. Smeets (cursusleider)

Technische Universiteit Eindhoven, Fac. Elektrotechniek, EVT, Postbus 513, 5600 MB Eindhoven

tel: 040 - 247 2392; fax: 040 - 245 0735; e-mail: r.p.p.smeets@tue.nl

KEMA TDT, Postbus 9035, 6800 ET Arnhem

tel: 026 - 356 2893; fax: 026 - 351 1468; e-mail: r.p.p.smeets@kema.nl

Stroombegrenzing

prof.ir. G.C. Damstra

Technische Universiteit Eindhoven, Fac. Elektrotechniek, EVT, Postbus 513, 5600 MB Eindhoven

tel: 040 - 247 4637; fax: 040 - 245 0735; e-mail: techniekmuseumheim@planet.nl

Toekomstige ontwikkeling

ir. A.L.J. Janssen

KEMA TDT, Postbus 9035, 6800 ET Arnhem

tel: 026 - 356 6086; fax: 026 - 351 1468; e-mail: a.l.j.janssen@kema.nl

Hoogspanningsschakelmaterieel

ir. E. de Meulemeester

VA Tech Elin Holec High Voltage BV, Postbus 474, 3800 AL Amersfoort

tel: 033 - 469 6704; fax: 033 - 469 6798; e-mail: meulemeb@vatech-ehh.com

Beproeving en voorschriften

ing. L.H. te Paske

KEMA TDT, Postbus 9035, 6800 ET Arnhem

tel: 026 - 356 3432; fax: 026 - 351 1468; e-mail: l.h.tepaske@kema.nl

Bedrijfspraktijk en ervaringen

ir. M.J.M. van Riet

NUON Technisch bedrijf, Postbus 50, 6920 AB Duiven

tel: 026-318 5566, fax: 026-318 5200, e-mail: maarten.van.riet@nuon.com

Transiënten en booggedrag

Prof.ir. L. van der Sluis

Technische Universiteit Delft, Faculteit ITS, Basiseenheid EPS, Postbus 5031, 2600 GA Delft

tel: 015 - 278 5782; fax: 015 - 278 1182; e-mail: l.vandersluis@its.tudelft.nl

Middenspanningsschakelmaterieel

ir. G. Schoonenberg

HOLEC MIDDENSANNING BV, Development and Technology, Europalaan 202, 7559 CS Hengelo

tel: 074 - 246 4966; fax: 074 - 246 4480; e-mail: g.schoonenberg@holec.nl

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD

LIJST MET ADRESSEN VAN DOCENTEN

1. INLEIDING	1.1
1.1 Plaatsbepaling	1.1
1.2 Probleemstelling	1.2
1.3 Klassificatie	1.2
1.4 Plaats van de vermogensschakelaar in de elektrische energievoorziening	1.5
1.5 Opzet van de cursus	1.6
2. HET PRINCIPE VAN SCHAKELLEN IN ELEKTRICITEITSNETTEN	2.1
2.1 De componenten	2.1
2.2 Het schakelen: een impedantiesprong	2.2
2.3 Waarom een boogontlading bij uitschakelen?	2.3
2.4 De basiseisen voor vermogensschakelaars	2.4
2.5 Het uitschakelprobleem	2.5
2.6 Nulpuntsblussers en gedwongen nuldoorgangs-blussers	2.7
2.7 De moeilijkheidsgraad van een te onderbreken netwerk	2.7
2.7.1 De stroomparameters vóór de nuldoorgang	2.8
2.7.2 De thermische en de diëlektrische doorslag. De spanningsparameters	2.9
2.8 Samenvatting	2.10
3. TRANSIËNTE INSCHAKELSTROMEN	3.1
3.1 Inschakelverschijnselen	3.1
3.2 Speciale gevallen van inschakelen	3.4
3.3 Kortsluitingen in driefasen netten	3.5
3.4 Het ontstaan van een kortsluiting	3.11
3.5 De gevolgen van transiënte kortsluitstromen	3.12
3.6 Het inschakelen van capacitieve belastingen	3.14
3.7 Andere inschakelverschijnselen	3.18
3.8 Literatuur	3.19
4. POWER SYSTEM TRANSIENT RECOVERY VOLTAGES	
Introduction	
6.1 Characteristics of the transient recovery voltage	110
6.1.1 Short-Circuit Test Duties based on IEC 60056-1987	111
6.1.2 Short-Circuit Test Duties based on ANSI/IEEE Standards	115
6.1.3 The harmonisation between IEC and ANSI/IEEE Standards	116
6.2 The transient recovery voltage for different types of faults	116
6.3 References	119
5. SWITCHING TRANSIENTS	
Introduction	
5.1 Interrupting capacitive currents	84

5.2	Capacitive inrush currents	91
5.3	Interrupting small inductive currents	93
5.4	Transformer inrush currents	95
5.5	The short-line fault	97
5.6	References	105
6.	DE INVLOED VAN DE BOOG OP DE ONDERBREKING	6.1
6.1	De boogspanning	6.1
6.2	De invloed van de boogspanning op de kortsluitstroom	6.2
6.3	Stapvormige boogspanning	6.3
7.	HERONTSTEKINGEN	7.1
7.1	Thermische herontstekingen	7.1
7.2	Diëlektrische herontstekingen	7.2
7.2.1	Spanningsescalatie	7.3
7.2.2	Virtuele stroombreking	7.5
7.2.3	Late herontstekingen	7.7
8.	DE TECHNISCHE UITVOERING VAN VERMOGENSSCHAKELAARS	8a.1
8a	Middenspanningsschakelaars	8a.1
8a.1	Blusmedia in MV vermogensschakelaars	8a.1
8a.1.1	Olie als blusmedium	8a.1
8a.1.2	Lucht als blusmedium	8a.3
8a.1.3	SF ₆ als blusmedium	8a.5
8a.1.4	Vacuüm als blusmedium	8a.8
8a.2	Opstelling van vermogensschakelaars	8a.13
8a.2.1	Uitrijdbare opstelling	8a.14
8a.2.2	Vast ingebouwde opstelling	8a.15
8b	Hoogspanningsschakelaars	8b.1
8b.1	Hoogspanningsschakelstations	8b.1
8b.2	Schakelende componenten	8b.2
8b.2.1	Scheiderschakelaar	8b.3
8b.2.2	Aardschakelaar	8b.3
8b.2.3	Vermogensschakelaar	8b.4
8b.3	Lucht als blusmedium	8b.5
8b.4	De drukluchtschakelaar	8b.5
8b.5	SF ₆ als blusmedium	8b.7
8b.6	De SF ₆ vermogensschakelaar	8b.8
8b.7	Nabeschouwing	8b.11
8b.8	Literatuur	8b.11
9.	NIET-MECHANISCHE SCHAKELLENDE COMPONENTEN	9.1
9.1	Smeltveiligheden	9.1
9.1.1	Principiële opbouw	9.1
9.1.2	Uitvoeringsvormen en toepassingsgebieden	9.2
9.1.3	Het aanspreken bij een overstroom	9.2
9.1.4	De boogperiode	9.4

9.2	Halfgeleiderschakelaars	9.6
9.3	Hybride schakelaars	9.7
9.4	Spark gaps	9.8
10.	BOOGMODELLERING IN VERMOGENSSCHAKELAARS	10.1
10.1	Introductie	10.1
10.2.	De opbouw en werking van de schakelaar	10.3
10.3	De fysica van de lichtboog	10.4
10.4	Lichtboog modellering	10.8
10.5	Boog-circuit interactie	10.15
10.6	De taken van de vermogensschakelaar en de voorschriften	10.20
	Literatuur	10.20
11.	BEPROEVING VAN VERMOGENSSCHAKELAARS	11.1
11.1	Type-keuringen	11.1
	11.1.1 Representatie van de beproevings-TRV	11.2
	11.1.2 De korte-lijnfout	11.5
11.2	Beproevingcircuits	11.9
	11.2.1 Rechtstreekse beproeving	11.9
	11.2.2 Direkte beproeving	11.9
	11.2.3 Synthetische beproeving	11.11
11.3	Beproeving van laagspanningsschakelaars	11.13
12.	RECENTE ONTWIKKELINGEN (HOOGSPANNING)	
12.1	Technische ontwikkelingen	12.1
12.2	Ontwikkelingen op het gebied van onderhoud en betrouwbaarheid	12.9
12.3	Ontwikkelingen ten aanzien van de integratie met andere componenten	12.16
12.4	Ontwikkelingen van ingebouwde intelligentie	12.19
12.5	Milieu	12.23
12.6	Toekomstige netten	12.25
12.7	Conclusies	12.28
12.8	Referenties	12.29
13.	STROOMBEGRENZING	
13.1	Inleiding	13.2
13.2	Passieve stroombegrenzing	13.3
	13.2.1. Resonante kortsluitbegrenzer	13.3
13.3	Actieve stroombegrenzing	13.3
	13.3.1. I_s -begrenzers/Pyrobreakers	13.4
	13.3.2. Supergeleidende stroombegrenzer	13.4
	13.3.3. Lichtboog schakelaars	13.5
	13.3.4. Hybride schakelaars	13.5
13.4	Toepassingen van kortsluitstroombegrenzers	13.5
13.5	Tijdsbegrenzing	13.6
13.6	Conclusies	13.7
13.7	Literatuur	13.7
	Resultaten CIGRE WG 13.10	

14. OPERATIONELE ASPEKTEN VAN SCHAKELEN

15. LITERATUUR (ALGEMEEN)

16. APPENDIX I: GENERATOR SCHAKELAARS I.1

1. Positie in het net I.1
2. Onderbreken van kortsluitstromen I.1
 - a. Netgevoede fout I.2
 1. Symmetrische stroom I.2
 2. Gelijkstroombid I.2
 - b. Generator gevoede fout I.3
 1. Symmetrische stroom I.3
 2. Asymmetrische stroom I.3
3. TRV I.4
4. Uitvoeringsvormen I.6
5. Specificaties I.7
6. Voorschriften en beproevingsaspecten I.8
7. Conclusies I.8
8. Referenties I.9

17. APPENDIX II: BETROUWBAARHEID VAN VERMOGENSSCHAKELAARS II.1

1. Hoogspanningsschakelaars II.1
2. Middenspanningsschakelaars II.3
 - 2.1 Vacuümschakelaars II.4
3. Laagspanningsschakelaars II.4
4. Literatuur II.5

18. APPENDIX III: SCHAKELAAR DIAGNOSTIEK III.1

1. Plaatsbepaling III.1
2. Eisen diagnose systeem III.1
3. Meetprincipes III.2
4. Verwerking gegevens III.3
5. Praktijk voorbeelden III.4
6. Commerciële meetsystemen III.6
7. Samenvatting III.7
8. Literatuur diagnostiek schakelaars III.8

19. APPENDIX IV: TIJDCONSTANTEN IN ELEKTRICITEITSNETTEN EN HUN RELATIE TOT VERMOGENSSCHAKELAARS IV.1

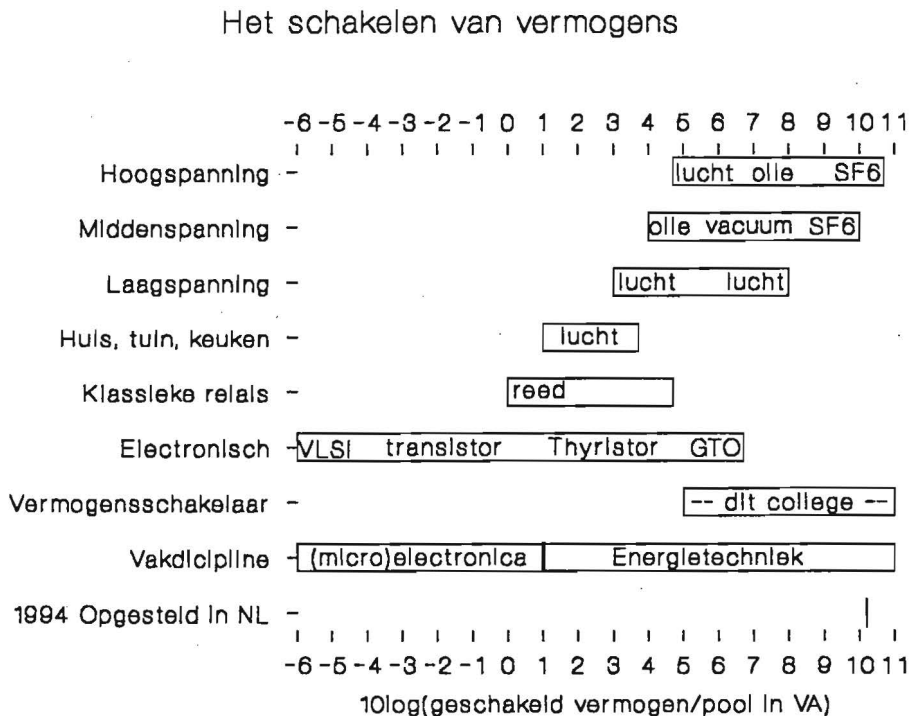
1. Middenspanning (< 72.5 kV) IV.1
2. Hoogspanning (> 72.5kV) IV.2
3. Generatoren IV.2

1. INLEIDING

1.1 Plaatsbepaling.

De schakelaar is zonder enige twijfel het meest gefabriceerde stuk(je) techniek voor of in elektrische toepassingen. Van alle mogelijke schakelaars maken de vermogensschakelaars slechts een zeer klein deel uit, maar wel het belangrijkste zeker in onze samenleving waar de continue levering van elektrische energie als vanzelfsprekend wordt beschouwd.

In fig. 1.1 is een globaal overzicht gegeven van de te schakelen vermogens die in de elektrotechniek een rol spelen. Het aandeel van de schakelaars uit de energietechniek loopt van ca. 1 VA tot ca. 50 GVA een gebied van meer dan 10 decaden.



Figuur 1.1. Overzicht van te schakelen vermogens in de elektrotechniek.

Het spreekt voor zich dat het beheersen van de vele schakelopdrachten in dit grote gebied tot zeer (veel) uiteenlopende problemen aanleiding geeft.

Hoewel de grens vrij willekeurig is, laten we de vermogensschakelaar beginnen bij ca. 100 kVA. Merk op dat de krachtigste vermogensschakelaar in staat is om in één onderbrekingsplaats (of "bluskamer") een vermogen af te schakelen groter dan het totaal in Nederland geïnstalleerde vermogen (ca. 15.000 MW).

In dit college wordt uitsluitend de vermogensschakelaar behandeld omdat:

- Dit een behandeling mogelijk maakt van alle schakelverschijnselen;
- De ontwikkeling van "kleinere" schakelaars voornamelijk ligt op het gebied van kostprijs- reductie, niet zozeer op technische vernieuwing; hun aantal echter overtreft verre dat van de vermogensschakelaars.
- De moderne ontwikkelingen zich vooral afspelen aan de bovenzijde van de vermogensschaal door steeds grotere energiedichtheden van de netten;
- Andere typen aan de orde komen in andere colleges ("Industriële netten en installaties", "Vermogenslektronica").

1.2 Probleemstelling.

De schakelaar die een net moet onderbreken van vele honderden kilovolts heeft dezelfde functie als het lichtknopje in de muur gecombineerd met de smeltpatroon in de meterkast. Het ontwerp van schakelaars wordt bij grotere vermogens echter in toenemende mate bemoeilijkt omdat functies steeds meer tegengesteld raken: in gesloten stand moet een steeds grotere stroom verliesvrij worden gevoerd, geopend moet er een perfecte isolatie tussen netdelen bestaan. Bovendien moet de overgang tussen beide toestanden uiterst snel verlopen, gepaard gaand met een sprongsgewijze verandering van elektrische circuit parameters.

Alle netten bevatten vele elementen die energie opslaan, waardoor het openen (of sluiten!) van een schakelaar een (soms zeer abrupte) her-rangschikking van elektrische energie noodzakelijk maakt voordat een nieuwe stationaire toestand intreedt. **De problemen die met deze her-rangschikking van energie te maken hebben en de technische oplossingen hiervan, vormen het centrale punt van deze cursus.**

Bij het schakelen van grote vermogens is altijd een **boog** betrokken. Een boog is een plasma van een zeer hoge ionisatiegraad dat altijd (door de energie her-rangschikking; zie par. 2.3) onmiddellijk gevormd wordt daar waar in een stroomvoerend circuit een fysieke onderbreking ontstaat (meestal tussen de openende contacten in een schakelaar). Aan dit plasma wordt zoveel energie toegevoerd dat het vrijwel perfect de stroom verder geleidt, alsof er geen (contact)scheiding bestaat.

Pas op het moment dat de stroom in het wisselstroom-net nul wordt (in de nuldoorgang, dus 100x per seconde per fase) wordt die energietoevoer even gelijk aan nul, zodat dan de geleiding (relatief) eenvoudig onderbroken kan worden. Op het moment van de nuldoorgang is tevens de nog aanwezige opgeslagen energie minimaal, dus de eerder genoemde energie her-rangschikking als gevolg van het plotseling verdwijnen van de geleidendheid van de schakelaar verloopt dan relatief gemakkelijk.

Het probleem is aldus de stroom niet te snel (als er nog veel energie in het net opgeslagen is) te willen onderbreken, maar de boog juist in stand te houden tot aan de stroom-nuldoorgang en daar effectief de geleiding op te heffen ("de boog te blussen") als de energie minimaal is.

Haastige spoed is ook hier niet goed.

1.3 Klassificatie.

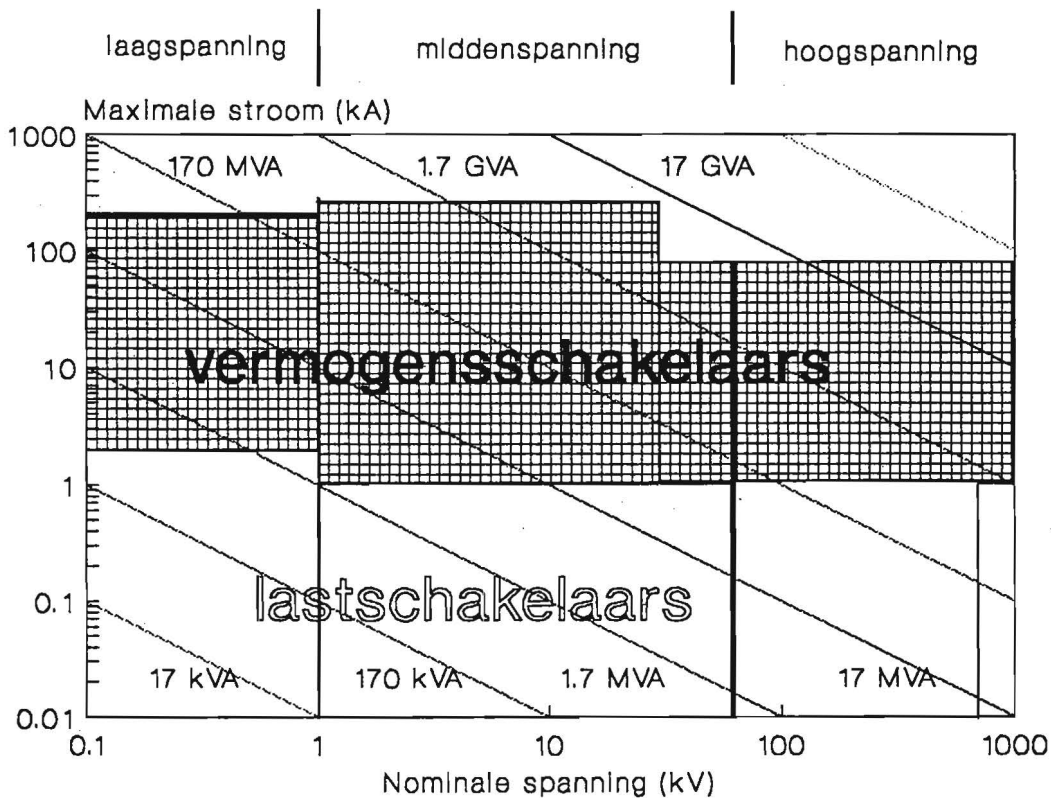
Zoals op grond van fig. 1.1 kan worden vermoed, bestaan schakelaars in vele uitvoeringsvormen, voor vele doeleinden en taken, die met uiteenlopende technieken uitgevoerd worden. Vermogensschakelaars bestaan voor spanningen van 220 V tot 800 kV en kortsluitstromen van 1 kA tot 300 kA.

Een globale indruk van het bereik in (kortsluit)stroom en spanning is te krijgen uit fig. 1.2. (De schuine lijnen representeren konstant (schijnbaar) driefasen vermogen $\sqrt{3}UI$, met U de lijnspanning en I de stroom, beide effectieve waarde).

- a) Bij een gegeven vermogen zijn de problemen bij een schakelaar voor hoge spanning en lage stroom heel anders dan bij een schakelaar voor lage spanning en hoge stroom. Het belangrijkste criterium voor indeling (zie fig. 1.2) is daarom vaak de **nominale spanning**: dit is de systeemspanning waarvoor de schakelaar ontworpen en beproefd is. We onderscheiden 3 gebieden:

- **laagspanning (LS)**: (verbruikersnet) (< 1 kV), waarbij een nominale stroom (de stroom die gevoerd moet worden bij normale bedrijfsvoering) hoort tot ca. 6 kA en kortsluitstromen tot 150-200 kA;
- **middenspanning (MS)**: (distributienet) (tussen 1 kV en 72 kV), met een nominale stroom tot ca. 4 kA en kortsluitstroom tot ca. 100 kA;

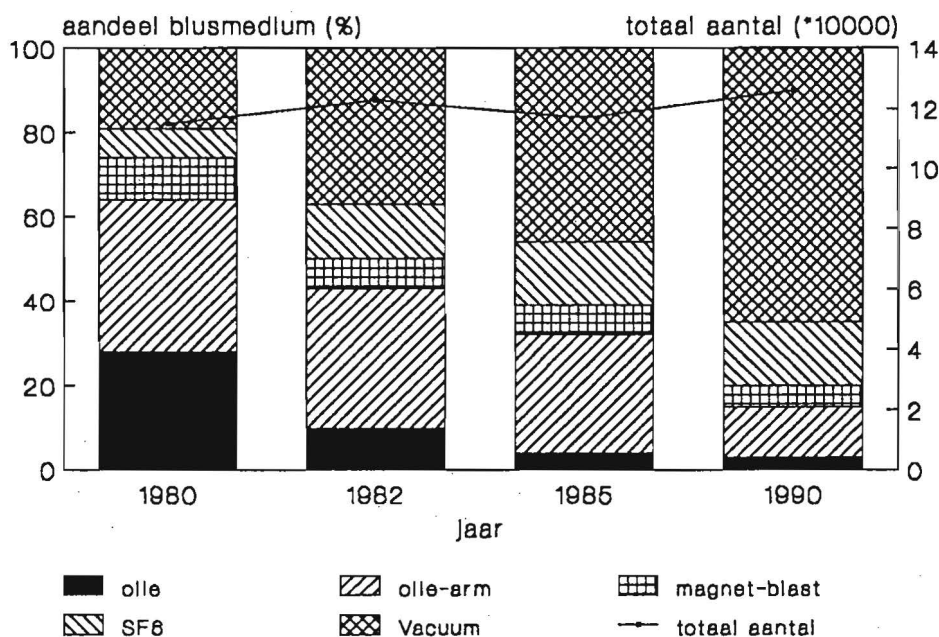
- **hoogspanning (HS):** (transmissienet) (> 72 kV), met nominale stroom tot ca. 4 kA en een kortsluitstroom tot ca. 80 kA;



Figuur 1.2. Globale klassificatie van schakelaars naar spanning en stroom. De schuine lijnen representeren lijnen van constant (schijnbaar) vermogen.

- b)
- Aangezien het schakelen van grote vermogens diverse moeilijkheidsgradaties kent, kan een tweede criterium voor klassificatie ontleend worden aan de **funkties** waarvoor de schakelaar ontworpen is. Aan de hand van deze funkties worden de volgende benamingen gebruikt:
- **Scheider:** Uitsluitend bedoeld om een veilige opening in een net aan te brengen die isolatie biedt tegen elke mogelijke overspanning. In gesloten toestand moet de scheider de kortsluitstroom een bepaalde tijd kunnen voeren. Openen/sluiten kan alleen in een onbelast net;
 - **Lastscheider (of lastschakelaar):** Als de scheider, maar nu met de mogelijkheid in- of uit te schakelen in een net onder normale bedrijfscondities;
 - **Contactoor:** lastschakelaar speciaal voor het veelvuldig schakelen in normaal bedrijf, ook onder geringe overbelasting;
 - **Vermogensschakelaar:** Combinatie van alle voorgaande eisen plus de mogelijkheid om alle voorkomende stromen te onderbreken of daar op in te schakelen, maar zonder de eis veelvuldig te moeten kunnen schakelen.
- c)
- Vaak wordt onderscheid gemaakt op basis van het "**blusmedium**"; dit is het medium waarin de toegevoerde elektrische energie meteen na contact-scheiding de boog doet ontstaan. Het spreekt voor zich dat de keuze van het blusmedium van cruciaal belang is.

- **lucht:** Historisch gezien is lucht het eerst toegepast op alle spanningsnivo's (eerste patent 1884 voor 10 kV), aanvankelijk bij atmosferische druk, later ook bij hogere druk. In vermogensschakelaars voor laagspanning wordt steeds atmosferische lucht toegepast. Voor hogere spanningen wordt lucht steeds minder gebruikt.
- **olie:** In het begin van de eeuw deed olie zijn intrede. Een innovatie vormde daarna een aanzienlijke reductie van de olie hoeveelheid in de zgn. olie-arme schakelaar. Dit type schakelaar zal over een aantal jaren niet meer in zwang zijn.
- **SF₆:** Een zeer snelle ontwikkeling maakt de schakelaar door die gebaseerd is op het isolerende gas SF₆ (zwavel hexa-fluoride), aanvankelijk (rond 1973) uitsluitend als hoogspannings-schakelaar later ook voor distributie (middenspannings-) toepassingen.
- **vacuüm:** Eveneens betrekkelijk recent (1970) is de vacuümschakelaar, waarin de boog bestaat in een medium van metaaldamp, verdampt uit de contacten. Deze schakelaar komt (nu) nog uitsluitend voor in middenspanningsnetten.



Figuur 1.3. De ontwikkeling van het marktaandeel (MS, HS) van blusmedia in aantallen.

In fig. 1.3 is aangegeven hoe het relatieve aandeel van de diverse blusmedia zich (in aantallen) in de westelijke wereld ontwikkeld heeft in de laatste 10 jaar.

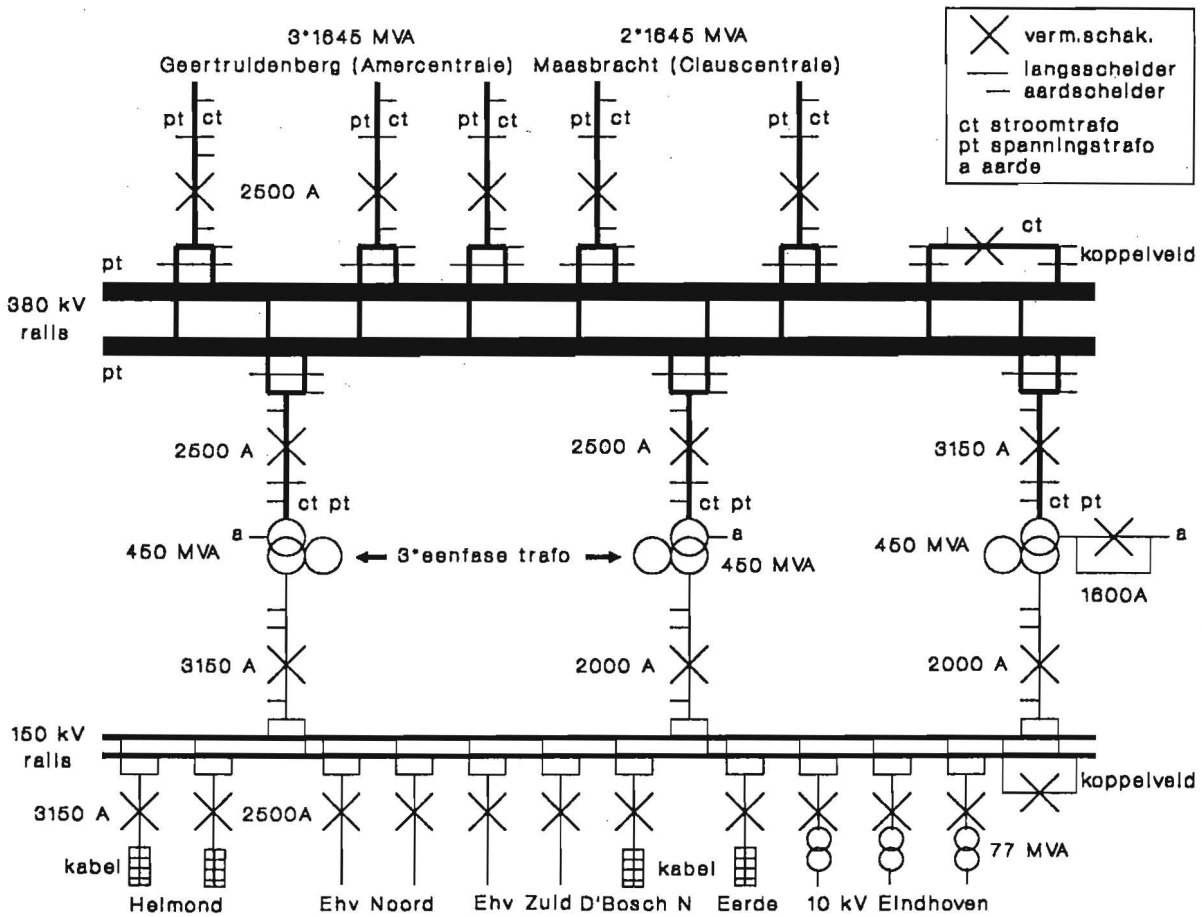
- d) De onderbrekingsplaats van een schakelaar is slechts één onderdeel van de totale schakelaar, die immers nog een uitgebreid mechanisch systeem bezit om snel en betrouwbaar de contacten te laten bewegen. Ook op basis van **bedieningssystemen** wordt wel een indeling gemaakt:
- **Hand(bediening)** (kleine MS-schakelaars), door het spannen van een veersysteem kan bij onverhoopt inschakelen op een sluiting snel uitgeschakeld worden;
 - **elektromotorisch** (alle spanningen), een veersysteem wordt gespannen door een elektro-motor;
 - **hydraulisch** (hoogspanning) vooral toegepast bij de hoogste spanningen, waar ook de benodigde krachten groot zijn, vanwege de omvang van de schakelaar.

Aandrijvingen zijn geen onderwerp van dit college. Het belang ervan is vooral te vinden in de betrouwbaarheid van de werking en de onderhoudskosten; verreweg het grootste deel (ca. 70%) van de storingen is te wijten aan mechanische defekten.

Een belangrijk deel van de nieuwe ontwikkelingen is er op gericht het aantal onderdelen per schakelaar te reduceren. Een 220 kV/40 kA schakelaar moest in 1965 nog 4 onderbrekingsplaatsen in serie hebben; tegenwoordig is dat er nog maar één; dit geeft een reductie van het aantal onderdelen met 64%.

1.4 Plaats van de vermogensschakelaar in de elektrische energievoorziening.

In fig. 1.4 [bron: PNEM] is een typisch onderstation afgebeeld met drie relevante spanningsnivo's en de daarin aanwezige (vermogens)schakelaars. Dit station verbindt het 150 kV net van de PNEM met het 380 kV landelijke koppelnet dat hier van de Amercentrale in Geertuidenberg naar de Clauscentrale in Maasbracht loopt. Het station is een van de vier (het grootste) die de regio Eindhoven invoeden.



Figuur 1.4. Plaats van vermogensschakelaars en scheiders in PNEM-SEP 380 - 150 - 10 kV onderstation Eindhoven Oost.

Naast sturing van de energiestromen is beveiliging tegen de gevolgen van kortsluiting de voornaamste taak. In midden- en laagspanningsnetten is de plaatsing van de vermogensschakelaar vaak geschikt gemaakt om fysiek toegang te krijgen tot de netgeleiders, bijv. om te aarden, meten of onderhoud te verrichten. Tevens is de vermogensschakelaar meestal voorzien van stroom- en spanningsmeters die de beveiligingsrelais voorzien van de actuele net bedrijfsparameters. De totale beveiliging, incl. aardingschakelaars is meestal (MS, LS) ingebouwd in de schakelaarkast. Op hoogspanningsnivo treft men de vermogensschakelaar aan in schakelstations, koppelstations en onderstations. Men kan vier soorten installaties onderscheiden:

1. Open schakelinstallaties in buitenopstelling (vooral transmissie-stations).

2. Open schakelinstallaties in binnenopstelling (vooral distributie-stations).
3. Omhulde schakelinstallaties (distributie).
4. Geheel gesloten schakelinstallaties: in toenemende mate worden vermogens-schakelaars geïntegreerd en ingebouwd in geheel gesloten (SF₆) gasgevulde schakelstations (GIS: "Gas Insulated Substations"), tot een nivo van 800 kV toe.

Automatisch werkende LS-vermogensschakelaars treft men in de meeste (nieuwere) woningen aan (voor kleine kortsluitstromen tot 5 kA) en op zeer grote schaal bij industriële eindverbruikers waar het kortsluitvermogen op kan lopen tot 100 MVA.

1.5 Opzet van de cursus.

Volgend op de inleiding, zal in hoofdstuk 2 het principe behandeld worden van in- en uitschakelen in elektriciteitsnetten, waarna uiteengezet wordt hoe de moeilijkheidsgraad van de onderbreking uitgedrukt wordt in de netparameters.

In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op (de gevolgen van) de eerder besproken energie her-rangschikking die optreedt bij het ontstaan van een kortsluiting ("het sluiten van een circuit") en die tot uiting komt in een transient ("voorbijgaand") gedrag van de stroom.

In hoofdstuk 4 en 5 wordt de wederkerende **spanning**, die eveneens het gevolg is van de herrangschikking van energie na onderbreking van de stroom ("het openen van een circuit") voor een aantal representatieve circuits berekend en toegelicht.

Behandelen hoofdstuk 4 en 5 de invloed van het elektrisch circuit op de onderbreking, hoofdstuk 6 gaat daarentegen in op de rol die de boog tot en met de nuldoorgang speelt in het onderbrekingsproces.

In hoofdstuk 7 worden herontstekingen behandeld, die na een aanvankelijke onderbreking de boog weer kunnen herstellen en tot een mislukken van de onderbreking (kunnen) leiden en (onder bepaalde condities) tot gevaarlijke overspanningen kunnen leiden.

Hoofdstuk 8 gaat dieper in op de technische uitvoering van het gehele scala van vermogensschakelaars, evenals hoofdstuk 9 waarin een aantal speciale schakelende componenten aan bod komen, hoofdzakelijk de schakelaars zonder bewegende delen met de smeltveiligheid als belangrijkste vertegenwoordiger.

Hoofdstuk 10 gaat dieper in op het microscopische gedrag van de schakelaarboog en op de modellering ervan t.b.v. het schakelaarontwerp.

Hoofdstuk 11 behandelt de normen en beproevingsmethoden in gespecialiseerde kortsluitlaboratoria die vast kunnen stellen of schakelaars voldoen aan de daarvoor vastgestelde internationale normen.

Hoofdstuk 12 gaat over de recente en toekomstige ontwikkelingen in het toepassen van schakelmaterieel, waarbij aandacht wordt besteed aan o.a. het belang van moderne onderhoudsconcepten, milieu aspecten verbonden met SF₆ gas en de rol die "intelligentie" kan en zal spelen in toekomstig schakelmaterieel.

Hoofdstuk 13 is gewijd aan stroombegrenzing: methoden die ten doel hebben door actief in grijpen (en soms ook passief) ("schakelen") de kortsluitstroom in netten te beperken.

Hoofdstuk 14 geeft een schematisch overzicht van diverse aspecten waarmee de netbeheerder te maken krijgt bij het toepassen, onderhouden en uitbreiden van zijn park van schakelaars.

Hoofdstuk 15 bevat een overzicht van literatuur over vele aspecten van de schakelproblematiek.

Appendix I geeft informatie over het schakelen van opwek-eenheden en generatoren, een steeds belangrijker wordend aspect bij het in bedrijf nemen van steeds meer lokaal opgestelde opwekeenheden.

In Appendix II staat kwantitatieve informatie verzameld over betrouwbaarheids aspecten van schakelapparatuur.

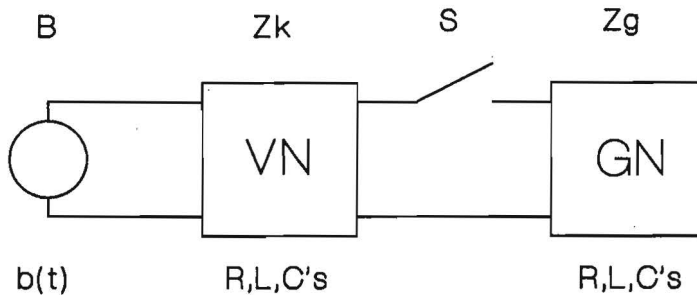
Appendix III beschrijft methoden van diagnostiek voor schakelaars.

Appendix IV geeft achtergrond informatie over de dc tijdconstante in diverse netten, die sterk het gedrag van de kortsluitstroom, en dus de problematiek bij het schakelen bepaalt.

2. HET PRINCIPE VAN SCHAKELEN IN ELEKTRICITEITSNETTEN

2.1 De componenten.

Het schakelen in elektriciteitsnetten is voor een algemene probleemstelling te vereenvoudigen tot het eenfase blokschema van fig. 2.1. Een bron B voedt een belasting via een verbinding waarin zich een



Figuur 2.1. Eenfase blokschema.

schakelaar S bevindt. De verbinding wordt verdeeld in een stuk tussen B en S , het voedende netwerk (VN), en een deel dat tussen schakelaar en belasting geschakeld is. Dit laatste deel maakt, vanuit de schakelaar gezien, deel uit van het totale gevoede netwerk (GN) dat dus ook de belasting bevat.

De bron kan worden gekarakteriseerd door een signaal $b(t)$.

Wij zullen ons beperken tot de schakelingen in de elektriciteitsnetten. Daarin stelt $b(t)$ in eerste benadering een harmonische spanningsfunctie voor. Daarvoor gebruiken we de uitdrukking:

$$u(t) = \hat{U} \cos(\omega t + \psi) \quad (2.1)$$

met: ω de netfrequentie;
 ψ de fasehoek van de spanning op $t = 0$;
 \hat{U} de amplitude;

$$i(t) = \hat{I} \cos(\omega t + \psi - \varphi) \quad (2.2)$$

φ de fasehoek tussen spanning en stroom.

Indien niet anders vermeld, wordt onder ω de cirkelfrequentie van de Europese netten verstaan:

$$\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ rad/s.}$$

In VN (fig. 2.1) is het geheel aan transformatoren, hoogspanningslijnen, kabels en verdeelrails opgenomen dat zich tussen B en S bevindt. Het is doorgaans een gecompliceerd netwerk. Dikwijls wordt het niet door één bron (centrale) gevoed maar zijn meer centrales via netwerken verbonden.

Om toch tot de vereenvoudiging van fig. 2.1. te kunnen komen wordt nagegaan tot welke plaats de optredende schakelverschijnselen als gevolg van openen of sluiten van S merkbaar worden beïnvloed door de componenten van VN . Alleen die componenten worden in de beschouwing meegenomen, alle verder weg gelegen componenten (vanuit S gezien) worden verwaarloosd. Het net wordt vanaf deze plaats tot aan de bron(nen) "oneindig sterk" genoemd en in zijn geheel vervangen door de ideale spanningsbron (per fase) van verg. (2.1). De impedantie van VN , gezien vanuit S , wordt de "kortsluitimpedantie", Z_k genoemd.

N.B. Hier kan al worden opgemerkt, dat door deze beschouwing VN een functie wordt van GN . Men kan dat direct inzien door twee "bijzondere" gevallen te vergelijken:

- a. In- en uitschakelen van een zeer kleine impedantie (klemmenkortsluiting) achter S. De impedantie van GN is dan nul: $Z_g = 0$. De stroom tijdens en na het inschakelen en de spanning na het onderbreken worden volkomen bepaald door B en VN;
- b. In- en uitschakelen van een grote impedantie achter S. In dit geval kan doorgaans de impedantie van VN nul gesteld worden: $Z_k = 0$, zodat het net tot aan S oneindig sterk is. In- en uitschakelverschijnselen worden nu geheel door GN bepaald.

Een juiste modelkeuze van VN is van groot belang. Te gecompliceerde netwerken maken beschouwingen en berekeningen onnodig moeilijk. Te simpele netwerken geven onjuiste resultaten en foutieve interpretaties. Dat geldt ook voor het gevoede deel GN, en zelfs nog sterker dan voor de voedende zijde.

Voor het berekenen van schakelverschijnselen in echte netconfiguraties staan uitgebreide computerprogramma's ter beschikking. Hiervan is EMTP (ElectroMagnetic Transient Program, inmiddels in een groot aantal versies verspreid) het bekendste. Voor een theoretische behandeling of een eerste benadering van een specifiek type schakeloperatie kunnen veel eenvoudiger modelschema's toegepast worden, hetgeen in het navolgende dikwijls zal gebeuren.

Blijft tenslotte de schakelaar S. Daaronder zullen we voorlopig elk apparaat verstaan dat naar keuze zowel een zeer goed geleidende verbinding als een zeer goede isolatie tussen de beide netwerken VN en GN tot stand kan brengen: van het lichtknopje tot de hoogspanningsvermogensschakelaar met meerdere bluskamers in serie. Daar waar het uitschakelen betreft rekenen we ook de smeltveiligheden hierbij.

Later zullen we ons voornamelijk beperken tot de vermogensschakelaars.

2.2 Het schakelen: een impedantiesprong.

Onder inschakelen resp. uitschakelen verstaan we meestal: door middel van een daartoe geconstrueerd toestel of netwerk-onderdeel een open verbinding in een elektrisch netwerk sluiten resp. een gesloten verbinding openen.

In dit vakgebied beperken we ons wat het toestel of onderdeel betreft tot de mechanisch en thermisch opererende constructies en behandelen we de halfgeleiders niet expliciet. Maar het is ook wat omslachtig om onderscheid te maken tussen "bewust inschakelen" d.m.v. een toestel en "spontaan inschakelen" doordat er ergens in het net een ongewilde verbinding ontstaat b.v. door elektrische doorslag. Omdat de gevolgen door dezelfde differentiaalvergelijkingen beschreven worden, zullen we ze beide "inschakelen" noemen.

Onder "uitschakelen" zullen we ook omvatten de spontane onderbreking b.v. door het doorsmelten van een smeltpatroon.

Elektrisch gezien betekent inschakelen in fig. 2.1 nu: door het aanleggen van een wisselspanning wordt een gedwongen trilling opgelegd aan een passief netwerk via een impedantiesprong $Z_s(t)$ ter plaatse S. De impedantiesprong verloopt van $Z_s = \infty$ tot $Z_s \approx 0$ binnen een eindige tijd. Vóór het inschakelen staat de gehele netspanning $u(t)$ over de geopende contacten. Na het sluiten is de spanning over de contacten (bijna) nul. Door het inschakelen gaat een transiënte stroom vloeien die op den duur overgaat in een stationaire toestand.

Een inschakelcyclus omvat alle verschijnselen tussen het commando tot sluiten en de nieuwe stationaire toestand.

Uitschakelen brengt in dit systeem het volgende teweeg: door het onderbreken van een wisselstroom resp. het isoleren van een netwerk van zijn voedende wisselspanning, wordt een passief netwerk bevrijd van zijn gedwongen trilling. Dit gebeurt door middel van een impedantiesprong $Z_s(t)$ ter plaatse S. De impedantiesprong verloopt van $Z_s \approx 0$ tot $Z_s = \infty$ in een eindige tijd. Door de impedantiesprong gaat de spanning over S van circa nul over in de stationaire netspanning meestal via een aantal gedempte oscillaties bepaald door de eigenfrequenties van de netwerken GN en VN. Een "uitschakelcyclus" omvat alle verschijnselen tussen het commando tot onderbreken en de nieuwe stationaire toestand.

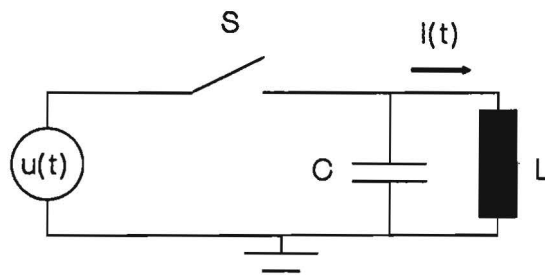
We onderkennen uit het bovenstaande de drie "probleemgebieden" van het schakelen gezien vanuit elektrotechnisch gezichtspunt:

1. de impedantiesprong, die praktisch altijd door een elektrische gasontlading plaatsvindt en in dat geval zuiver resistief is;
2. de transiënten in de netten, door het schakelen veroorzaakt;
3. de interactie tussen beide.

De elektrische gasontladingen en speciaal de boogontladingen van de schakelaars, worden in hoofdstuk 10 behandeld. Elektrische transiënten van uit- en inschakelen zijn het onderwerp van de hoofdstukken 3, 4 en 5. De interactie tussen beide komt uitvoerig aan bod in de hoofdstukken 6 en 7.

2.3 Waarom een boogontlading bij uitschakelen?

We kiezen, ter invulling van fig. 2.1, het zeer eenvoudige schema van fig. 2.2. Het net is tot aan de schakelaar oneindig sterk (de serie impedantie tussen bron en schakelaar is nul) en alle dempingen zijn nog



Figuur 2.2. Eenvoudig netwerk.

verwaarloosd. L is een inductieve belasting, C de totale vervangingscapaciteit van de toevoer-geleiders en de capaciteit ten opzichte van aarde. Kiezen we verder als voorbeeld een 10 kV spanningsstelsel en een belastingsstroom van ca. 100 A. Dan is:

$$\hat{U} = (\sqrt{2}/\sqrt{3})10^4 = 8160 \text{ V}$$

$$\hat{I} = \sqrt{2} \cdot 100 = 141 \text{ A.}$$

Stel de contacten van S scheiden op het moment dat $i(t) = 100 \text{ A}$. Op dat moment is

$$u(t) = \hat{U} \cos\{\arcsin(100/141)\} = 5770 \text{ V.}$$

Voor L kunnen we berekenen:

$$L = \frac{\sqrt{2} * 10000}{\sqrt{3} \sqrt{2} * 100 * 2\pi * 50} = \frac{1}{\pi \sqrt{3}} = 0.184 \text{ H}$$

Een heel acceptabele waarde voor de grootte orde van C is 2000 - 10.000 pF. Nemen we eens $C = 5000 \text{ pF}$. Wanneer S opent is dus:

de magnetische energie in L : $\frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2} * 0.184 * 10^4 = 920 \text{ J};$

de elektrische energie in C : $\frac{1}{2}Cu^2 = \frac{1}{2} * 5 * 10^{-9} * 5770^2 = 0.08 \text{ J.}$

De magnetische energie is dus vele malen groter is dan de elektrische. Omdat de stroom in een spoel continu is zal deze, na het openen van S, ogenblikkelijk zijn weg in C vervolgen. Daardoor wordt C opgeladen totdat alle energie in de capaciteit is opgeslagen. Op dit ogenblik zou U_{max} , de spanning over C gegeven worden door:

$$\frac{1}{2}CU_{max}^2 = 920 + 0.08 \text{ J, dus } U_{max} = \sqrt{[2(920 + 0.08)/5 \cdot 10^{-9}]} = 607 \text{ kV.}$$

Tegen zo'n hoge spanning is uiteraard een 10 kV-net niet bestand. Zeer lang voor deze waarde bereikt wordt heeft al ergens een doorslag plaatsgevonden. Waar dat is ligt ook voor de hand: de afstand tussen de scheidende contacten is nog zeer klein, eigenlijk niet meer dan +0 mm op 't moment van scheiden. Bovendien zal juist voor het loslaten de hele stroom door de laatste aanrakingsplaatsen ("α-spots") lopen en daar, door de grote stroomdichtheid, een hevige warmte-ontwikkeling, smelten en zelfs enig verdampen veroorzaken.

Deze plaats zal dan ook bij relatief lage spanning al doorslaan en het hete gas elektrisch geleidend maken. Er ontstaat daar een **boogontlading** die zichzelf in stand houdt zolang er stroom vloeit.

Samenvattend:

- Als de contacten scheiden loopt de stroom praktisch ongestoord door omdat er een elektrische boog-ontlading wordt gevormd tussen de contacten.
- Deze boog zal blijven bestaan zolang er een stroom loopt. Als de boog zou stoppen zorgt de magnetische energie direkt weer voor zo'n hoge spanning dat het nog hete boogpad weer doorslaat.

Als de wisselstroom zijn nuldoorgang heeft bereikt is de magnetische energie verdwenen en is alleen de capaciteieve energie over, op dit moment, (wegens 90° faseverschil is $u(t) = \hat{U}$), is dit $\frac{1}{2}C\hat{U}^2$. Als de contactafstand inmiddels groot genoeg is geworden kan nu de stroom verbroken worden. Daartoe moet nu zeer snel de impedantie toenemen.

Om de impedantie op het moment van de stroomnuldoorgang snel naar oneindig te brengen wordt de boog in een vermogensschakelaar sterk gekoeld: er wordt meer energie aan onttrokken dan er (onder invloed van de wederkerende spanning u_b) aan wordt toegevoerd. De voorwaarde voor onderbreking is dus:

$$W_{koel} > \int_0^{\infty} \frac{u_b(t)^2}{Z_s(t)} dt$$

In deze "voorwaarde voor blussing" onderkennen we weer de drie voorheen genoemde probleemgebieden: de impedantiesprong $Z_s(t)$, het transiënte gedrag $u_b(t)$ en de interactie, blijkend uit:

$$i_s = \frac{u_b}{Z_s} \quad Z_s = f(i_s)$$

2.4 De basiseisen voor vermogensschakelaars.

Aan de schakelaars worden, afhankelijk van het type en de toepassing, vele en gedetailleerde eisen gesteld, verzameld in een aantal internationale en nationale voorschriften. Na de voorgaande beschouwingen kunnen we de basis-eisen voor de vermogensschakelaars afleiden:

- a. **In gesloten toestand moet een vermogensschakelaar een ideale geleider vormen ($Z_s = 0$) en blijven bij elke stroom tot boven de nominale;**
- b. **In open toestand moet hij een ideale isolator vormen ($Z_s = \infty$) en blijven bij elke spanning tot boven het isolatienivo van het net;**
- c. **In gesloten toestand moet hij in staat zijn op commando elke ter plaatse mogelijke stroom snel te onderbreken** zonder daarbij:
 - ontoelaatbare overspanningen te produceren of

- door contacterosie (verlies van contactmateriaal) of andere wijze van aantasting ongeschikt te worden voor een volgende schakelhandeling;
- d. In geopende toestand moet hij in staat zijn op commando elke ter plaatse mogelijke stroom, inclusief een maximale kortsluitstroom snel in te schakelen, zonder daarbij:
- ontoelaatbare overspanningen te produceren, of
 - door contact-erosie, contact-lassen of andere beschadiging ongeschikt te worden voor een volgende schakelhandeling.

Een schakelaarmodel waarvoor geldt:

$Z_s = 0$ voor $t < 0$ en $Z_s = \infty$ voor $t > 0$, met $t = 0$ het moment waarop $i(t) = 0$ noemen we een **α -breaker**. Deze geleidt de stroom tot aan de nuldoorgang en onderbreekt daar. Gedurende de boogfase is bovendien de boogspanning nul.

2.5 Het uitschakelprobleem.

Beschouwingen over het onderbreken van stromen door vermogensschakelaars zijn vanzelfsprekend sterk gericht op de zwaarste eis: het kunnen onderbreken van kortsluitstromen, snel en betrouwbaar, zonder belangrijke eigen beschadiging.

Om wat gevoel te geven om welke energieën het hierbij gaat beginnen we met een analogon.

Het Nederlandse koppelnet, 400 kV is gebaseerd op een maximale kortsluitstroom van 50 kA, stationaire waarde. Deze stroom zal optreden als de begrenzende inductiviteit ca. $400/(50\omega\sqrt{3}) = 14.7$ mH bedraagt. Op het moment waarop de topwaarde van deze stroom door het net vloeit is daarin een magnetische energie opgeslagen ter grootte:

$$\frac{1}{2} * 0.015 * (50\sqrt{2} * 10^3)^2 = 36.8 \text{ MJ.}$$

Deze energie slingert met een frequentie van 50 Hz op en neer tussen centrale en net.

We kunnen deze situatie vergelijken met een oscillerende massa (M) aan een veer met veerconstante k. De differentiaalvergelijkingen die de mechanische en elektrische trillingen beschrijven hebben dezelfde vorm:

$$\begin{aligned} \text{Elektrisch: } L \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{C} q &= 0 \quad \Rightarrow \quad q = q_0 \cos \omega_e t = C U_0 \cos \omega_e t \quad \text{met } \omega_e = \frac{1}{\sqrt{LC}} \\ \text{Mechanisch: } M \frac{d^2 x}{dt^2} + kx &= 0 \quad \Rightarrow \quad x = x_0 \cos \omega_m t \quad \text{met } \omega_m = \sqrt{\frac{k}{M}} \end{aligned}$$

met x de uitwijking van de massa aan de veer en q de lading op de condensator (C).

De verdere equivalentie van mechanische en elektrische grootheden is aangegeven in onderstaande tabel.

We kunnen de elektrische energie in het kortgesloten net gelijkstellen aan de kinetische energie van een locomotief, b.v. met een massa (M) van 84 ton (zie fig. 2.3) die met 50 Hz heen en weer wordt geslingerd in een massa-veer systeem.

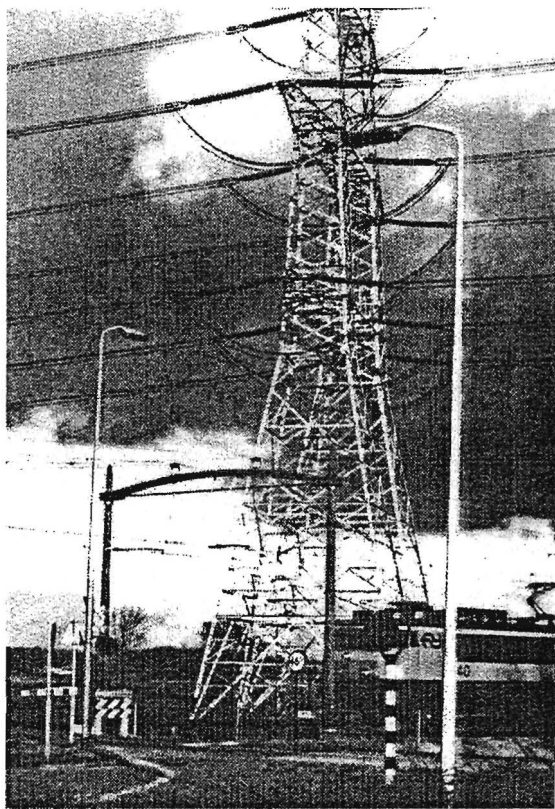
Uit de gelijkstelling: $\frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} M v_{\max}^2 = 36.8 \text{ MJ}$ volgt dan de maximale snelheid $v_{\max} = 29.6 \text{ m/s}$ (107 km/uur). Verdere analogie van het elektrische en mechanische systeem levert de maximale verplaatsing x_{\max} en de maximale kracht F_{\max} :

$$\text{uit } x = \int v dt : x_{\max} = \frac{v_{\max}}{\omega} = 9.4 \text{ cm}$$

$$\text{uit } a = \frac{dv}{dt} : a_{\max} = v_{\max} \omega = 9300 \text{ m/s}^2 \text{ en } F_{\max} = M a_{\max} = 7.8 \cdot 10^8 \text{ N}$$

De energie die tijdens deze kortsluiting heen en weer slingert zou dus gebruikt kunnen worden om een locomotief aan een verend systeem heen en weer te doen slingeren met een frequentie van 50 Hz en een uitslag van 9 cm. De hoogste snelheid tussen versnellen en vertragen is daarbij 29.6 m/s of 107 km per uur. Deze snelheid moet vanuit stilstand bereikt worden in 5 ms. Hiertoe is een versnelling werkzaam van 9300 m/s^2 , dus van ruim 900 g en een maximale kracht van 780 miljoen N!

mechanisch grootheid		elektrische grootheid	
uitwijking	x	q	lading
snelheid	v	I	stroom
massa	M	L	zelfinductie
reciproke veerconstante	$1/k$	C	capaciteit
potentiële energie	$\frac{1}{2}kx^2$	$\frac{1}{2}q^2/C = \frac{1}{2}Cu^2$	elektrische energie
kinetische energie	$\frac{1}{2}Mv^2$	$\frac{1}{2}Li^2$	magnetische energie



Figuur 2.3 Locomotief en koppelnets onder normaal bedrijf (niet opgehangen resp kortgesloten).

Het uitschakelen van de kortsluitstroom komt nu neer op het plotseling tot stilstand brengen van deze slingerende massa. De oplossing voor dit probleem is: wacht tot de uitslag maximaal is, de beweging van richting omkeert en houdt op dit moment de massa vast. Vertaald naar de schakelaar: wacht tot $i=0$. Op dit moment zit er geen energie meer in het te onderbreken netwerk (met uitzondering van de relatief geringe capaciteieve energie).

Uit het analogon wordt ook de belangrijke taak van de boogontlading duidelijk: hij/zij vormt een kortstondige verbinding met de voeding waardoor alle energie het gevoede net nog kan verlaten.

Daarna moet deze verbinding zeer snel verbroken worden omdat anders het net weer met energie gevuld wordt.

We zullen nog zien dat het grootste deel van de impedantiesprong zich afspeelt in enkele (tientallen) μs rond en vooral na de nuldoorgang.

2.6 Nulpuntsblussers en gedwongen nuldoorgangs-blussers.

Men kan de boogontlading op twee principieel verschillende manieren in het onderbrekingsproces toepassen:

- a. Men ontwikkelt een boog van zeer goede geleidendheid (G_b), dus lage weerstand R_b . Dan is dus ook de boogspanning ($u_b = i_b R_b$) laag en daardoor is de totale boogenergie ($W_b = \int u_b i_b dt$) gering. Rond de natuurlijke stroom-nuldoorgang wordt wat nog over is van deze energie zeer snel door koeling afgevoerd. We noemen dit type schakelaar "**nulpuntsblussers**", aanduiding verder: NPB. In het analogon vertaald: de locomotief maakt ongehinderd eerst zijn maximale slag en wordt dan pas zeer snel geblokkeerd (Een α -breaker is een ideale NPB).
- b. Men ontwikkelt een boog van zeer hoge weerstand, en wel zo hoog dat de stroom zijn maximale waarde ("**prospektieve waarde**") lang niet kan bereiken. Ook nu kan de totale boogenergie nog betrekkelijk klein zijn omdat in het produkt $u_b i_b$ ditmaal de stroom beperkt wordt. Door de ingelaste hoge weerstand wordt nu het circuit van overheersend inductief naar sterk resistief geforceerd, dus ook de totale boogtijd t_b is (sterk) verkort. We noemen dit type verder **gedwongen nuldoorgangs-blusser** (GNB).

In het analogon vertaald: de massa wordt sterk geremd vanaf het moment dat de ruststand verlaten wordt. Hij maakt daardoor maar een kleine slag, bereikt minder snelheid en kan gemakkelijker bij zijn grootste uitslag worden geblokkeerd. Dit principe is echter alleen toepasbaar voor niet te grote energieën resp. voor niet te hoge spanningen.

Beide principes van blussing komen uitvoerig aan bod in hoofdstuk 6.

N.B. Onder prospektieve waarde van een (kortsluit)stroom door een schakelaar zullen we die waarde verstaan die bij een gesloten schakelaar en $Z_s = 0$ zou vloeien. Een α -breaker voert dus de prospektieve stroom tot aan $i = 0$. Als dit een kortsluitstroom is wordt hij aangeduid met i_k . De werkelijke stroom door een schakelaar met boogspanning krijgt symbool i_b .

2.7 De moeilijkheidsgraad van een te onderbreken netwerk.

Er zijn veel verschillende typen schakelaars. Ze kunnen worden ingedeeld naar boogtype in NPB's en GNB's, naar netspanning, nominale stroom en te onderbreken vermogen, naar blusmedium en naar blusmechanisme. Elk type is op een eigen wijze gevoelig voor het circuit waarin het wordt geplaatst. Om deze relatie te kunnen karakteriseren voeren we het begrip "Moeilijkheidsgraad" in, naar analogie van de term "circuit severity", afkomstig van Cassie.

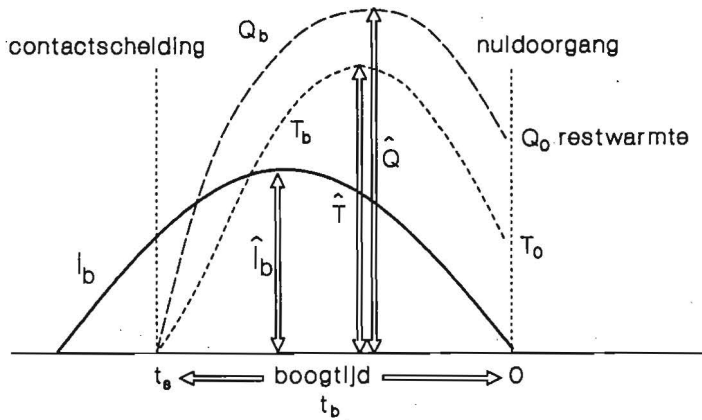
De moeilijkheidsgraad is een functie die aangeeft van welke karakteristieke parameters ("M-parameters") de grens tot onderbreken afhangt en op welke wijze. De functie zelf is hoogstens gedeeltelijk en in globale termen bekend.

De parameters zijn in eerste benadering "prospektieve grootheden" die bepaald worden door B, VN en GN en een α -breaker. In werkelijkheid kan de schakelaar deze grootheden zelf vervormen, bij de GNB's zelfs in zeer sterke mate. Maar ondanks deze tekortkomingen blijkt de moeilijkheidsgraad een nuttige weegschaal voor het relatieve gewicht van een onderbrekingsopdracht.

Het ligt voor de hand dat de karakteristieke parameters vóór de nuldoorgang afhangen van de stroom. Na de nuldoorgang zal de terugkerende spanning over de contacten bepalen of er opnieuw een boog ontstaat en dus kans op falen van de onderbreking bestaat.

2.7.1 De stroomparameters voor de nuldoorgang.

Op het moment van contactscheiding t_s start de boog. Hij handhaaft zich gedurende de boogtijd t_b en dooft op moment $t = 0$ waarop $i_b = 0$ (fig. 2.4).



Figuur 2.4. Verloop van stroom (i_b), boogenergie (Q_b) en temperatuur (T_b).

We constateren:

- over de totale brandtijd van de boog t_b wordt per tijdseenheid een energie toegevoerd aan de boog, op elk moment gegeven door $P_b = u_b i_b$;
- tegelijk wordt er energie afgevoerd door koeling: P_k ;
- het verschil tussen beide veroorzaakt temperatuurstijging resp. -daling in het boogkanaal. De vermogensbalans van de boog luidt daarom:

$$P_b = P_k + \frac{dQ_b}{dt} \quad (2.3)$$

met Q_b = interne boogenergie (dikwijls noemt men een dergelijke vergelijking een energiebalans. In feite is dat alleen juist voor de geïntegreerde vorm).

Wanneer de stroom tot een hoge waarde toeneemt zal ook Q_b en dus T_b (temperatuur) stijgen. Daalt i_b naar nul, dan nemen ook Q_b en T_b af, bijvoorbeeld zoals in fig. 2.4.

De energie Q_0 die bij $i_b = 0$ ($t = 0$) nog snel moet worden afgevoerd is daarom een functie van zowel \hat{i}_b (de max. waarde van de boogstroom) als van de stroomsteilheid $S_i = (di/dt)$ op $t = -0$.

(Om de snelheid van energie-afvoer of de daarvan afhankelijke, toename van de boogweerstand te karakteriseren wordt later een thermische, resp. elektrische "tijdconstante van de boog" geïntroduceerd).

In het algemeen zal \hat{i}_b toenemen met toenemende prospectieve kortsluitstroom.

Daarom kunnen we \hat{i}_k en S_i zien als de twee belangrijkste parameters van de stroom voor de moeilijkheidsgraad van een onderbreking.

Voor een α -breaker geldt $i_b = i(t)$. Voor het onderbreken van een stationaire stroom zou hierbij $\hat{i}_b = \hat{i}_k$ zijn, terwijl uit $i = \hat{i}_k \cos(\omega t + \psi - \varphi)$ volgt:

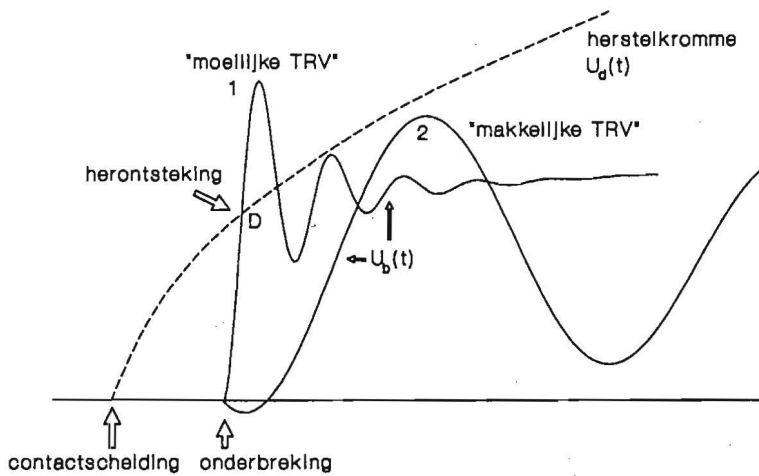
$$S_i = \omega \hat{i}_k, \quad \text{een belangrijke en veel gebruikte vereenvoudiging.}$$

Zulke simpele betrekkingen gelden niet meer voor \hat{I}_b en S_i in het geval van schakelaars met niet-verwaarloosbare boogspanning of/ en voor het onderbreken van stromen die nog niet hun stationaire waarde hebben bereikt.

2.7.2 De thermische en de diëlektrische doorslag. De spanningsparameters.

De boog dooft op $t = 0$ omdat $i_b = 0$. Op dit moment is dus ook $u_b = i_b R_b = 0$. Maar direkt na $t = 0$ komt spanning over de contacten te staan. Het gas is dan natuurlijk nog heet zoals aangegeven in fig. 2.4. en ook nog enigszins geleidend: er kan nog een kleine stroom vloeien. Als dat zo is, is $P_b = u_b i_b > 0$ na de nuldoorgang.

Zolang in vergelijking (2.3) de term $dQ_b/dt > 0$ blijkt $P_b > P_k$ te zijn: er wordt meer energie aan het boogkanaal toegevoerd dan afgevoerd. Daardoor zal het gas voortdurend verder opgewarmd worden en weer snel geleidend kunnen worden. We spreken dan van een **thermische doorslag**. Als de circuitstroom nu ook weer gaat vloeien noemen we dat een **herontsteking** (van de boog). In de praktijk is het onderscheid nauwelijks te maken en worden beide termen veel door elkaar gebruikt.



Figuur 2.5. TRV's (1, 2) en herstelkromme (U_d).

Als de koeling het blijft winnen van de elektrische energietoever ($dQ_b/dt < 0$) verliest het voormalige boogkanaal alle geleidendheid.

De afstand tussen de contacten en de isolatiekwaliteit van het diëlektricum nemen nog voortdurend toe en dus stijgt de doorslagspanning b.v. volgens de lijn $U_d(t)$ in fig. 2.5. We noemen een dergelijke lijn de "herstelkromme".

Als nu de terugkerende spanning $u_b(t)$ hoger wordt dan de momentane doorslagspanning (punt D, kromme 1) ontstaat een z.g. **diëlektrische doorslag** meestal weer gevolgd door herontsteking.

Kromme 2 geeft een voorbeeld van een wederkerende spanning die niet tot herontsteking leidt.

We kunnen hieruit de twee volgende parameters van de moeilijkheidsgraad begrijpen:

- thermische herontsteking is **alleen kort na de stroom-nuldoorgang** mogelijk, enkele (tientallen) μs . Daarom is hierbij vooral van belang hoe **snel** de spanning terugkeert tussen de contacten. We noemen deze parameter S_u :

$$S_u = \frac{du_b}{dt} \text{ op } t = +0 \tag{2.4}$$

- diëlektrische herontsteking wordt vooral bepaald door de **hoogte** waartoe de transiënte spanning stijgt. We karakteriseren deze door de dimensieloze overspanningsfaktor A:

$$A = \frac{(TRV)_{max}}{\hat{U}_f} \tag{2.5}$$

\hat{U}_f = de topwaarde van de fasespanning; $(TRV)_{max}$ = topwaarde van de transiënte wederkerende spanning.

We hebben hiermede vier van de vijf M-parameters gekarakteriseerd. De vijfde heeft betrekking op het overgangsgedrag tussen thermische en diëlektrische herontsteking. Deze wordt behandeld in hfst. 4.4.

2.8 Samenvatting.

Schakelen betekent een plotselinge impedantie-verandering, van nul tot oneindig of omgekeerd, in een verbinding tussen twee netwerken. De impedantiesprong bij uitschakelen mag niet oneindig snel verlopen, anders treden zeer hoge overspanningen op. Bij mechanische schakelaars ontstaat er automatisch een boogontlading die eerst bij een stroomnuldoorgang geblust kan worden door koeling.

De netwerken zijn uitgebreid en gecompliceerd maar zullen voor het behandelen van specifieke problemen sterk vereenvoudigd (moeten) worden tot slechts enkele componenten. Over een geopende schakelaar staat de hele bronspanning; over de gesloten (ideale) schakelaar is de spanning nul. De overgang tussen beide toestanden en een eventuele interactie met de ontlading in de schakelaar vormt het voornaamste onderwerp van dit college.

Een stroom kan pas worden onderbroken wanneer hij op natuurlijke of gedwongen wijze zijn nuldoorgang bereikt heeft. Dit wordt aan de hand van een mechanisch equivalent verduidelijkt. Schakelaars met natuurlijke nuldoorgang door lage boogspanning noemt men nulpuntsblussers (NPB's). Schakelaars met geforceerde nuldoorgang (GNB's) hebben een hoge boogspanning. Een indicatie van de moeilijkheidsgraad (M) van een onderbreking geven de M-parameters van de stroom, \hat{I} en S_i en die van de transiënte wederkerende spanning, (de z.g. TRV), S_u en A. Door een te hoge waarde van één of meer M-parameters kan thermische of diëlektrische doorslag ontstaan, gevolgd door herontsteking van de boog.

3. TRANSIËNTE INSCHAKELSTROMEN

In dit hoofdstuk zullen we nader ingaan op transiënte verschijnselen zoals die ontstaan wanneer een kortsluiting zich ontwikkelt of wanneer op een kortsluiting wordt ingeschakeld. Beide situaties worden in het vervolg "inschakelen" genoemd.

Deze verschijnselen zijn een direkt gevolg van de (in hoofdstuk 1) aangestipte her-rangschikking van de energie tijdens en na de overgang van het netwerk naar een nieuwe situatie: door het inschakelen moeten de aanwezige capaciteiten uit de netspanning worden opgeladen. In de inductiviteiten moeten de velden worden opgebouwd. Dat kost enige tijd (de transiënte toestand) en een kortstondige energie(stroom) die als een bijzondere stroombijdrage (de transiënt) tot uiting komt. Hierna is de stationaire toestand bereikt, die eenvoudig met de complexe rekenwijze kan worden bepaald.

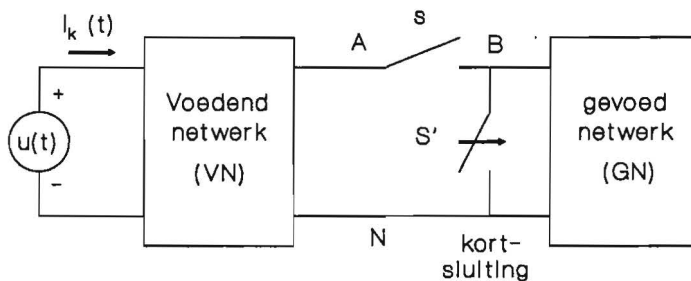
In dit hoofdstuk bestaat de overgang uit een sprong in de impedantie Z_g (uit fig. 2.1) van belastingsimpedantie naar nagenoeg nul en manifesteert de overgang zich in **transiënt gedrag van de stroom** in het netwerk.

In het volgende hoofdstuk bestaat de overgang uit een impedantiesprong van de schakelaar S van nul naar oneindig, hetgeen leidt tot **transiënte spanningen** over schakelaar en belasting.

Voor de berekening van het transiënte verloop van de kortsluitstroom wordt (hier) uitgegaan van een oneindig sterke bron en van constante netimpedanties. Dit geldt niet meer voor sluitingen dichtbij generatoren en nabij belasting met groot motorvermogen.

3.1 Inschakelverschijnselen.

De situatie die in het netwerk van fig. 2.1 ontstaat bij kortsluiting van GN is elektrisch equivalent met het sluiten van een schakelaar S' parallel aan GN. We noemen de stroom die vervolgens (bij gesloten S') gaat lopen de **kortsluitstroom** $i_k(t)$ (fig. 3.1).



Figuur 3.1. Het ontstaan van een sluiting is identiek met het inschakelen van S'.

Als S geopend is tijdens het ontstaan van de kortsluiting kan S inschakelen op de sluiting, hetgeen een van de moeilijke schakelopdrachten is.

Ontstaat de kortsluiting tijdens normaal bedrijf dan hoeft S alleen de kortsluitstroom te voeren, een minder moeilijke opdracht. Is S een vermogensschakelaar dan moet S bovendien de kortsluitstroom kunnen onderbreken, de moeilijkste opdracht.

Uitgaande van het principeschema (3.1) berekenen we nu de kortsluitstroom wanneer de sluiting ontstaat bij gesloten S. S' wordt dan gesloten op $t = 0$.

$$u(t) = \hat{U} \cos(\omega t + \psi)$$

Als (complexe) impedanties worden ingevoerd:

$$Z_k = R_k + j\omega L_k, \text{ de kortsluitimpedantie en}$$

$$Z_g = R_n + j\omega L_n, \text{ de belastingsimpedantie.}$$

We veronderstellen dat vóór $t = 0$ de **stationaire bedrijfsstroom** i_n loopt:

$$i_n = \hat{I}_n \cos(\omega t + \psi - \varphi_n) \tag{3.1}$$

met:

$$\hat{I}_n = \frac{\hat{U}_n}{\sqrt{(R_k + R_n)^2 + \omega^2(L_k + L_n)^2}} - \frac{\hat{U}_n}{\sqrt{R_n^2 + \omega^2 L_n^2}}$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{\omega(L_k + L_n)}{R_k + R_n} \cong \arctan \frac{\omega L_n}{R_n}$$

Op $t \rightarrow \infty$ loopt de **stationaire kortsluitstroom** $i_{k,st}$:

$$i_{k,st} = \hat{I}_k \cos(\omega t + \psi - \varphi_k) \tag{3.2}$$

$$\hat{I}_k = \frac{\hat{U}_n}{\sqrt{R_k^2 + \omega^2 L_k^2}}$$

$$\varphi_k = \arctan \frac{\omega L_k}{R_k} = \arctan(\omega \tau_k) \text{ met: } \tau_k = \frac{L_k}{R_k}$$

Meteen na $t = 0$ ontstaat de **transiënte kortsluitstroom** $i_{k,tr}$ die berekend wordt uit het homogene deel van de circuit differentiaal-vergelijking:

$$i_{k,tr} R_k + L_k \frac{d i_{k,tr}}{dt} = 0 \Rightarrow i_{k,tr}(t) = C \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right) \tag{3.3}$$

De algemene oplossing ontstaat door optellen van (3.2) en (3.3) en vervolgens de constante C te bepalen uit de beginconditie $i_k(0) = i_n(0)$:

$$i_k(t) = \hat{I}_k \cos(\omega t + \psi - \varphi_k) + C \exp\left[-\frac{t}{\tau_k}\right] \tag{3.4}$$

Dit levert de algemene vorm voor de kortsluitstroom $i_k(t)$ in een eenfase LR circuit:

$$i_k(t) = \hat{I}_k \left[\cos(\omega t + \psi - \varphi_k) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right) \left(\cos(\psi - \varphi_k) - \frac{i_n(0)}{\hat{I}_k} \right) \right] \tag{3.5}$$

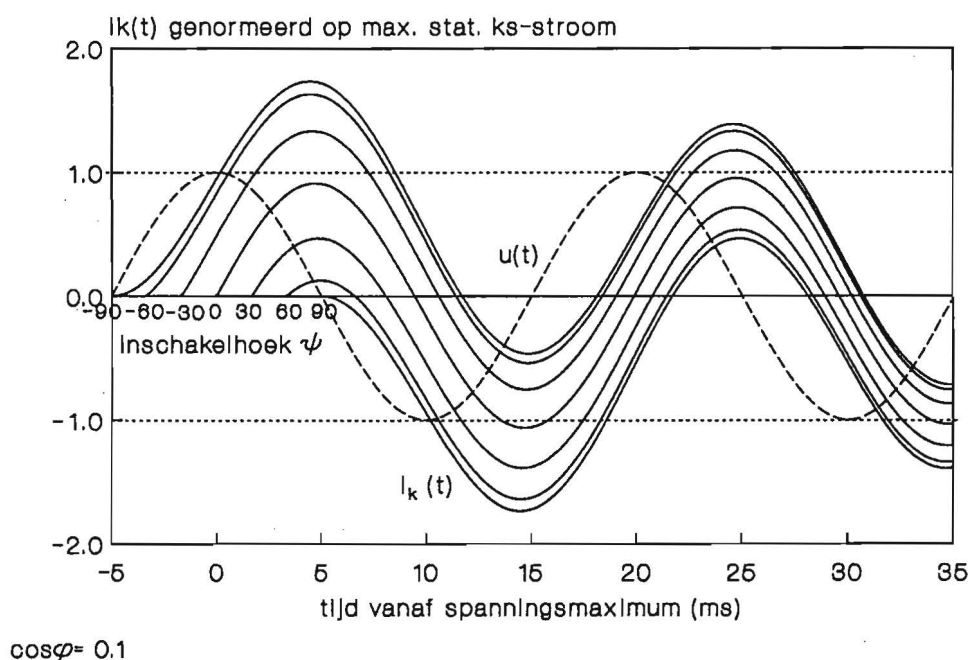
Meestal kan de beginconditie term verwaarloosd worden, $\hat{I}_k \gg \hat{I}_n$ zodat:

$$i_k(t) = \hat{I}_k \left[\cos(\omega t + \psi - \varphi_k) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right) \cos(\psi - \varphi_k) \right] \tag{3.6}$$

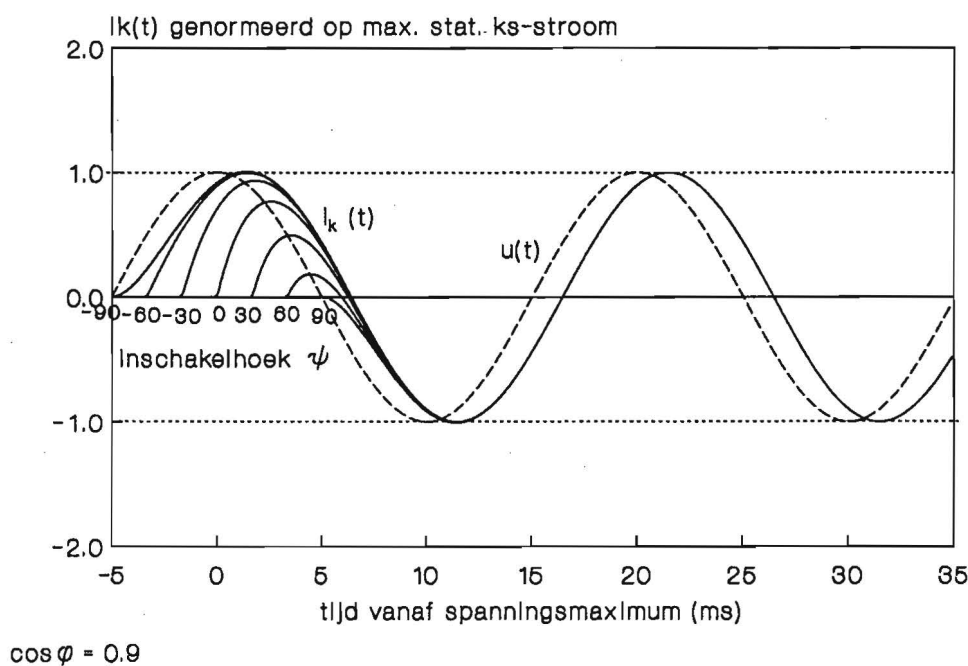
De exponentiële term in (3.6) wordt gewoonlijk **gelijkstroomlid** genoemd. De hoek ψ wordt **inschakelhoek** genoemd ($-\pi/2 \leq \psi < \pi/2$), en is (hier) gedefinieerd als de fase van de spanning op het moment van inschakelen [$u(0) = \hat{U} \cos \psi$].

De tijd ψ/ω is dus de tijd tussen het maximum van de spanning en het inschakelmoment. In andere analyses wordt de inschakelhoek ook wel gerelateerd aan de nuldoorgang van de spanning; ψ is dus geen universele grootheid, deze hangt af van de spanningsvorm, cosinus (hier) dan wel sinus. φ_k Is de gebruikelijke fasehoek tussen spanning en **stationaire kortsluitstroom**.

In fig. 3.2 is het verloop van de kortsluitstromen volgens (3.6) getekend, in fig.3.2a voor een overwegend inductief circuit ($\cos \varphi_k = 0.1$) en in fig. 3.2b voor een resistief circuit ($\cos \varphi_k = 0.9$). In beide gevallen zijn zeven inschakelhoeken gekozen in stappen van $\pi/6$ van $-\pi/2$ tot $\pi/2$.



Figuur 3.2a. Kortsluitstroomvormen voor diverse inschakelhoeken in een sterk inductief net.



Figuur 3.2b. Kortsluitstroomvormen voor diverse inschakelhoeken in sterk resistief circuit

Meteen is te zien dat:

- de stroom groter kan worden dan \hat{I}_k ;
- de nuldoorgangen verder dan 10 ms uit elkaar kunnen liggen;
- steilheden op kunnen treden, groter dan het stationaire maximum $\omega \hat{I}_k$.

Hoewel al deze situaties de moeilijkheidsgraad van de onderbreking kunnen vergroten is een schakelaar vaak te langzaam om contactscheiding tot stand te brengen vóór de eerste nuldoorgang. De onderbreking

vindt dan plaats wanneer het stationaire stroomverloop (nagenoeg) bereikt is. Alleen in circuits met tijdconstantes groter dan de openingstijd van de schakelaar, of bij gebruik van snelle schakelaars, kunnen transiënte verschijnselen de moeilijkheidsgraad van de onderbreking beïnvloeden.

3.2 Speciale gevallen van inschakelen.

Allereerst twee definities:

$$\text{Stootfactor } f_s =: \frac{\max [i_k(t)]}{\hat{I}_k} \text{ voor alle } \psi \text{ bij gegeven } \cos \varphi_k$$

$$\text{Stootverhouding } f_s =: \frac{\max [i_k(t)]}{\hat{I}_k} \text{ voor een bepaalde } \psi \text{ bij gegeven } \cos \varphi_k$$

dus $f_s(\varphi_k) = \max[f_s(\varphi_k, \psi)]$, en de stootverhouding is altijd kleiner of gelijk aan de stootfactor.

Nadere bestudering van (3.6) levert een aantal bijzondere gevallen op:

1. $\psi - \varphi_k = \pm\pi/2$. Het gelijkstroomlid is gelijk aan nul en de stroom gaat onmiddellijk over in zijn stationaire waarde. Dit is het geval als op dat moment ingeschakeld wordt, waarop ook de stationaire stroom een nuldoorgang zou hebben. Dit geval wordt "**symmetrisch inschakelen**" genoemd.
2. $\psi - \varphi_k = 0$. Het gelijkstroomlid is nu maximaal, er wordt ingeschakeld op dat moment waarop de stationaire stroom maximaal zou zijn. Het is belangrijk te realiseren dat hoewel het gelijk-stroomlid maximaal is, deze situatie (vanwege de dempingsterm) **niet de grootste stroom** oplevert.
3. $\psi = \pm\pi/2$, φ_k willekeurig. Afgeleid kan worden dat deze situatie de grootste stroom (stootfactor) oplevert. Hiervoor is de eis immers:

$$\frac{\partial i_k(t, \psi)}{\partial t} = 0 \quad \text{en} \quad \frac{\partial i_k(t, \psi)}{\partial \psi} = 0 \quad (3.7)$$

$$-\omega \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) + \frac{I}{\tau_k} \exp\left[-\frac{t}{\tau_k}\right] \cos(\psi - \varphi_k) = 0 \quad (3.8a)$$

$$-\sin(\omega t + \psi - \varphi_k) + \exp\left[-\frac{t}{\tau_k}\right] \sin(\psi - \varphi_k) = 0 \quad (3.8b)$$

Beide vergelijkingen delen en gebruik van $1/\tan(x) = \tan(\pm\pi/2 - x)$ levert $\psi = \pm\pi/2$ voor alle φ_k . Deze situatie treedt dus op bij **inschakeling op de nuldoorgang van de spanning**, de maximale stroom wordt de **stootkortsluitstroom** genoemd. Tevens kan afgeleid worden dat de aanvangssteilheid van de stroom $S_{i,0} = di_k/dt|_{t=0} = 0$.

4. $\psi = 0$, φ_k willekeurig. Deze inschakeling op het maximum van de spanning levert de grootste waarde van de aanvangssteilheid:
 $S_{i,0} = \omega \hat{I}_k / \sin(\varphi_k)$ (leidt dit zelf af). Inzicht in de stroomsteilheid is o.a. van belang voor het ontwerpen van smeltveiligheden en zeer snelle stroombegrenzende schakelaars voor laagspanning die vóór het eerste maximum van de stroom na een korte openingstijd (1-2 ms) in het net moeten ingrijpen.

In de situaties 1 t/m 4 is de rol van de inschakelhoek behandeld. In de normale netten echter is het moment van ontstaan van een kortsluiting niet te voorspellen en zijn dus alle waarden van ψ mogelijk.

Het is daarom vooral van belang te weten welke waarde de stootfactor heeft in een (door $\cos\varphi_k$) bekend circuit. De twee extrema in $\cos\varphi_k$ zijn:

5. $\cos\varphi_k = 0$ (inductief circuit). De grootste stroom (geval 3) treedt nu op voor $\psi = \pm\pi/2$. Hiermee gaat (3.6) over in:

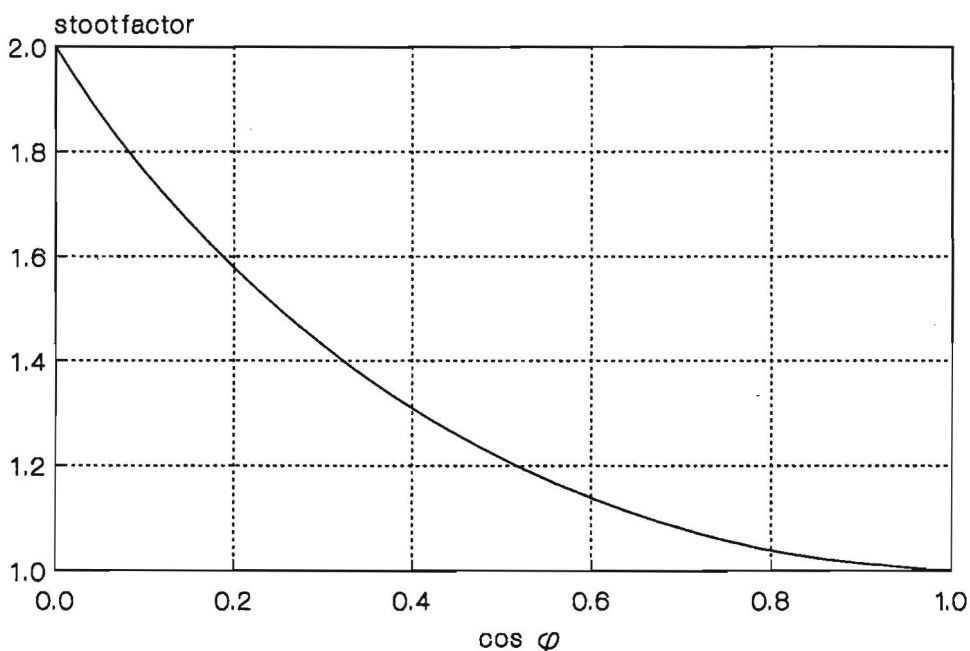
$$i_k(t) = \pm \hat{I}_k (\cos \omega t - 1) \quad (3.9)$$

waarmee eenvoudig in te zien is dat het **absolute maximum** van de stootfactor $f_s(\pi/2) = 2$. Uit de literatuur zijn een aantal benaderingsformules bekend voor $f_s(\varphi_k)$; één ervan luidt:

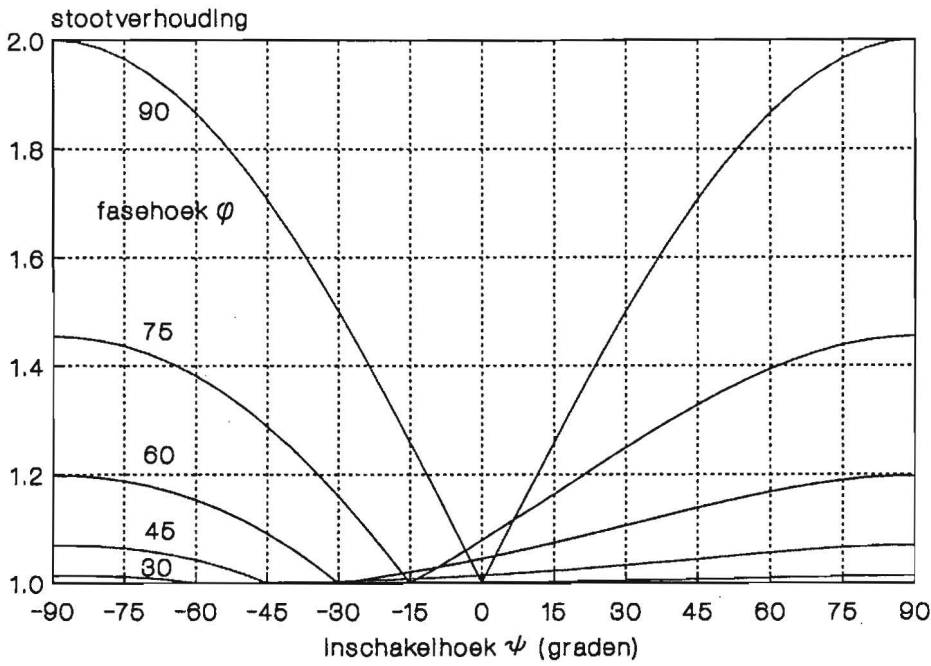
$$f_s = 1 + \sin \varphi_k \exp\left[-\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_k\right) \cotan \varphi_k\right] \quad (\text{Slamecka}) \quad (3.10)$$

6. $\cos\varphi_k = 1$ (resistief circuit). Dit geval is triviaal; de stroom "springt" op $t = 0$ meteen naar het stationaire verloop, dus $f_s(0) = 1$.

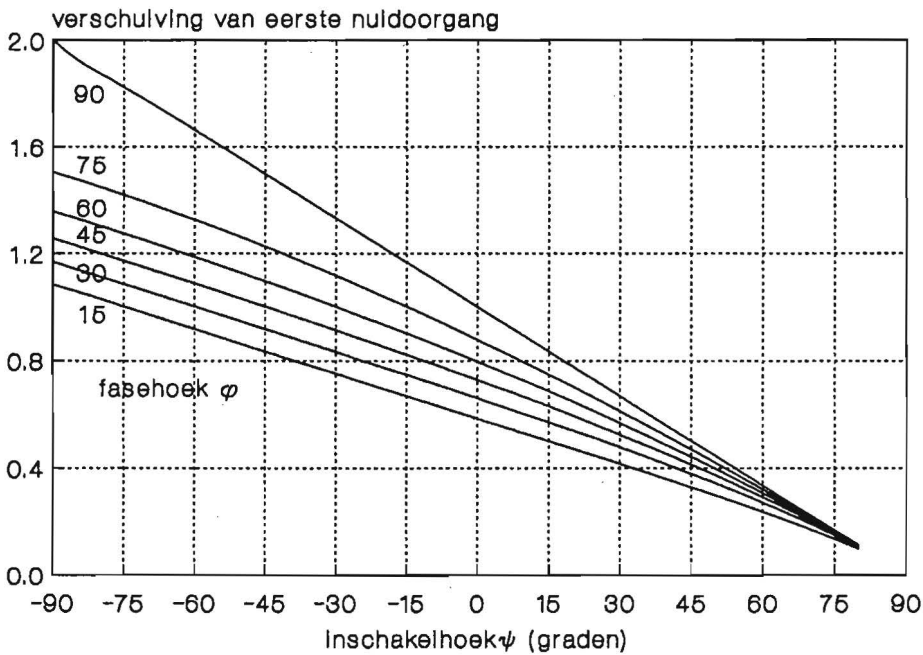
Vanuit praktisch belang is in fig. 3.4 het (exacte) verloop gegeven van f_s als functie van $\cos(\varphi_k)$.



Figuur 3.4. Verloop van de stootfactor f_s als functie van $\cos(\varphi_k)$.



Figuur 3.3a. Verloop van stootverhouding (f_s') als functie van de inschakelhoek (ψ) voor diverse fasehoeken (φ_k).



Figuur 3.3b. Verloop van tijdstip van nuldoorgang als functie van de inschakelhoek (ψ) voor diverse fasehoeken (φ_k).

In fig. 3.3 is een overzicht gegeven van een twee relevante parameters als functie van φ_k (parameter) en ψ (variabele op de horizontale as):

fig.3.3a: Stootverhouding; (de stootfactor is het snijpunt met de verticale as!);

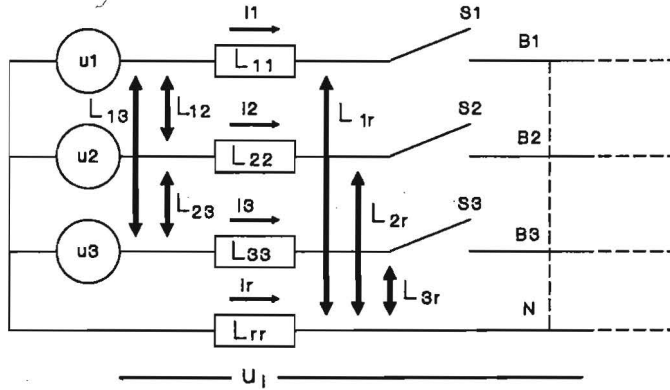
fig.3.3b: Tijd van eerste nuldoorgang, genormeerd op $\pi/\omega = 10$ ms;

Probeer in de figuren de boven beschreven opgesomde speciale gevallen van ψ en φ_k aan te geven.

3.3 Kortsluitingen in driefasen netten.

Voor de behandeling van transiënten (door kortsluiting of inschakelingen) in een driefasen net gebruiken we principieschema fig. 3.5, de driefasen-uitbreiding van fig. 2.1.

In een driefasen net moet de mutuele zelfinductie van de geleiders beschouwd worden zoals aangegeven in fig. 3.5.



Figuur 3.5. Principe van driefasen netwerk met retourgeleider

Een stroom in fase i induceert via mutuele zelfinductie spanningen in de buurfasen (en in een eventueel aanwezige retourgeleider), hetgeen gevolgen heeft voor de grootte van de kortsluitstromen in elk van de drie fasen.

De magnetische koppeling tussen de fasen onderling (en de retourgeleider) wordt in rekening gebracht door een impedantie met reaktantie ωL_{ij} ($i \neq j$), terwijl de reaktanties ωL_{ii} de "eigen"-inducties in rekening brengen. Om een eenvoudige beschouwing mogelijk te maken wordt in het volgende een transformatie uitgevoerd van de gedistribueerde mutuele zelfinducties L_{ij} ($i \neq j$) naar geconcentreerde impedanties. Hiertoe beschouwen we de spanningen u_i (zie fig. 3.5) die het gevolg zijn van elk van de vier stromen (in een symmetrische geleiderconfiguratie):

$$u_i = j\omega (L_{i1}i_1 + L_{i2}i_2 + L_{i3}i_3 + L_{ir}i_r) \tag{3.11}$$

hierin is L_{ij} een eigen inductiviteit als $i = j$ en een mutuele inductiviteit als $i \neq j$.

Met $i_r = -i_1 - i_2 - i_3$ (niet symmetrische belastingen, anders is $i_r = 0$) gaat (3.11) over in:

$$u_i = j\omega [(L_{i1} - L_{ir})i_1 + (L_{i2} - L_{ir})i_2 + (L_{i3} - L_{ir})i_3] \tag{3.12}$$

Hierin onderscheiden we drie impedanties:

$$\begin{aligned} Z_e &= j\omega(L_{ii} - L_{ir}) \\ Z_m &= j\omega(L_{ij} - L_{ir}) \quad i \neq j \\ Z_r &= j\omega(L_{rr} - L_{ir}) \end{aligned} \tag{3.13}$$

Hiermee kunnen de spanningen u_i geschreven worden als een product van een impedantiematrix met de stromen i_i :

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_e & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_e & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_e \\ -Z_r & -Z_r & -Z_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix}$$

Definieer nu de **bedrijfsimpedantie** Z_b

$$Z_b = Z_e - Z_m$$

waarmee de impedantie-matrix overgaat in:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_b & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix}$$

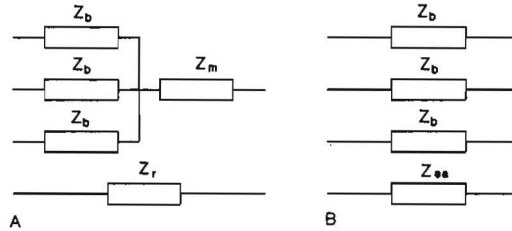
$$u_r = -Z_r(i_1 + i_2 + i_3)$$

Op basis hiervan kan een circuit met geconcentreerde elementen getekend worden dat een identiek gedrag vertoont als het circuit in fig. 3.5. Dit vervangingsschema staat in fig. 3.6a.

De homopolaire impedantie Z_0 is hier eenvoudig uit af te leiden; zie ook diktaat EO II en Industriële Netten en Installaties:

$$Z_0 = Z_b + 3Z_m + 3Z_r = Z_e + 2Z_m + 3Z_r$$

Het circuit in fig. 3.6a kan op zijn beurt eenvoudig getransformeerd worden naar dat in fig. 3.6b. Hierin is te zien dat - met in acht name van de juiste interpretatie van de impedanties - we met dit circuit verder kunnen rekenen alsof een mutuele koppeling afwezig is.



Figuur 3.6. Driefasen netwerk na transformatie tot geconcentreerde impedanties.

De in deze paragraaf verder te gebruiken "kortsluit"impedantie Z_b wordt daarom vanaf nu geïnterpreteerd als een bedrijfsimpedantie:

$$Z_b = Z_e - Z_m \tag{3.14}$$

de impedantie tussen sterpunt en aarde Z_{sa} als:

$$Z_{sa} = Z_m + Z_r \tag{3.15}$$

In de verdere analyse nemen we de bedrijfsimpedanties van de voedende netwerken gelijk. Het geïdealiseerde netwerk wordt gevoed door een oneindig sterke bron (transformator) met:

$$u_1 = \hat{U} \cos\left[\omega t + \psi - \frac{\pi}{6}\right] \quad u_2 = \hat{U} \cos\left[\omega t + \psi - \frac{5\pi}{6}\right] \quad u_3 = \hat{U} \cos\left[\omega t + \psi - \frac{3\pi}{2}\right] \tag{3.16}$$

zodat geldt: $u_1 + u_2 + u_3 = 0$ op alle mogelijke tijdstippen.

In een dergelijk systeem zijn verschillende kortsluitingen mogelijk:

- a) Fase-aarde sluiting $B_i - N$ (zie figuur 3.5)
- b) Fase-fase sluiting $B_i - B_j$
Tweefasen aardsluiting $B_i - B_j - N$ (combinatie van a en b)
- c) Driefasen sluiting $B_1 - B_2 - B_3$
Driefasen aardsluiting $B_1 - B_2 - B_3 - N$

Elk van deze gevallen kan aanleiding geven tot gecompliceerde transiënten in elk van de fasen, afhankelijk van de manier van aarding. Speciale gevallen van aarding zijn:

1. geen sterpuntsaarding, "zwevend net" $Z_{sa} = \infty$; in dit geval leiden "sluitingen" met aarde alleen tot capacatieve aardstromen die buiten het kader van dit college vallen.
2. starre sterpuntsaarding, in dit geval is Z_{sa} minimaal, maar niet nul vanwege de mutuele component in Z_{sa} .

Zoals in het eenfase geval worden de stromen vóór de sluiting nul gesteld.

- a) Fase-aarde sluiting: dit geval is te behandelen als éénfase sluiting met kortsluitimpedantie $Z_b + Z_{sa}$, de maximale stroom bedraagt:

$$I_{max} = f_s(\varphi_a) \frac{\hat{U}}{|Z_b + Z_{sa}|} \quad \text{met } \varphi_a = \arg(Z_b + Z_{sa}) \quad (3.17)$$

en ontstaat bij inschakelen op de nuldoorgang van de fase spanning;

- b) Fase-fase sluiting en $Z_{sa} = \infty$: veronderstel sluiting $B_1 - B_2$, als in fig. 3.5 waarin S_1 gesloten is, S_2 sluit en S_3 geopend blijft. Het circuit staat afgebeeld in fig. 3.7.
De stroom wordt bepaald door de gekoppelde spanning en de dubbele impedantie Z_b :

$$u_{12} = u_1 - u_2 = \sqrt{3} \hat{U} \cos(\omega t + \psi) \quad (3.18)$$

$$i_1 = -i_2 = \frac{1}{2} \sqrt{3} \hat{I}_k \left[\cos(\omega t + \psi - \varphi_b) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right) \cos(\psi - \varphi_b) \right]$$

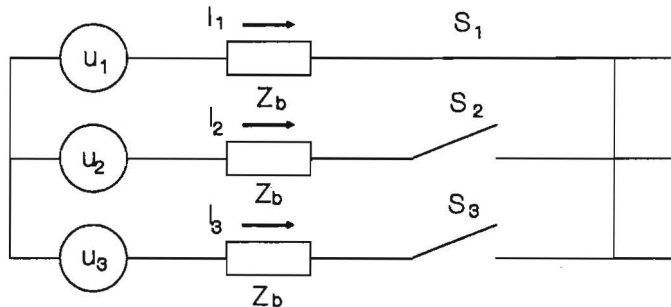
$$\hat{I}_k = \frac{\hat{U}}{|Z_b|} \quad \text{en } \varphi_b = \arg(Z_b)$$

De grootste stroom is nu dus:

$$I_{max} = f_s(\varphi_b) \frac{\sqrt{3}}{2} \hat{I}_k$$

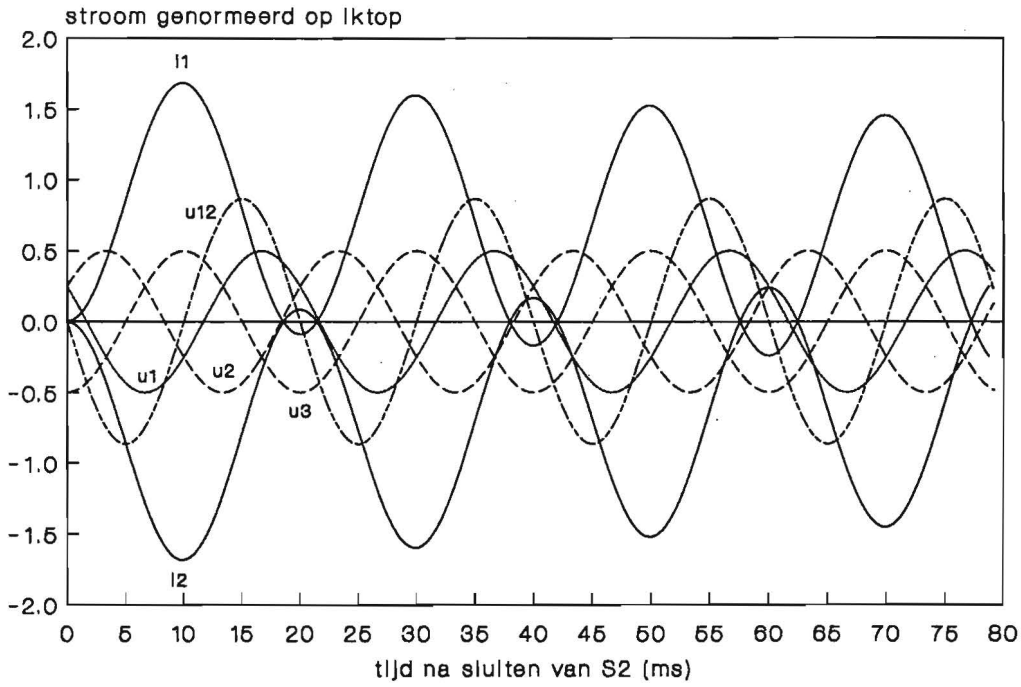
en zal optreden bij inschakelen op de nuldoorgang van de gekoppelde spanning.

Deze situatie (hier voor $\cos\varphi_b = 0.02$) is weergegeven in fig. 3.8. Hierin wordt (vanwege $\cos\varphi_b \approx 0$) vrijwel de grootst mogelijke stroom $\sqrt{3}\hat{I}_k$ bereikt.



Figuur 3.7. Net zonder sterpuntsaarding bij fase-fase sluiting (S_2 sluit).

- c) Driefasen sluiting. Ook hier weer is alleen het geval $Z_{sa} = \infty$ (zwevend net) relatief eenvoudig te berekenen. Neem aan dat S_1 gesloten is. Op het moment dat S_2 sluit (op $t = 0$) ontstaat de tweefasen sluiting en worden de stromen gegeven door (3.18) en $I_3 = 0$.



Figuur 3.8. Fasespanningen u_1, u_2, u_3 , gekoppelde spanning u_{12} en stromen i_1, i_2 na fase-fase sluiting in een zwevend net.

Na een tijd $t_3 = \gamma/\omega$ sluit de laatste fase zodat vanaf dit moment een nieuwe situatie ontstaat die na het verdwijnen van de transiënten overgaat in de stationaire toestand:

$$\begin{aligned} i_{1,st} &= \hat{I}_k \cos(\omega t + \psi - \pi/6 - \varphi_k) \\ i_{2,st} &= \hat{I}_k \cos(\omega t + \psi - 5\pi/6 - \varphi_k) \\ i_{3,st} &= \hat{I}_k \cos(\omega t + \psi - 3\pi/2 - \varphi_k) \end{aligned} \tag{3.19}$$

Nemen we weer $Z_b = R_b + j\omega L_b$, dan kunnen de transiënte componenten $i_{i,tr}$ ($i = 1, 2, 3$) als in (3.3) berekend worden met de homogene differentiaalvergelijkingen voor elke fase afzonderlijk:

$$i_{i,tr} R_b + L_b \frac{d i_{i,tr}}{dt} = 0 \Rightarrow i_{i,tr} = C_i \exp\left(-\frac{t - t_3}{\tau_b}\right), \quad \tau_b = \frac{L_b}{R_b} \tag{3.20}$$

De constanten C_i volgen nu uit de beginvoorwaarden met (3.18) en (3.19):

$$i_{i,st}(t_3) + i_{i,tr}(t_3) = i_i(t_3) \tag{3.21}$$

hetgeen de waarden levert van C_i :

$$C_i = i_i(t_3) - i_{i,st}(t_3) \tag{3.22}$$

Na enig rekenwerk levert dit:

$$\begin{aligned} C_1 &= -\frac{1}{2} \hat{I}_k [\sqrt{3} \exp(-t_3/\tau_b) \cos(\psi - \varphi_b) + \sin(\gamma + \psi - \varphi_b)] \\ C_2 &= \frac{1}{2} \hat{I}_k [\sqrt{3} \exp(-t_3/\tau_b) \cos(\psi - \varphi_b) + \sin(\gamma + \psi - \varphi_b)] \\ C_3 &= \hat{I}_k \sin(\gamma + \psi - \varphi_b), \end{aligned} \tag{3.23}$$

zodat algemeen gevonden wordt:

vóór het sluiten van S_3 : (recapitulatie van 3.18):

$$i_1 = -i_2 = \frac{1}{2}\sqrt{3}\hat{I}_k [\cos(\omega t + \psi - \varphi_b) - \exp(-t/\tau_b)\cos(\psi - \varphi_b)] \text{ en } i_3 = 0 \quad (3.24)$$

na het sluiten van S_3 op tijdstip $t_3 = \gamma/\omega$: [optellen van (3.19) en (3.20)]

$$\begin{aligned} i_1 &= \hat{I}_k [\cos(\omega t + \psi - \pi/6 - \varphi_b)] + C_1 \exp[-(t - t_3)/\tau_b] \\ i_2 &= \hat{I}_k [\cos(\omega t + \psi - 5\pi/6 - \varphi_b)] + C_2 \exp[-(t - t_3)/\tau_b] \\ i_3 &= \hat{I}_k [\cos(\omega t + \psi - 3\pi/2 - \varphi_b)] + C_3 \exp[-(t - t_3)/\tau_b] \end{aligned} \quad (3.25)$$

Als controle geldt: $i_1 + i_2 + i_3 = 0$.

De voorwaarden voor symmetrisch inschakelen zijn eenvoudig in te zien:

$$C_1 = C_2 = C_3 = 0 \rightarrow \cos(\psi - \varphi_b) = 0 \quad \text{en} \quad \sin(\gamma + \psi - \varphi_b) = 0;$$

dit levert:

$$\psi = \varphi_b \pm \pi/2 \quad \text{en} \quad \gamma = (2n - 1)\pi/2 \quad \text{dus} \quad t_3 = (2n - 1)\pi/(2\omega) \quad (3.26)$$

De berekening van de maximale stroom is zeer omslachtig, we volstaan met benaderde resultaten voor een circuit met $\cos\varphi_b = 0.07$:

$$i_1|_{\max} = 2.11 \frac{\hat{U}}{|Z_b|}; \quad i_2|_{\max} = 1.26 \frac{\hat{U}}{|Z_b|}; \quad i_3|_{\max} = 1.80 \frac{\hat{U}}{|Z_b|} \quad \text{bij } \gamma = \frac{\pi}{2} \quad \text{en} \quad \psi = \frac{\pi}{2}$$

Bij **gelijktijdige** sluiting van (S_1), S_2 , S_3 volgt uit (3.25) met $\gamma = 0$:

$$\begin{aligned} i_1 &= \hat{I}_k [\cos(\omega t + \psi - \pi/6 - \varphi_b) - \exp(-t/\tau_b)\cos(\psi - \pi/6 - \varphi_b)] \\ i_2 &= \hat{I}_k [\cos(\omega t + \psi - 5\pi/6 - \varphi_b) - \exp(-t/\tau_b)\cos(\psi - 5\pi/6 - \varphi_b)] \\ i_3 &= \hat{I}_k [\cos(\omega t + \psi - 3\pi/2 - \varphi_b) - \exp(-t/\tau_b)\cos(\psi - 3\pi/2 - \varphi_b)] \end{aligned} \quad (3.27)$$

waarbij de maximale stroom gelijk is aan het eenfase geval:

$(i_i)_{\max} = f_s(\varphi_b)\hat{I}_k$, **dus lager dan bij ongelijktijdig inschakelen.**

De maximale stroom ontstaat bij inschakelen op de nuldoorgang van een van de fasen, dus $\psi = \pi/3, 2\pi/3$, etc., dus om de 60° .

3.4 Het ontstaan van een kortsluiting.

Zoals in fig. 3.2. te zien is, is de maximaal mogelijke kortsluitstroom afhankelijk van het moment van ontstaan van de kortsluiting. In sommige gevallen zal een kortsluiting zich langzaam ontwikkelen bijv. bij smeltprocessen. Over de wijze waarop een kortsluiting zich ontwikkelt bij mechanische beschadiging e.d. zijn weinig ervaringsgegevens bekend.

In die gevallen echter waarbij een kortsluiting ontstaat door doorslag t.g.v. te grote spanningen, kan de impedantiesprong op de kortsluitplaats wel abrupt zijn. Dat geldt ook voor het relatief veel voorkomende inschakelen op een kortgesloten net.

Bij kortsluiting t.g.v. overspanning is het redelijk te veronderstellen dat de sluiting ontstaat **nabij het spanningsmaximum**, zeker wanneer de snelheid van naderen (v_i) van de geleiders laag is.

De grootte van de doorslagspanning wordt gegeven door:

$$u_d(t) = E_d x(t) \tag{3.28}$$

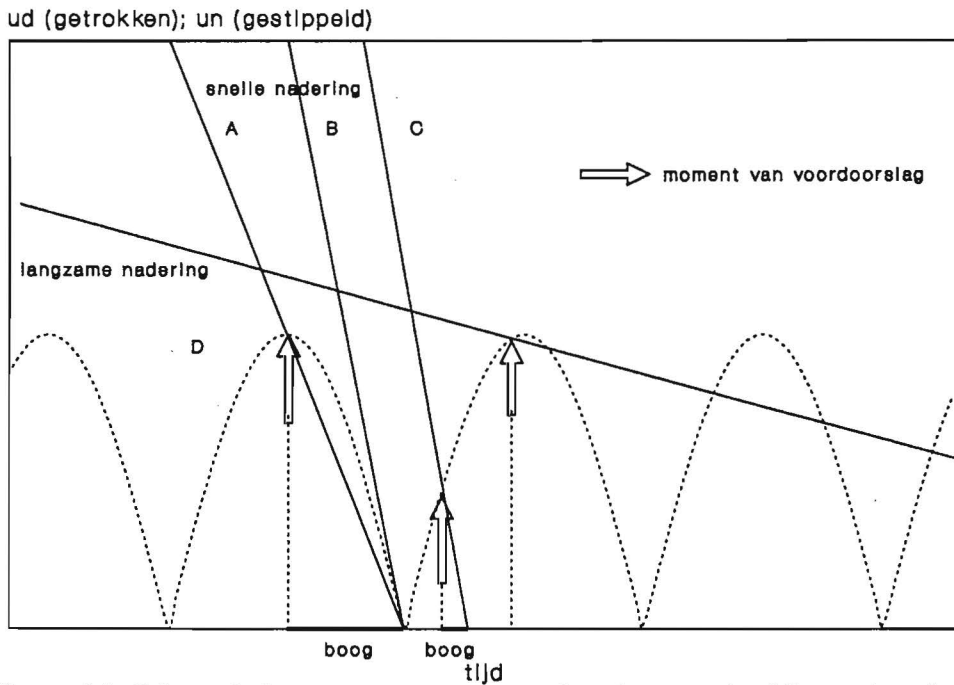
met $x(t)$ de afstand tussen de geleiders en E_d de veldsterkte. Wanneer $u_d(t) = |u_n(t)|$ zal er door- /overslag optreden.

Bij het naderen van schakelaarcontacten treedt dit **vrijwel altijd** op en wordt dan **voordoorslag** genoemd. Voordoorslag kan alleen vermeden worden wanneer:

- a) het galvanische contact nagenoeg samenvalt met de spanningsnuldoorgang en:
- b) de contactsnelheid voldoende groot is; uit (3.28) volgt dus:

$$\frac{du_d}{dt} = E_d v_i > \frac{du_n}{dt} = \omega \hat{U} \rightarrow v_i > \frac{\omega \hat{U}}{E_d} \tag{3.29}$$

dit is geval B in fig. 3.9. Nadering C voldoet wel aan eis b) maar niet aan a), het omgekeerde is het geval voor nadering A.



Figuur 3.9. Schematische weergave van net- en doorslagspanning bij voordoorslag.

Aangezien (vanwege eis a) voordoorslag alleen te vermijden is in speciale synchrone laboratorium schakelaars, treedt voordoorslag in praktische schakelaars bijna altijd op. Dit gaat gepaard met een boog vóór het moment van galvanisch contact maken, waarvan de boogduur alleen door een grote inschakelsnelheid beperkt kan worden (zie fig. 3.9). Een boog voorafgaand aan de fysieke inschakeling kan leiden tot grote thermische belasting van de contactplaats met als mogelijk gevolg **vastlassen** van de contacten. In moderne schakelaars worden contactsnelheden gerealiseerd van 4 - 10 m/s bij doorslag veldsterkten $E_d = 10 - 20 \text{ kV/mm}$ (SF_6).

Nadat contact is gemaakt moet de bewegingsenergie door de constructie worden opgenomen. Als de contacten loodrecht op elkaar botsen kan dit aanleiding geven tot kortstondig openen ("stuiten" of "denderen" genaamd). Ook hieruit ontstaan weer kortdurende boogjes met kans op contactlassen. Zelfs kan de stroom weer onderbroken worden door de terugbotsende contacten wanneer door HF-inschakelverschijnselen (parasitaire capaciteiten en zelfindukties) nuldoorgangen optreden.

3.5 De gevolgen van transiënte kortsluitstromen.

In praktische circuits wordt meestal uitgegaan van een vuistwaarde voor de stootfactor:

$$f_s = 1.8 \text{ (} \cos\varphi_k = 0.07 \text{) voor hoogspanningsnetten (lijninductiviteit) en}$$

$$f_s = 1.4 \text{ (} \cos\varphi_k = 0.30 \text{) voor laagspanningsnetten (relatief veel weerstand door kabels)}$$

Zoals in fig. 3.3a te zien is, is de afname van de stootverhouding in een gebied $\pm\pi/6$ rondom de meest ongunstige inschakelhoek $\psi = \pm\pi/2$ niet groot. Aangezien in een driefasen systeem de nuldoorgangen $\pi/3$ van elkaar liggen, is bij een willekeurige inschakeling de kans op de stootkortsluitstroom van ongeveer $f_s \hat{I}_k$ in tenminste één van de fasen groot. De aanname van de stootfactor $f_s = 1.8$ resp. 1.4 als worst-case benadering is dan ook niet onrealistisch.

De gevolgen van een grote transiënte kortsluitstroom zijn divers:

- a) elektrodynamische belasting van geleider-konstrukties. De kracht per eenheid van lengte F_{ij} tussen twee stroomvoerende geleiders (i_i, i_j) geplaatst op afstand a wordt gegeven door:

$$F_{ij} = \frac{\mu_0 i_i i_j}{2\pi a} \quad (3.30)$$

zodat voor een driefasen-rail-systeem in één vlak voor de krachten op elke rail geldt:

$$F_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{i_1 i_2}{a} + \frac{i_1 i_3}{2a} \right] \quad F_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{i_2 i_3}{a} - \frac{i_2 i_1}{a} \right] \quad F_3 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{i_3 i_1}{2a} + \frac{i_3 i_2}{a} \right] \quad (3.31)$$

In het geval van tweefasen sluiting is de kracht evenredig met $(\frac{1}{2}\sqrt{3}f_s \hat{I}_k)^2 = 2.43 \hat{I}_k^2$. Bij driefasen sluitingen wordt de berekening ingewikkeld vanwege de fase verschillen tussen de stromen. Met vgl. (3.27) resp. (3.31) kan de maximale kracht op elke geleider in principe uitgerekend worden.

Uit fig. 3.10 kan een idee verkregen worden van de zeer grote krachten die op de geleiders werken; afgebeeld is de kracht op elke geleider met onderlinge afstand 10 cm (laagspanningsnet!) na een kortsluiting als in fig. 3.9 met $\hat{I}_k = 50$ kA.

Een ander ongewenst gevolg van de hoge dynamische belasting is het spontaan openen van contacten in schakelaars door de afstotende werking van tegengestelde stromen. De dan ontstane boog kan aanleiding geven tot contactlassen. Vooral voor scheiders kan de eis "stootkortsluitstroom voeren" zwaar zijn.

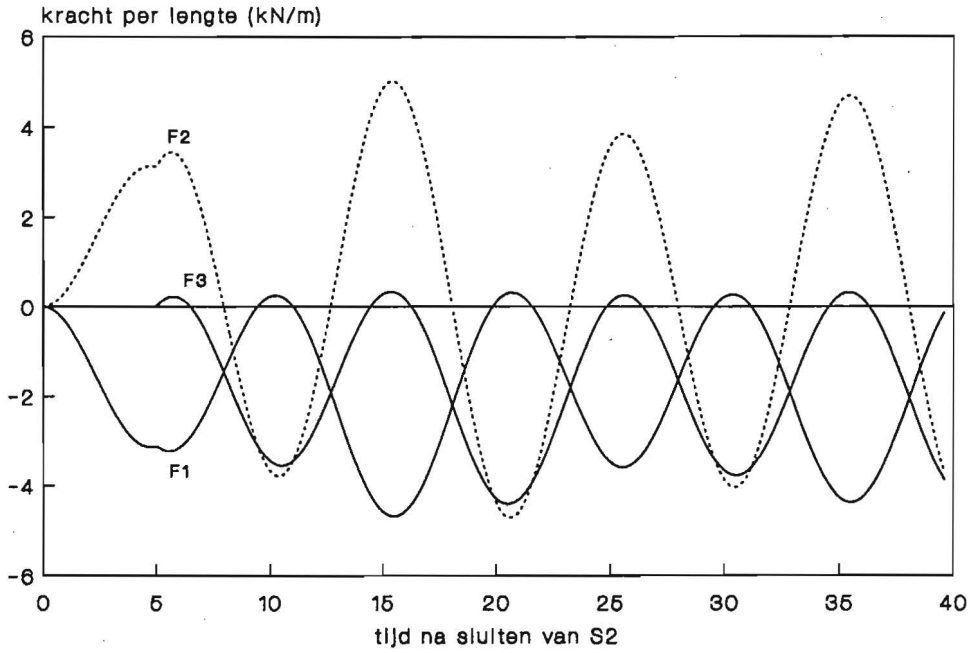
- b) Thermische belasting van de geleiders.

De thermische belasting van de geleiders wordt vaak uitgedrukt in de **doorlaat-integraal** JI ; dit is de te dissiperen energie per ohm geleider. Deze mag niet groter mag zijn dan een gegeven maximum i.v.m. oververhitting:

$$JI(t) = \int_0^t [i_k(\tau)]^2 d\tau \quad (3.32)$$

Ook in studies die betrekking hebben op coördinatie van schakelende componenten in een uitgebreide (laag- en middenspannings-)netten speelt de doorlaat-integraal cruciale rol.

Aangezien de stroom kwadratisch voorkomt kan de thermische belasting t.g.v. transiënten aanzienlijk zijn, tot 6 p.u.

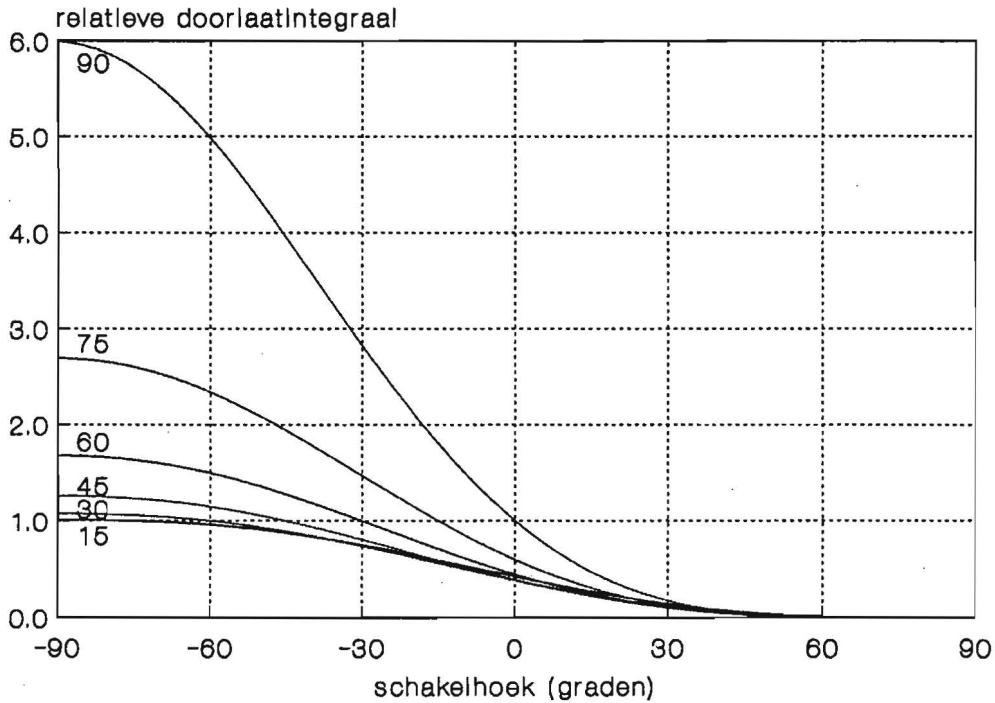


Figuur 3.10. Voorbeeld van de kracht/meter in een driefasen kortgesloten 50 kA LS-net.

In fig. 3.11 is de relatieve doorlaatintegraal $JI'(t_1)$ gegeven, met t_1 het moment van eerste nul-doorgang in het eenfase geval.

$JI'(t_1)$ is genormeerd op de doorlaatintegraal van de halve symmetrische stroomsinus.

De doorlaat-integraal kan zo groot worden omdat zowel stroom als tijd (tot 2x) vergroot kunnen worden.



Figuur 3.11. De relatieve doorlaatintegraal (JI') als functie van de inschakelhoek (ψ) voor enkele waarden van de fasehoek (φ_k).

3.6. Het inschakelen van capacitieve belastingen.

Het schakelen van capacitieve belastingen komt in distributie- en transmissie netten komt veelvuldig voor. Capacitieve belastingen worden voornamelijk gevormd door kabels en condensatoren.

Condensatorbanken dienen veelal ter cosφ verbetering en om de spanningsstabiliteit van een transmissie-systeem te verhogen.

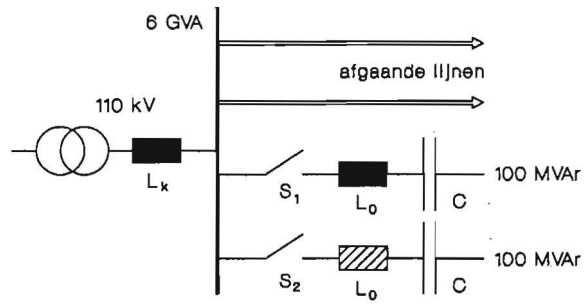
Het inschakelen van een condensatorbank is in het algemeen problematisch omdat de impedantie van een condensator voor een stapvormige spanningsverandering zeer klein is, waardoor zeer grote stromen kunnen gaan lopen, de zg. inrush-stromen. Door extra aangebrachte serie impedanties en/of door een juiste keuze van het inschakelmoment kunnengrote inrush stromen vermeden worden.

In het volgende voorbeeld is uitgegaan van twee 100 MVar condensatorbanken aangesloten op een 110 kV rail met een kortsluitvermogen van 6 GVA (zie fig. 1).

We stellen deze situatie in het vervangingsschema enkelfasig voor. De componentenwaarden zijn:

$6 \text{ GVA} = \sqrt{3}i_k u$, dit levert een kortsluitstroom $i_k = 31.5 \text{ kA}$ en een kortsluit-zelfinductie $L_k = 6.42 \text{ mH}$;

$100 \text{ MVar} = \sqrt{3}i_c u$ dit levert een stationaire condensatorstroom $i_c = 525 \text{ A}$ en een capaciteit per bank $C = 26 \mu\text{F}$.



Figuur 3.12. Configuratie condensatorbanken

Verder nemen we de zelfinductie van de condensatorbank $L_0 = 0.1L_k = 0.64 \text{ mH}$.

Onderscheid moet nu worden gemaakt tussen twee situaties:

1. "Single bank" (S_1 schakelt in bij geopende S_2).

Gaan we uit van één enkele bank die ingeschakeld wordt terwijl geen andere bank aangesloten is, dan kunnen de volgende grootheden als volgt geschat worden (damping verwaarloosd):

De maximale **inrush-stroom** wordt nu gegeven door:

$$I_{\max} = \hat{U}_f \sqrt{\frac{C}{L_k + L_0}} = 5.45 \text{ kA}$$

Met \hat{U}_f de amplitude van de fase-spanning (in niet-geaarde netten moet voor \hat{U}_f de amplitude van de gekoppelde spanning genomen worden).

De frequentie van de stroom wordt bepaald door:

$$f = \frac{1}{2 \pi \sqrt{C(L_k + L_0)}} = 370 \text{ Hz}$$

Inschakelen op het ongunstigste moment (spanningsmaximum) levert een **spanningsdip** op de rail ter grootte van:

$$\frac{\hat{U}_f - \Delta U}{\hat{U}_f} = \frac{L_k}{L_k + L_0} = 0.9 \text{ pu}$$

De lage golf-impedantie van de condensatorbank bij inschakelen (hier 16.5Ω) trekt de railspanning kortstondig naar aarde.

Bovendien geeft de grote inrush stroom over de kortsluitimpedantie een **overspanning** op de rail die in eerste benadering gegeven kan worden als:

$$\frac{\Delta U + \hat{U}_f}{\hat{U}_f} = 1 + \frac{L_k}{L_k + L_0} = 1.9 pu$$

Deze overspanning plant zich door het net voort en kan problemen veroorzaken.

Een goed gedocumenteerd voorbeeld hiervan behandelt de overspanning na het inschakelen van een condensator die zich aan het eind van een 150 kV kabel voordoet door de spanningsverdubbeling bij reflectie aan het station van een afnemer [1]. Deze transiënt bracht aan 50 kV zijde het LC circuit kabel(capaciteit) en trafo (spreidingsinductie) in resonantie, met als gevolg overspanningen die diverse beveiligingen deden aanspreken.

Door synchroon in te schakelen kan de inrush-transiënt vermeden worden. In het zwevende 150 kV net betekent dit dat de eerste twee polen van de schakelaar sluiten op de nuldoorgang van de gekoppelde spanning (van die fase) en de derde pool 5 ms daarna (dan gaat immers de derde fase spanning door nul). Synchroon schakelen stelt hoge eisen aan de schakelsnelheid en aan de mechanische stabiliteit van het mechanisme. Een kleine spreiding (1 a 2 ms) rond het optimale inschakelmoment kan al leiden tot te grote transiënten.

Daarom kunnen conventionele vermogensschakelaars niet als synchrone schakelaars worden gebruikt. Speciale schakelaars zijn sinds kort beschikbaar, deze bezitten een adaptieve regeling om ook de synchronisatie op termijn te behouden.

2. Back-to-back situatie. (S_1 schakelt in bij gesloten S_2).

In deze situatie wordt een condensatorbank bij reeds in bedrijf zijnde parallel banken geschakeld. Nu vindt een vereffening met buur-condensatorbanken plaats, met nog maar een kleine aandeel van de inrush-stroom uit het voedende net omdat $L_k \gg L_0$. Dit heeft als ongunstig effect dat de **inrush-stroom groter** is, nl. ongeveer:

$$I_{\max} = \hat{U}_f \sqrt{\frac{C}{4 L_0}} = 9.0 kA ; \text{ bij ongelijke banken: } I_{\max} = \hat{U}_f \sqrt{\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \frac{1}{L_{01} + L_{02}}}$$

Ook de frequentie van de inrush-stroom is hoger:

$$f = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L_0 C}} = 1.23 \text{ kHz} ; \text{ bij ongelijke banken: } f = \frac{1}{2 \pi \sqrt{\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (L_{01} + L_{02})}}$$

Dit is verduidelijkt in fig. 3.13b, te vergelijken met fig. 3.13a.

Deze stroom is voornamelijk een vereffeningstroom tussen beide banken, en de stroom door de kortsluitimpedantie van het net L_k is beduidend kleiner dan in de situatie van de single bank. Daardoor is de **spanningsdip en de overspanning op de rail aanzienlijk kleiner** dan in situatie met de enkelvoudige bank. Dit is geïllustreerd in fig. 14b, te vergelijken met fig. 14a.

Concluderend kan dus gesteld worden dat "single bank" schakelen een grotere nettransiënt maar een lagere inrushstroom oplevert dan "back-to-back" schakelen. De grote inrushstroom (tot 100 x de nominale stroom) bij back-to-back schakelen vereist speciale "definite purpose" schakelaars.

Voor het net is de "single bank" situatie gevaarlijker, voor de schakelaar de "back-to-back" situatie.

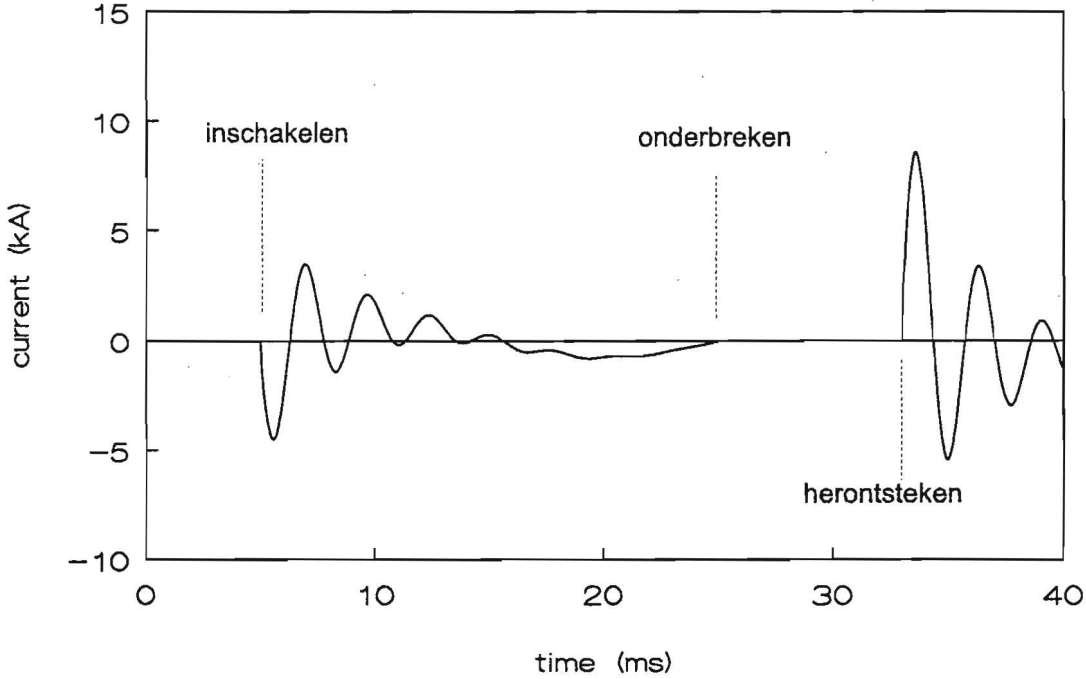
Voor de condensatoren is de spanningsbelasting bij "single bank" hoog, en in "back-to-back" situatie vormt de stroombelasting mogelijk een probleem.

Ongunstiger wordt de situatie als er restspanning op de condensatorbank aanwezig is tijdens het inschakelen ("trapped charge"). Onder normaal bedrijf is de kans daarop niet groot omdat de bank eventuele restspanning kan ontladen via weerstanden of spanningstransformatoren.

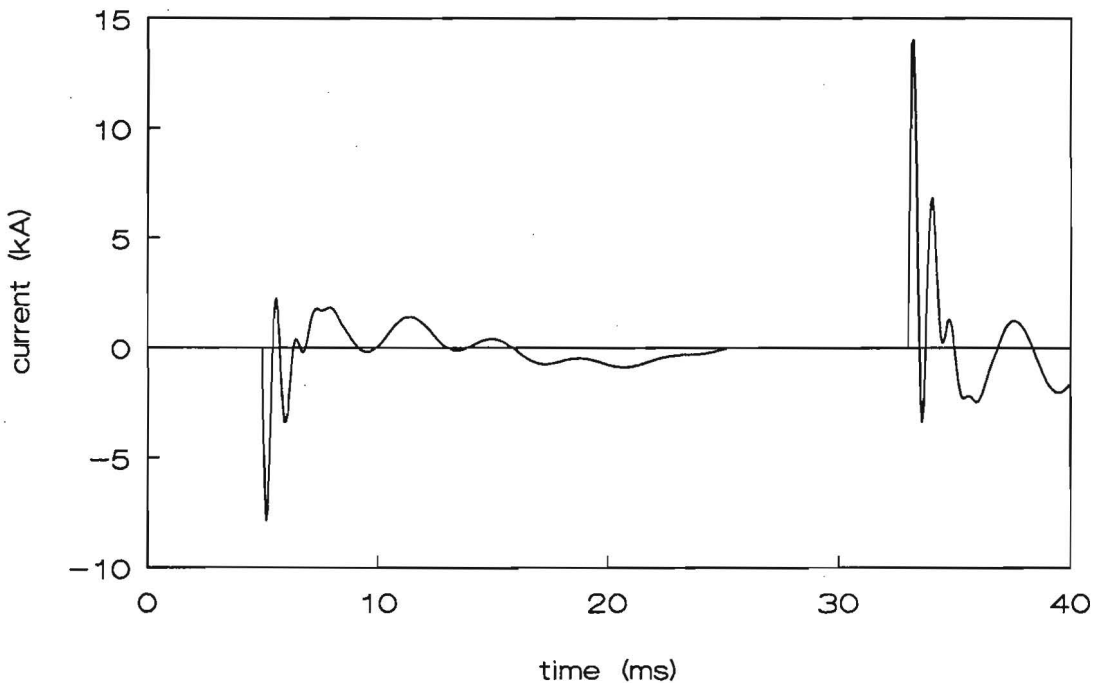
Bij **herontsteking** van de schakelaar echter ontstaat een gevaarlijke situatie: herontsteking (restrike) vindt

plaats #10 ms na onderbreking van de nominale stroom, veel korter dan de ontlaadtijd van de restspanning.

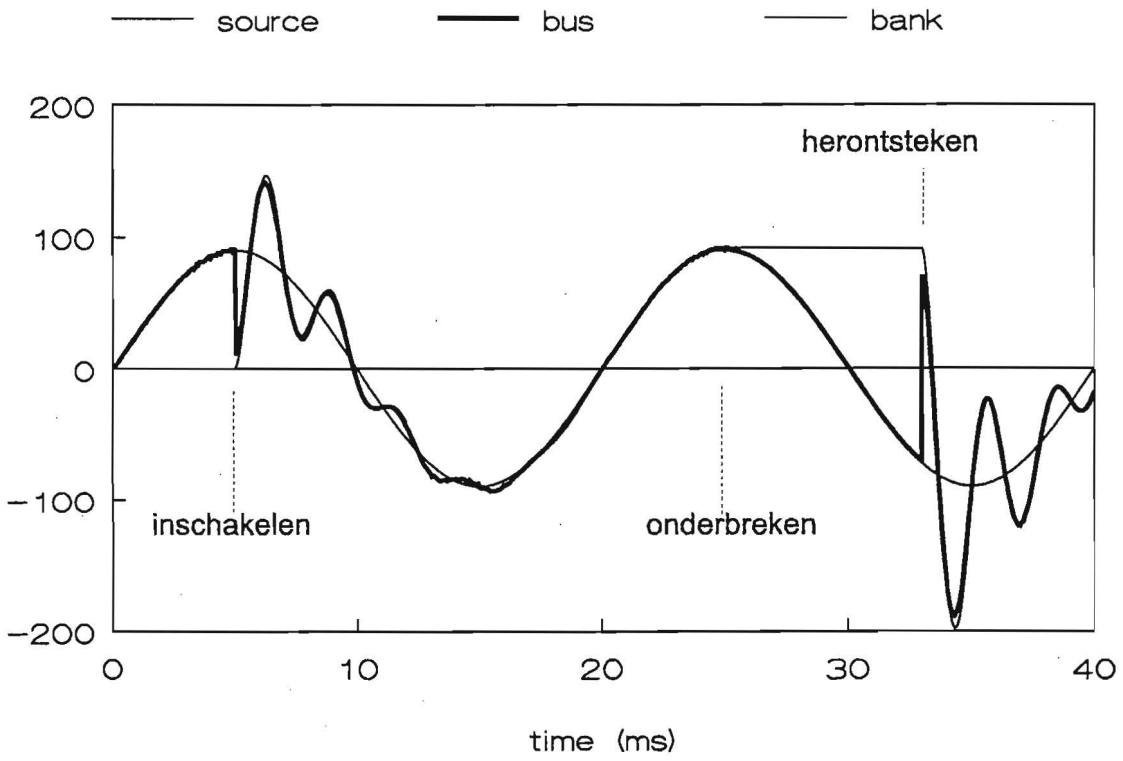
De spanning over de schakelaar is dan maximaal $2\hat{U}_f$ (in de voorbeeld situatie) omdat de bank na onderbreking van de stroom achterblijft op \hat{U}_f en na 10 ms de netspanning $-\hat{U}_f$ bedraagt. De dan ontstane transiënten in spanning en stroom zijn dus **dubbel zo groot** dan berekend in het voorgaande. Ook deze situatie is aangegeven in fig. 13 en 14.



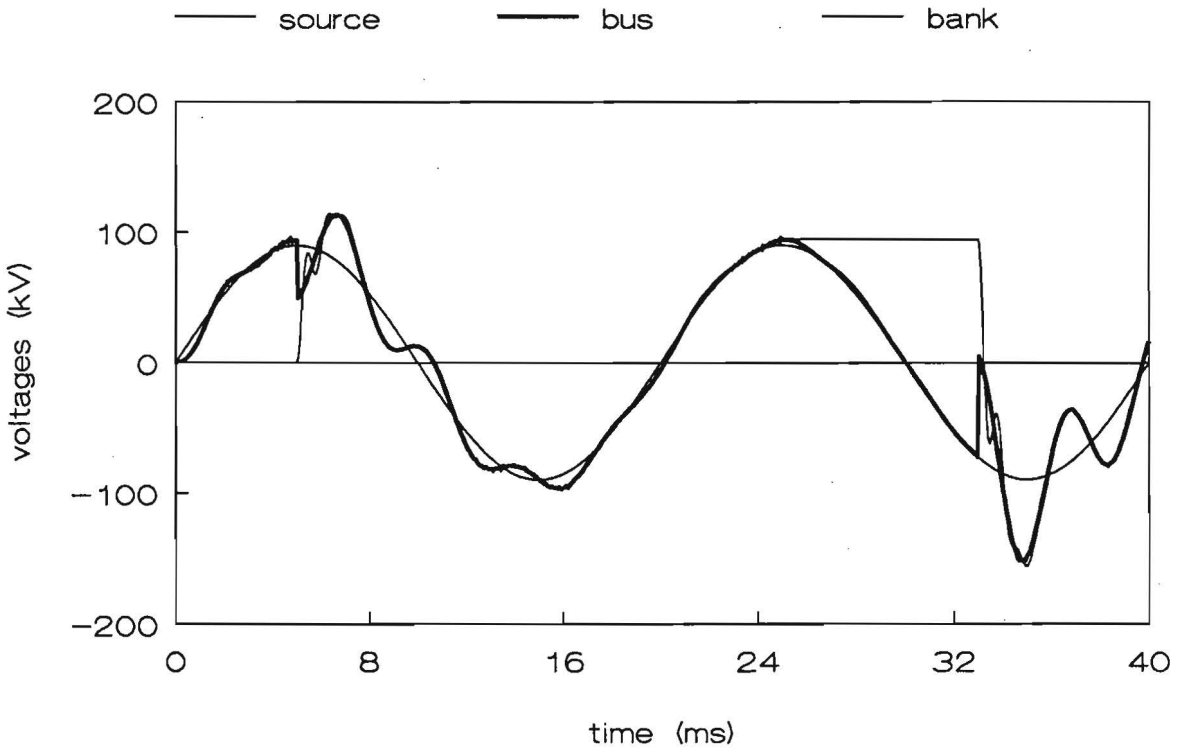
Figuur 13a. *Inrush- en herontstekingsstroom bij single-bank configuratie*



Figuur 13b. *Inrush- en herontstekingsstroom bij back-to-back configuratie*



Figuur 14a. Spanningen bij back-to-back configuratie



Figuur 14b. Spanningen bij single bank configuratie

In dit geval is het vermogen van de schakelaar om de hoog-frequente stroom te onderbreken van belang. Door demping van deze stroom kunnen overspanningen worden vermeden [2].

De IEC voorziet niet in voorschriften voor het schakelen van condensatorbanken. ANSI schrijft voor 145 kV als richtlijn 16 kA inrush-stroom bij 4.25 kHz ("definite purpose schakelaars"), zowel voor de single-bank als voor de back-to-back configuratie.

Het doel van capaciteieve schakelproeven volgens IEC is het vaststellen van de herontstekingsvrijheid van de schakelaar bij verschillende boogtijden.

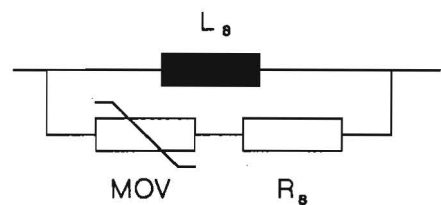
Het herontstekingsvrij zijn betreft niet alleen het gedrag van een schakelaar gedurende een typetest, maar ook de garantie voor het gedrag na jarenlang gebruik. De huidige voorschriften kunnen deze garantie echter niet geven. Hoewel condensatorschakelaars in nieuwe (beproeft!) conditie herontstekingsvrij zijn, is weinig bekend over de kans op herontsteking na vele bedrijfsjaren.

Na het voorgaande is het duidelijk dat maatregelen wenselijk zijn ter begrenzing van de inrushstroom bij het inschakelen van condensatorbanken.

Hiervoor zijn de volgende methoden voorhanden:

1. Gebruik van een schakelaar met "closing resistor". Dit is een weerstand in de schakelaar die vóór het fysiek contact maken in serie geschakeld wordt, en erna kortgesloten.
Nadeel: Niet beschikbaar voor de lagere hoogspanning (110 kV) en middenspanning.
Werkt niet begrenzend op transiënten t.g.v. herontstekingen.
2. Synchroon (in-)schakelen;
Nadeel: Ervaring is nog beperkt
Werkt niet begrenzend op transiënten t.g.v. herontstekingen.
3. Aanbrengen van een serie zelfinductie in de condensator-tak
Nadeel: Geven steile wederkerende spanning na het onderbreken van een sluiting tussen de inductie en de bank;
4. Aanbrengen van serie-weerstand (10 - 20% van C-bank impedantie) in de condensator-tak.
Nadeel: Geeft ohmse verliezen in normaal bedrijf.

Recentelijk is door EdF (2500 MVar opgesteld) besloten over te gaan tot het gebruik van een selectief dempend LR-netwerk [3]. Het principe is geschetst in fig. 4. Bij inschakelen of herontsteking wordt de spanning over L_s (5 mH) zo groot dat de metaal-oxide varistor MOV in geleiding gaat (4 kV), zodat weerstand R_s (60 Ω) de inrush stroom sterk dempt. In normaal bedrijf geleidt MOV niet, zodat er geen ohmse verliezen zijn.



Figuur 3.15. Selectief LR circuit (EdF)

3.7. Andere inschakelverschijnselen.

In het voorgaande hebben we aandacht besteed aan het inschakelen van een, twee en driefasen circuits met slechts één weerstand en één lineaire zelfinductie per fase. De spanningsbron(nen) werd(en) oneindig sterk verondersteld. Uitgangspunt was de vraag: wat zijn de grootste stromen - en dus de hoogste elektrodynamische en thermische belastingen - die in een netdeel of installatie te verwachten zijn.

Ook het inschakelen van een gloeilamp levert al een kortstondige stroompiek van ca. 10 maal de nominale waarde.

Vanwege deze inschakelstoten moet "snel wederinschakelen" na een onderbreking van een kortsluiting ook inderdaad snel gebeuren (≈ 300 ms). Om dezelfde reden moet het weer onder spanning brengen van een gestoord verzorgingsgebied in etappes geschieden.

Bij het ontwerpen van beveiligingsmethoden moeten de "normale" inschakelstoten gescheiden worden van de abnormale. De overstromen die bij het inschakelen van ongestoorde netten en apparaten ontstaan blijven beperkt tot hoogstens 8 - 10 maal de nominale stromen. Een uitzondering vormen de transformatoren waarin na het laatste uitschakelproces remanent magnetisme is achtergebleven.

Kortsluitingen aan de klemmen van een synchrone generator veroorzaken transiënte stromen van een gecompliceerd karakter. Hun behandeling valt buiten het bestek van dit college. Datzelfde geldt voor de behandeling van de lopende golven die bij het inschakelen van een lange lijn of kabel optreden en die in de netten voor de hoogste spanningen mede het vereiste isolatienivo bepalen.

3.8. Literatuur

- [1] Maas J.H., Koreman C.G.A., de Zwart T., "Optimale inschakeling van condensatorbatterijen", *Energietechniek* 2, jaargang 70 (1992) pp. 114 - 120
- [2] Jansen A.L.J., van der Sluis L., "Controlling the transient currents and overvoltages after the interruption of a fault near shunt capacitor banks", *CIGRE Conf. Parijs 1988*, paper 13-13, pp. 1 - 6
- [3] Sabot A. et al., "A unique multipurpose damping circuit for shunt capacitor bank switching", *IEEE Trans. on Power Del.*, Vol. 8, No. 3 (1993) pp. 1173 - 1183

6. DE INVLOED VAN DE BOOG OP DE ONDERBREKING

Tot nu toe werd de vermogensschakelaar steeds voorgesteld als een α -breaker, d.w.z. een perfecte geleider vóór de onderbreking en een perfecte isolator onmiddellijk erna.

Het zal duidelijk zijn dat de aanwezigheid van de boog aanleiding geeft om van deze geïdealiseerde voorstelling af te moeten wijken immers:

1. Vóór de onderbreking moet er een zekere spanning (de boogspanning) over de (ex-) boog bestaan om ladingstransport (dus geleiding) mogelijk te maken.
2. Na de onderbreking zal het geïoniseerd medium waaruit de boog bestaat heeft, niet ogenblikkelijk afgekoeld en/of afgevoerd zijn, waardoor er een zekere tijd een restgeleiding gehandhaafd blijft.

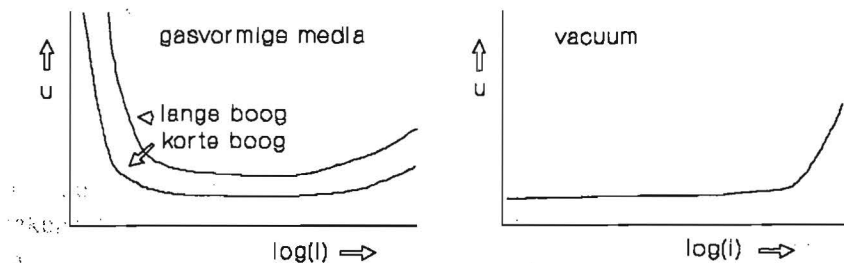
In dit hoofdstuk zal het effect van de boog op het onderbrekingsgedrag behandeld worden, daar waar het de invloed van de boog(spanning) vóór de **nuldoorgang** betreft (punt 1 hierboven). In het volgende hoofdstuk zal de invloed van de (ex)boog op de verschijnselen **na de nuldoorgang** besproken worden (punt 2 hierboven).

6.1 De boogspanning.

Elke boog bouwt een spanning op waarvan de hoogte sterk afhankelijk is van een aantal parameters. Van deze laatst zijn de belangrijkste:

- de stroom door de boog
- de aard van het medium waarin de boog "brandt"
- de lengte van de boog
- de mate van externe koeling van de boog
- het contactmateriaal.

Zonder in detail op de boog als fysisch medium in te gaan (dat gebeurt in hoofdstuk 10), volstaan we hier met het aangeven van tendensen, uiteengezet in fig. 6.1 en verwoord in de onderstaande tabel.



Figuur 6.1. U-i karakteristieken van gas- en vacuümbogen.

Van belang voor de volgende beschouwing is vooral de constatering dat in gasvormige media voor kleinere stromen de **spanning toeneemt bij een afnemende stroom**, m.a.w. de boogkarakteristiek (u-i kurve) heeft daar een negatieve helling. Merk op dat het boogspanningsgedrag in gasvormige media zich essentieel anders gedraagt dan in vacuüm. Dit verschil wordt verder behandeld in hoofdstuk 10.

medium	stroomtoename ($i < 1 \text{ kA}$)	stroomtoename ($i > 1 \text{ kA}$)	lengte- toename	grotere koeling
SF ₆ , lucht, olie	spanning neemt af	neemt toe	neemt toe	neemt toe
vacuüm	spanning blijft constant	neemt toe	blijft constant	niet van toepassing

6.2 De invloed van de boogspanning op de kortsluitstroom

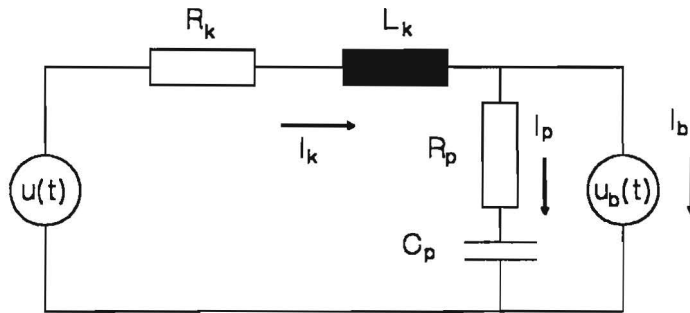
Als we de wisselwerking tussen boog en circuit bestuderen moeten we onderscheid maken op grond van de snelheid van verandering in de boogspanning.

Op welk punt dat onderscheid gemaakt wordt, is afhankelijk van het circuit (fig. 6.2). Hierin is de boogspanning over schakelaar S voorgesteld als $u_b(t)$.

In dit circuit zijn twee tijdconstanten van belang:

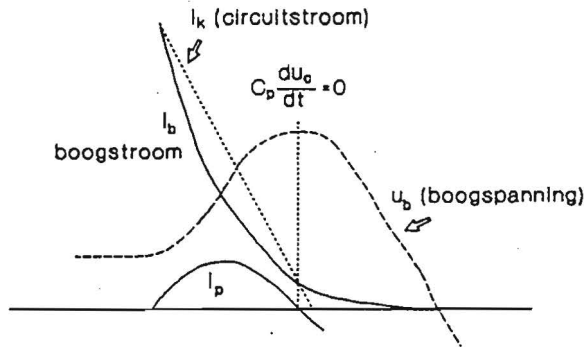
$$\tau_k = \frac{L_k}{R_k} \quad (\text{orde } 50 \text{ ms, } \cos \varphi \approx 0.06)$$

$$\tau_p = R_p C_p \quad (\text{orde } 50 \mu\text{s})$$



Figuur 6.2. Circuit met twee relevante tijdconstanten.

- i) **Snelle veranderingen** met tijdconstanten $\approx \tau_p$ zullen worden vereffend in de paralleltak. Voorbeelden hiervan zijn:
- overlappings van delen van lange geluste bogen die vanwege een abrupte lengte-afname een abrupte spanningsdaling veroorzaken;
 - boog-instabiliteiten (abrupte toename van boog"weerstand" bij kleine stromen);



Figuur 6.3. Beïnvloeding van de boogstroom rond de nuldoorgang door de bluspiek.

- de bluspiek die vlak voor de nuldoorgang (bij lage stroom, zie fig. 6.1) ontstaat als gevolg van het dynamisch karakter van de boog in gasen (zie fig. 6.3). De spanning van de bluspiek laadt condensator C_p op:

$$i_p = C_p \frac{du_c}{dt}$$

waardoor de boogstroom i_b verminderd wordt met deze laadstroom:

$$i_b = i_k - i_p$$

De naar nul dalende circuitstroom beïnvloedt dus niet alleen de spanning over de schakelaar direct (via de bluspiek) maar ook de stroom door de boog (indirect via C_p).

Wanneer $i_k = 0$ ontladst C_p zich over de schakelaar waardoor de nuldoorgang in i_b uitgesteld wordt, wat met een aanzienlijk verlaagde S_i gepaard kan gaan (zie fig. 6.3). Dit laatste effect komt de kans van slagen van de onderbreking **zeer ten goede**.

ii) **Langzame veranderingen** met tijdconstanten $\gg \tau_p$ zullen wel merkbaar zijn in het hoofdcircuit. Het belangrijkste voorbeeld hiervan is boogspanningstoename als gevolg van (geforceerde) boogverlenging.

We zullen dit geval nader analyseren, omdat het belang ervan o.a. voor toepassing in laagspanningsschakelaars zeer groot is.

We nemen voor de verdere uitwerking van dit geval aan dat het voedende circuit (VN) inductief is ($R_k \ll \omega L_k$) en dat het om een klemmsluiting gaat ($Z_{GN} = 0$). De schakelaar wordt weer als spanningsbron $u_b(t)$ voorgesteld en de stroom i_p wordt klein verondersteld t.o.v. i_k : $i_p \ll i_k$; $|Z_p| \gg \omega L_k$.

Verder: $u_n(t) = \hat{U}_n \cos \omega t$. Voor het circuit in fig. 6.2 geldt dan:

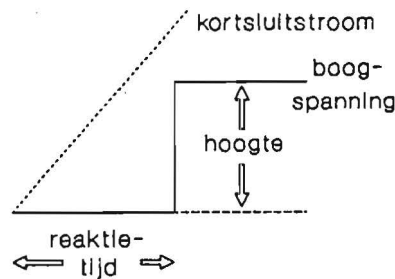
$$L_k \frac{di_k}{dt} + u_b(t) = \hat{U}_n \cos \omega t \quad \rightarrow \quad \frac{di_k}{dt} = \frac{\hat{U}_n}{L_k} \cos \omega t - \frac{u_b(t)}{L_k} \quad (6.1)$$

bij een gegeven $u_b(t)$ kan hieruit $i_k(t)$ berekend worden. We beschouwen nu de benadering **stapvormige boogspanning**.

6.3 Stapvormige boogspanning.

We gaan uit van een stapvormige boogspanning die na een reaktietijd $T'T$ instantaan naar een waarde $u' \hat{U}_n$ springt. Het verloop van de boogspanning wordt dan door twee dimensieloze grootheden gekarakteriseerd, u' en T' :

$$\begin{aligned} u_b(t) &= 0 & \text{als } t < T'T \\ u_b(t) &= u' \hat{U}_n & \text{als } t > T'T \end{aligned} \quad (6.2)$$



Figuur 6.4. Boogspannings-stapfunctie

Hierin representeert u' de fractie van de boogspanning gerelateerd aan de (amplitude van) netspanning \hat{U}_n en T' de fractie van de reaktietijd (vanaf het begin van de kortsluitstroom) gerelateerd aan de periodetijd (20 ms in 50 Hz netten), zoals geïllustreerd in fig. 6.4.

Hiermee kunnen we nu (6.1) oplossen:

$$i_k(t) = \frac{1}{L_k} \int [\hat{U}_n \cos \omega t - u_b(t)] dt$$

Met $\hat{I}_k = \hat{U}_n / \omega L_k$ wordt dit:

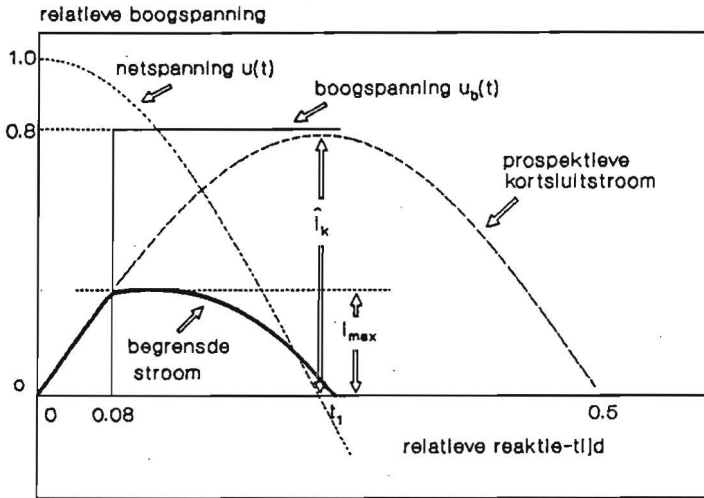
$$\begin{aligned} i_k(t) &= \hat{I}_k \sin \omega t - \omega \hat{I}_k u' \int_{T'T}^t dt = \hat{I}_k [\sin \omega t - \omega u'(t - T'T)] & \text{als } t \geq T'T \\ &= \hat{I}_k \sin \omega t & \text{als } t < T'T \end{aligned} \quad (6.3)$$

De gevolgen van de extra term t.g.v. de boogspanning in (6.3) kunnen groot zijn. In fig. 6.5 is het begrenzendende effect van de boogspanning uiteen gezet: zodra $u_b(t) > u_n(t)$ geldt met (6.1) dat $di_k/dt < 0$ en neemt de kortsluitstroom vanaf dat moment continu af. Dit heeft op de volgende wijzen invloed op de onderbreking:

- de stroom gaat versneld naar nul en de nuldoorgang schuift van $T/2$ naar t_1 ; t_1 is op te lossen uit (6.3):

$$t_1 = \frac{\sin \omega t_1}{\omega u'} + T'T \quad (6.4)$$

- het maximum van de stroom wordt eerder bereikt en de top is lager (I_{\max} i.p.v. \hat{I}_k). Dit laatste effect wordt **stroombegrenzing** genoemd en is belangrijk in smeltveiligheden en laagspanningsschakelaars;



Figuur 6.5. Het principe van (kortsluit)stroombegrenzing door opbouw van boogspanning boven de momentane netspanning.

- de stroomsteilheid neemt voor $u' \ll 1$ en $T' \ll 1$) aan-vankelijk toe, later echter weer af; De laatste effect is in principe gunstig voor de onderbreking, aangezien S_i een van de moeilijkheidsparameters is. Voor laagspanningsschakelaars is de verlaging van S_i van minder belang omdat de onderbreking daar vooral door de waarde van \hat{I}_k bepaald wordt.
- de boogenergie die door koeling moet worden afgevoerd vermindert; hiervoor geldt:

$$W_b = \int_{T'T}^{t_1} i_k(t) u_b(t) dt = \int_{T'T}^{t_1} \hat{I}_k [\sin \omega t - \omega u'(t - T'T)] u' \hat{U}_n dt \quad (6.5)$$

De boogenergie zonder beïnvloeding van de stroom zou zijn (neem $u' = 1$ als referentie):

$$W_{b0} = \int_{T'T}^{\frac{T}{2}} (\hat{I}_k \sin \omega t) \hat{U}_n dt = \frac{\hat{I}_k \hat{U}_n}{\omega} (1 + \cos 2\pi T') \quad (6.6)$$

Voor de boogenergie werken we dit verder uit voor $T' = 0$:

$$W_b = \hat{I}_k \hat{U}_n u' \int_0^{t_1} [\sin \omega t - \omega u' t] dt \quad \text{en} \quad W_{b0} = \hat{I}_k \hat{U}_n \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega t dt = \frac{2 \hat{I}_k \hat{U}_n}{\omega}$$

zodat voor de relatieve boogenergie $W' = W_b/W_{b0}$ geldt:

$$W' = \frac{\omega u'}{2} \int_0^{t_1} (\sin \omega t - \omega u' t) dt = \frac{1}{2} u' \left[1 - \cos \omega t_1 - \frac{1}{2} \omega^2 u' t_1^2 \right] \quad (6.7)$$

met t_1 uit (6.4).

In figuur 6.6 staat de reductie van de relevante onderbrekings-parameters $t_1/(T/2)$, I_{\max}/\hat{I}_k , $S_i/(\omega\hat{I}_k)$ en W' uitgezet als functie van u' voor $T'=0$. Behalve de aanvankelijke toename van S_i zijn al de geschetste tendenzen **gunstig** voor de onderbreking.

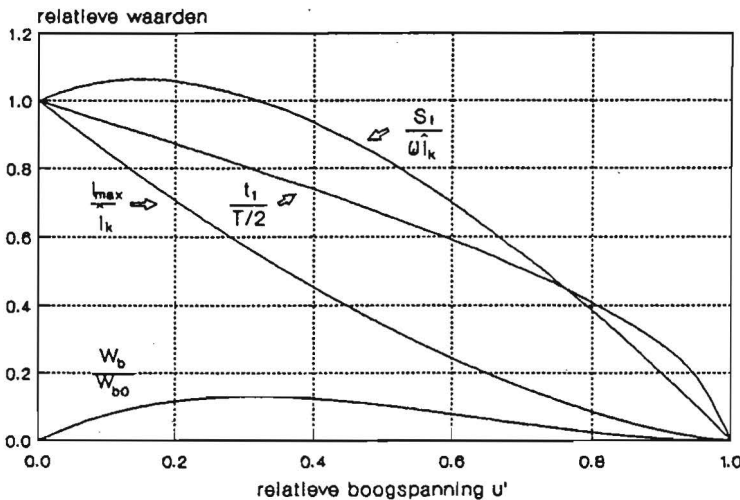
Twee limiet-gevallen zijn nu te onderscheiden:

$\lim_{u' \rightarrow 0} W' = 0$ nulpuntsblussers, NPB en

$\lim_{u' \rightarrow 1} W' = 0$ geforceerde nuldoorgang-blussers, GNB

Dit betekent dat toepassing van zowel zeer lage als zeer hoge boogspanning leidt tot minimalisering van het gedissipeerde vermogen in de schakelaar. De lage-boogspanning schakelaars maken veelal gebruik van SF₆, olie of vacuüm als blusmedium. Vacuümschakelaars kunnen zelfs als een zeer goede benadering van de α -breaker worden beschouwd.

In laagspanningsschakelaars lukt het met relatief weinig moeite een boogspanning op te bouwen groter dan de (topwaarde van de) fase spanning, door een combinatie van koeling (in speciale kunststof kamers), boogverlenging (de boog wordt tussen divergerende contacten gedrukt) en segmentering (opdeling tussen parallel staande plaatjes; zie hoofdstuk 8). Het is duidelijk, dat naarmate de nominale spanning hoger is, het steeds moeilijker wordt hoge waarden van u' te realiseren en aldus de onderbreking te vergemakkelijken.



Figuur 6.6. Reduktie van de onderbrekingsparameters t.g.v. de boogspanning.

Voor veel hoog- en middenspanningsschakelaars is $u' \ll 1$. Alleen in magnetisch beblazen MS schakelaars wordt daarentegen een snelle boogspanningsopbouw verkregen door snelle boogverlenging en segmentering (zie hoofdstuk 8).

Smeltveiligheden (LS en MS) slagen er in een hoge spanning (zelfs $u' > 1$) op te bouwen vanwege de effectieve koeling (zand in direct contact met de boog) en een snelle lengte toename (afbrand van de smeltdraad; hoofdstuk 9).

De belangrijkste reden om geforceerde nulpuntsblussers toe te passen is om de doorgelaten kortsluitstroom te begrenzen van \hat{I}_k (de prospectieve top van de kortsluitstroom) naar I_{\max} (de top van de doorgelaten stroom) en de nuldoorgang te vervroegen om daarmee de **doorlaat-integraal** $\int I$ te beperken

(zie hoofdstuk 3.5 vgl. 3.28).

Voor elke stroombegrenzende component geldt dat altijd enige tijd (de reaktietijd, zie fig. 6.4) verloopt tussen het ontstaan van de kortsluiting en het moment van maximale boogspanning.

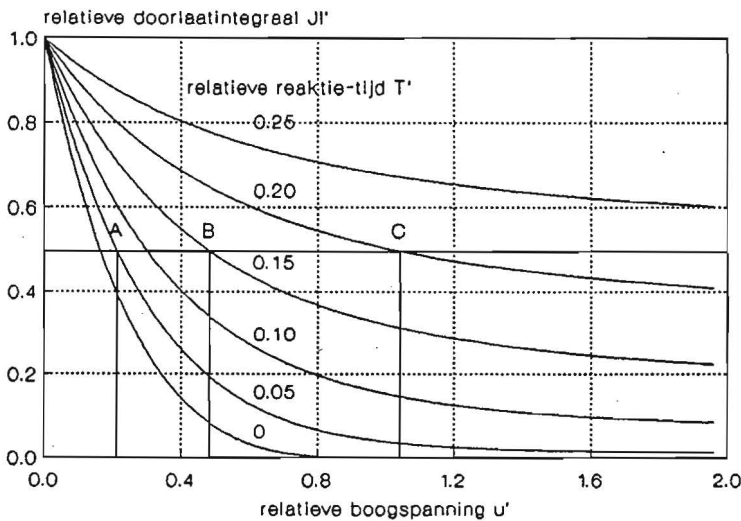
Dit kan mechanische oorzaken hebben (in schakelaars moet de sluiting eerst gedetecteerd worden en daarna kunnen de contacten pas open) of thermische (in smeltveiligheden moet de smeltband eerst op smelttemperatuur gebracht worden). De opbouw van de boogspanning verloopt daarna echter snel, zodat vgl. (6.1) een redelijke benadering is; de tijd $T'T$ is dan de "reaktietijd".

In fig. 6.7 staat de relatieve doorlaat-integraal $JI' = JI/(JI)_0$ met:

$$(JI)_0 = \int_0^{\frac{T}{2}} \hat{I}_k^2 \sin^2 \omega t dt = \frac{\hat{I}_k^2 \pi}{2\omega}$$

(de onbeïnvloede doorlaat-integraal) uitgezet als functie van u' en T' (corresponderend met reaktietijden van 0, 1, 2, 3, 4 en 5 ms).

In fig. 6.8 staat de relatieve boogenergie W' (vgl. 6.5/6.6) op dezelfde manier uitgezet.



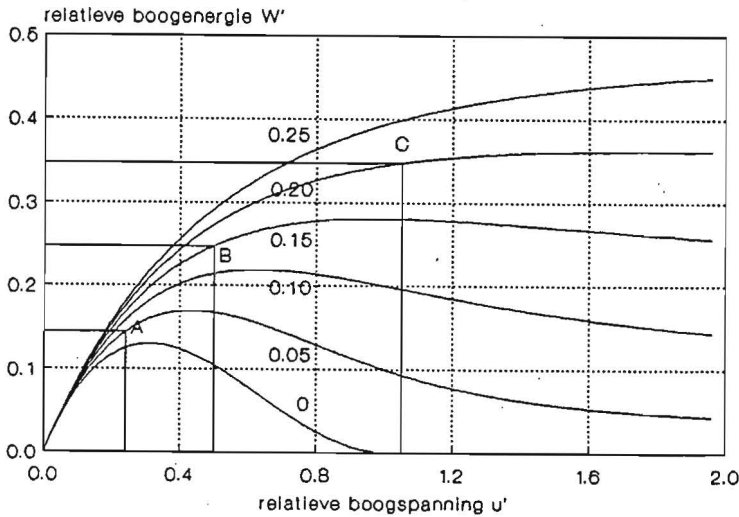
Figuur 6.7. Reduktie van de doorlaatintegraal

Dergelijke kurven kunnen een hulpmiddel zijn om het ontwerp van stroombegrenzende schakelaars te verbeteren. Reduktie van JI' leidt immers tot een lagere thermische belasting van het kortgesloten net, reductie van W' leidt tot een minder zware thermische belasting van de schakelaar.

Een voorbeeld van het gebruik van dergelijke "ontwerpkurven" is het volgende: beperking van de doorlaat-integraal met 50% kan volgens fig. 6.7 verkregen worden door een zeer korte reaktietijd ($T'T = 1$ ms) en een lage boogspanning ($u' = 0.22$) (aangegeven in werkpunt A) ofwel met een minder snel openingsmechanisme ($T'T = 4$ ms) en $u' = 1.05$, (werkpunt C). In fig. 6.8 is dan duidelijk te zien dat "ontwerp A" de voorkeur geniet aangezien de boogenergie daar slechts 40% van "ontwerp C" bedraagt.

In dit voorbeeld kan een snel mechanisme besparend werken op de bluskamer-konstruktie die immers de boogenergie te absorberen krijgt.

Een ander voordeel van stroombegrenzing is de reductie van de doorgelaten stroom en dus van de elektrodynamische belasting van de (kortsluitstroom) voerende rails van installaties. Bedenk dat de kracht tussen geleiders evenredig is met \hat{I}_k^2 ! Tevens kunnen door het begrensd blijven van de kortsluitstroom de verderop in het net geplaatste schakelaars eenvoudiger zijn; bijv. lastschakelaars i.p.v. vermogensschakelaars. Een dergelijk systeem van centrale stroombegrenzing begint op laagspanningsnivo ingang te vinden in woning- en utiliteitsbouw.

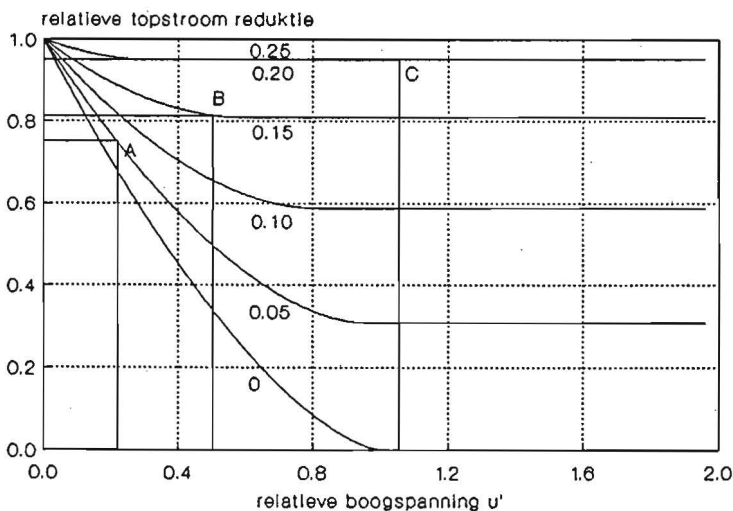


Figuur 6.8. Reductie van de boogenergie

In fig. 6.9 staat de relatieve topstroom reductie I_{\max}/\hat{I}_k gegeven, weer als functie van u' en T' . Ook hieraan is te zien dat een korte reactie-tijd gunstiger is dan een hoge spanningsopbouw in de schakelaar. Dit onderstreept het belang van een "snel werkend" mechaniek.

Voor laagspanningsschakelaars is vooral de maximaal toelaatbare boogenergie van belang als faktor die de specificaties voor toepassing bepaalt. Het boogkamer volume is immers relatief klein en er wordt geen geforceerde koeling toegepast.

Anders dan bij hoog- en middenspanningsschakelaars zijn S_i , S_u en u_1 nauwelijks van invloed op de kans van onderbreken; de spannings gekoppelde parameters zijn klein en daardoor minder kritisch vanwege de lage nominale spanning.



Figuur 6.9. Reductie van de doorgelaten stroom

Uit deze beschouwingen blijkt dus dat niet alleen direct vóór de nuldoorgang (bluspiek!) maar ook gedurende de voorafgaande halve periode al door de boog zelf een (meestal verzachtende) invloed kan worden uitgeoefend op de moeilijkheidsgraad van de onderbreking: de boogstroom en -energie nemen af, de nuldoorgang wordt versneld, de stroomsteilheid kan daarentegen toenemen.

Dit heeft vooral consequenties voor de schakelaar-beproeving in laboratoria voor certificering zoals KEMA. Schakelaars voor de grootste vermogens kunnen daar niet met hun gespecificeerde kortsluitstroom en nominale spanning beproefd worden ("direkte beproeving"). In speciale circuits wordt de

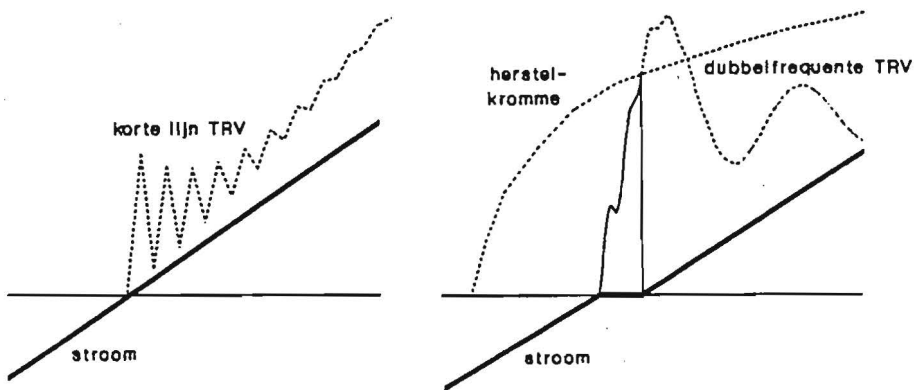
energie vóór de nuldoorgang toegediend bij hoge (kortsluit-)stroom en verlaagde spanning, na de nuldoorgang bij echte (over)spanning en lage stroom (hoge bron impedantie).

Het is duidelijk dat bij deze zgn. "synthetische beproeving" vóór de nuldoorgang de relatieve boogspanning u' groter zal zijn dan in de netten waardoor de schakelaar "te gemakkelijk beproefd" kan worden. Hiervoor dient gecorrigeerd te worden. In hoofdstuk 11 wordt uitvoerig ingegaan op de beproeving van schakelaars.

7. HERONTSTEKINGEN

Na de nuldoorgang zal het geïoniseerde medium waaruit de boog bestaan heeft niet onmiddellijk verdwenen zijn, waardoor er een zekere tijd een restgeleiding gehandhaafd blijft. Onder invloed van de wederkerende spanning kan dit leiden tot een kleine stroom (enkele ampères) de zgn. **reststroom** (of "post arc current") waardoor opnieuw energie aan de contactbres toegevoerd wordt. Is deze energie groter dan de afgevoerde energie dan stijgt de temperatuur van het geleidend kanaal snel en treedt er een thermische doorslag op, gevolgd door een herontsteking. We noemen deze herontsteking **thermische herontsteking** (thermisch vanwege de hoge gastemperatuur ≥ 3000 K).

Anders van karakter is de **diëlektrische herontsteking**. Deze treedt op wanneer het restplasma weliswaar (nagenoeg) verdwenen is, maar er toch een doorslag van de gap optreedt, ofwel omdat de wederkerende spanning te groot is ofwel omdat de contactafstand (nog) te klein is.



Figuur 7.1. Thermische en diëlektrische herontsteking

In het Engels wordt thermische herontsteking aangeduid met "reignition", (Duits "Wiederzündung"). Diëlektrische herontsteking optredend na $\frac{1}{4}T$ na de nuldoorgang wordt wel als "restrike" (Duits: "Rückzündung") aangeduid.

Het gevolg van een herontsteking is het opnieuw ontstaan van een boog. Daardoor kan de circuitstroom weer gaan vloeien en de onderbreking bij deze nuldoorgang is mislukt. Naast dit ongunstige effect hebben herontstekingen de gunstige eigenschap op een natuurlijke wijze overspanningen te begrenzen.

Vanwege de rol van de TRV (moet voldoende groot zijn!) spelen herontstekingen uitsluitend een rol in midden- en hoogspanningsschakelaars.

7.1 Thermische herontsteking.

Op **microscopische** schaal ontstaat de thermische doorslag doordat de aanwezige ladingdragers in het hete gas veel thermische energie bevatten en gericht gaan bewegen (de rest-stroom) onder invloed van de TRV en via botsingen en ionisaties een nieuwe, goed geleidende ontladingsbaan veroorzaken.

Meteen na de nuldoorgang is de gasdruk, ofwel de deeltjesdichtheid (n) groot. Hierdoor is de vrije weglengte (λ , de gemiddelde weglengte die een deeltje aflegt tussen twee botsingen, evenredig met $1/n$) klein vanwege het grote aantal botsingen per tijdseenheid. De energie W_E die uit het elektrische veld $E_{trv} = u_{ab}/d$ met u_{ab} de spanning over de schakelaar; zie hoofdstuk 4) opgenomen kan worden is dan ook beperkt tot $W_E = eE_{trv}\lambda$, met e de elementaire lading. De thermische energie W_t , echter is meteen na de nuldoorgang aanzienlijk: $W_t = 3/2 kT$ met k de constante van Boltzmann en T de temperatuur, in de orde van 5000 - 10.000 K.

De eis voor een thermische doorslag op microscopische schaal luidt:

$$W_{tot} = W_t + W_E \approx W_t > W_i \quad (7.1)$$

met W_i de ionisatie-energie van het gas (ca 15 eV). Bij verdere afkoeling enige tijd (enkele tientallen μs) na de nuldoorgang wint de term W_E aan betekenis omdat:

- a) de wederkerende spanning toeneemt en
- b) de vrije weglengte toeneemt door expansie van het dichte gas naar de omgeving. Deze expansie verloopt vooral in vacuümschakelaars zeer snel ($< 1 \mu\text{s}$). De term W_i daarentegen wordt kleiner door verdere afkoeling. Netto neemt de kans op doorslag af omdat tevens het aantal botsingen en dus het aantal nieuw gevormde ladingdragers afneemt; doorslag is per definitie die toestand waarbij net "voldoende" (ca 10^8) elektronen zich bewegen van kathode naar anode.

Een meer kwantitatieve analyse is moeilijk te geven omdat de relevante parameters als T en n onbekende functies zijn van het stroomverloop voor de nuldoorgang en de beblazing (koeling). De parameter E_{trv} is eenvoudiger te kwantificeren en wordt bepaald door (verloop van) contactafstand en wederkerende spanning.

Macroscopisch kan de voorwaarde voor thermische herontsteking gegeven worden als een energiebalans:

$$i_r(t) u_{AB} > P_k(t) \quad (7.2)$$

met $i_r(t)$ de reststroom. Het aan het restplasma toegevoerde vermogen is groter dan het koelvermogen P_k . Het verschil tussen de vermogens wordt gebruikt om het ontladingskanaal in temperatuur te doen stijgen, waardoor de geleiding en daarmee de stroom weer toeneemt. Dit zichzelf versterkende effect leidt tot thermische doorslag.

Uit het voorafgaande blijkt dat thermische herontstekingen zeer kort (enkele tientallen μs) na de nuldoorgang optreden en dat de spanning waarbij dit gebeurt laag blijft (tot enkele kV). Omdat het "tijdvenster" waarin thermische doorslag op kan treden zo klein is, is de spanningssteilheid van de TRV meteen na de nuldoorgang (S_u) van cruciaal belang. Deze bepaalt immers de reststroom $i_r(t)$ in (7.2). Wanneer het eerste maximum u_1 van de TRV net binnen het tijdvenster valt - dit is met een niet-oneindig sterk voedend net het geval als de frequentie van het voedende net $f_k > 10 \text{ kHz}$ (zie par. 4.4) - zal er na dit maximum geen thermische herontsteking meer te verwachten zijn omdat de TRV (voorlopig) daalt (zie fig. 7.1).

De grotere S_u in deze circuits, in vergelijking tot circuits met een oneindig sterk voedend net, vergroot echter de kans op thermische herontsteking. Het gevaarlijkst voor thermische herontsteking is echter de korte-afstands-fout (zeer grote S_u), waarvoor vooral SF_6 -schakelaars gevoelig zijn (zie fig. 7.1).

Thermische herontsteking vóór de nuldoorgang treedt op in het geval van stroombreking (zie par. 5.3). De initiële stijging van de TRV die gelijk van teken is met de boogspanning (zie fig. 5.7) kan tot vele herhaalde herontstekingen leiden die voorkómen dat de hoge overspanningen worden bereikt, die karakteristiek zijn bij stroombreking.

Herontstekingen na de nuldoorgang komen bijna altijd voor in olie- of gasgevulde schakelaars wanneer contactscheiding minder dan $T/2$ "geleden" plaats vond. De vacuümschakelaar is meestal wél in staat om te onderbreken op de eerste nuldoorgang.

7.2 Diëlektrische herontsteking.

Diëlektrische herontsteking treedt op nadat de restgassen afgekoeld zijn en de reststroom verdwenen is. In het "koude gas" kan doorslag nu uitsluitend optreden onder invloed van een grote veldsterkte E_{trv} in de gap. De altijd aanwezige geladen deeltjes worden versneld door dit veld en winnen tussen elke botsing een energie $W_e = \lambda E_{\text{trv}} e \gg W_i$. Bij elke (ioniserende) botsing treedt een verdubbeling van elektronen op zodat een lawine ontstaat, zoals beschreven in de theorie van de Townsend-doorslag. Als de lawine voldoende ladingdragers levert is de diëlektrische doorslag een feit.

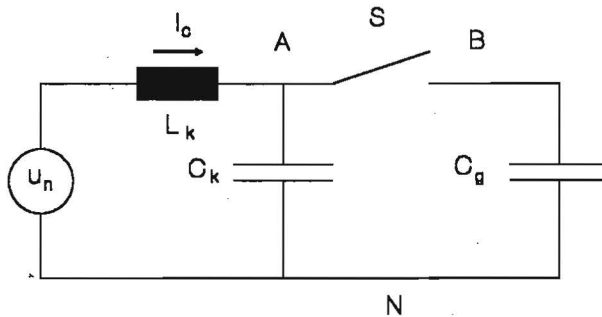
Het criterium hiervoor is dus:

- a) voldoende energiewinst (uit het E-veld) tussen twee botsingen om te ioniseren (grote veldsterkte en niet te grote dichtheid);
- b) er moeten voldoende botsingen optreden (voldoende dichtheid).

Afgeleid kan worden dat de uit dit proces volgende doorslagspanning (U_d) een functie is van pd , met p de druk en d de contact-afstand. De functie $U_d = f(pd)$ wordt "Paschen-kromme" genoemd en is specifiek voor het medium. Van belang is vooral de minimale doorslagspanning (ook wel "Paschen-minimum" genoemd). Voor SF_6 is deze $U_{d,min} = 507 \text{ V}$ en wordt bereikt voor $pd = 3.4 \cdot 10^{-4} \text{ bar cm}$.

7.2.1 Spanningsescalatie.

Een diëlektrische herontsteking doet zich voor als de veldsterkte groter is dan de doorslagveldsterkte. Een grote veldsterkte wordt gerealiseerd door hoge TRV's en/of kleine contactafstanden. Beide situaties kunnen leiden tot (zeer) grote overspanningen door het mechanisme van **spanningsescalatie**: het stapsgewijs toenemen van de TRV door herhaalde herontstekingen.



Figuur 7.2. Circuit bij capacatieve spanningsescalatie.

Dit wordt toegelicht met twee praktijk-situaties:

a) **Spannings-escalatie door hoge TRV.**

Illustratief hiervoor is de onderbreking van een capacatieve belasting (zie par. 4.7), voor het eenvoudige circuit geschetst in fig. 7.2.

De onderbreking vindt plaats op de nuldoorgang van de stroom en is niet moeilijk (kleine \hat{I} , kleine S_i , kleine S_u). Op de nuldoorgang is $U_{BN} = \hat{U}$ en blijft dat. Een halve periode later is de spanning: $U_{AB} = U_{AN} - U_{BN} = -\hat{U} - \hat{U} = -2\hat{U}$. Stel dat bij een dergelijke overspanning ($A = 2$) een herontsteking optreedt dan wordt de stroom $i_c(t)$ gegeven door:

$$-\hat{U} = L_k \frac{di_c}{dt} + \hat{U} + \frac{1}{C_g} \int i_c dt \tag{7.3}$$

met als oplossing:

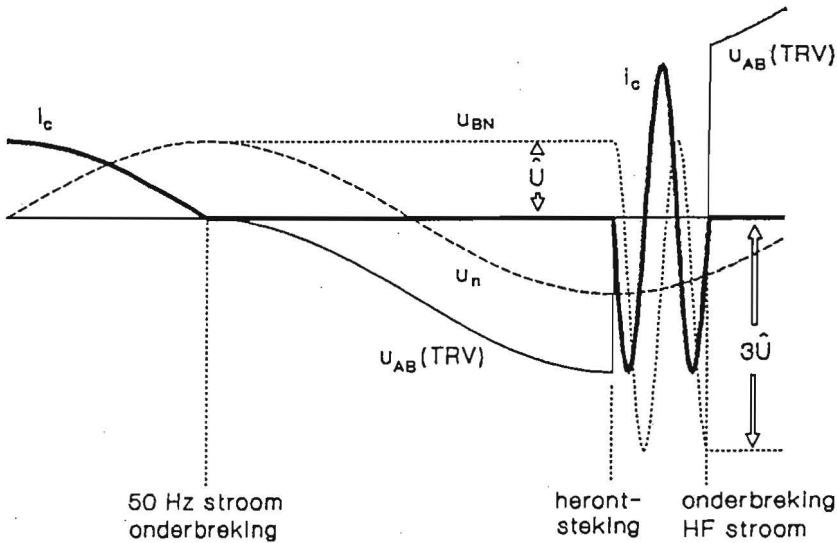
$$i_c(t) = -2\hat{U} \sqrt{\frac{C_g}{L_k}} \sin \omega_{hf} t, \quad \text{met } \omega_{hf} = \frac{1}{\sqrt{L_k C_g}} \tag{7.4}$$

dit is een hoogfrequente herontstekingsstroom waarvan de amplitude vooral bij een sterk voedend net groot kan zijn. Deze stroom is moeilijk te onderbreken vanwege de grote $S_i = 2\hat{U}/L_k$ én de grote S_u . Voor de condensatorspanning u_{BN} geldt:

$$u_{BN}(t) = u_{BN}(0) + \frac{1}{C_g} \int i_c dt = \hat{U} + 2\hat{U} (\cos \omega_{hf} t - 1) \tag{7.5}$$

Het verloop van stromen en spanningen is gegeven in fig. 7.3.

Als $i_c(t)$ toch onderbroken wordt - b.v. door een schakelaar die weinig moeite heeft met grote waarden van S_i (vacuümschakelaar) of nadat door demping S_i tot lagere waarden is teruggebracht - kan U_{BN} op dat moment (in het ongedempte geval) oplopen tot $-3\hat{U}$ en blijft dat ("chargetrapping").



Figuur 7.3. Stroom- en spanning bij capacitieve spanningsescalatie.

Ca. $\frac{1}{2}T$ later is $U_{AB} = 4\hat{U}$, waardoor bij herontsteking dan een stroom gaat lopen met amplitude:

$$\hat{i}_c = 4\hat{U} \sqrt{\frac{C_g}{L_k}}$$

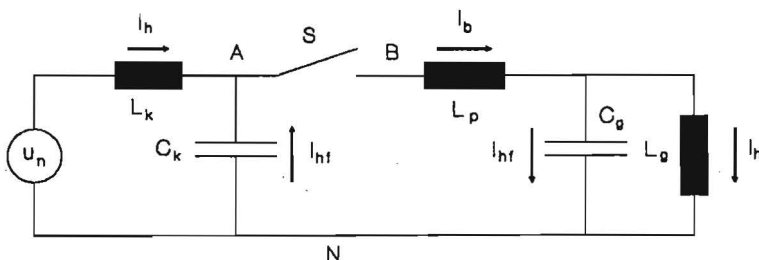
die de condensator op kan laden tot $U_{BN} = 5\hat{U}$, enz. Het is duidelijk dat in theorie zeer grote overspanningen mogelijk zijn, maar dat door demping en weglekken van lading deze situatie in echte circuits wat minder dramatisch is.

b) **Spanningsescalatie door kleine contactafstanden.**

In dit geval vindt de herontsteking plaats doordat op de stijgende flank van de TRV de spanning groter wordt dan de doorslagspanning van een nog kleine gap. Als de contact-scheiding vlak vóór de nuldoorgang plaats gevonden heeft is de gap vlak na de nuldoorgang nog klein en de doorslagspanning laag. Bij steile of hoge TRV's snijdt de TRV de herstelkromme bij een doorslagspanning U_d . Gebeurt dit in het circuit van fig. 7.4 dan is in te zien dat op het moment van herontsteking ook in dit geval een hoogfrequente stroom $i_{hf}(t)$ begint te lopen ($L_p \ll L_k \ll L_g$):

$$i_{hf}(t) \approx U_d \sqrt{\frac{C_{hf}}{L_p}} \sin \omega_{hf} t \text{ met } \omega_{hf} \approx \frac{1}{\sqrt{L_p C_{hf}}} \text{ en } C_{hf} = \frac{C_k C_g}{C_k + C_g} \quad (7.6)$$

$\omega_{hf}/2\pi$ kan in dit geval veel hogere (enkele honderden kHz) waarden aannemen dan in de voorgaande situatie bij capacitieve onderbreking.



Figuur 7.4. Circuit voor inductieve spanningsescalatie.

De amplitude van de stroom is hier echter lager, enkele honderden A, waardoor S_i in dezelfde orde ligt als in situatie a).

Het is belangrijk te realiseren dat de stroom door de ontstane schakelaarboog $i_b(t)$ behalve de hoogfrequente component $i_{hf}(t)$ tevens de 50 Hz-komponent:

$i_h(t) \approx (\hat{U}/L_g)t$ bevat.

Wanneer de som-(boog) stroom dan nul wordt: $i_b = i_h + i_{hf} = 0$

kan de boog doven - afhankelijk van het type schakelaar - maar dan bevat L_g nog de magnetische energie $\frac{1}{2}L_g(\Delta I)^2$, met $\Delta I = (\hat{U}/L_g)\Delta t$, Δt de duur van de hf stroom.

In woorden: doordat t.g.v. herontsteking de gap weer tijdelijk geleidt, laadt de zelfinductie opnieuw magnetische energie ("current trapping"), hier van 0 tot $\frac{1}{2}L_g(\Delta I)^2$.

Het gevolg hiervan is dat de **volgende TRV steiler en hoger** kan worden (zie fig. 7.5), overeenkomstig de onderbreking met stroombreking waarbij de stroom breekt vanaf ΔI (zie par. 5.3).

Tevens stijgt de doorslagspanning als gevolg van verder diëlektrisch herstel van de gap. Daardoor wordt de TRV niet alleen steiler (door de steeds groter wordende ΔI) maar reikt ook tot hogere spanning.

Aldus ontstaat ook in deze situatie een opeenvolging van herontstekingen (zie fig.7.5) die zich echter in een veel kortere tijdsspanne (enkele honderden μs) afspeelt dan de capacatieve spanningsescalatie (enkele tientallen ms). In veel gevallen zullen dan ook de bovenbeschreven herontstekingen meestal een tussenvorm zijn tussen puur thermische en puur diëlektrische fenomenen.

De spanningsescalatie duurt voort totdat of:

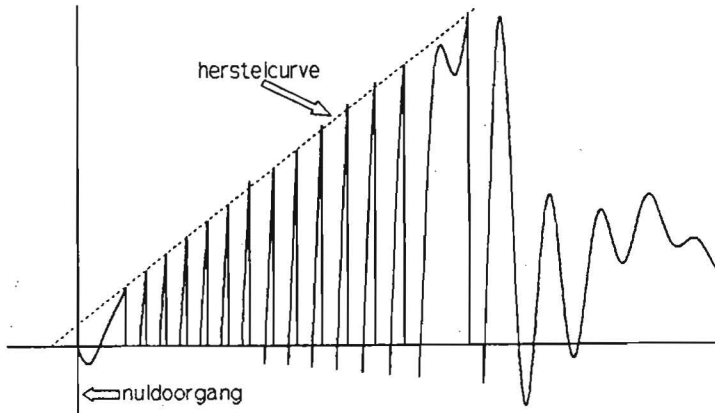
- i) $u_d(t) > u_{ab}(t)$: het laatste spanningsmaximum levert meestal grote amplitude-factoren, maar de onderbreking is succesvol; of:
- ii) $i_b(t) > 0$ voor alle t: er is geen hoogfrequente nuldoorgang meer en de 50 Hz-stroom loopt nog minstens een halve periode; de overspanning blijft beperkt tot U_{max} maar de onderbreking is voorlopig mislukt.

In het voorafgaande is naar voren gekomen dat de potentie om ook extreem grote stroomsteilheden te onderbreken - vanwege de kans op daaruit volgende spanningsescalatie - eerder als negatief dan als positief beoordeeld moet worden.

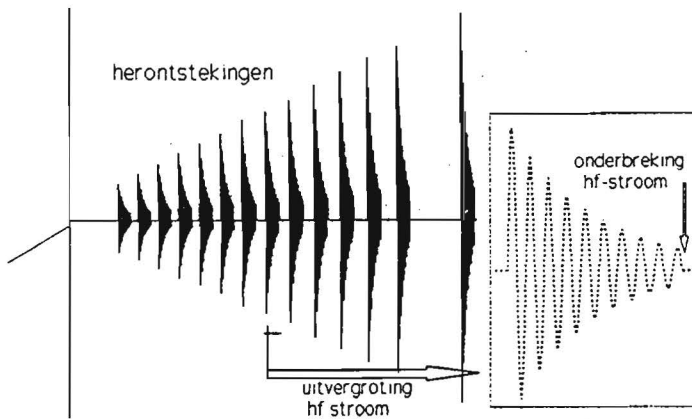
Van alle schakelaars zijn vooral vacuümschakelaars (en in mindere mate SF₆-schakelaars) in staat om zeer steile stromen (tot enkele honderden A/ μs) te onderbreken terwijl de grootste 50 Hz-steilheid hooguit enkele tientallen A/ μs kan bedragen. Om die reden spreekt men wel van "harde" onderbrekers, in tegenstelling tot de "zachte" schakelaars waar de generatie van overspanning van nature eerder begrensd wordt door een langzaam verlopend herstel. De olieschakelaar is een typische representant van de laatste categorie. Rest-stromen kunnen hier nog lang na de onderbreking voortduren door het ontstaan van een (anormale) glimontlading in het hete (waterstof) gas, althans na het onderbreken van kleine stromen.

7.2.2 Virtuele stroombreking.

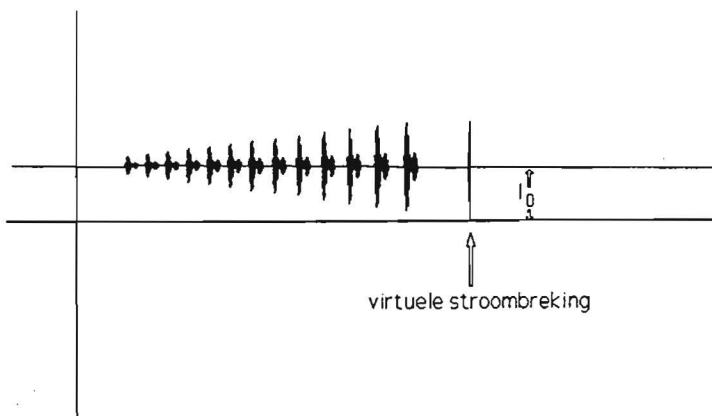
In driefasen circuits kunnen gevaarlijke overspanningen ontstaan door de zg. virtuele stroombreking. Hierbij herontsteekt de pool van de eerst-blussende fase - bijvoorbeeld door een toevallige contact-scheiding vlak vóór de nuldoorgang - met als gevolg een hoogfrequente stroom door die pool. Door inductieve en/of capacatieve koppeling kan in (een van de) naburige fase(n) een nuldoorgang geforceerd worden door superpositie van de ingekoppelde stroom en de 50 Hz-stroom, zie fig. 7.5 beneden, waar herontsteking in de R-fase na enige herhaalde herontstekingen tot virtuele stroombre-



Herontsteking t.g.v. contactscheiding vlak voor de nuldoorgang. Het proces van herhaalde herontstekingen stopt pas als de TRV de herstelcurve niet meer snijdt. De steile spanningsfronten kunnen windingen van machines beschadigen.



Na elke herontsteking ontstaat een hoog-frequente stroom (frequentie enkele honderden kHz). Deze wordt onderbroken na enkele perioden, maar intussen laadt de belastingsinductie L_g stroom uit de bron, waardoor de magnetische energie in L_g steeds een beetje toeneemt en elke volgende TRV hoger en steiler wordt.



Figuur 7.5. Spanningsescalatie (boven), herhaalde herontsteking (boven, midden) en virtuele stroombreking (beneden).

Door inductieve (en capacatieve) koppeling tussen de fasen koppelt een deel van de hf stroom in op de buurfase en wordt gesuperponeerd op de daar lopende 50 Hz stroom. Dit kan op na enkele herontstekingen leiden tot een nuldoorgang van de somstroom. Als de schakelaar in deze fase geopend is (met boog!) kan dit een onderbreking betekenen (als afgebeeld).

king in de buurfase leidt. Dit betekent stroombreking in de naburige fase vanaf een momentane stroomwaarde:

$$i_0 = \hat{I} \sin \frac{\pi}{3} = \frac{1}{2} \sqrt{3} \frac{u_f}{\omega_n L} \quad (7.6)$$

zodat de maximale amplitude-faktor met (5.10) gegeven wordt door:

$$A = I + \sqrt{I + \frac{3\omega_0^2}{4\omega_n^2}}, \quad \text{met } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_g C_g}} \quad (7.7)$$

deze is aanzienlijk groter dan in eenfase stroombreking, waar $i_0 \ll \hat{I}$.

7.2.3 Late herontstekingen.

Tot slot vermelden we nog de zg. late herontstekingen ("late restrikes" of "non sustained disruptive discharges").

In vacuümschakelaars voor de hogere middenspanning (36 kV) is recentelijk een (nog goeddeels onbegrepen) vorm van (diëlektrische) herontsteking ontdekt, die echter uiterst zelden optreedt: in geopende toestand zijn herontstekingen geconstateerd vele perioden (tot ca. 10 s na de onderbreking). Een mogelijke verklaring hiervoor is de vorming van metallische uitsteekseltjes op het contactoppervlak onder invloed van de hoge veldsterkte of de (langdurige) aanwezigheid van druppeltjes.

MIDDENSPANNINGSSCHAKELAARS

Holec Middenspanning B.V.

Inhoudsopgave

DE TECHNISCHE UITVOERING VAN VERMOGENSSCHAKELAARS

8a.1	Blusmedia in MV vermogensschakelaars	8a-1
8a.1.1	olie als blusmedium (bulk oil, minimum oil)	8a-1
8a.1.2	lucht als blusmedium (atmosferische lucht, druklucht)	8a-3
8a.1.3	SF6 als blusmedium (puffer, autoexpansie, roterende boog)	8a-5
8a.1.4	vacuum als blusmedium	8a-8
8a.2	Opstelling van vermogensschakelaars	8a-13
8a.2.1	uitrijdbare opstelling	8a-14
8a.2.2	vast ingebouwde opstelling	8a-15

bijlage: Switching voltages in MV networks, CIRED 1989

8a.1 Blusmedia in MV vermogensschakelaars

Het belangrijkste onderscheid tussen de vele soorten vermogensschakelaars wordt gevormd door het blusmedium. Het is duidelijk dat de eigenschappen van dit medium (of blusgas) en de wijze waarop dit wordt toegepast de schakelprestaties bepalen. In dit hoofdstuk gaan we in op deze twee aspecten en zullen aan de hand daarvan een aantal schakelaar-typen behandelen.

De belangrijkste eigenschappen van "het ideale blusmedium" zijn:

- **Groot elektrisch isolatievermogen** in koude toestand.
- Uitstekende **afvoer van ladingdragers en thermische energie** rond de nuldoorgang (efficiënte blussing rond de nuldoorgang en snel herstel).

Deze eigenschappen worden aangetroffen in moleculaire gasen waaronder de blusgassen lucht, H₂ (ontlede olie), SF₆.

Alle vermogensschakelaars in de MV en de HV zijn van het type **nulpuntsblusser**. Na het openen van de kontakten blijft de stroom gewoon doorlopen (drijvende netspanning veel groter dan boogspanning) totdat de natuurlijke stroomnuldoorgang van de sinus bereikt wordt. Op dit moment moet de isolatie tussen de kontakten zeer snel volwaardig worden, zodat de stroomsinus niet meer kan aanstijgen en de boog geblust is: de schakelaar heeft afgeschakeld.

Nulpuntsblusser: **Gemakkelijke ioniseerbaarheid** (lage ionisatie-energie) maar **slechte warmtegeleiding bij stroomgeleiding** (vergt lage boogenergie door een lage boogspanning).

Gedwongen nuldoorgangsblusser: **Moeilijke ioniseerbaarheid en zeer goede warmtegeleiding bij stroomgeleiding** (stroombegrenzing door hoge boogspanning).

Voorbeeld van een gedwongen nuldoorgangs blusser is een 24 kV-smeltveiligheid (patroon).

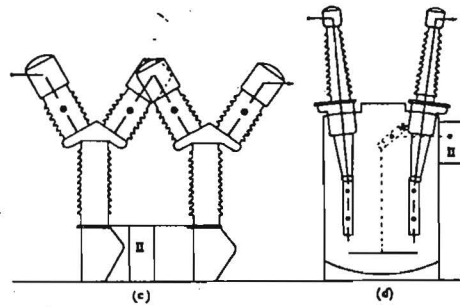
Qua technische **konstruktie** zijn alle olie/gas-gevulde schakelaars voor midden- en hoogspanning ontworpen om een **zo groot mogelijke koeling van de boog rond de stroomnuldoorgang** tot stand te brengen **met zo weinig mogelijk energietoevoer van buiten**. Meestal overheerst tot aan de nuldoorgang **konvektieve koeling**, terwijl na de nuldoorgang **geleiding** het belangrijkste koelmechanisme is. In hun konstruktie verschillen schakelaars uitsluitend in de wijze waarop een effectieve koeling verwezenlijkt wordt.

De vacuümschakelaar is een buitenbeentje omdat noch (konvektieve) koeling noch een blusmedium aangebracht is. De werking is gebaseerd op zeer snelle expansie van de boogprodukten (contactmetaaldamp) naar de "vacuüm" omgeving. Hierdoor wordt zowel thermische energie afgevoerd ("meegenomen door de deeltjes") als diëlektrisch herstel opgebouwd: de deeltjesdichtheid wordt zo gering dat de doorslagspanning zeer groot is (geen botsingen).

Ook in laagspanningsschakelaars wordt geen actieve koeling aangebracht. Het hierin toegepaste principe is steeds de boog **zoveel mogelijk te verlengen** en in contact te brengen met een **koude omgeving**. Hierdoor neemt de boogspanning toe en wordt het blusproces vergemakkelijkt.

8a.1.1 Olie als blusmedium.

Al sinds de vorige eeuw is olie een veelgebruikt isolatie- en blusmedium. Door een boogontlading in olie (C₁₈H₃₈) wordt de olie in een groot aantal gasvormige componenten ontleed.



Live tank and dead tank circuit breakers

- a Live tank single break
 - b Dead tank double break
 - c Live tank 4 break
 - d Dead tank 4 break
- I interrupters
 II mechanism
 III current transformer

Figuur 8a1. Olietank-schakelaars.

De belangrijkste (ca. 70%) is waterstof (H_2), dat bijzonder goede koelende eigenschappen bezit. Daarnaast komt er acethyleen (C_2H_2 , ca. 25%) en methaan vrij (CH_4 , ca. 5%).

Uit metingen is bekend dat onder standaard condities ca. 0.7 liter gas gevormd wordt per kJ boogenergie. Dit gas, in de nabije omgeving van de boog, stijgt met de temperatuur in druk waardoor de koeling sterk toeneemt. Nadelig is het ontstaan van vaste koolresten die vooral samen met water het isolatievermogen verlagen en daarmee de onderbrekingseigenschappen beïnvloeden. Dit maakt een verticale bouwwijze noodzakelijk, om te vermijden dat vaste resten op isolerende delen neerslaan. In moderne olie(arme) schakelaars is daarom een scheiding aangebracht tussen de isolatie-olie en de blusolie.

De olie-vermogensschakelaar.

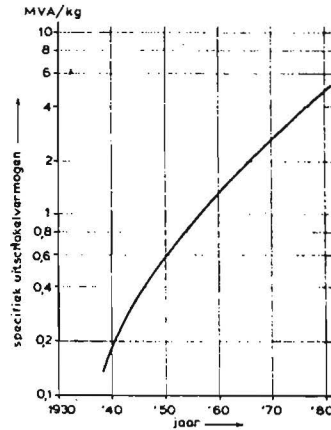
Evenals SF_6 -schakelaars, zijn olie-schakelaars op alle spanningsnivo's vanaf 3 kV vertegenwoordigd. Vanaf ca. 150 kV moeten meerdere bluskamers in serie toegepast worden.

Historisch gezien begon de ontwikkeling van de olieschakelaar met de **olietankschakelaar**, waarbij onderscheid gemaakt wordt naar de wijze van aarding van de olieketel. In de "deadtank"-schakelaar is de olieketel van metaal en geaard, de "live-tank"-schakelaar heeft een van aarde geïsoleerde opstelling van het oliereservoir en bevat veel minder olie. In fig. 8a1 (uit Flurscheim: "Power circuit breaker theory and design", Peregrinus, 1975) zijn beide schematisch weergegeven met 4 onderbrekings-plaatsen in serie.

Vanwege met name brandgevaar is vanaf de jaren dertig het streven gericht geweest op het reduceren van de hoeveelheid olie. Dit leidde tot de ontwikkeling van de **olie-arme schakelaar** ("minimum oil"- of "low oil volume-circuit breaker"), waarin de hoeveelheid olie slechts ca. 1% (enkele liters) bedraagt van de "bulk oil"-schakelaars. In continentaal West Europa is dit laatste type geheel van de markt verdrongen, in de Angelsaksische en Oosteuropese staten is de "bulk-oil"-schakelaar nog wijd verbreid. Tot de komst van de SF_6 - en vacuümschakelaar in de jaren zestig heeft er felle concurrentie bestaan tussen "olie-arm" en "drukvlucht"; onder invloed hiervan heeft de olie-arme schakelaar een gigantische ontwikkeling doorgemaakt, geïllustreerd in fig.8a2. Hedendaagse verbeteringen zijn voornamelijk geconcentreerd op verkleining van de onderhoudsbehoefte.

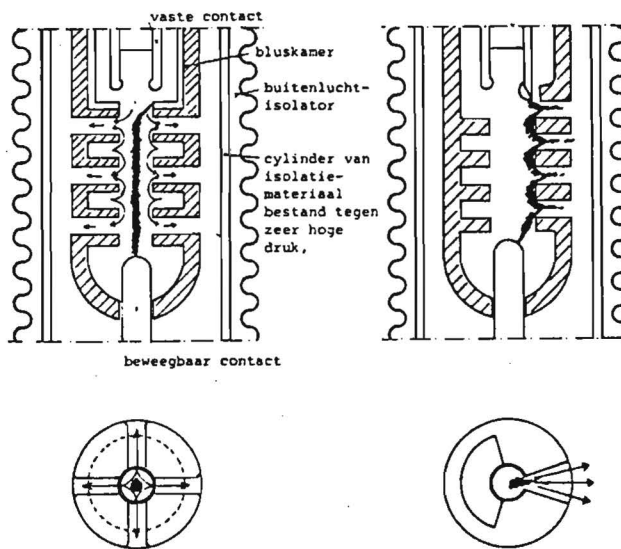
Het principe van de olie-arme schakelaar is dat de druk (30 - 50 bar), die ontstaat door verdamping en dissociatie van de olie, in een beperkte ruimte gehouden wordt. Dit gebeurt door één van de contacten te laten bewegen door een speciale bluskamer waarin slechts drukontlasting optreedt zodra het bewegende contact zijdelings aangebrachte openingen passeert en zo ontsluit. Het waterstofgas ontsnapt dan door de openingen en oefent een sterk koelende werking uit op de boog. Afhankelijk van de plaatsing van de openingen spreekt men van axiale (of langs-) beblazing of van transversale (dwars-) beblazing. Dit is verduidelijkt in fig.8a3.

Zoals bij alle typen schakelaars die de eigen boogenergie voor blussing gebruiken kan de blussing moeilijk zijn voor lage stromen. In olie-arme schakelaars is hiervoor ten eerste een extra olie-reservoir



Figuur 8a2. *Toename van het specifieke uitschakelvermogen (Sprecher & Schuh).*

("compensatie kamer") aangebracht aan de onderkant van de bluskamer; ten tweede wordt veelal "olie injectie" toegepast: met een externe zuiger wordt extra olie in de bluskamer gepompt.



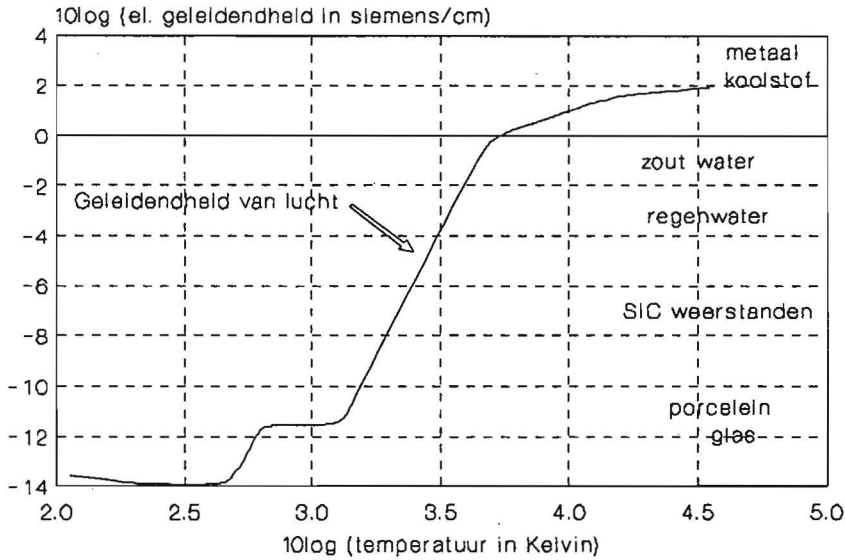
Figuur 8a3. *Principe van axiale (links) en transversale beblazing.*

8a.1.2 Lucht als blusmedium.

Sinds het allereerste begin van de elektrische energievoorziening is lucht gebruikt als blusmedium. Het is goedkoop, licht, onbrandbaar, chemisch weinig actief en goed isolerend. De warmte geleiding van stilstaande lucht is niet groot maar de door turbulenties (konvektie) veroorzaakte stromingen verhogen de geleiding aanzienlijk. De elektrische geleidbaarheid als functie van de temperatuur is gegeven in fig. 8a4. Het grote bereik (ca. 16 dekaden!) is opmerkelijk.

Voor het gebruik in schakelaars moeten we onderscheid maken tussen:

- a) **lucht van atmosferische druk**, toegepast tot een nivo van ca. 24 kV;
- b) **lucht onder hoge druk** (tot honderden bar), toegepast tot de hoogste hoogspanning.



Figuur 8a4 De elektrische geleidbaarheid van lucht als functie van de temperatuur

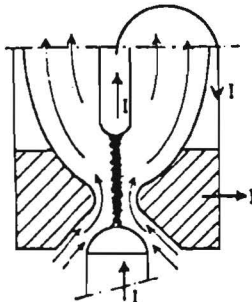
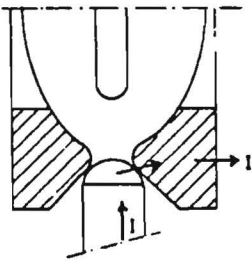
De open-luchtschakelaar.

In deze schakelaars staat de lucht in de bluskamer altijd in direct contact met de buitenlucht, waardoor de hete (en verbruikte gassen) vrij de bluskamer verlaten. Dit heeft tot gevolg dat in metaal-omsloten binnen-installaties een relatief grote loze afblaasruimte aanwezig moet zijn boven of achter de bluskamers, die eveneens behoorlijke (bij 24 kV ca. 1.20 m!) afmetingen hebben. Mede hierdoor wordt de open-lucht schakelaar ("airbreak circuit breaker") op middenspanningsnivo nog maar weinig toegepast.

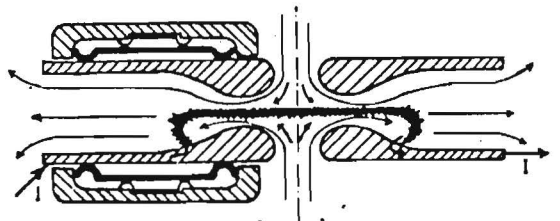
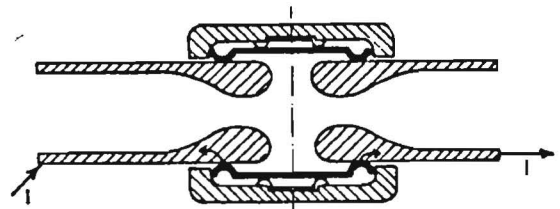
De drukluchtschakelaar.

De drukluchtschakelaar ("air blast circuit breaker") staat qua blusprincipe op één lijn met de SF₆-schakelaar: lucht onder hoge druk wordt gebruikt om de boog (meestal axiaal) te beblazen.

Bij het uitschakel-commando wordt lucht uit een voorraadvat (25 - 200 bar) naar de straalpijp ("nozzle") geleid, in het hart waarvan de boog brandt (fig. 8a5). Wanneer er naast deze axiale luchtstroming ook nog een stroming loodrecht op de boog aangebracht is, spreekt men van dubbele beblazing (fig. 8a6), of van radiale beblazing.



Figuur 8a5. Enkele beblazing.



Figuur 8a6. Dubbele beblazing.

Een andere functie van de lucht onder hoge druk is de contactscheiding teweeg te brengen. Lucht wordt na de blussing tevens als isolatiemedium gebruikt. In moderne schakelaars blijft lucht onder hoge druk tussen de contacten aanwezig.

In de zgn. impulskamerschakelaar wordt een serie-scheider (met grote contactafstand) geopend zodra de boog in de schakelaar geblust is. De boogkamer wordt dan elektrisch ontlast en de luchtdruk kan atmosferisch blijven. Dankzij het gemak waarmee gecomprimeerde lucht naar diverse punten geleid kan worden, bestaat er een overvloed aan ontwerpen met variabelen als: plaatsing van het drukvat (geaard of zwevend), plaatsing van contacten (in de open lucht: "Freistrahlschalter" of in druklucht), aantal bluskamers etc. In alle schakelaars vindt expansie plaats naar de buitenlucht hetgeen aanleiding geeft tot een zeer grote geluidsoverlast. Het aanbrenge van geluiddemping is noodzakelijk. Hierdoor, en door de noodzaak van een permanente aanwezigheid van lucht onder (zeer) hoge druk is de toepassing van de drukluchtschakelaar duur in vergelijking tot olieschakelaars.

In hoge druk schakelaars (lucht, SF₆), speelt de dimensionering van de aerodynamische componenten een belangrijke rol. Dit geldt met name voor de straalpijp ("nozzle"). Het streven is erop gericht zo weinig mogelijk blusgas te gebruiken (b.v. om reserve te hebben voor een snel volgende onderbreking) en dus de straalpijp heel klein te houden.

De grens van het onderbrekingsvermogen wordt echter mede bepaald door de keelopening. Bij zeer hoge stromen (of te kleine keelopening) kan de boogontlading de opening "verstopen" met zeer heet gas, waardoor het blusgas geen (of te weinig) mogelijkheid heeft effectief te koelen. Onderbreken is dan niet meer mogelijk. Men noemt dit effect "**kurk effect**" ("clogging"). Mede hierdoor is de grootte van de te onderbreken stroom een van de parameters die de moeilijkheidsgraad van de onderbreking bepaalt.

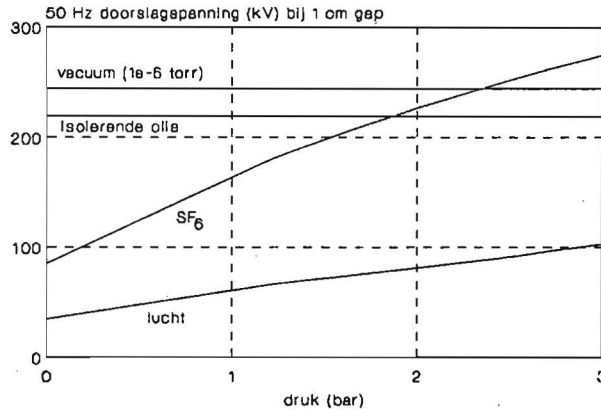
8a.1.3 SF₆ als blusmedium

Aan het eind van de jaren vijftig werd dit gas ("zwavel-hexafluoride") voor het eerst toegepast als isolatie- en blusmedium in vermogensschakelaars; sinds het midden van de jaren zestig ook in geheel gesloten schakelinstallaties.

We beschouwen nu het gedrag van SF₆ in elk van de drie relevante boogfasen:

- a. Het dielektrisch herstel na de blussing. Bij lage druk is SF₆ een **uitstekende isolator** (zie fig. 8a7). Dit is het gevolg van:
 - Het **elektronegatief** zijn van het SF₆-molekuul. Vrije elektronen worden makkelijk ingevangen en gebonden zodat een negatief ion ontstaat. Deze eigenschappen **verhogen de doorslagspanning** omdat elektronen, nodig voor lawinevorming die uiteindelijk tot doorslag leidt, effectief aan het gas onttrokken worden.
 - **De ionisatie-energie is hoog**, ca. 19.3 eV (N₂: 15.5 eV, O₂: 12.2 eV), waardoor het aantal door thermische energie-overdracht gevormde ionen bij lage (< 1000 K) temperatuur zeer gering is.
- b. Het gedrag rond de nuldoorgang. Bij lage temperatuur (ca. 1000 K) begint SF₆ te dissociëren. Hierdoor wordt telkens een F-ion onttrokken aan het molekuul, hetgeen telkens 3.7 eV kost. De energie hiervoor (6 x 3.7 eV) kan uitsluitend door de hete omgeving opgebracht worden waardoor de **warmtegeleiding uitstekend is**.
- c. De hoge stroom fase. In deze fase is de temperatuur groter dan 3000 K en het SF₆-molekuul geheel ontleed. De ionisatie-energie van het zwavelatoom is laag (10.4 eV) zodat de **elektrische geleiding uitstekend is**. Daarom is het gas al bij relatief lage temperatuur sterk geïoniseerd. De boog heeft dus een geringe energie-inhoud en raakt daarom weinig energie kwijt aan de omgeving. De thermische

energie van de naar lagere temperatuur diffunderende deeltjes is laag, m.a.w. de **warmtegeleiding** (aan de rand van de boog) is **klein**.



Figuur 8a7. 50 Hz doorslagspanning van een 1 cm gap in diverse media.

Het gevolg van bovengenoemde eigenschappen is dat SF₆-bogen een **kleine diameter hebben**, **snel afkoelen rond de nuldoorgang** en dan **snel overgaan in een uitstekende isolatietoestand**; en bovendien een **zeer geringe energie-inhoud hebben** en dus een **lage boogspanning**.

Als minder gunstige eigenschap volgt uit deze laatste konstatering dat er ook maar **weinig energie nodig is (lage TRV)** om een **nog niet voldoende gekoelde ontlading weer in geleiding te brengen**. Als verdere nadelen gelden dat door bogen in SF₆ verbindingen ontstaan die om twee redenen gevaarlijk zijn:

ten eerste zijn ze **korrosief** en kunnen constructie-materialen aantasten hetgeen onderhoud nodig kan maken;

ten tweede zijn ze **zeer giftig** en vormen ze serieuze milieuproblemen.

Een ander bezwaar is dat SF₆ bij lage drukken en hoge omgevingstemperaturen (0° C en 15 bar) kondenseert, waardoor in koude openluchtopstellingen een verwarmingssysteem nodig is is.

De SF₆ vermogensschakelaar

SF₆-vermogensschakelaars worden toegepast in het hele midden- en hoogspanningsgebied. Zij zijn ontwikkeld vanuit de principes zoals die reeds bekend waren bij de drukluchtschakelaars.

Voor de MV-vermogensschakelaars zijn diverse blusprincipes met SF₆ te onderscheiden, allen zijn enkeldruk:

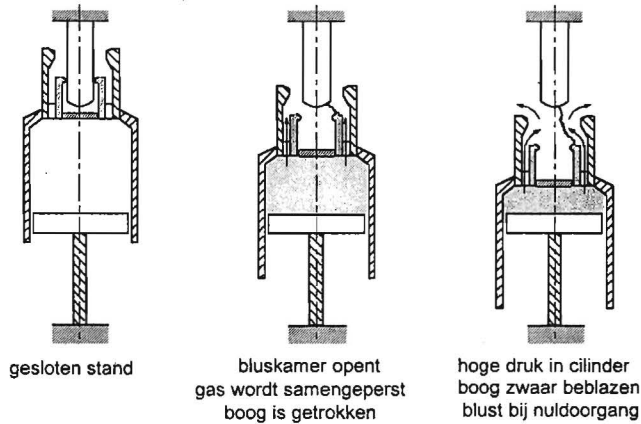
- Puffer voor de hogere kortsluitstromen (> 25 kA)
- Autoexpansie (statisch, rotating of zelfs met -kleine- puffer)
- roterende boog (≤ 25 kA)

Puffer:

Na de dubbeldruk schakelaar (HV, verouderd) werkt de tweede generatie SF₆-schakelaars volgens het **enkeldruk principe**, toegepast in de **puffer-schakelaar**. Deze wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van slechts één druk op relatief laag nivo (3 - 6 bar). De noodzakelijke blusdruk wordt opgebouwd door de uitschakelbeweging zelf. Tijdens het uitschakelen glijdt het bewegende cilinderhuis tegen een vast opgestelde zuiger, zie fig. 8a8. Door de compressie zal het gas met grote snelheid door een speciale (keramische of kunststof) straalpijp ("nozzle") stromen, in het hart waarvan de boog zich bevindt.

Tevens wordt de druk verhoogd door de hoge temperatuur van de boog.

Dit principe vereist een zware aandrijving die grote krachten uitoefent op de fundamenteen. De pufferschakelaar wordt in de MV toegepast voor de grotere kortsluitstromen (> 25 kA).



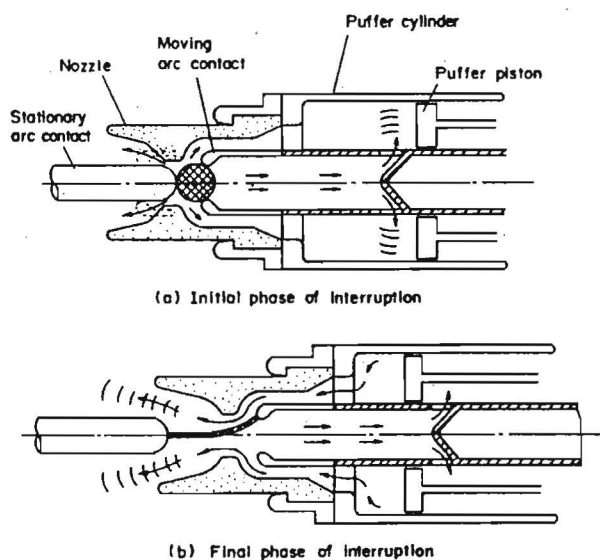
Figuur 8a8. Principe werking van de SF₆-pufferschakelaar.

Autoexpansie:

De derde generatie SF₆ schakelaars heeft geresulteerd in een aanzienlijke verlaging van de extern toegevoerde energie door meer koelvermogen uit het boogvermogen af te tappen, volgens hetzelfde principe als bij de olie-arme schakelaar. Dit is gerealiseerd in de "zelfblussende" ("self-blast" - of "self-extinguishing") schakelaar waarin drukverhoging niet zozeer mechanisch dan wel thermisch tot stand wordt gebracht. Dit kan gebeuren door in de hoge stroomfase de hete boog druk op te laten bouwen in een speciale drukkamer, die leegstroomt en aldus de boog koelt nabij de nuldoorgang, zie fig. 8a9 (uit Nakanishi, "Switching Phenomena in HV Switchgear", M. Dekker Inc. 1991).

Het probleem van deze schakelaar is de sterk verminderde koeling bij lage (kortsluit-)stromen. Om deze reden moet meestal nog een extra (kleine) zuiger aangebracht worden. Deze vereist dan echter nog maar 10-20% van de aandrijfenergie van een pufferschakelaar.

Dergelijke ontwerpen zijn sterk verbeterd door toepassing van gecompliceerde computerberekeningen, gebaseerd op thermodynamica en stromingsleer, o.a. uit de automobiellindustrie.

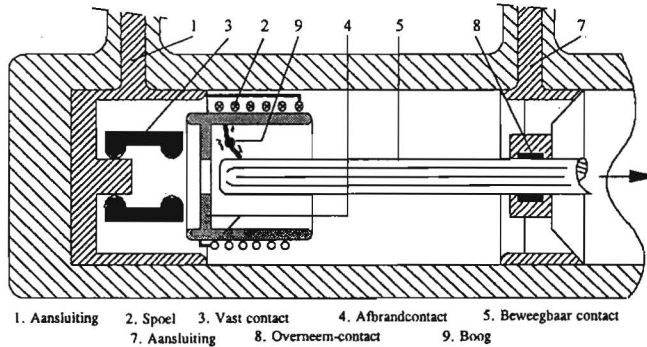


Figuur 8a9. Principe zelfblussende schakelaar (Toshiba).

Roterende boog:

Ook toegepast is het zelfblussingsprincipe in roterende boog schakelaars (alleen middenspanning). Een spoel wordt bij het openen in de stroom kring geschakeld waardoor een magneetveld opgebouwd wordt, dat de boog tussen coaxiale afbrandcontacten doet roteren; koeling ontstaat t.g.v. de relatieve beweging van boog en omgevingsgas, zie fig. 8a10 (Blower, "Distribution Switchgear", Collins, London 1986).

Een essentiële eis is dat er een aanzienlijk faseverschil bestaat tussen de flux en de stroom, zodat juist nabij de stroomnuldoorgang de magnetische werking niet te gering is.



Figuur 8a10. Principe roterende-boog schakelaar.

8a.1.4 Vacuüm als blusmedium.

Aangezien er geen boogontlading in een vacuüm kan bestaan is de term "vacuümschakelaar" misleidend. In een dergelijke schakelaar is uitsluitend sprake van een vacuüm buiten de schakelperiode en heeft het vacuüm voornamelijk de functie van **isolatie-"medium"**.

De doorslagveldsterkte van vacuüm is zeer hoog (zie fig. 8a7) en wordt (bij drukken 10^{-5} mbar) voor grotere contactafstanden uitsluitend bepaald door microscopische oneffenheden op het oppervlak die de veldsterkte plaatselijk vergroten ("de kerktoren waar de bliksem inslaat"). In het productieproces van vacuümschakelaars worden deze oneffenheden verwijderd door de geopende contacten kortstondig te belasten met een hoge spanning (80 - 100 kV) waardoor een zgn. veld emissiestroom (ca. 1 - 10 mA) uit de oneffenheden "getrokken" wordt. Door thermische effecten (smelten en verdampen) worden de oneffenheden afgerond waardoor de totale doorslagspanning van de gap aanzienlijk toeneemt. Dit proces wordt "konditioneren" genoemd.

Tijdens de boogfase is van een vacuüm in de contactgap al helemaal geen sprake. De boog bestaat in een medium van metaaldamp dat door een enorme vermogensdichtheid (orde 10^{17} W/m³) in het boogvoetpunt uit de contacten vrijgemaakt wordt.

De boogspanning is laag (ca. 20 - 30 V) vanwege de zeer lage ionisatie-energie van metaaldamp (ca. 8 eV). Het gedrag van de boog is sterk afwijkend van de olie-, lucht- of SF₆-boog.

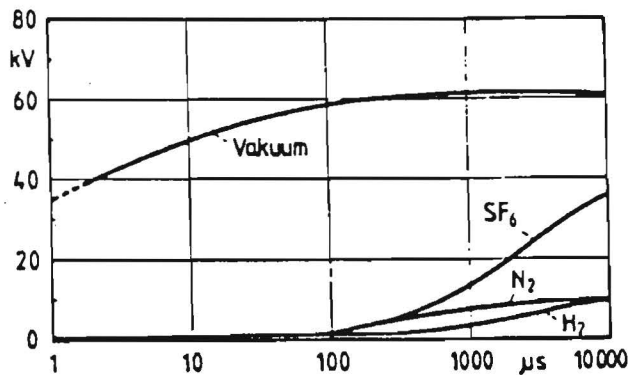
Op de zich openende kontakten van de op dat moment negatieve elektrode (kathode), bevinden zich allemaal voetpunten van deelboogjes van elk ca 100 A. Hier wordt de metaaldamp gegenereerd. Deze boogjes stoten elkaar af, hetgeen in tegenstelling is tot de Lorentz kracht. Het bestaan van deelboogjes (zgn diffuse mode) is zonder verdere maatregelen tot ca 10 kA beperkt. Daarboven vindt contractie (samentrekken) plaats hetgeen grote smeltplekken op de anode tot gevolg zou hebben.

Een methode is om de contractie te accepteren, maar de boog geen schade te laten aanrichten door hem rond te laten rennen als gevolg van een opgewekt (radiaal) magneetveld; hiertoe kunnen op een bepaalde

manier zaagsnedes in de contacten worden aangebracht. Een andere methode is het vergroten van de stroomwaarde waarbij contractie plaatsvindt, tot boven de toegekende kortsluitstroom. Dit gebeurt door het opwekken van een axiaal magneetveld, waarvoor diverse principes bestaan: (voor plaatjes zie sheets)

- uitwendige lus van de stroomgeleider (oud)
- aanbrengen van zaagsnedes in het contact
- hoefijzer- blikpakket onder contact (Holec patent)

Ook rond de nuldoorgang is een lage achtergronddruk in de bluskamer gunstig, omdat het restplasma van metaaldamp zeer snel kan expanderen, waardoor het diëlektrisch herstel zeer snel verloopt; in fig. 8a11 staan herstelkurves (na onderbreking van 1600 A) voor 4 media gegeven (Calor Emag).



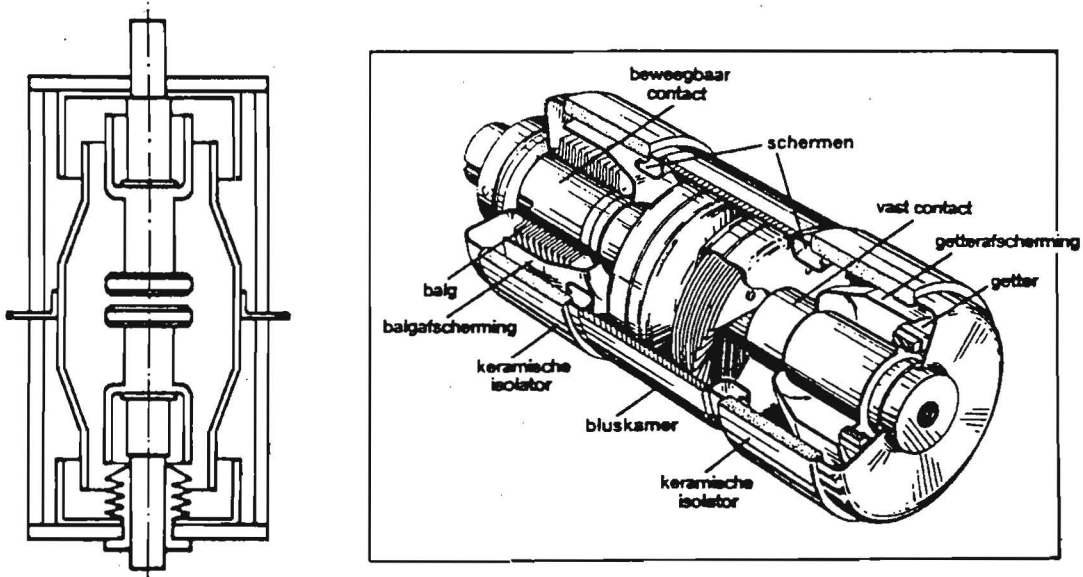
Figuur 8a11. Herstelkurves in diverse media na onderbreking van 1600 A.

De vacuümvermogensschakelaar.

In het begin van de jaren zestig kwam General Electric met een vacuümschakelaar voor middenspanningen op de markt. Thans heeft de vacuümschakelaar in landen als Duitsland, Engeland en Japan een aanzienlijke plaats in de productie van middenspanningsschakelaars. Een serie van Nederlandse vacuümschakelaars wordt geproduceerd door HOLEC.

De huidige stand van ontwikkeling biedt vacuümschakelaars commercieel aan voor de hoogste middenspanningen en de hoogste stromen.

Op laboratoriumschaal is bereikt: 145 kV (32 kA) resp. 200 kA (12 kV). De kans op een doorbraak naar het hoogspanningsgebied (> 72 kV) is niet groot; technisch gezien biedt de vacuümschakelaar mogelijkheden, commercieel echter blijft "SF₆" in deze spanningen aantrekkelijker.



Figuur 8a12. Vacuümschakelaar principe.

vacuümvermogensschakelaar (HOLEC).

De voordelen van vacuümschakelaars in het middenspanningsgebied (onderhoudsvrijheid, compactheid, milieuvriendelijkheid) wegen minder zwaar of gaan (nog?) verloren bij hoogspannings-toepassingen. Wel is de verwachting dat de vacuümschakelaar in het laagspanningsgebied zal door dringen. De vacuümschakelaar bestaat in zijn eenvoudigste vorm uit twee contacten die zich in een ruimte bevinden met een extreem lage gasdruk (10^{-5} - 10^{-8} mbar). Fig. 8a12 geeft de opbouw van een vacuümschakelaar-pool weer: links schematisch, rechts een echte schakelaar.

Door de uitstekende isolatie-eigenschappen van het vacuüm worden de hoofddimensies van de bluskamer voornamelijk door de eisen van uitwendige diëlektrische vastheid bepaald. Het huis bestaat uit isolatiemateriaal (keramiek, glas) verbonden met twee metalen eindflenzen. De essentiële beweeglijkheid van één der contacten wordt verkregen door middel van een metaalbalg. De keramische isolatiewand en de kwetsbare balg zijn beveiligd tegen de gevolgen van het ontladproces door middel van metalen schermen.

Een tweede functie van de schermen is het inwendige elektrische veld zo te "sturen" dat de plaatselijke veldsterkte beperkt blijft. Tijdens de fabricage worden alle onderdelen zorgvuldig gereinigd en ontgast. In de laatste fase van de productie wordt de kamer geëvacueerd. De vacuümbuis wordt hierbij verhit om aan de wanden geadsorbeerde gassen zo veel mogelijk te verwijderen. Na verzegeling blijft het vacuüm in stand met behulp van "getter"werking (het binden van gassen) van speciaal aangebracht "getter"-materiaal.

Omdat het schakelmedium in feite de contactmetaaldamp is, is de juiste keuze van het contactmateriaal in deze schakelaar zeer belangrijk. De eisen die aan het contactmateriaal worden gesteld hebben op een aantal punten een strijdig karakter en een compromis is daarom noodzakelijk.

Materialen met relatief veel dampproductie houden de boog tot zeer dicht vóór de nuldoorgang in stand (en hebben een lage breekstroomwaarde), maar vertonen tevens een slecht diëlektrisch herstel. Het omgekeerde geldt voor materialen met een geringe afgifte van metaaldamp in de boogfase. Een tegenwoordig veel toepast contactmateriaal is een gesinterd mengsel van koper en chroom of koper en bismuth.

Voor toepassingen waarbij geen overspanningen toelaatbaar zijn en niet de eis van een groot onderbrekingsvermogen bestaat (motorlastschakelaars) kan een metaalkomponent met hoge dampdruk (Cd, Sb, Zn) als geringe bijmenging worden toegevoegd om de breekstroom te verlagen.

De vacuümschakelaar heeft mede door zijn constructie een aantal aantrekkelijke eigenschappen. De voornaamste hiervan zijn:

- a. **Grote bedrijfszekerheid.** Vanwege de eenvoudige bouw is het aantal onderdelen klein (ca. 50% kleiner dan van een vergelijkbare SF₆- of olieschakelaar) en dus de betrouwbaarheid groot.
- b. **Geringe schakelenergie.** Door de kleine slag (≈ 1 cm) van de contacten en het geringe gewicht van de te versnellen massa('s) is de vereiste schakelenergie laag. Dit vereenvoudigt het uitschakelmechanisme aanzienlijk.
- c. **Lage boogspanning.** Door de lage boogspanning (enkele tientallen volts) is de energie in de boog beperkt.
- d. **Geen explosie- en/of brandgevaar,** geluidsarm en niet milieubelastend. Eisen die in toenemende mate ook voor schakelaars van belang worden.
- e. **Uitstekende onderbrekingseigenschappen.** De onderbreking kan snel plaatsvinden (boogduur maximaal 10 - 20 ms). Hierdoor kan de hoeveelheid toegevoerde energie ter plaatse van de fout worden beperkt.
- f. De schakelaarkonstruktie leent zich goed voor een **geïntegreerde bouwwijze.** Dit vergroot de mogelijkheid van toepassing in gesloten schakelinstallaties voor spanningen boven 72 kV.

Hierdoor wordt de vorming van zeer giftige verbindingen door boogactiviteit in SF₆ vermeden.

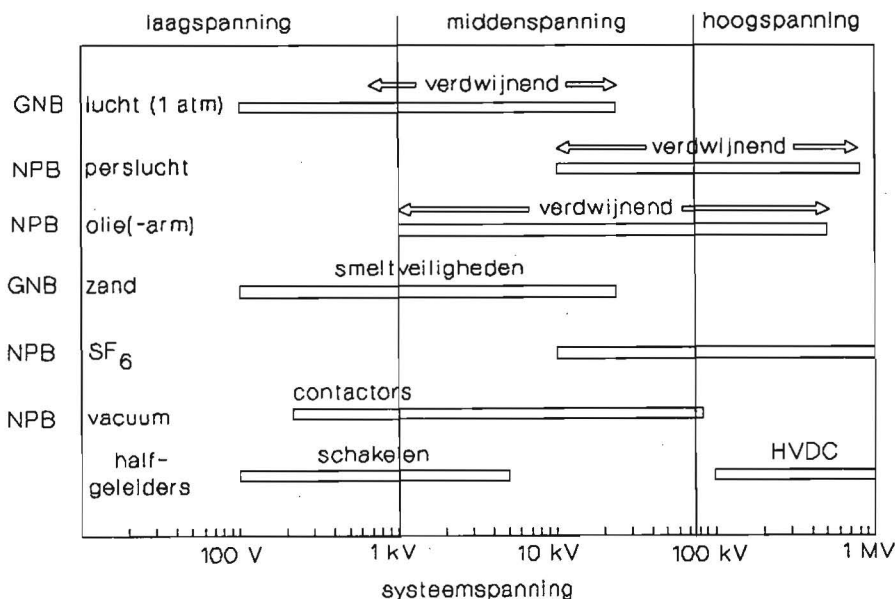
De mogelijke nadelen van de schakelaar zijn:

- a. De vacuümschakelaar is een typische "harde" schakelaar. **Schakeloverspanningen** worden nog vaak geassocieerd met vacuümschakelaars. Dit stamt vooral uit de eerste generatie waar koperen kontakten inzaten, die afbreekstromen van ca 20 A hadden. In de moderne schakelaars (sinds 1980) wordt koper-chroom toegepast, hetgeen afbreekstromen van 3 a 5 A impliceert. In de praktijk leveren dergelijk afbreekstromen geen hoge overspanningen meer op. Echter, er kunnen bij uitzondering bij het schakelen van inductieve belastingen zoals geblokkeerde motoren en onbelaste transformatoren in "inrush" nog te hoge overspanningen ontstaan (tgv spanningsescallatie), zoals ook bij SF₆ het geval kan zijn. Hoewel (door een geschikte selectie van contactmateriaal) de overspanningen aanzienlijk gereduceerd zijn, blijft overspanningsbeveiliging soms noodzakelijk (voor motoren < 250 kW, afhankelijk van de kabellengte). Dit wordt vaak bereikt door metaaloxide afleiders. In driefasen circuits kunnen gevaarlijke overspanningen ontstaan door zg. virtuele stroombreking. (zie bijgevoegd artikel)
- b. **Controle van de vacuümkwaliteit "in het veld"** is mogelijk (magnetron methode) maar moeilijk. Inlek van slechts 4 ml lucht maakt de schakelaar onbruikbaar. Dergelijke kleine drukveranderingen zijn moeilijk op te sporen. Normaliter wordt een voldoende vacuüm gegarandeerd gedurende 30 - 50 jaar. De som van deze "inlek" geeft een ontoelaatbare drukstijging na 20 jaar; door het inbouwen van een "getter" wordt deze tijd verlengd tot ca. 50 jaar.

Een karakteristieke maat voor de betrouwbaarheid van schakelaars is de "Mean Time Between Failures" (MTBF). Praktijkervaring leert dat de MTBF ruwweg evenredig is met het aantal onderdelen per apparaat. Vergelijking van twee schakelaarpolen geeft aan dat de mechanische betrouwbaarheid van een vacuümschakelaar (22 onderdelen per pool waarvan 9 bewegende) hoger geacht mag worden dan een vergelijkbare SF₆-schakelaar (52 onderdelen waarvan 24 bewegende).

Statistisch onderzoek heeft uitgewezen dat de MTBF (voor een vacuümschakelaar) m.b.t. ernstige fouten ca. 350 jaar bedraagt. Behalve door mechanische storingen wordt het functioneren van een vacuümschakelaar bedreigd door gebrek aan vacuümkwaliteit.

Een andere (eventueel) levensduurbeperkende factor is een overmatige contacterosie. Dit hangt uiteraard



Figuur 8a13. Overzicht van blusmedia voor vermogensschakelaars

samen met het gebruik, dus het aantal schakelhandelingen bij een bepaalde stroom. Vaak wordt de levensduur opgegeven als het aantal mogelijke schakelhandelingen bij bepaalde stromen.

Samenvatting:

Als kompakte samenvatting van dit hoofdstuk is in fig. 8a13 een overzicht gegeven van alle:

- blusmedia
- op welke spanningsnivo's deze worden toegepast
- op welke wijze de onderbreking plaats vindt (Gedwongen NuldoorgangsBlusser - GNB of NulPuntsBlusser - NPB)

8a.2 Opstelling van vermogensschakelaars

Voor middenspanning zijn voor de grotere typen vermogensschakelaars al sinds jaar en dag (metaal-) omsloten installaties gebruikelijk. Voordeel ten opzichte van de vroeger ook wel toegepaste open installaties is o.a. het geringere ruimtebeslag. De vermogensschakelaar is bedoeld als verbinding tussen (enkele of meervoudige) railsystemen ("busbars") en afgaande kabels, bijv. naar de gebruiker.

De omhulling van een schakelaarveld is opgedeeld in 1 of meerdere compartimenten.

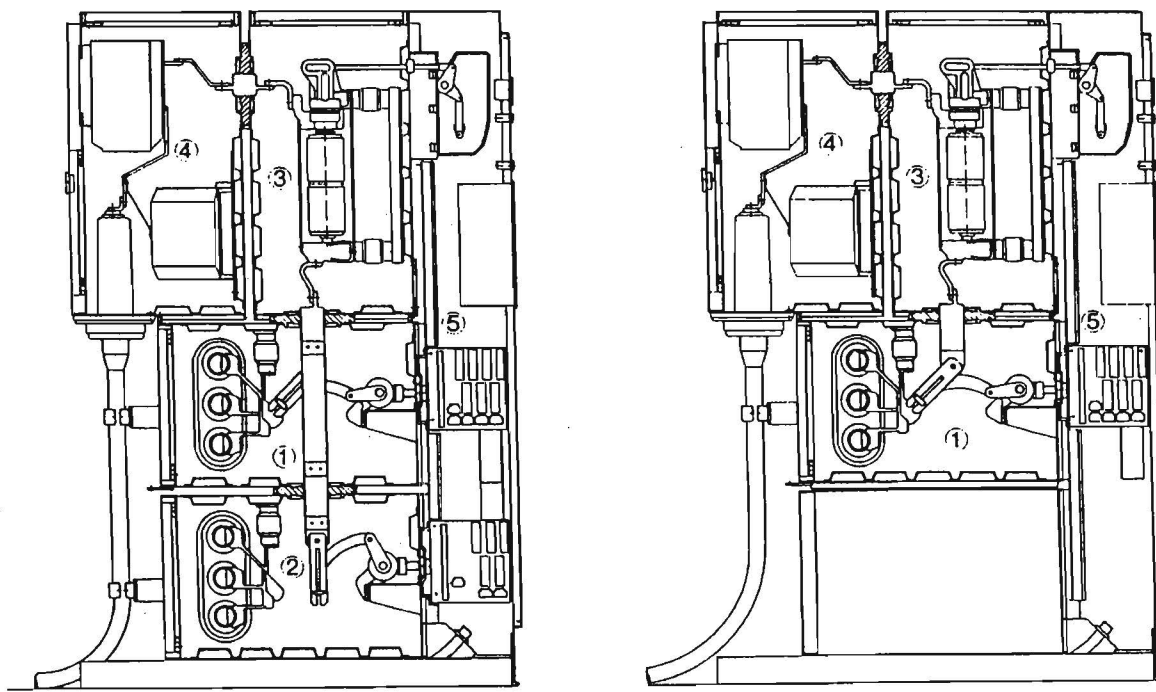
Volgens het voorschrift IEC 298 (*metaal omhuld "metal-enclosed" (buiten omhulling) MS schakelmaterieel*) wordt onderscheid gemaakt tussen:

- "metal clad" schakelmaterieel ("Metallgeschottet"): elke hoofdfunctie (schakelaar, rails en kabelaanluiting) is aangebracht in een afzonderlijk compartiment met gearde metalen wanden.
- "compartmented" schakelmaterieel: schakelaar en componenten zijn aangebracht in compartimenten waarvan de wanden niet metallisch zijn.
- "cubicle" schakelmaterieel: de componenten zijn niet of niet allemaal in compartimenten aangebracht (maar wel in een metalen buiten omhulling).

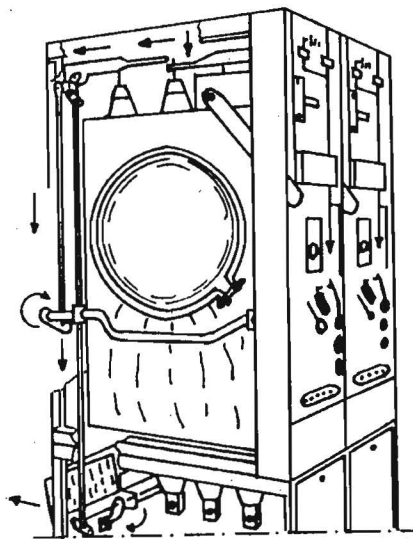
Een typisch voorbeeld is te zien in fig. 8a14. Hierin is duidelijk de compartimentering te zien van vermogensschakelaar deel, railsysteem en afgaande verbinding.

De compartimentering is noodzakelijk als men wil kunnen werken aan bijv. de kabelaanluiting, terwijl de rails onder spanning blijft. Ook verkleint compartimentering de kans dat een fout (= boog!) in één compartiment andere compartimenten binnendringt. In bepaalde ontwerpen vindt een automatische afschakeling plaats na detectie van de bolling van de gesloten installatie t.g.v. de stijging van de druk door de interne boog. Dit vergroot de veiligheid (zie fig. 8a15).

Interne isolatie in MS schakelinstallaties vindt plaats met lucht, eventueel gecombineerd met giethars, en ook wel met SF₆, hetgeen zeer compacte installaties mogelijk maakt. De vermogensschakelaars zijn meestal vacuümschakelaars maar ook wel SF₆ gevulde schakelaars. In oudere installaties bevinden zich nog vaak olie-arme vermogensschakelaars en luchtschakelaars.



Figuur 8a14. Schakelaar in SF₆ geïsoleerde "metal clad" MS-installatie (Calor Emag) met dubbel (links, 1,2) of enkel (rechts, 1) railsysteem met railscheider(s). 3. Vacuümschakelaar, 4. Meettrafo's.



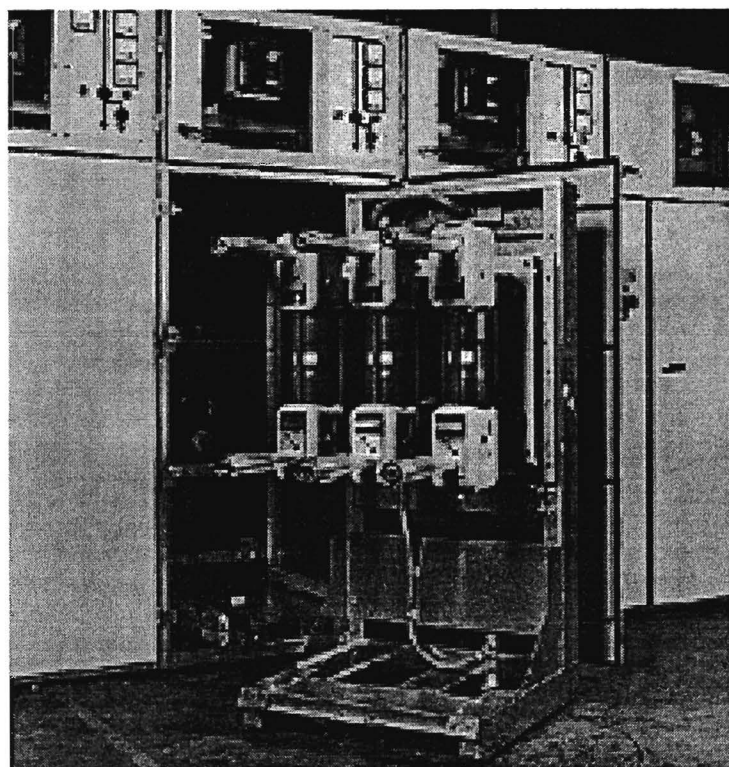
Figuur 8a15. Automatische (mechanische) detectie van drukstijging bij boog in de installatie (Driescher).

8a.2.1 Uitrijdbare opstelling:

De conventionele opstelling van de grotere typen vermogensschakelaars in omsloten materieel is als volgt: de vermogensschakelaars is uitrijdbaar opgesteld als cassette (compact-) of op een wagen, in een metalen omhulling. Een dergelijk schakelveld bevat verder nog: een snelaarder (om veilig de kabel te kunnen aarden, bedieningsmechanieken, vergrendelingen (bijv. tegen weer inrijden met gesloten schakelaar).

Spanning- en stroommeters, evenals elektronica komen verder ook vaak voor.

Een zichtbare veiligheidsscheiding wordt in dit geval gerealiseerd door het uitgereden zijn van de vermogensschakelaars. Zie fig. 8a16



Figuur 8a16. Unitole in compartmented uitvoering

8a.2.2 Vast ingebouwde opstelling:

Met de komst van de onderhoudsvrije vacuümonderbreker is de noodzaak tot uitrijdbaar zijn verdwenen; voor de totale beschikbaarheid van de installatie verdient vaste inbouw van de onderbreker zelfs de voorkeur. In dergelijke installaties wordt de scheidingsweg gecreeerd door een aparte scheider die eventueel met de aardingsfunctie kan zijn gekoppeld. Zie fig. 8a14. Sealed for life (verzegeld voor het leven) is hier het motto, met alleen een minimale onderhoudsbehoefte voor de mechanieken. Men ziet dan ook in de meest recente uitvoeringen van de diverse producenten steeds meer een vast ingebouwde (vacuum)onderbreker. Het isolatiemedium is dan of lucht (Holec -MMS, GEC - Visax) resp. stikstof, of giethars (Holec SVS), of SF₆ (ABB - ZX1,2; Siemens NX plus). Hierbij wordt SF₆ vooral bedacht voor de hogere nominaal spanningen als 24 en 36 kV.

HOOGSPANNINGSSCHAKELAARS

ELIN Holec High Voltage b.v.

Inhoudsopgave

8b.1	Hoogspanningsschakelstations	8b-1
8b.2	Schakelende componenten	8b-2
8b.2.1	Scheiderschakelaar	8b-3
8b.2.2	Aardschakelaar	8b-3
8b.2.3	Vermogensschakelaar	8b-4
8b.3	Lucht als blusmedium	8b-5
8b.4	De drukluftschakelaar	8b-5
8b.5	SF ₆ als blusmedium	8b-7
8b.6	De SF ₆ -vermogensschakelaar	8b-8
8b.7	Nabeschouwing	8b-11
8b.8	Literatuur	8b-11

8b HOOGSPANNINGSSCHAKELAARS

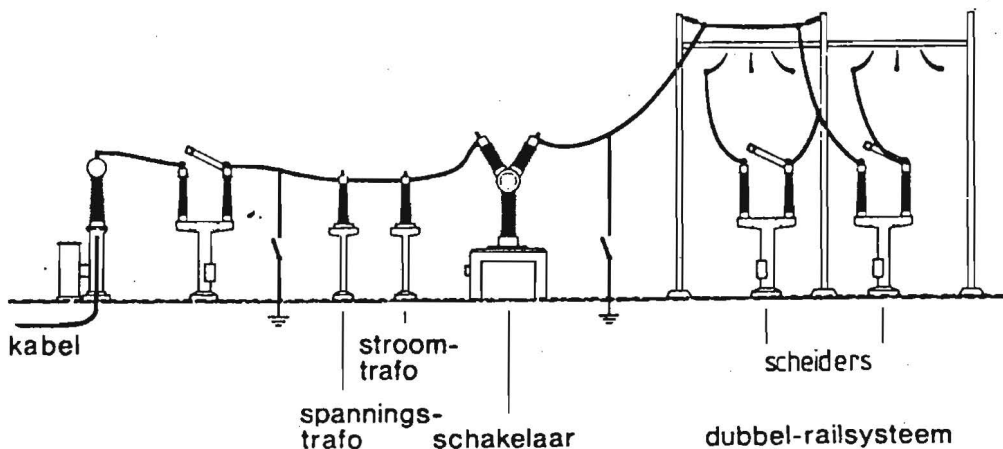
Het begrip hoogspanning is gangbaar voor netten met een maximale bedrijfsspanning (rated voltage) van minimaal 52 kV. De vermogensschakelaars, welke in deze netten toegepast worden, zullen onderstaand behandeld worden.

8b.1 Hoogspanningsschakelstations

Hoogspanningsschakelstations zijn knooppunten in het distributie en transportnet van electriciteit, welke de energieverdeling in het electriciteitsnet op betrouwbare wijze dient te beheersen en waarborgen en de veiligheid van het systeem moet verzekeren. Voor dit doel bestaat een schakelstation uit diverse schakelende componenten, zoals vermogensschakelaars, scheiders en aarders. Daarnaast zijn diverse andere componenten aanwezig om de beveiligingsfunctie te realiseren, zoals stroom en spanningstransformatoren.

Een schakelstation bestaat in het algemeen uit een aantal voedende (of inkomende) velden en een aantal afgaande velden (bijvoorbeeld transformatorvelden. Deze velden worden door middel van één of meer railsystemen met elkaar verbonden.

De componenten in een hoogspanningsschakelstation kunnen allen vrij opgesteld staan (binnen of buiten) ofwel geplaatst zijn in geheel gesloten schakelinstallaties. In vrije opstelling zijn de componenten op steunisolatoren geplaatst (zie figuur 8b.1)

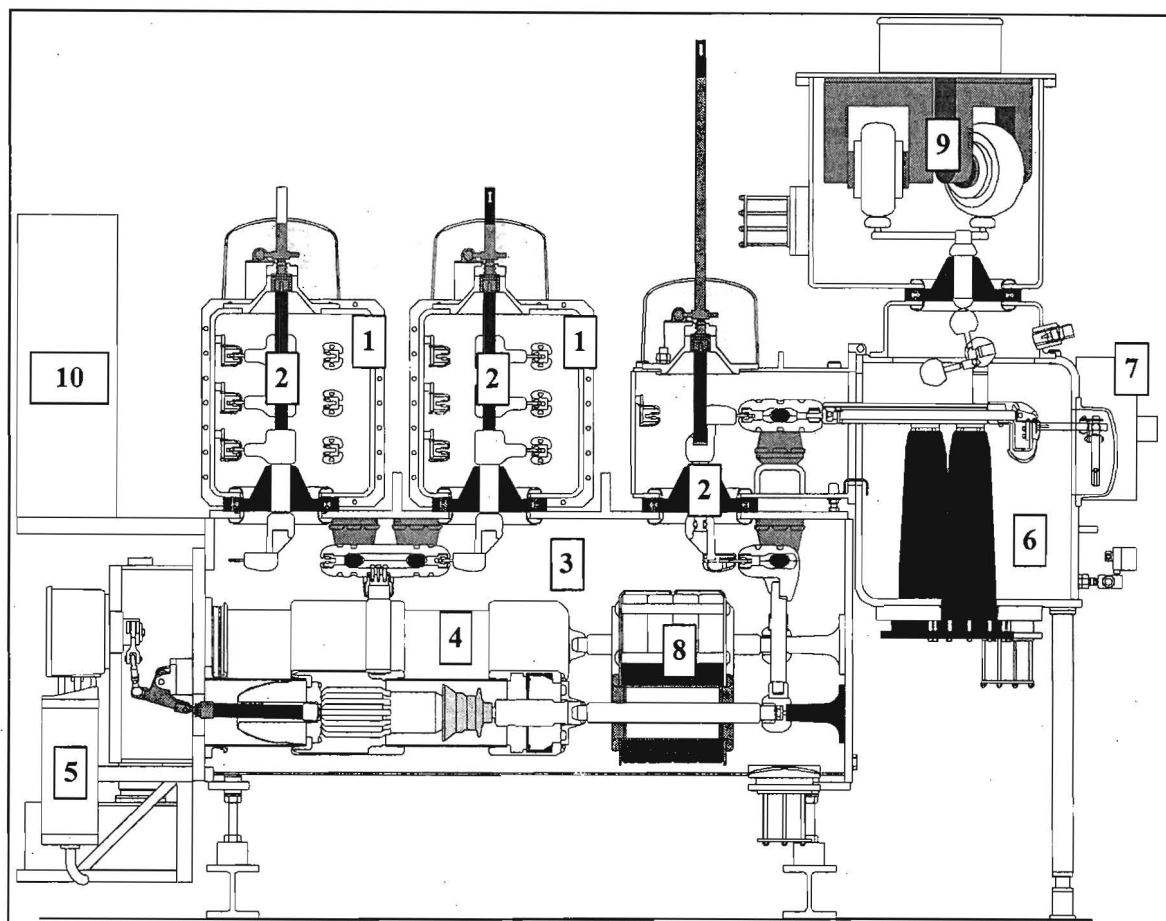


Figuur 8b.1. Lijn-kabel verbinding in een openlucht hoogspanningsstation.

Bij geheel gesloten schakelinstallaties bevinden de diverse componenten (railsysteem, schakelende componenten, meettransformatoren) zich in een (geaarde) metalen omhulling. Het gasvormige isolatiemedium SF₆ (enkele bar) verzorgt de isolatie binnen een gesloten schakelinstallatie, voorheen was druklucht gangbaar als isolatiemedium in een gasgeïsoleerd schakelstation. Voordeel van een dergelijke "GIS" (Gas Insulated Substations) is een zeer compacte bouwwijze en de onafhankelijkheid van het milieu. In dichtbevolkte gebieden of vijandige milieus (tropische-, woestijnklimaten) is door besparing op oppervlakte en/of onderhoud toepassing van GIS zeer aantrekkelijk.

De eerste typen GIS waren allen enkelfasig omhuld, hetgeen inhoudt, dat elke fase zijn eigen geaarde omhulling heeft.

In een later stadium zijn 3-fasen omhulde systemen ontstaan. Kenmerk van 3-fasen omhulde systemen is, dat alle 3 de fasen zich in één geaarde omhulling bevinden (zie figuur 8b.2). Geheel 3-fasen omhulde systemen bestaan tot een spanningsniveau van 300 kV. Vanaf een spanningsniveau van ca. 170 kV ontstaan echter hybride oplossingen (bijvoorbeeld 3-fasen omhulde railsystemen en enkelfasig omhulde vermogensschakelaars).



Figuur 8b.2. *Gasgeïsoleerde schakelinstallatie (GIS), (ELIN Holec High Voltage) 1.Railsysteem, 2. "Double-Gap" Scheider, 3. Vermogensschakelaar-compartiment, 4. Vermogensschakelaar, 5. Aandrijving, 6. Kabelaanluitcompartiment, 7. Aarder, 8. Stroomtransformatoren, 9. Spanningstransformator, 10. Besturing*

Door de modulaire opbouw kunnen de diverse componenten op velerlei wijzen gekoppeld worden tot complete onderstations (zie figuur 8b.3), resulterend in vele stationsconfiguraties, welke elk zijn specifieke voordelen hebben naar bijv. beschikbaarheid, uitbreidingsmogelijkheden en betrouwbaarheid.

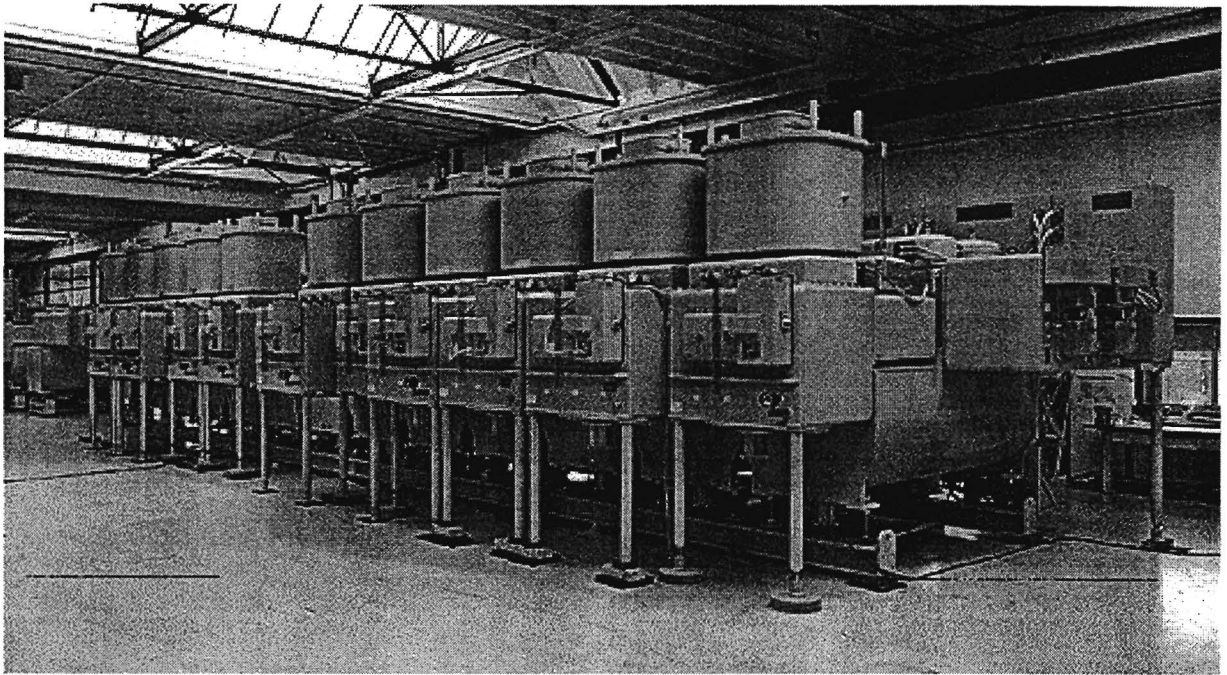
8b.2 Schakelende componenten

In een schakelinstallatie zijn grofweg 3 schakelende componenten te onderscheiden :

- scheiderschakelaars
- aardschakelaars
- vermogensschakelaars

Daarnaast zijn afgeleide schakelaars te onderkennen met specifieke toepassingsgebieden, zoals bijvoorbeeld een transformatorschakelaar.

Het afschakelvermogen van een schakelaar is gedefinieerd als het product van de stroom voor het afschakelen en de spanning na het afschakelen; het afschakelvermogen is derhalve geen reëel vermogen. Analoog is het inschakelvermogen te definiëren.



Figuur 8b.3. Aanzicht van een GIS-installatie (ELIN Holec High Voltage)

8b.2.1 Scheiderschakelaar

De functie van een scheider(schakelaar) is het isoleren van onderdelen van de installatie van de rest van de installatie, opdat op veilige wijze onderhoud of inspectie gepleegd kan worden op het betreffende deel, terwijl de rest van de installatie in bedrijf blijft.

Een scheider is dus met name ontwikkeld voor statische toepassingen (stroomvoeren in gesloten stand of spanning houden in geopende stand). Een scheider zal derhalve ook nauwelijks vermogen hoeven en kunnen schakelen : een scheider kan stroom schakelen bij geringe spanning (inductieve bustransfer 1600 A, 10-tallen Volt) of spanning bij geringe stroom (capacitieve buscharging nominale spanning, 100-en mA). Scheiders worden gekenmerkt door de over het algemeen trage beweging van de scheidercontacten, globaal enkele centimeters per seconde en een zeer gering af- en inschakelvermogen van ca. 0.01 MVA.

De "double-gap" scheider (ELIN Holec High Voltage) integreert twee scheidergaps in serie met een gearde tussenbarriere in geval de scheider in de geopende positie is. Bovendien bevindt zich tussen de twee scheidergaps een gasdichte afscheiding tussen de twee compartimenten. (zie ook figuur 8b.2). Deze scheiderconstructie garandeert optimale veiligheid en biedt volledige testmogelijkheden.

8b.2.2 Aardschakelaar

De functie van een aardschakelaar is het (kortsluitvast)aarden van delen van een schakelinstallatie. Indien de aarder zodanig ontworpen is, dat deze op een kortsluiting mag inschakelen, dan wordt gesproken van een inschakelvaste aarder en kan een inschakelvermogen toegekend worden. In geval van een inschakelvaste aarder zal tijdens de IN-beweging de aardercontacten een hoge snelheid bereiken (meters / seconde). Door de hoge snelheid van de contacten wordt de boogtijd verkort en de vrijkomend energie beperkt. Dit heeft als resultaat, dat afbrand aan de contacten en ontledingsproducten geminimaliseerd worden.

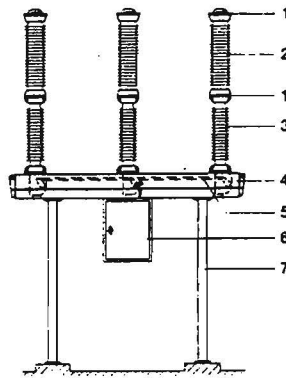
Analoog aan de scheider heeft de aarder nauwelijks afschakelvermogen. Wel dient een aarder geïnduceerde stromen en spanningen ten gevolge van parallelle circuits af en in te kunnen schakelen

(tot enkele tientallen kV's en honderden A's). De uitschakelsnelheid van de contacten bedraagt over het algemeen net als bij scheiders enkele centimeters per seconde. De aarder kent een afschakelvermogen van ca. 1 MVA. Een inschakelvaste aarder een inschakelvermogen van >1000 MVA (52 kV - 31.5 kA) tot >10000 MVA voor spanningen hoger dan 300 kV.

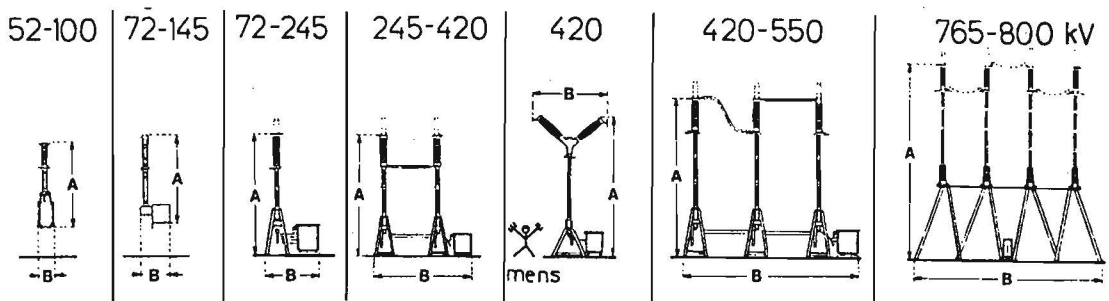
8b.2.3 Vermogensschakelaar

De vermogensschakelaar moet geschikt zijn om alle mogelijke stromen (nominale stromen en kortsluitstromen), die in het net voorzien zijn, te kunnen inschakelen, voeren en afschakelen; de schakelaar dient dus het gehele vermogen van het op die plaats in het net aanwezig zijnde vermogen te kunnen schakelen. Dit resulteert in schakelbewegingen met hoge snelheid (meters per seconde). Bij het onderbreken van de stroom moet de schakelaar in staat zijn de na de onderbreking optredende spanning te weerstaan. Af- en inschakelvermogens zijn in de orde van grootte van >1000 MVA (52 kV / 31.5 kA) tot >10000 MVA voor spanningen groter dan 300 kV.

In vrije opstelling worden de schakelaars met één mechanisme bediend (figuur 8b.4) of - voor de hoogste spanningen - met één mechanisme per fase. In figuur 8b.5 is een serie SF₆-schakelaars te zien die het hele hoogspanningsgebied beslaat. Bij toenemende spanning zijn meerdere bluskamers in serie noodzakelijk, de maximale spanning per bluskamer bedraagt op dit moment ca. 250 kV, kortsluitstroom 50 - 60 kA, in de experimentele fase is 500 kV gerealiseerd.



Figuur 8b.4. HS-schakelaar met mechanisme 1: Aansluiting 2.bluskamer 3.steunisulator, 4.frame 5.stangenmechanisme 6.aandrijving 7.draagconstructie (AEG)



Figuur 8b.5. Serie van SF₆-HS schakelaars met 1-4 bluskamers in serie voor een fase (GEC Alsthom)

Soms zijn schakelaars voor de hoogste spanningen voorzien van een (apart naast de bluskamer of in de bluskamer aangebrachte) "closing resistor", een weerstand (enkele honderden Ω) die vóór het sluiten van de contacten automatisch in serie wordt geschakeld en op het moment van sluiten weer kortgesloten

wordt. De functie hiervan is de lopende golven die ontstaan door het plotseling onder spanning brengen van een onbelaste hoogspanningslijn bij inschakelen (t.g.v. voorontsteking) te dempen.

Om schakeloverspanning door bijv. stroombreking te verzachten worden wel laagohmige weerstanden over de schakelaar geplaatst, met name bij druklucht-schakelaars.

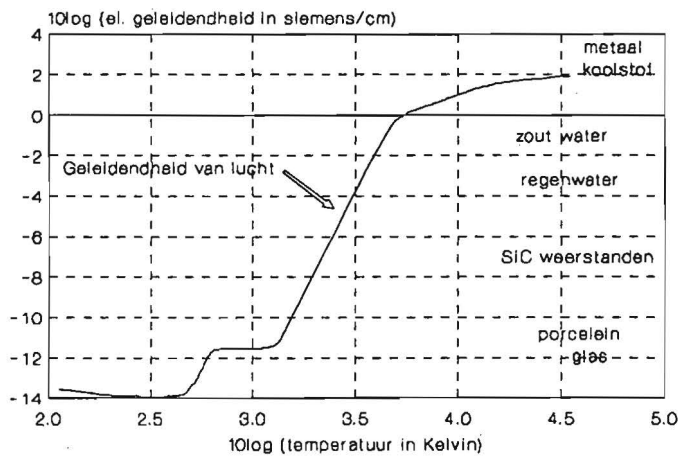
Bij gebruik van meerdere bluskamers in serie worden parallel capaciteiten en/of hoogohmige weerstanden gebruikt om een evenredige spanningsverdeling over de kamers te bewerkstelligen ("voltage grading").

8b.3 Lucht als blusmedium.

Sinds het allereerste begin van de elektrische energievoorziening is lucht gebruikt als blusmedium. Het is goedkoop, licht, onbrandbaar, chemisch weinig actief en goed isolerend. De warmte geleiding van stilstaande lucht is niet groot maar de door turbulenties (convectie) veroorzaakte stromingen verhogen de geleiding aanzienlijk. De elektrische geleidbaarheid als functie van de temperatuur is gegeven in figuur 8b.6. Het grote bereik (ca. 16 decaden!) is opmerkelijk.

Voor het gebruik in schakelaars moeten we onderscheid maken tussen:

- lucht van atmosferische druk, toegepast tot een niveau van ca. 24 kV;
- lucht onder hoge druk (tot honderden bar), toegepast tot de hoogste hoogspanning.



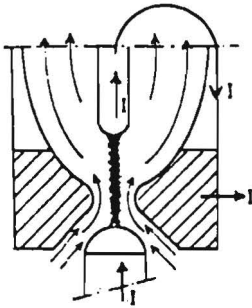
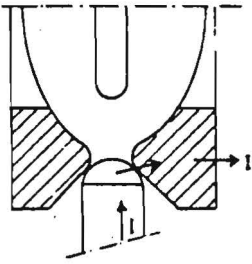
Figuur 8b.6. De elektrische geleidbaarheid van lucht als functie van temperatuur

8b.4 De drukluchtchakelaar.

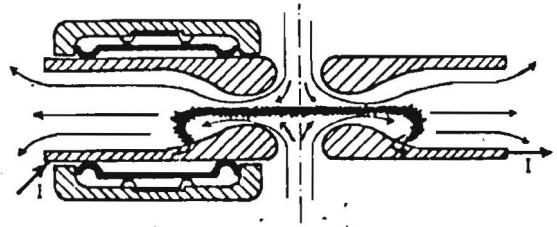
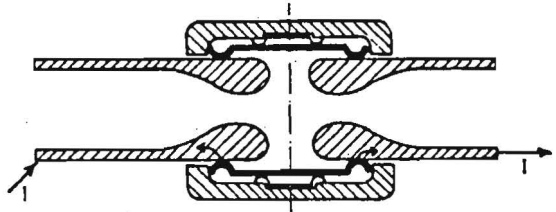
De drukluchtchakelaar ("air blast circuit breaker") staat qua blusprincipe op één lijn met de SF₆-schakelaar: lucht onder hoge druk wordt gebruikt om de boog (meestal axiaal) te beblazen.

Bij het uitschakel-commando wordt lucht uit een voorraadvat (25 - 200 bar) naar de straalpijp ("nozzle") geleid, in het hart waarvan de boog brandt (figuur 8b.7). Wanneer er naast deze axiale luchtstroming ook nog een stroming loodrecht op de boog aangebracht is, spreekt men van dubbele beblazing (figuur 8b.8), of van radiale beblazing.

Een andere functie van de lucht onder hoge druk is de contactscheiding teweeg te brengen. Lucht wordt na de blussing tevens als isolatiemedium gebruikt. In moderne schakelaars blijft lucht onder hoge druk tussen de contacten aanwezig.



Figuur 8b.7. Enkele beblazing



Figuur 8b.8. Dubbele beblazing

In de zgn. impulskamerschakelaar wordt een serie-scheider (met grote contactafstand) geopend zodra de boog in de schakelaar geblust is. De boogkamer wordt dan elektrisch ontlast en de luchtdruk kan atmosferisch blijven. Dankzij het gemak waarmee gecomprimeerde lucht naar diverse punten geleid kan worden, bestaat er een overvloed aan ontwerpen met variabelen als: plaatsing van het drukvat (geaard of zwevend), plaatsing van contacten (in de open lucht: "Freistrahlschalter" of in druklucht), aantal bluskamers etc. In alle schakelaars vindt expansie plaats naar de buitenlucht hetgeen aanleiding geeft tot een zeer grote geluidsoverlast. Het aanbrengen van geluiddemping is noodzakelijk. Hierdoor, en door de noodzaak van een permanente aanwezigheid van lucht onder (zeer) hoge druk is de toepassing van de drukluchtschakelaar duur in vergelijking tot olieschakelaars.

In hoge druk schakelaars (lucht, SF₆), speelt de dimensionering van de aërodynamische componenten een belangrijke rol. Dit geldt met name voor de straalpijp ("nozzle"). Het streven is erop gericht zo weinig mogelijk blusgas te gebruiken (b.v. om reserve te hebben voor een snel volgende onderbreking) en dus de straalpijp heel klein te houden.

De grens van het onderbrekingsvermogen wordt echter mede bepaald door de keelopening. Bij zeer hoge stromen (of te kleine keelopening) kan de boogontlading de opening "verstopen" met zeer heet gas, waardoor het blusgas geen (of te weinig) mogelijkheid heeft effectief te koelen. Onderbreken is dan niet meer mogelijk. Men noemt dit effect "kurk effect" ("clogging"). Mede hierdoor is de grootte van de te onderbreken stroom een van de parameters die de moeilijkheidsgraad van de onderbreking bepaalt.

Nadelen van de luchtdrukschakelaar zijn :

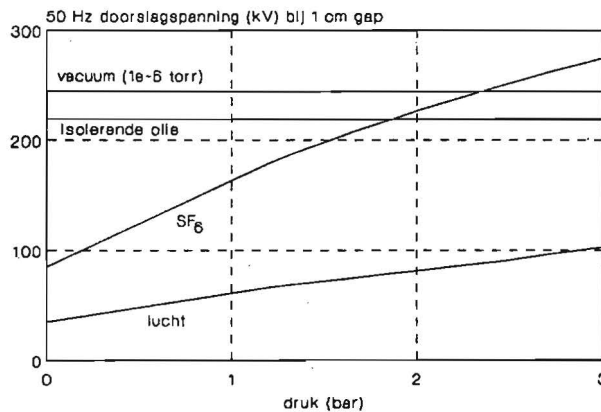
1. het constante drukverschil tijdens het blussen voor zowel kleine als grote stromen (constante blusenergie), leidt tot "current-chopping" (stroomafscheuren) in geval van kleine stromen
2. de gevoeligheid van het blusmedium voor RRRV (Rates of Rise of Restriking Voltage). Dit maakt aanvullende maatregelen, zoals weerstanden, noodzakelijk.
3. het hoge geluidsniveau tijdens afschakelen of de hoge investeringskosten om dit niveau te verminderen
4. de hoge kosten gepaard gaand met de aanwezigheid van lucht onder hoge druk

8b.5 SF₆ als blusmedium

Aan het eind van de jaren vijftig werd het gas SF₆ ("zwavel-hexafluoride") voor het eerst toegepast als isolatie- en blusmedium in vermogensschakelaars; sinds het midden van de jaren zestig ook in geheel gesloten schakelinstallaties.

We beschouwen nu het gedrag van SF₆ in elk van de drie relevante boogfasen:

- a. Het diëlektrisch herstel na de blussing. Bij lage druk is SF₆ een uitstekende isolator (zie figuur 8b.9). Dit is het gevolg van:
 - Het elektronegatief zijn van het SF₆-molekuul. Vrije elektronen worden makkelijk ingevangen en gebonden zodat een negatief ion ontstaat. Deze eigenschappen verhogen de doorslagspanning omdat elektronen, nodig voor lawinevorming die uiteindelijk tot doorslag leidt, effectief aan het gas onttrokken worden.
 - De ionisatie-energie is hoog, ca. 19.3 eV (N₂: 15.5 eV, O₂: 12.2 eV), waardoor het aantal door thermische energie-overdracht gevormde ionen bij lage (< 1000 K) temperatuur zeer gering is.



Figuur 8b.9. 50 Hz doorslagspanning van een 1 cm gap in diverse media.

- b. Het gedrag rond de nuldoorgang. Bij lage temperatuur (ca. 1000 K) begint SF₆ te dissociëren. Hierdoor wordt telkens een F-ion onttrokken aan het molecuul, hetgeen telkens 3.7 eV kost. De energie hiervoor (6 x 3.7 eV) kan uitsluitend door de hete omgeving opgebracht worden waardoor de warmtegeleiding uitstekend is.
- c. De hoge stroom fase. In deze fase is de temperatuur groter dan 3000 K en het SF₆-molekuul geheel ontleed. De ionisatie-energie van het zwavelatoom is laag (10.4 eV) zodat de elektrische geleiding uitstekend is.

Daarom is het gas al bij relatief lage temperatuur sterk geïoniseerd. De boog heeft dus een geringe energie-inhoud en raakt daarom weinig energie kwijt aan de omgeving. De thermische energie van de naar lagere temperatuur diffunderende deeltjes is laag, m.a.w. de warmtegeleiding (aan de rand van de boog) is klein.

Het gevolg van bovengenoemde eigenschappen is dat SF₆-bogen een kleine diameter hebben, snel afkoelen rond de nuldoorgang en dan snel overgaan in een uitstekende isolatietoestand; en bovendien een zeer geringe energie-inhoud hebben en dus een lage boogspanning.

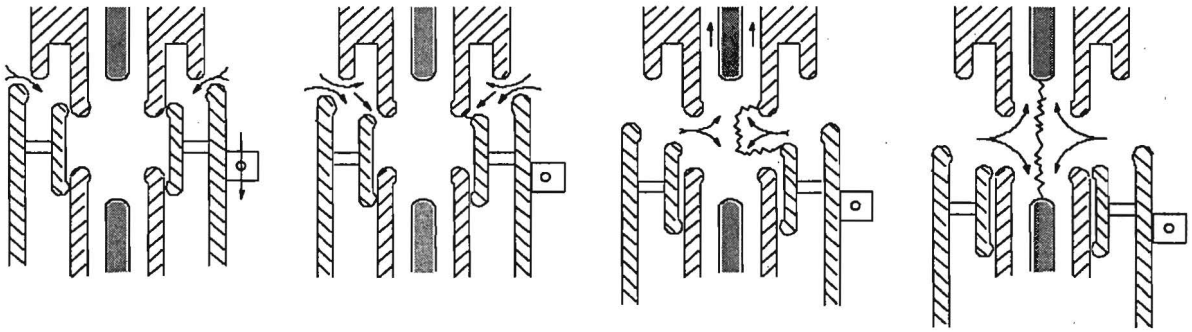
Als minder gunstige eigenschap volgt uit deze laatste constatering dat er ook maar weinig energie nodig is (lage TRV) om een nog niet voldoende gekoelde ontlading weer in geleiding te brengen. Als verdere nadelen gelden dat door bogen in SF₆ verbindingen ontstaan die om twee redenen gevaarlijk zijn: ten eerste zijn ze corrosief en kunnen constructie-materialen aantasten hetgeen onderhoud nodig kan maken; ten tweede zijn ze zeer giftig en vormen ze serieuze milieuproblemen.

Een ander bezwaar is dat SF₆ bij hoge drukken en lage omgevingstemperaturen (0° C en 15 bar) condenseert, waardoor in koude openluchtopstellingen een verwarmingssysteem nodig is.

8b.6 De SF₆ vermogensschakelaar

SF₆-vermogensschakelaars worden toegepast in het hele midden- en hoogspanningsgebied. Zij zijn ontwikkeld vanuit de principes zoals die reeds bekend waren bij de drukluftsckakelaars.

In eerste instantie zijn de SF₆-dubbeldrukschakelaars ontstaan waarbij in rusttoestand altijd 2 drukken aanwezig zijn (bv. 16 bar en 3 bar), op peil gehouden door een externe compressor. Op de scheiding van hoge en lage druk zijn de bluskamers aangebracht (zie figuur x.10). Bij het openen van de contacten wordt een klep tussen de kamers geopend en wordt de boog alzijdig axiaal door het SF₆-gas omstroomd en gekoeld. Op deze manier worden de hete gassen en contact-afbrandprodukten afgevoerd.

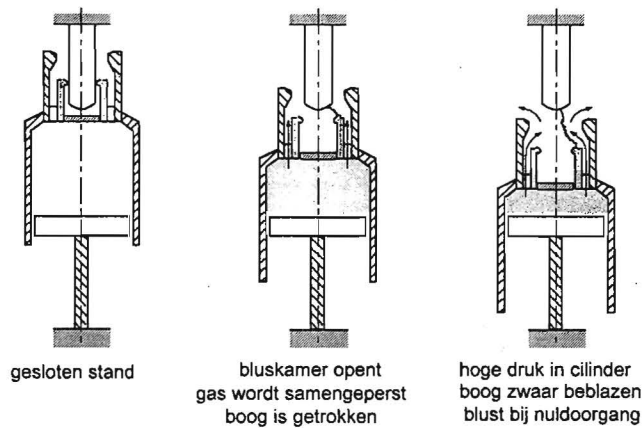


Figuur 8b.10. *Werking van de dubbeldruk SF₆-schakelaar. 1. Gasstroming begint; 2. Boog wordt getrokken en beblazen; 3. Boog naar bluspositie; 4. Boog in bluspositie, nuldoorgang.*

In figuur 8b.10 is tevens te zien dat het contactstelsel voor gescheiden functies ontworpen is: de nominale stroom wordt door de hoofdcontacten gevoerd (meestal verzilverde vinger- of tulpcontacten). De boog wordt zo snel mogelijk (elektromagnetisch) naar speciale afbrandcontacten geleid (meestal van een wolframlegering).

Puur technisch gezien is het dubbeldruk principe aantrekkelijk omdat zeer grote stromen onderbroken kunnen worden en het gas makkelijk gezuiverd kan worden. De nadelen zijn van economische aard: de hoge druk moet continu "stand by" staan en bewaakt worden. Er is een compressor nodig en bij extreme koude kan condensatie optreden van het hoge druk gas. Om bovenstaande redenen wordt dit principe door vrijwel geen enkele fabrikant meer toegepast.

De tweede generatie SF₆-schakelaars werkt volgens het enkeldruk principe, toegepast in de puffer-schakelaar. Deze wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van slechts één druk op relatief laag niveau (3 - 6 bar).



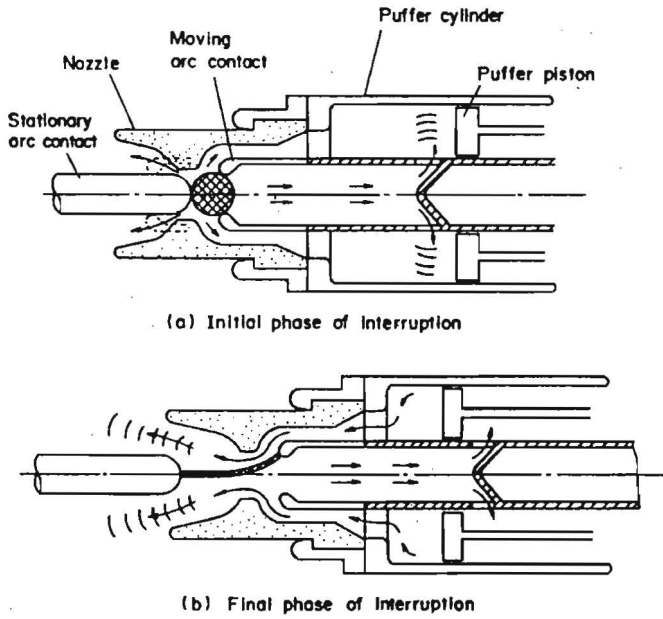
Figuur 8b.11. *Principe werking van de SF₆-pufferschakelaar.*

De noodzakelijke blusdruk wordt opgebouwd door de uitschakelbeweging zelf. Tijdens het uitschakelen glijdt het bewegende cilinderhuis tegen een vast opgestelde zuiger, zie figuur 8b.11. Door de compressie zal het gas met grote snelheid door een speciale (keramische of kunststof) straalpijp ("nozzle") stromen, in het hart waarvan de boog zich bevindt. Tevens wordt de druk verhoogd door de hoge temperatuur van de boog.

Dit principe vereist een zware aandrijving; voor vermogensschakelaars in vrije opstelling (open lucht) kan dit resulteren in grote krachten op de fundamente. De pufferschakelaar is (nog) de meest toegepaste SF₆-schakelaar.

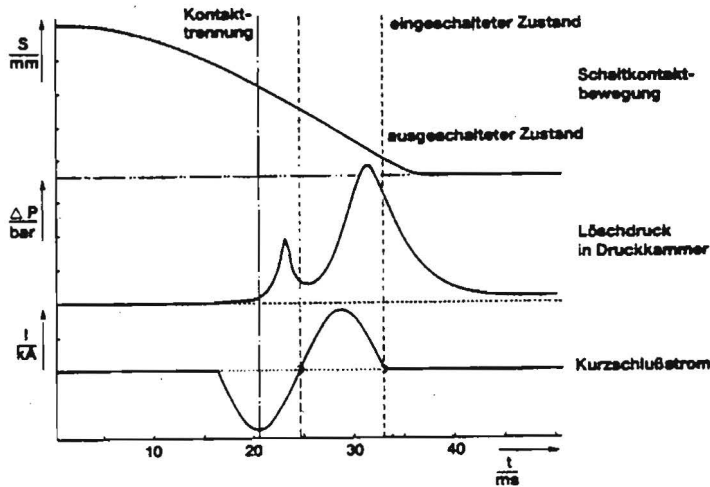
Ofschoon puffer-schakelaars uitstekende onderbrekingseigenschappen hebben, heeft de zware aandrijving benodigd voor de pufferschakelaar geleid tot de ontwikkeling van de 3^e generatie SF₆-vermogensschakelaars. Deze ontwikkeling heeft namelijk geleid tot een aanzienlijke reductie van de (extern toegevoerde) aandrijfenergie en derhalve de mogelijkheid geopend voor lichtere (veer)aandrijvingen met een hogere betrouwbaarheid.

De aanzienlijke verlaging van de extern toegevoerde energie van de 3^e generatie SF₆ schakelaars wordt bewerkstelligd door meer boogvermogen af te tappen. Dit is gerealiseerd in de "zelfblussende" ("self-blast" - of "self-extinguishing") schakelaar waarin drukverhoging niet zozeer mechanisch dan wel thermisch tot stand wordt gebracht. Dit kan gebeuren door in de hoge stroomfase de hete boog druk op te laten bouwen in een speciale drukkamer, die leegstroomt en aldus de boog koelt nabij de nuldoorgang, zie figuur 8b.12 (uit Nakanishi, "Switching Phenomena in HV Switchgear", M. Dekker Inc. 1991).



Figuur 8b.12. Principe zelfblussende schakelaar (Toshiba).

Het probleem van deze schakelaar is de sterk verminderde koeling bij lage (kortsluit-)stromen. Om deze reden moet meestal nog een extra (kleine) zuiger aangebracht worden, voor een puffer-ondersteunde blussing. Deze vereist dan echter nog maar 10-20% van de aandrijfenergie van een pufferschakelaar. Dergelijke ontwerpen zijn sterk verbeterd door toepassing van gecompliceerde computerberekeningen, gebaseerd op thermodynamica en stromingsleer, o.a. uit de automobiellindustrie. In figuur 8b.13 is het globale gesimuleerde gedrag van het drukverloop geschetst tijdens de onderbreking van een dergelijke zelfblussende schakelaar.

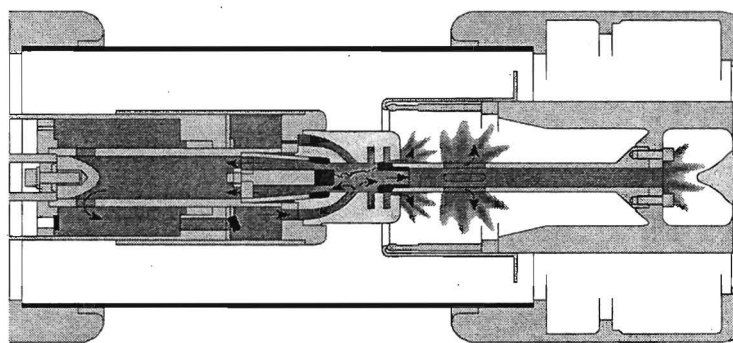


Figuur 8b.13. Schakelcyclus zelfblussende schakelaar (AEG)

Analoog zijn meerdere principes uitgewerkt, welke elk gericht zijn op het benutten van de boogenergie om de extern toegevoerde aandrijfenergie te verminderen. De plaats waar de boogenergie zijn energie afgeeft of de manier waarop is voor de diverse fabrikanten verschillend en leidt derhalve ook tot verschillende benamingen van het onderbrekingsprincipe van de 3^e generatie SF₆ vermogensschakelaars, zoals "autopuffer" (ABB), zelf comprimerende vermogensschakelaar

(“Selbstkompressionsprinzip”, Siemens), thermische beblazing (“thermal blast interruption”, GEC Alstom / AEG) en “Zelf Compenserende Vermogensschakelaar” (ELIN Holec High Voltage).

Het principe van de “Zelf Compenserende Vermogensschakelaar” (ELIN Holec High Voltage) is er op gebaseerd het “afgetapte” boogvermogen mee te laten werken met de aandrijfenergie in een “ondersteund” puffer-principe (zie figuur 8b.14). Hiermee wordt de aandrijfenergie gereduceerd analoog aan de andere 3^e generatie SF₆-vermogensschakelaars, doch worden de voordelen van het puffer-principe gehandhaafd (geen kritische stroom,) en de nadelen van de “zelfblussende” schakelaar (o.a. hulp pufferkamer) ondervangen.



Figuur 8b.14. *Principe zelf compenserende vermogensschakelaar (ELIN Holec High Voltage)*

8b.7 Nabeschouwing Hoogspanningsvermogensschakelaars

Achtereenvolgens zijn drukluchtschakelaars en SF₆ vermogensschakelaars behandeld.

De drukluchtschakelaar was de opvolger van de olieschakelaar, daar de drukluchtschakelaar de weg opende naar hogere afschakelvermogens.

De nadelen verbonden aan de drukluchtschakelaar (zoals current-chopping, gevoeligheid voor RRRV en de geluidsbelasting) leidde tot de ontwikkeling van SF₆ vermogensschakelaars.

Voortgaande ontwikkelingen binnen de SF₆ vermogensschakelaars leiden tot een steeds gaande vereenvoudiging van de onderbreker zelf en een sterke afname van de benodigde (externe) aandrijfenergie. Dit laatste vertaald zich in steeds simpelere en lichtere aandrijvingen en een hogere betrouwbaarheid van de vermogensschakelaar.

8b.8 Literatuur

- Prof. Ir. J. de Haas, “Centrales en Onderstations II”, Collegedictaat TU Delft, 1982
- I.J.P.J.M. Ponsioen, “Driefasen omhuld L-SEP gasgeïsoleerd schakelmaterieel”, *Energietechniek* 74, 1996, pp. 784-787
- C.H. Flurscheim, “Power circuit breaker, theory and design”, IEE Monograph series 17, 1975, Peregrinus
- Nakanishi, “Switching Phenomena in HV Switchgear”, M. Dekker Inc. 1991
- Z. Gajic, “Experience with puffer interrupter having full self-compensation of resulting gas pressure force generated by the electrical arc”, CIGRE, 1998

9. NIET-MECHANISCHE SCHAKELENDE KOMPONENTEN

In de voorafgaande hoofdstukken zijn steeds schakelaars behandeld waarbij de boog ontstaat ("getrokken wordt") als gevolg van een mechanische handeling, nl. het scheiden van stroomvoerende contacten.

In de **smeltveiligheid** echter ontstaat de boog "automatisch" na het smelten van speciale smeltgeleiders door een overmaat aan elektrische energietoevoer. In de energietechniek wordt de beveiligingsfunctie "stroomonderbreking bij overstroom" zeer vaak vervuld door smeltveiligheden, die in laag- en middenspanningsnetten (in het laatste geval vaak in combinatie met lastscheiders) veelvuldig aanwezig zijn.

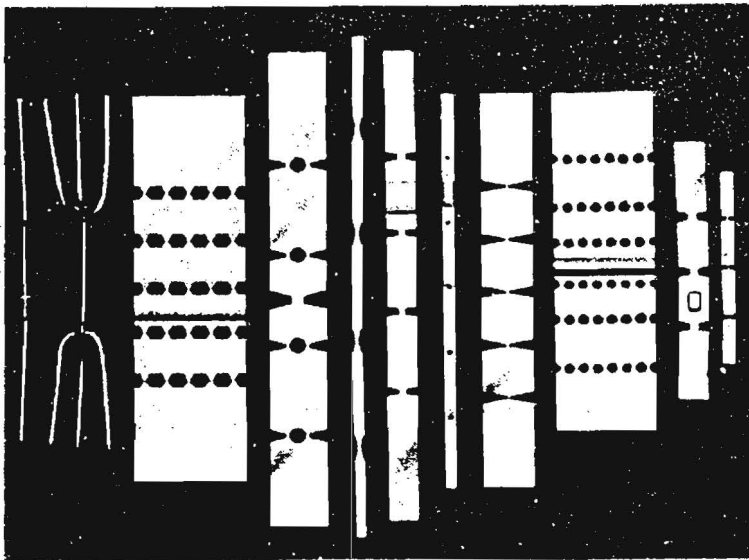
Verder zal in dit hoofdstuk kort aandacht worden besteed aan twee soorten "gestuurde schakelaars":

- (stroomgestuurde) **halfgeleiders**, eventueel in combinatie met mechanische schakelaars. Een dergelijke combinatie wordt wel "hybride schakelaar" genoemd.
- (spanninggestuurde) **inschakelaars** voor goed gedefiniëerde inschakelingen van stroom en/of spanning in laboratorium- of beproevingscircuits, de zg. vonkenbruggen of "spark gaps".

9.1 Smeltveiligheden.

Smeltveiligheden waren de eerste beveiligingstoestellen in elektrische circuits. Hun werking is gebaseerd op het bewust aanbrengen van een zwakste schakel in het circuit. Bij een calamiteit wordt deze schakel opgeofferd om een omvangrijker circuitdeel te redden. Hun rol is geleidelijk overgenomen door vermogensschakelaars.

Voor een aantal toepassingen waarbij een zeer hoge snelheid van ingrijpen vereist wordt, (dus een zeer korte reactie tijd $T''T$, zie hoofdstuk 6.2) zoals bij een interne fout in distributietransformatoren of voor de beveiliging van halfgeleiders, is de smeltveiligheid meestal superieur. Ook uit kosten- of selectiviteitsoverwegingen kan voor smeltveiligheden worden gekozen.



Figuur 9.1. Smeltgeleiders.

9.1.1 Principiële opbouw.

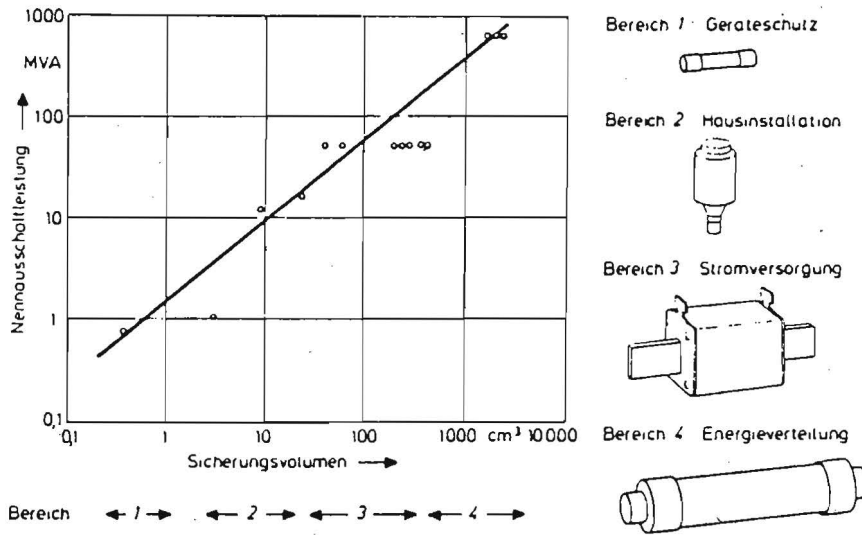
Smeltveiligheden zijn in principe zeer eenvoudig opgebouwd. Het hart van een smeltveiligheid wordt gevormd door een of meer smeltgeleiders, bestaande uit dunne draden of strips van zilver of koper (zie fig. 9.1). Meestal zijn de smeltgeleiders voorzien van plaatselijk vernauwde doorsnedes ("notches") en

zijn ze, omgeven door kwartszand, in een drukvaste behuizing geplaatst. Op de geleiders is vaak een smeltpuntverlagend middel aangebracht.

9.1.2 Uitvoeringsvormen en toepassingsgebieden.

Hoewel het basisprincipe van smeltveiligheden zeer eenvoudig is, zijn in de loop van de tijd sterk verschillende uitvoeringsvormen ontstaan, bepaald door het toepassingsgebied (zie fig. 9.2).

Voor de beveiliging van distributiesystemen (middenspanning) worden buisvormige patronen gebruikt, waarbij de smeltgeleiders om een isolator zijn gewikkeld, om een maximale lengte te bereiken. Aan smeltveiligheden voor laagspanningsverdeelssystemen worden bijzondere eisen gesteld qua kortsluit-



Figuur 9.2. Het onderbrekingsvermogen van smeltpatronen als functie van het volume bij diverse uitvoeringsvormen.

vastheid, vandaar de meskonstructie (zie fig.9.2, uit: Haas, ETZ 105 (1984)). Bij smeltveiligheden voor eind-verbruikers (de zg. D- en miniatuur patronen) zijn vooral de kostenfactoren en de veilige uitwisselbaarheid van belang.

In fig. 9.2 is het verband gegeven tussen het schakelvermogen (0.1 - 1000 MVA) en het volume (0.1 - 10.000 cm³). Van de niet getoonde uitvoeringsvormen kan verder nog de expulsiepatroon genoemd worden. In deze smeltveiligheid is de smeltgeleider niet omgeven door zand maar door gasafgevend fiber t.b.v. koeling van de boog. Dergelijke (niet stroombegrenzende) patronen vormen buiten West-Europa de meest gebruikte beveiliging van distributietransformatoren.

9.1.3 Het aanspreken bij een overstroom.

Smeltveiligheden dienen aan te spreken bij het optreden van overstromen. Hierbij moet een onderscheid worden gemaakt tussen kortsluitingen en overbelastingen.

- a) Aanspreken bij kortsluiting. Bij een optredende kortsluitstroom (vele malen de nominale stroom) zal de Joule warmte-ontwikkeling ter plaatse van de vernauwing resulteren in een doorsmelten van de smeltgeleider. De temperatuurverhoging dT gedurende een tijd dt van een element met lengte dl en doorsnede A kan worden beschreven met de energiebalans, zonder rekening te houden met warmtetransport naar de omgeving omdat het opwarmproces zeer snel verloopt (adiabatische verhitting):

$$i^2 \rho \frac{dl}{A} dt = C A dl dT \quad (9.1)$$

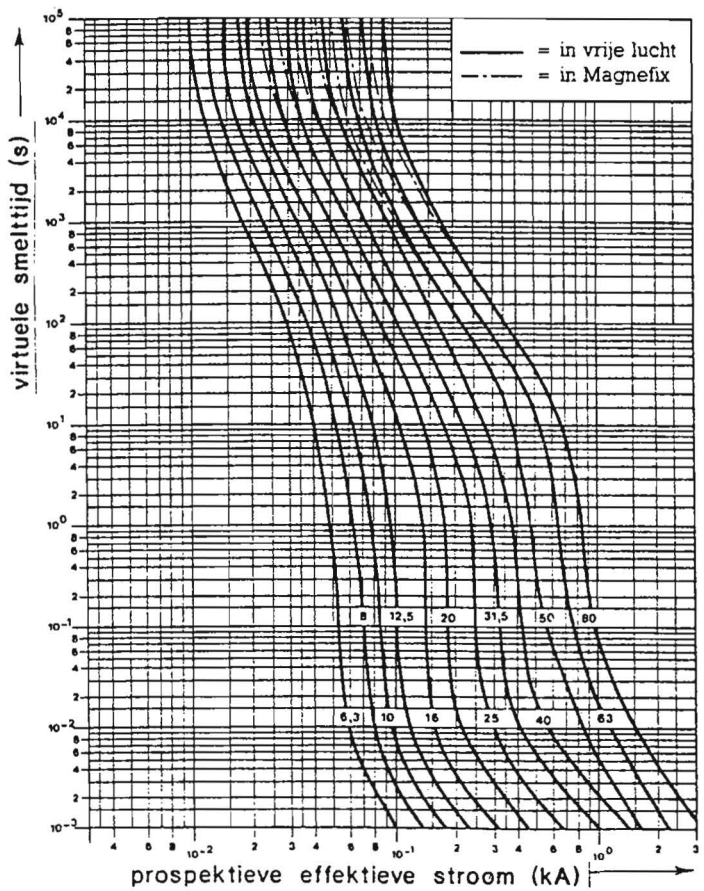
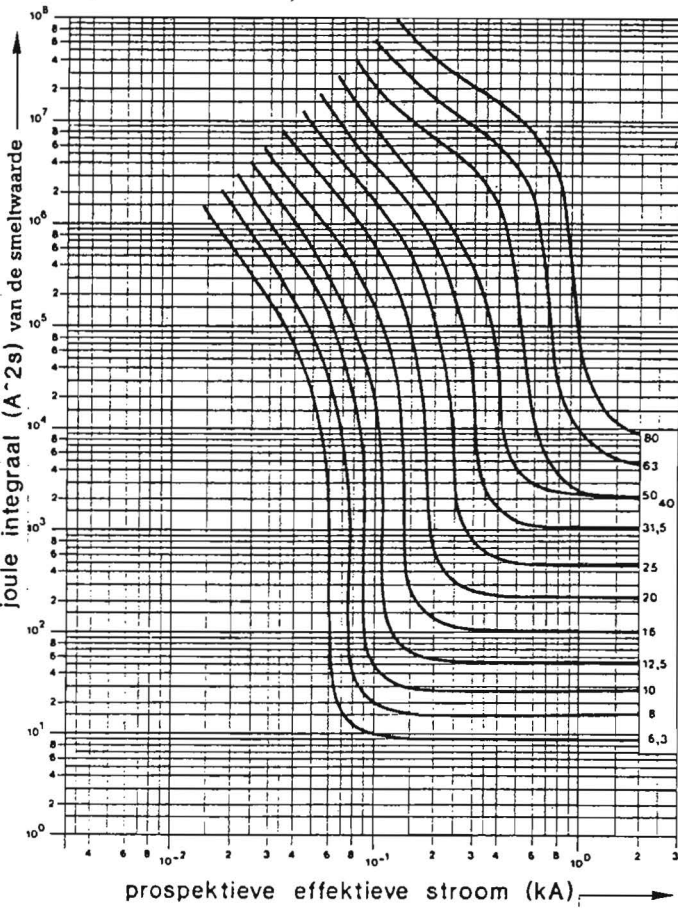
met ρ de soortelijke weerstand en C de warmtecapaciteit. Na substitutie van de temperatuur afhankelijke weerstand:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \beta(T - T_0)] \tag{9.2}$$

(met β de temperatuurcoëfficiënt) volgt dat het aanspreken van de smeltveiligheid wordt bepaald door de integraal:

$$\int j^2 dt = \int \frac{C}{\rho} dT \tag{9.3}$$

met $j = i/A$ de stroomdichtheid en als integratiegrenzen de begin- en smelttemperaturen.



Figuur 9.3. (links): Joule-integraal als functie van de prospektieve effectieve stroom (HOLEC).

Figuur 9.4. (rechts): Virtuele smelttijd als functie van de prospektieve effectieve stroom

Deze adiabatische integraalwaarde wordt wel met Meyerconstante aangeduid, alhoewel de grootte niet alleen afhankelijk is van materiaalgrootheden maar ook van de begintemperatuur T_0 .

De hiervan afgeleide integraal $\int i^2 dt$ voor de complete smeltveiligheid wordt wel **smeltintegraal** of **Joule-integraal** genoemd, kortweg $J I_{smelt}$ (zie ook hoofdstuk 3.5).

Voor smelttijden boven 100 ms kan in plaats van de smeltintegraal, de **smelttijd** als maat voor het aanspreken van de patroon worden genomen. Veelal wordt in plaats van de werkelijke smelttijd de **virtuele smelttijd** (t_v) gebruikt; deze is gedefiniëerd als:

$$t_v = \frac{J I_{smelt}}{I_p^2} \tag{9.4}$$

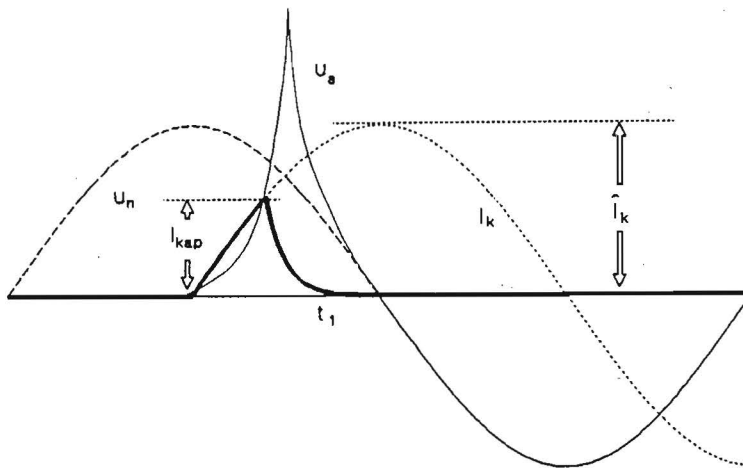
met I_p de (effektieve waarde van de) prospectieve stroom, zie fig. 9.3 en 9.4. Merk op dat op de horizontale as de effectieve **prospectieve kortsluitstroom** is uitgezet; hieronder verstaat men de kortsluitstroom die zou lopen zonder de aanwezigheid van beveiligingstoestellen (Engels: prospective current).

- b) Aanspreken bij overbelasting. Bij kleine overbelastingsstromen (enkele malen de nominale stroom) vindt de Joule-verwarming in de vernauwingen veel geleidelijker plaats, waarbij een aanzienlijke warmtestroom kan ontsnappen en de (adiabatische) aanname in (9.1) niet meer gerechtvaardigd is.

Dit heeft een drastische toename van de smeltintegraal tot gevolg. De patroon kan daardoor zo traag aanspreken dat deze inmiddels aan de buitenzijde is verhit tot ontoelaatbare temperaturen. Om de smeltveiligheid sneller te laten aanspreken bij kleine overstromen, wordt wel een druppel metaal met een laag smeltpunt (zoals tin) aangebracht op de zilverstrip. Het tin zal aanvankelijk weinig stroom voeren wegens de grotere specifieke weerstand maar wel eerder smelten dan de drager. Vervolgens diffundeert het zilver in het gesmolten tin, waardoor de zilverdoorsnede afneemt en de Joule-warmte exponentieel toeneemt. Zo kan de smelttijd bij lage overbelastingsstromen aanzienlijk worden verkort.

9.1.4 De boogperiode.

Na het doorsmelten van de smeltgeleider ontstaat een boogontlading die door steeds meer smeltbandmateriaal te verbruiken zichzelf verlengt. Bij kortsluitstromen brandt de zilverstrip zo snel weg (zeer kleine reaktietijd $T'T$), dat (bij zandgevulde patronen) er zeer snel een grote spanning (relatieve boogspanning $u' > 1$) opgebouwd wordt. Deze is, volgens het mechanisme van stroombegrenzing zoals beschreven in hoofdstuk 6 (zie fig. 9.5), in staat de stroom naar nul te dwingen, ver voordat de verwachte stroomtop wordt bereikt.



Figuur 9.5. Stroom en spanning bij onderbreking met smeltveiligheid van een kortsluitstroom.

Bij een sterke stroombegrenzing is de doorgelaten stroompiek I_{kap} (de kapstroom) ongeveer gelijk aan de stroomwaarde waarbij het doorsmelten plaatsvindt. In dit geval neemt de piekwaarde I_{kap} van de in het net optredende kortsluitstroom niet meer lineair toe met I_p (zie fig. 9.6), maar slechts met de macht $1/3$. Deze afhankelijkheid is eenvoudig af te leiden door substitutie van $i(t) = I_p \sqrt{2} \omega t$ in de uitdrukking voor de smeltintegraal.

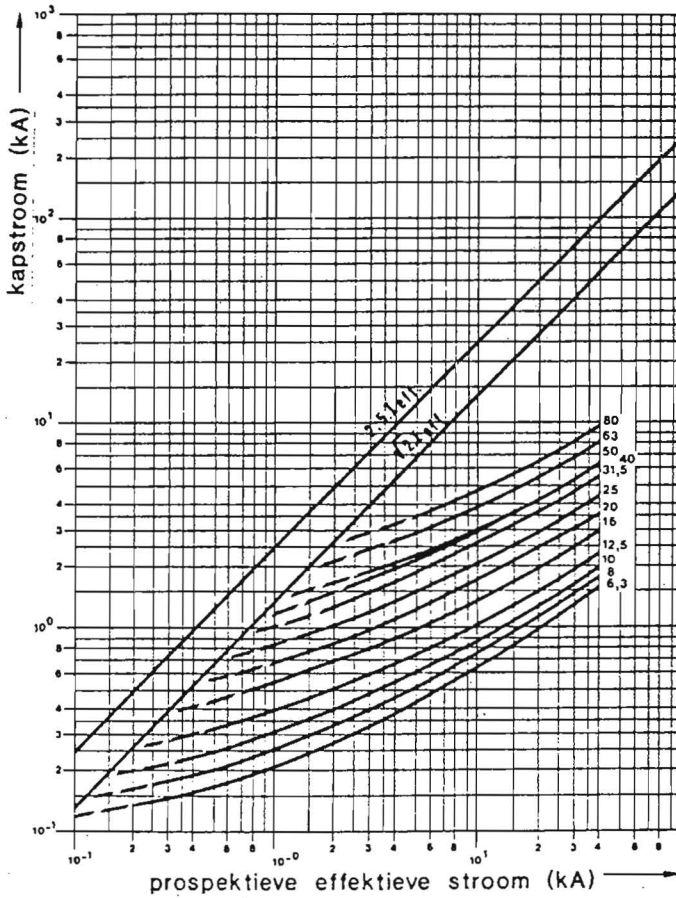
De stroombegrenzende werking heeft ook tot gevolg dat de boogenergie niet lineair blijft toenemen met de stijgende prospectieve kortsluitstroom. Na een maximale waarde (bij een kritische stroomsterkte van 25 - 50 maal de nominale stroom), neemt de boogenergie af bij hogere kortsluitstromen. Het optreden van dit maximum is kwalitatief als volgt te verklaren:

Als een smeltveiligheid bij een kortsluiting aanspreekt bij een momentane stroom I_{kap} , moet de opgeslagen energie $\frac{1}{2} L I_{kap}^2$ in de zelfinductie, worden gedissipeerd in de boog (en de circuitweerstand). Er geldt dan:

$$I_{kap} = \sqrt[3]{I_p}$$

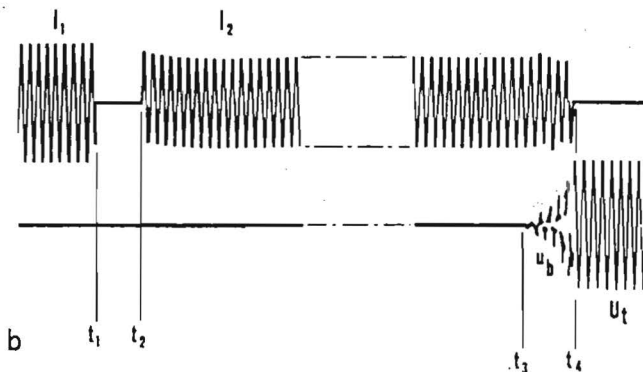
$$I_p = \frac{1}{L} = \frac{1}{2} L I_{kap}^2 = \frac{1}{\sqrt[3]{I_p}}$$

Door de verlaagde boogenergie bereikt men niet alleen een verminderde thermische belasting van de patroon(omgeving), maar ook een verkleining van de totale doorlaatintegraal Π_{tot} (voor zowel de smelt- als de boogperiode), hetgeen bepalend kan zijn voor de beveiliging van achterliggend materieel. In het geval van geringe overbelastingsstromen geschiedt de boogverlenging en boogspanningsopbouw zeer geleidelijk. De uiteindelijke stroomonderbreking vindt dan pas plaats na meerdere perioden (zie fig. 9.7), zonder stroombegrenzing.



Figuur 9.6. Kapstroom als functie van de prospektieve effectieve stroom (HOLEC).

Terwijl de bovengrens van de afschakelstroom weinig problemen oplevert voor de meeste smeltveiligheden kan dit beslist niet gezegd worden van de ondergrens. Niet alleen het trage aanspreken maar ook



Figuur 9.7. Stroom en spanning bij een overbelasting (HOLEC).

de trage boogspanningsopbouw kan funeste gevolgen hebben.

Vooraf bij middenspanning-patronen kan het afsmelten zo traag zijn dat de voor stroomonderbreking vereiste isolatie-afstand pas na tien of meer perioden bereikt wordt, hetgeen kan leiden tot een explosie van de patroon.

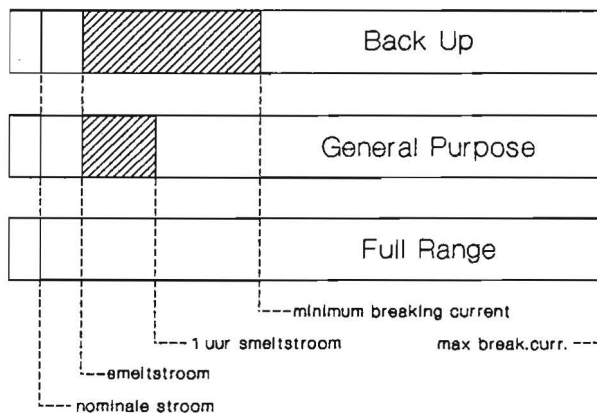
Daarom maakt men wel onderscheid tussen "backup"-patronen, die enkel geschikt zijn als beveiliging tegen kortsluitingen, en "general purpose"-patronen die ook in staat zijn om een gedeelte (niet alle!) van de overbelastingsstromen te onderbreken.

Recentelijk zijn er ook nog "full range"-patronen bij gekomen, die alle stromen waarbij doorsmelten optreedt kunnen onderbreken (zelfs stromen beneden de nominale waarde).

9.2 Halfgeleider-schakelaars.

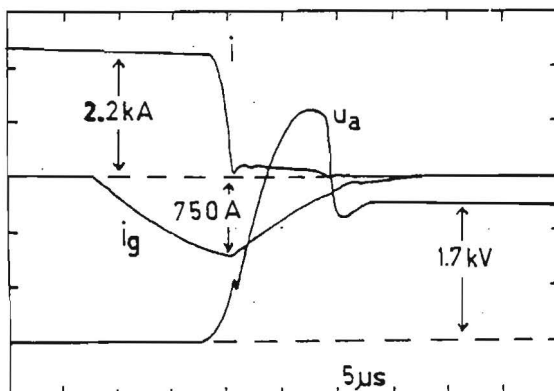
De boogvrije, statische halfgeleider-vermogensschakelaar is een reeds lang gekoesterde wens. Daarbij wordt echter vaak vergeten dat de wisselstroomboog een zeer goede natuurlijke synchronisatie biedt om op dat moment de stroom te onderbreken waarop de opgeslagen energie in het net minimaal is, nl. op de nuldoorgang (zie hoofdstuk 2.3).

Heden ten dage staat een groot assortiment van halfgeleiders ter beschikking, tot spanningen van enkele kV en stromen tot enkele kA per component.



Figuur 9.8. Toepassingsgebieden van smeltveiligheden

Het dichtst bij de vermogensschakelaar komt de GTO (Gate Turn Off)-thyristor. Deze component is - in tegenstelling tot de conventionele thyristor - in staat om stromen te onderbreken na een kortstondige (maar grote) gate stroompuls, zie oscillogram 9.9. In speciale "snubber-circuits" moet de in het net opgeslagen energie dan worden geabsorbeerd. Sperspanningen van 4.5 kV en uitschakelstromen van 4 kA zijn reeds (1994) gerealiseerd.



Figuur 9.9. Onderbreking van een 2.2 kA stroom (i) met een GTO thyristor (Siemens). u_a : anodespanning; i_g : gatestroom.

Vooralsnog treft men halfgeleider elementen uitsluitend aan de verbruikerszijde van de energie distributie aan (tot enkele MVA). De toepassing van halfgeleiders als regel- en schakelement komt uitvoerig aan de orde in het college "Vermogenselectronica".

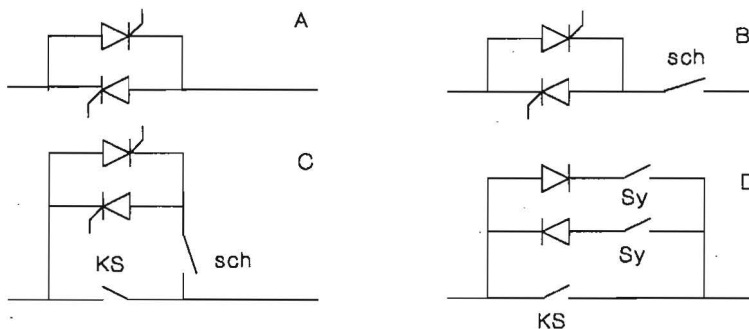
Halfgeleiderschakelaars treft men in grote getale aan bij de conversie van wissel- naar gelijkspanning en vice versa (AC\DC en DC\AC). Deze komt voor als netten van verschillende frequentie en/of fase aan elkaar gekoppeld moeten worden, of bij gelijkspanningstransmissie over zeer grote afstanden (HVDC). In HVDC netten zelf wordt niet geschakeld omdat een nuldoorgang ontbreekt.

Ook voor het flexibel bij- en afschakelen van condensatorbanken t.b.v. een grotere spanningsstabilisatie en/of betere $\cos\phi$ worden wel halfgeleidersystemen toegepast ("Static Var Control").

9.3 Hybride schakelaars

In principe zijn ook op transmissie nivo halfgeleidervermogensschakelaars denkbaar. Gaan we uit van een te vervangen HS-schakelaar (245 kV, 40 kA kortsluit- en 2 kA nominale stroom) dan zijn meerdere honderden in serie geschakelde thyristoren nodig in een driepolige antiparallelschakeling, als aangegeven in fig. 9.10a. De kosten hiervan liggen een tot twee orden van grootte boven die van een konventionele SF₆ schakelaar. Bovendien zal vanwege de spanningsval over de halfgeleiders in ongestoord bedrijf al vele honderden kW thermisch vermogen verloren gaan.

De schakeling in fig. 9.10b bevat een scheider (sch) die de isolatie tegen overspanningen verzorgt waardoor het aantal serieelementen gereduceerd kan worden.



Figuur 9.10. Principe hybride schakelaars.

Door bovendien een commutatie-schakelaar KS aan te brengen (fig. 9.10c) nemen tevens de nominale wattverliezen af. Deze schakelaar heeft de taak bij een foutsituatie (snel) te openen waardoor de stroom zal commuteren in een van beide halfgeleidertakken.

Fig. 9.10d laat zien dat in de stroomloze halve periode door de diodetakken de synchrone schakelaars Sy boogloos geopend kunnen worden (10 ms na elkaar) waardoor - bij geopende KS - in principe boogloos afgeschakeld wordt.

Een dergelijk schakelaarconcept waarbij een combinatie van een mechanische met een halfgeleider schakelaar toegepast wordt, wordt wel **hybride schakelaar** genoemd. Hoewel vele soorten hybride schakelaars in principe voor alle schakelopdrachten denkbaar zijn, zal in de afzienbare toekomst de halfgeleider niet in het hoogspanningsnet doordringen.

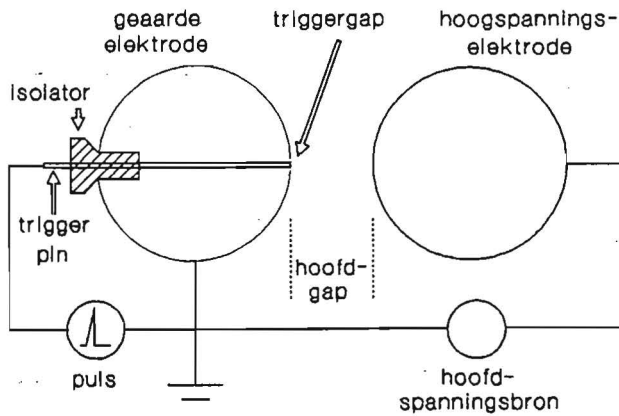
Op middenspanningsnivo dringen de hybride schakelaars nu door in gelijkspanningsnetten (bijv. de Nederlandse Spoorwegen). Door een geladen condensator snel na detektie van een sluiting te ontladen wordt een tegenstroom op de stijgende flank van de kortsluitstroom geïnjecteerd. Onderbreking kan dan plaats vinden op de aldus ontstane geforceerde nuldoorgang, waarna de kortsluitstroom commuteert in een energie absorberend element, bijv. een (niet-lineaire) weerstand.

(Op basis van dit principe zijn in Japan exotische schakelaars gebouwd met vacuümschakelaar (voor de onderbreking op de geforceerde nuldoorgang) en SF₆ schakelaar (voor het "houden" van de TRV) in hoog(gelijk)spannings voedingen van magneten voor kernfusie-experimenten).

9.4 Spark gaps.

Met "spark gaps" (Nederlandse benaming is wel "vonkenbrug") worden schakelende componenten aangeduid waarin met behulp van een kleine hulpdoorslag een grote doorslag tussen twee hoofdelektroden (bollen of gekruiste cylinders) tot stand gebracht wordt. Deze worden veelvuldig gebruikt in laboratorium- en testcircuits (zie hoofdstuk 11) waar een nauwkeurige timing van spannings- of stroominschakeling vereist is.

Een veel gebruikte constructie is de "trigatron spark gap", zie fig. 9.11.



Figuur 9.11. Principe van getriggerde vonkenbrug.

Tussen de triggerpin en de bolvormige geaarde elektrode wordt met een relatief lage spanning (< 10 kV) een doorslag of overslag veroorzaakt van de triggergap. Als er een hoge spanning over de hoofdelektroden staat, geeft de injectie van geladen deeltjes uit de hulpdoorslag aanleiding tot doorslag tussen de bollen, bij een spanning die veel lager ligt dan de spontane doorslagspanning van de bollenconfiguratie.

Trigatrons kunnen worden gebruikt voor zeer hoge spanningen (800 kV) en zeer grote stromen (100 kA).

Een trigatron in vacuüm wordt wel "triggered vacuum gap" genoemd en heeft (naast compactheid) als voordeel dat factoren als luchtvochtigheid, luchtstroming e.d. geen invloed hebben op het inschakel-tijdstip, dat zeer nauwkeurig kan worden ingesteld.

1. BEPROEVING VAN VERMOGENSSCHAKELAARS

Ondanks een grote verdieping van het inzicht in de essentiële processen gedurende de schakelcyclus, zijn de mogelijkheden om vermogensschakelaars te ontwikkelen op basis van theoretische concepten vooralsnog beperkt. Dit leidt ertoe dat het beproeven van schakelaars vanaf de tekentafelfase tot aan het produkt van zeer groot belang is.

In de ontwerpfase leiden **ontwikkelingsproeven**, meestal uitgevoerd door de fabrikant, tot een geleidelijke verbetering van een prototype. Het definitieve ontwerp wordt vervolgens onderworpen aan een reeks **typekeuringen**, waarmee getracht wordt aan te tonen dat het uiteindelijke produkt voldoet aan de eisen, die in de **normvoorschriften** vastgelegd zijn. Deze normvoorschriften kunnen in nationaal verband (NEN, Nederland; VDE, Duitsland; BS, Groot Brittanie; ANSI, USA) dan wel in internationaal verband (IEC, International Electrotechnical Commission) opgesteld zijn. In het streven naar eenheid in normvoorschriften zijn thans (met uitzondering van ANSI) de meeste nationale voorschriften gebaseerd op IEC.

Het opstellen van voorschriften vereist een grondige kennis van de verschijnselen die zich in net en schakelaar voordoen. Enerzijds moeten normen gebaseerd zijn op de moeilijkste schakelopdrachten voor een bepaald type schakelaar, anderzijds moeten de keuringseisen realistisch zijn, om nodeloze overdimensionering te vermijden. Gedetailleerde (voor)studies worden in internationaal verband gedaan door studiegroepen van het CIGRE (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à haute tension). Verslag hiervan wordt gedaan in een tweejaarlijkse conferentie (Parijs), in het tijdschrift "Electra", in symposia en in (besloten) colloquia.

Typekeuringen worden meestal uitgevoerd door gespecialiseerde keuringsinstanties in opdracht van de fabrikant. Na het met succes afsluiten van een - in overeenstemming met een van de bovenvermelde normen - serie beproevingen, is de instantie bevoegd een certificaat ("letter of acceptance") af te geven waarin vermeld staat dat de door de fabrikant opgegeven specificaties geverifieerd zijn.

Voorbeelden van bekende keuringsinstanties zijn KEMA (Arnhem), dat beschikt over het grootste kortsluitlaboratorium ter wereld, CESI (Milaan) en diverse instanties van nationale energiebedrijven (EdF, Frankrijk).

Een verdere soort beproeving is de **afnamekeuring** waarbij de gebruiker aan een keuringsinstantie opdracht geeft de specificaties van individuele produkten van een type te toetsen.

11.1 Type-keuringen.

De in paragraaf 2.4 genoemde eisen van vermogensschakelaars luiden:

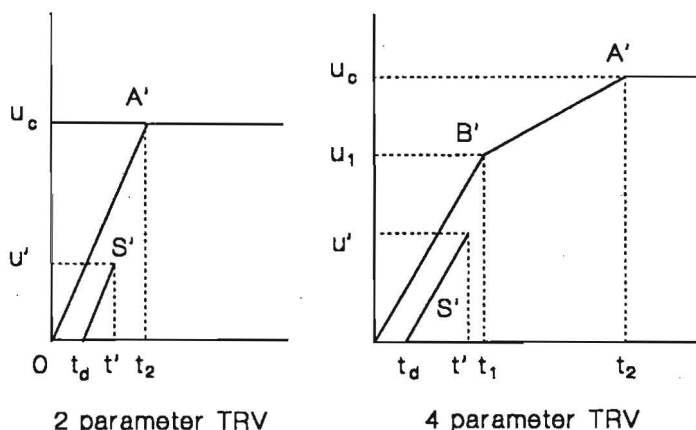
- 1) Goede isolator in geopende toestand. Ter controle hiervan worden diëlektrische proeven uitgevoerd met wisselspanning, in droge toestand alsook in regen voor buiteninstallaties. Verder worden proeven met bliksemspanning van een gestandaardiseerde vorm uitgevoerd en, voor schakelaars met nominale spanningen boven 300 kV, bovendien nog met schakeloverspanningen.
- 2) Goede geleider in gesloten toestand. Hiervoor wordt de schakelaar met zijn nominale stroom belast waarbij op langere termijn een bepaalde temperatuur niet overschreden mag worden. Verder wordt de schakelaar in gesloten toestand elektrodynamisch en thermisch belast met de volledig asymmetrische stootkortsluitstroom gedurende 1 s.
- 3) De overgang tussen geleidende en isolerende toestand en omgekeerd moet te allen tijde en onder alle gespecificeerde kondities snel verlopen. Ter controle hiervan worden mechanische beproeving (grote aantallen schakelingen in nullast gevolgd door schakelingen met nominale belasting) en kortsluitproeven gedaan, opklimmend van enige % tot 100% van het onderbrekingsvermogen. Het onderbreken van "kleine" (enige procenten van de) kortsluitstromen kan immers problematisch zijn bij schakelaars met drukopbouw t.g.v. boogactiviteit (olie-, zelfblussende SF₆-schakelaar). Ook de schakelcyclus is voorgeschreven. Een genormeerde cyclus luidt bijv.: O-t-CO-t'-CO (met O: openen, t, t': pauze, CO: sluiten onmiddellijk gevolgd door openen).

Aangezien een groot aantal fouten in het hoogspanningsnet door een kortstondige onderbreking opgeheven kan worden, moeten schakelaars in deze netten ook kortstondig kunnen onderbreken. Dit betekent voor de schakelcyclus $t = 0.3$ s ("autoreclosing").

De zwaarste beproeving wordt in veel gevallen niet gevormd door de volledige kortsluitstroom (klemmensluiting) maar door een sluiting op enige afstand (**korte-lijnfout** of "short line fault" [SLF], zie 4), vanwege de daarbij optredende zeer grote waarde van S_u . We zullen hier nader op ingaan aan de hand van de IEC normen voor beproeving met de juiste TRV in het algemeen en de korte-lijnfout in het bijzonder. We gaan hierbij uit van de IEC 62271-100 (2001) norm voor **midden- en hoogspanningsschakelaars** .

11.1.1 Representatie van de beproevings TRV.

Ten behoeve van de schakelaarbeproeving met een realistische TRV is door de IEC een makkelijk hanteerbare beschrijving ontwikkeld van het verloop van de TRV. Het doel hiervan is de beproeving onafhankelijk te maken van de plaats waar beproefd wordt, zonder de beproevingslaboratoria voor onmogelijke opgaven te stellen.



Figuur 11.1 (l), 11.2 (r): Twee- en vier-parameter IEC lijnen.

Hiertoe wordt de voorgeschreven, nog net toelaatbare beproevings-TRV beschreven door een aantal lijnstukken, die op hun beurt vastgelegd zijn door parameters.

- a) Voor schakelaars met nominale spanningen beneden 100 kV gaat men uit van een monofrequente TRV die geschematiseerd wordt met de zg. **twee-parameter-methode** bestaande uit de volgende twee parameters (zie fig. 11.1):

u_c : referentiespanning.

t_2 : tijdstip waarop u_c bereikt wordt. Dit levert het punt A'.

- b) Voor schakelaars met nominale spanningen boven 100 kV is de invloed van het multifrequente karakter van de TRV niet meer verwaarloosbaar en moet de TRV gedefiniëerd worden met 4 parameters (zie fig. 11.2), de zg. **vier-parameter-methode** :

u_1 : eerste referentiespanning;

t_1 : tijdstip waarop u_1 bereikt wordt. Dit levert het punt B'.

u_c : tweede referentiespanning;

t_2 : tijdstip waarop u_c bereikt wordt. Dit levert het punt A'.

- c) Lokale netcapaciteiten in de buurt van de schakelaar zullen de aanvangssteilheid van de TRV enige tijd vertragen. Daartoe is voor alle schakelaars een zg. "delay line" gedefiniëerd m.b.v. drie parameters (in fig. 11.1, 11.2 aangegeven als lijnstuk S'):

t_d : vertragingstijd;
 u' : spanning;
 t' : tijdstip waarop u' bereikt wordt.

Rated voltage	TRV peak value	Time	Time delay	Voltage	Time	Rate of rise
U (kV)	u_c (kV)	t_3 (μ s)	t_d (μ s)	u' (kV)	t' (μ s)	u_c/t_3 (kV/ μ s)
3.6	6.2	40	6	2.1	19	0.15
7.2	12.3	52	8	4.1	25	0.24
12	20.6	60	9	6.9	29	0.34
17.5	30	72	11	10	35	0.42
24	41	88	13	14	42	0.47
36	62	108	16	21	52	0.57
52	89	132	7	30	51	0.68
72.5	124	166	8	41	64	0.75

$$u_c = 1.4 \cdot 1.5 \sqrt{\frac{2}{3}} U; \quad t_d = 0.15 t_3 \text{ for } U < 52 \text{ kV};$$

$$u' = \frac{1}{3} u_c; \quad t_d = 0.05 t_3 \text{ for } U \geq 52 \text{ kV}.$$

Tabel 11.1 Twee-parameter TRV-representatie voor middenspanningsschakelaars. $p = 1.5$.

Rated voltage	First reference voltage	Time	TRV peak value	Time	Time delay	Voltage	Time	Rate of rise
U (kV)	u_1 (kV)	t_1 (μ s)	u_c (kV)	t_2 (μ s)	t_d (μ s)	u' (kV)	t' (μ s)	u_1/t_1 (kV/ μ s)
100	122	61	171	183	2	61	33	2.0
123	151	75	211	225	2	75	40	2.0
145	178	89	249	267	2	89	46	2.0
170	208	104	291	312	2	104	54	2.0
245	260	130	364	390	2	130	67	2.0
300	318	159	446	477	2	159	82	2.0
362	384	192	538	576	2	192	98	2.0
420	446	223	624	669	2	223	113	2.0
525	557	279	780	837	2	279	141	2.0
765	812	406	1137	1218	2	406	205	2.0

$$u_1 = 1.3 \sqrt{\frac{2}{3}} U; \quad t_2 = 3 t_1; \quad u_c = 1.4 u_1; \quad u' = \frac{1}{2} u_1.$$

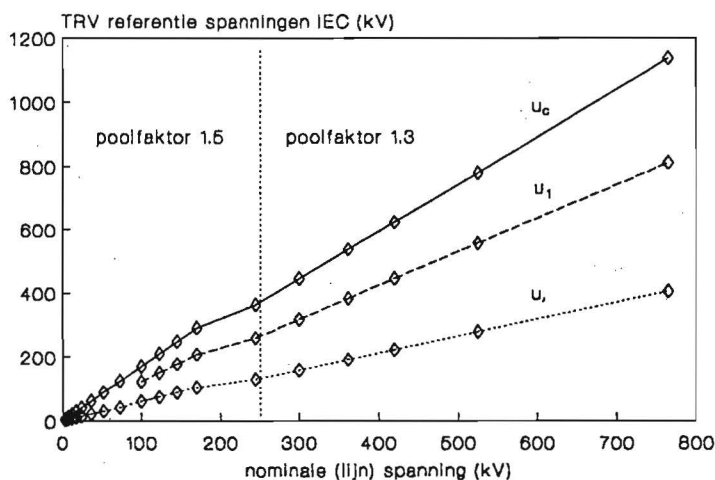
Tabel 11.2 Vier-parameter TRV-representatie voor hoogspanningsschakelaars
 Poolfactoren: serie 1 (100 - 170 kV): $p = 1.5$; serie 2: (245 - 765 kV): $p = 1.3$.

In tabel 11.1 t/m 11.2 (IEC 62271-100 tabel 1a, 1b en 1c) staan de waarden aangegeven van de vereiste 5 (< 100 kV) c.q. 7 (\geq 100 kV) parameters. Op basis van de tabellen is in figuur 11.3 de relatie tussen nominale spanning (U) en de 2 c.q. 3 referentiespanningen aangegeven. Zoals duidelijk te zien is, is er een lineair verband:

$$u_c = Ap \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U; \quad u_1 = p \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U; \quad u' = 0.5 p \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \tag{11.1}$$

Met de amplitudedefactor ($A = 1.4$) en p de poolfactor :

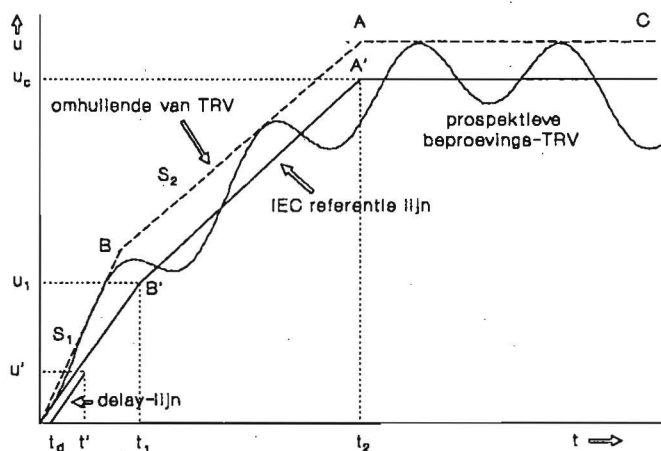
$p = 1.5$ voor $U < 100$ kV; $p = 1.5$ of 1.3 voor $100 \leq U \leq 170$ kV en $p = 1.3$ voor $U \geq 245$ kV.



Figuur.11.3 IEC referentie-spanningen vs. nominale spanning voor twee poolfactoren.

Om nu na te gaan of een TRV uit een beproevingscircuit voldoet aan de normen handelt men als:

- 1) Men neemt een oscillogram op van een beproevings-TRV die zonder beïnvloeding van een schakelaar optreedt.
Omdat op $t = 0$ $i = 0$ kan men de TRV t.g.v. het onderbreken door een α -breaker zien als het inschakelen van de netspanning op een RLC-circuit.
- 2) Trek een horizontale lijn door het maximum van de aldus verkregen TRV.
- 3) Bepaal daarop het punt A door snijden met de lijn $t = t_2$.
- 4) Construeer S_2 als raaklijn aan de TRV vanuit A.
- 5) Bepaal nu B als snijpunt van S_2 met S_1 , de raaklijn aan de TRV vanuit 0.



Figuur.11.4 Voorbeeld van een (prospektieve) beproevings-TRV die voldoet aan de IEC beschrijving voor de vier-parameter beproeving ("line of reference").

De op deze wijze geconstrueerde omhullende (O - B - A) van de beproevings-TRV ("prospective test TRV envelope") moet nu geheel links van de door het IEC voorgeschreven referentielijnen O - B' - A' liggen. ("reference line").

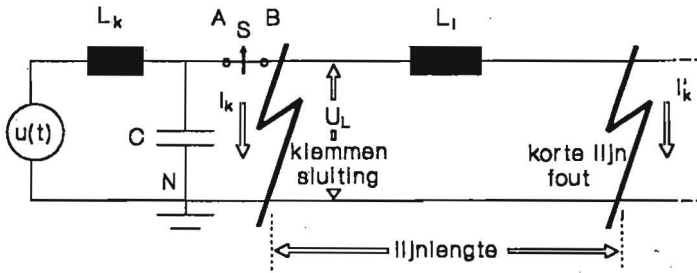
Bovendien moet de beproevings-TRV geheel links blijven van het delay lijnstuk S'. In fig. 11.4 is het bovenstaande toetsingscriterium voor beproevings TRV's geïllustreerd (IEC 62271-100 fig. 39) voor de vier-parameter-methode.

11.1.2 De korte-lijnfout.

Zoals uit de tabellen 11.1 t/m 11.2 blijkt, is de S_u van de voorgeschreven TRV altijd $\leq 2 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Bij het optreden van de korte-lijnfout echter kunnen veel hogere waarden optreden, zodat ook deze foutsituatie in de voorschriften moet zijn opgenomen.

Als maat voor de korte-lijnfout wordt niet de lijnlengte gedefinieerd maar de verhouding (λ) van de optredende kortsluitstroom (\hat{I}_k') en maximale kortsluitstroom bij klemmensluiting (\hat{I}_k), zie fig. 11.5:

$$\lambda = \frac{\hat{I}_k'}{\hat{I}_k} \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (11.2)$$



Figuur.11.5 Circuit voor berekeningen aan de korte-lijnfout.

Met deze definitie zijn een aantal relevante grootheden uit te drukken in λ . Voor de stromen geldt:

$$\hat{I}_k = \frac{\hat{U}}{\omega L_k} \quad \text{en} \quad \hat{I}_k' = \frac{\hat{U}}{\omega(L_k + L_L)}$$

met L_L de lijninductiviteit tot aan de foutplaats. Voor de spanning U_L over de lijn geldt:

$$U_L = \frac{L_L}{L_L + L_k} \hat{U}$$

zodat volgt:

$$U_L = (1 - \lambda) \hat{U} \quad (11.3)$$

Op basis van U_L definiëert de IEC voor de top-topwaarde (U_m) van de TRV aan lijnzijde:

$$U_m = 1.6 U_L \quad (11.4)$$

waarin de demping van de driehoeks-TRV verdisconteerd is (ongedempt geldt $U_m = 2U_L$). Het eerste maximum van de TRV over de schakelaar u_1 volgt dan uit:

$$u_1 = U_m + S_{u,c} t_m \quad (11.5)$$

met $S_{u,c}$ de steilheid van de TRV aan voedende zijde (du_{AN}/dt op $i = 0$) en t_m het tijdstip waarop U bereikt wordt.

Drukken we $L_L = l_s s$ uit als het produkt van de zelfinductie per meter l_s en de lijnlengte s dan volgt voor de lijnlengte:

$$s = \frac{1 - \lambda}{\lambda} \frac{L_k}{l_s} = \frac{1 - \lambda}{\lambda} \frac{\hat{U}}{l_s} \frac{1}{\omega \hat{I}_k} \quad (11.6)$$

In (4.20) is de demping verwaarloosd en is de spanningssteilheid S_u uitgedrukt als $S_u = vU_1/s$ met als golfvoortplantingssnelheid $v = 1/\sqrt{(l_s c_s)}$. Met substitutie van $S_i = \omega \hat{I}_k'$ is dan eenvoudig af te leiden dat

$$S_u = Z_0 S_i \quad \text{met} \quad Z_0 = \sqrt{l_s / c_s} \quad (11.7)$$

de golfimpedantie van de lijn. In de IEC normen, zie tabel 11.3 (IEC 62271-100 tabel 4), is te vinden dat voor beproevingscircuits t.a.v. de korte-lijnfout moet gelden: $Z_0 = 450 \Omega$.

Rated voltage U (kV)	Number of conductors per phase	Rated surge impedance Z (Ω)	Rated peak factor k	RRRV factor		Time delay t_{dl}^{**} (μs)
				50 Hz	60 Hz	
≤ 170	1 to 4	450	1.6	0.200	0.240	0.2
≥ 245						0.5

* For the RRRV factor s , see Appendix AA.

** A local capacitance on the line side of the circuit-breaker (e.g. disconnector, current and voltage transformer) produces a slower rate-of-rise of the line side voltage in its very initial stage. This is taken into account by introducing a line side time delay t_{dl} . This capacitance does not have any influence upon the surge impedance of the actual line.

For determination of the line side time delay and the rate-of-rise of the line side voltage, see figure 14, page 102.

Tabel 11.3 Standaardwaarden voor lijnkaracteristieken bij korte-lijnfout beproeving.

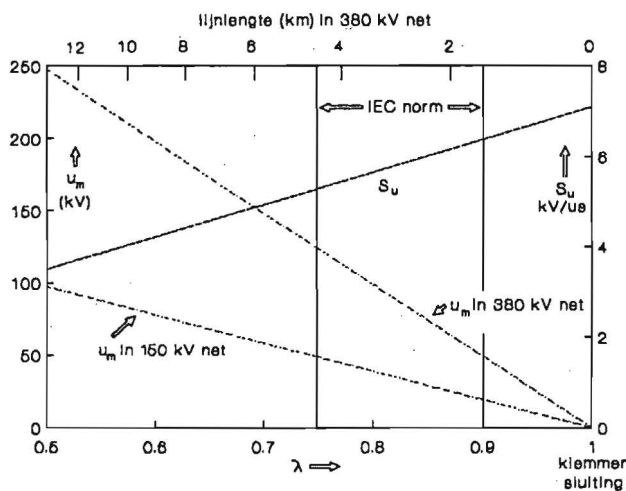
Voor een schakelaar met een onderbrekingscapaciteit van $\hat{I}_k = 50 \text{ kA}$ betekent dit dat in geval van een 90% korte-lijnfout ($\lambda = 0.9$):

$S_i = 0.9 \cdot 314 \cdot 50 \cdot 10^3 = 14 \text{ A}/\mu s$, 5 μs voor de nuldoorgang vloeit dus nog 70 A. De TRV begint met:

$S_u = 450 \cdot 14 \cdot 10^6 = 6.4 \text{ kV}/\mu s$, dus 5 μs later is de spanning reeds ca. 30 kV!

Het is duidelijk dat deze zeer sterk wisselende belasting binnen 10 μs een moeilijke opgave is.

In fig. 11.6 staan de onderbrekingsparameters U_m en S_u voor de bovenvermelde schakelaar uitgezet tegen de korte-lijn (of stroom-redukctie)factor λ .



Figuur 11.6 Afhankelijkheid van de spanningsparameters U_m en S_u van λ (ks.factor) en lengte (s).

Er is duidelijk te zien dat de lengte een invloed moet hebben op de moeilijkheidsgraad: grotere lengte betekent lagere \hat{I}_k' , kleinere S_i , lagere S_u maar grotere U_m , dus u_1 . Omdat de laatste parameter de onderbreking moeilijker maakt en de eerste drie de onderbreking vergemakkelijken, ligt het voor de hand te

veronderstellen dat er een waarde van λ is waarbij de onderbreking het moeilijkst is. Alleen bij exakte kennis van de moeilijkheidsgraad-functie $M = f(\hat{I}_k, S_i, S_u, u_1, A)$ is deze lengte en dus λ te bepalen.

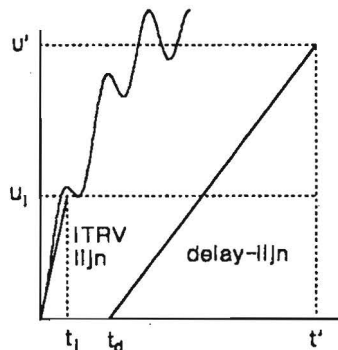
Door het IEC is vastgelegd dat t.a.v. korte-lijnfouten beproefd dient te worden met $\lambda = 0.9$ en $\lambda = 0.75$, zoals aangegeven in fig. 11.6.

De SF₆-schakelaar is gevoelig voor thermische herontsteking aangezien een lage spanning de boog weer kan herstellen (zie par. 8a1.3) mits deze spanning zeer snel na de nuldoorgang aanwezig is. Hiervoor is het initiële gedrag van de TRV voorafgaand aan de kortelijn-TRV voorgeschreven.

Deze TRV-component (in IEC publicaties ook wel ITRV genoemd; "I" voor "initial") ontstaat door reflecties van lopende golven aan de dichtstbijzijnde impedantiesprong langs de geleiders, meestal nog in het onderstation. Deze ITRV heeft dus dezelfde oorsprong als de korte-lijn-TRV maar heeft een veel hogere frequentie (ca. 1 MHz) en veel lagere amplitude (enkele kV).

De ITRV wordt gekarakteriseerd door 2 parameters (zie fig. 11.7):

- u_i : referentie spanning;
- t_i : tijdstip waarop u_i bereikt wordt (9 parameters gekarakteriseerd).



Figuur 11.7 IEC beschrijving van de ITRV.

Voorbeeld.

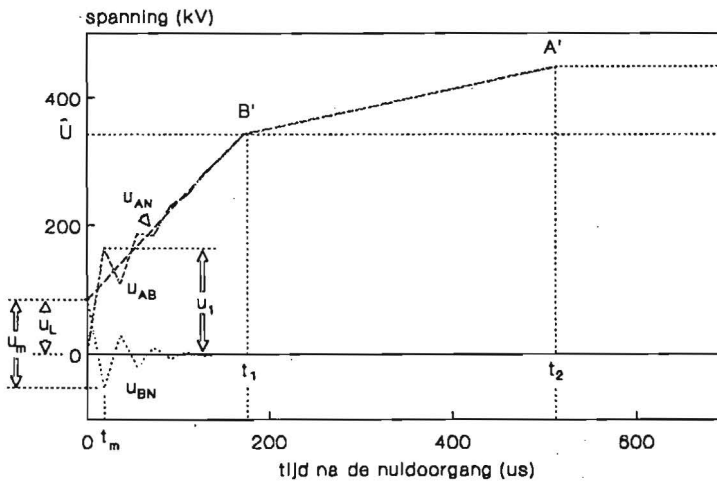
Stel weer een schakelaar in het Nederlandse 380 kV-koppelnet. Een in aanmerking komende schakelaar (moet in de genormeerde reeks liggen, zie tabel 11.1 t/m 3) is bijv. de 420 kV SF₆ schakelaar uit de serie afgebeeld in fig. 8b.5 Stel de maximale (effektieve waarde van de) kortsluitstroom in het net bedraagt 50 kA. Als we uitgaan van een 75% korte-lijnfout, dan wordt de kortsluitstroom daardoor gereduceerd tot: $\hat{I}_k' = 0.75 \cdot 50 \sqrt{2} \cdot 10^3 = 53$ kA.

De beproevings-TRV dient te bestaan uit een component t.g.v. de voedende zijde (u_{AN}) en een component van de korte-lijn zijde (u_{BN}). We behandelen deze apart en gaan daarbij uit van een beproeving van de schakelaar op zijn nominale specificaties (420 kV, 50 kA en 3150 A).

1. Korte-lijnzijde (u_{BN}).

Maximale fasespanning:	$\hat{U} = 420 \sqrt{2} \cdot 10^3 / \sqrt{3} = 343$ kV
Lijnspanning ten tijde van de nuldoorgang:	$U_L = (1 - \lambda) \hat{U} = 86$ kV
Eerste maximum van u_{BN} :	$U_m = 1.6 U_L = 137$ kV
Spanningssteilheid:	$S_u = 0.2 \lambda I_{k,eff} = 7.5$ kV/ μ s
faktor 0.2 uit tabel 11.3 is afkomstig van:	$\omega Z_0 \sqrt{2} = 0.2 \cdot 10^6$
Tijd van eerste maximum	$t_m = U_m / S_u = 18.3$ μ s
Lijnlengte (met $l_s = 1.5$ μ H/m):	$s = 3.4$ km

Verder staat de IEC norm een vertragingstijd (vanwege lokale capaciteiten voor de lijn) toe van $t_{dL} = 0.5 \mu\text{s}$, (tabel 11.3), zodat het eerste maximum u_1 bereikt wordt ten tijde (na de nuldoorgang): $t_{dL} + t_m = 18.8 \mu\text{s}$.



Figuur 11.8 De constructie van de voorbeeld-korte-lijn TRV.

2. Voedende zijde (u_{AN}).

De parameters voor de TRV aan voedende zijde zijn voor de korte-lijnfout apart gespecificeerd:

Punt B': 343 kV na 171 μs

Punt A': 480 kV na 513 μs .

De steilheid bedraagt dus (zie fig. 11.8): $S_{u,c} = (343 - 86)/171 = 1.5 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

Nu is de waarde van u_1 te bepalen: $u_1 = U_m + S_{u,c}t_m = 165 \text{ kV}$.

In figuur 11.8 is het verloop aangegeven van de bovenbeschreven spanningen en de daarbij gebruikte parameters.

Het aantal bluskamers neemt toe met toenemende spanning (zie fig. 8b.5). De steilheid van de korte-lijn-TRV hangt echter niet van de spanning af maar van de stroom, zie (11.7). Bij hogere spanning wordt de steilheid per bluskamer steeds lager door spanningsdeling over de bluskamers. Hieruit volgt dat bij gelijke stromen de schakelaar voor de laagste spanning te maken krijgt met de steilste TRV (dit geldt niet voor bijv. de klemmsluiting, aangezien daar $S_u \sim \hat{U}$).

In het bovenbeschreven voorbeeld is het voorgeschreven initiële gedrag van de TRV, de ITRV (in de eerste paar μs na de onderbreking) niet behandeld, zie hiervoor de IEC publikaties. In fig. 11.7 is het verloop geschetst van een korrekte TRV, rekening houdend met de eisen t.a.v. de ITRV.

11.2 Beproevingscircuits.

De eisen en aanbevelingen geformuleerd in de IEC zijn voornamelijk gebaseerd op neteigenschappen. Of en hoe deze eisen vertaald kunnen worden naar beproevingscircuits staat hier in principe los van.

Het samenwerkingsverband van grote kortsluitlaboratoria in Europa (STL: Short circuit Testing Liaison) geeft richtlijnen uit voor het volgens IEC beproeven van hoogspannings-materieel.

Voor adequate beproeving worden drie principieel verschillende methoden gebruikt:

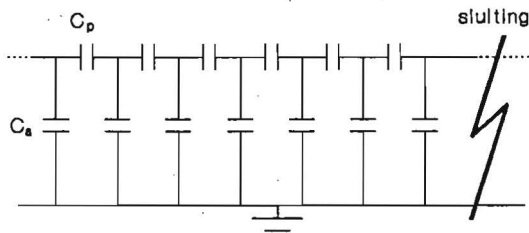
- Rechtstreekse beproeving in het openbare net;
- Direkte beproeving met eigen kortsluitgenerator of condensatorbatterij met een vermogen tenminste gelijk aan het te verifiëren kortsluitvermogen;
- Synthetische beproeving met gescheiden (boog)stroombron en (TRV) spanningsbron.

11.2.1. Rechtstreekse beproeving.

Bij rechtstreekse beproeving zijn echte netcondities voorhanden. Nadeel is een geringe flexibiliteit in de keuze van kortsluitvermogen, TRV vorm etc. Bovendien is de beschikbaarheid klein ('s nachts) en is toestemming moeilijk te krijgen.

11.2.2. Direkte beproeving.

Bij direkte beproeving is de flexibiliteit in parameterkeuze groot. Daar tegenover staat dat zeer grote generatoren voor handen moeten zijn, hetgeen de methode duur maakt. De TRV is meestal niet korrekt waardoor speciale TRV-netwerken aangebracht moeten worden om de netsituatie na te bootsen. Aangezien de krachtigste schakelaars onderbrekingsvermogens bezitten die groter zijn dan het in heel Nederland opgestelde vermogen, is geen enkel kortsluitlaboratorium in staat alle schakelaars direct te beproeven. De grootste schakelaar van fig. 8b.5 (800 kV, 50 kA) heeft een driefasig onderbrekings-vermogen van $3 \cdot 50 \cdot 800 / \sqrt{3} \cdot 10^6 = 70 \text{ GVA}$.



Figuur 11.9 Rol van verdeelde capaciteiten.

Dit (schijnbare) vermogen is ca. 5x het totaal in Nederland opgestelde (continue!) actieve vermogen.

Elk van de 4 bluskamers heeft een onderbrekingsvermogen:

$(50 \cdot 800 / \sqrt{3} \cdot 10^6) / 4 = 5.7 \text{ GVA}$, en dit laatste getal is nog lang niet het hoogst bereikte: onderbrekingsvermogens van 20 - 25 GVA per bluskamer zijn inmiddels gerealiseerd.

KEMA, het grootste kortsluitlaboratorium ter wereld beschikt in het "De Zoeten laboratorium (DZL 4)" over generatoren voor directe beproeving van 7.4 GVA driefasig (250 kV bij 17 kA) en 4.6 GVA enkelfasig (456 kV bij 10 kA).

De grotere schakelaars worden wel "per pool" of per onderbrekingseenheid beproefd. Deze manier van beproeving vergt bijzondere aandacht voor de TRV om de volgende redenen:

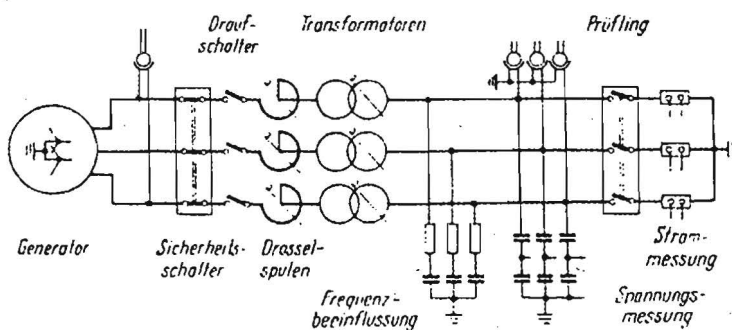
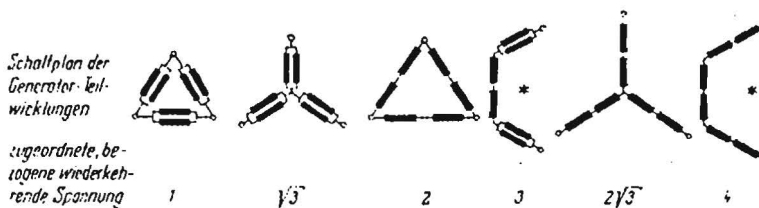


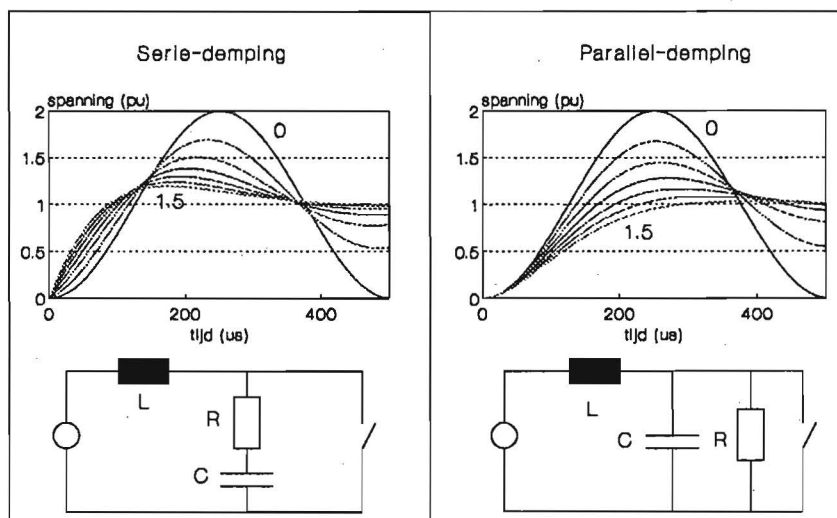
Abb. V/1. Dreiphasiger Prüfstromkreis



Figuur 11.10 Circuit voor directe beproeving met trafo-spanningsregeling. (Slamecka: "Prüfung von Hochspannungsleistungsschaltern")

- De TRV zal zich over de onderbrekingseenheden verdelen omgekeerd evenredig met de restgeleidbaarheid. De gap die het snelst herstelt krijgt zo een groter deel van de TRV te verwerken dan de waarde u_{AB}/n (n = aantal onderbrekingselementen).
- Na het diëlektrisch herstel wordt de spanningsverdeling over de bluskamers bepaald door parallel- en aardcapaciteiten, zie fig. 11.9. De eerste onderbrekingseenheid wordt daardoor dus het zwaarst belast.

In beproevingscircuits wordt de stroom ingesteld met spoelen, de spanning met transformatoren. In fig. 11.10 (uit staat een typisch circuit voor directe beproeving afgebeeld. Hierin is aangegeven hoe door geschikte schakeling van de transformator(en) een aantal verschillende spanningen gerealiseerd worden. Omdat dergelijke circuits compact zijn zal de TRV i.h.a. veel te steil en te hoog zijn. Door het aanbrengen van impedanties kan de vorm van de TRV beïnvloed worden, zoals in het voorbeeld van fig 11.11 verduidelijkt is.

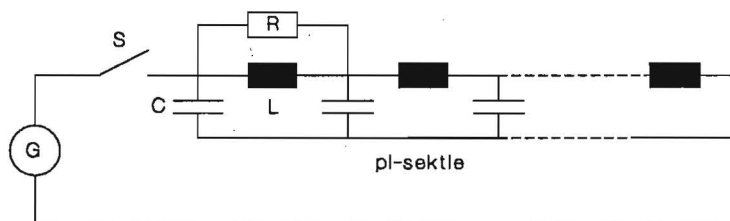


Figuur 11.11 Verloop van de TRV in een serie- en parallel gedempt circuit vs. dempweerstand.

Afgebeeld is het gedrag van de TRV in twee circuits, één gedempt met een serieweerstand en één gedempt met een parallelweerstand (R). De waarde van R is in fig. 11.11 als veelvoud genomen van de impedantie $Z = \sqrt{L/C}$, als $R = \alpha Z$ (seriedemping) en $R = Z/\alpha$ (paralldemping) met $0 \leq \alpha \leq 1.5$ in 7 gelijke stappen van 0.25. Merk op dat S_u en A (amplitudefactor) "in te stellen" zijn met R . Voor het parallel gedempte circuit geldt altijd $S_u = 0$, in het algemeen een te lichte beproeving (de delay-lijn S' wordt gesneden, zie fig. 11.1).

Als het nodig is een multifrequente TRV te genereren, beschreven door de vier-parametermethode (voor schakelaars boven 100 kV) dan worden gekompliceerde LC combinaties gebruikt.

Voor de generatie van korte-lijn-TRV's kunnen kunstlijnen toegepast worden: laddernetwerken van zg. π -sekties, zie fig. 11.12. Om te vermijden dat de hele kortsluitstroom door alle spoelen loopt, worden in de praktijk speciale circuits gebruikt met één spoel voor de doorgaande stroom. Voor de ITRV worden micro-kunstlijnen ingezet.



Figuur 11.12 Kunstlijn ter nabootsing van een korte-lijnfout.

11.2.3 Synthetische beproeving.

Beproeving van schakelaars voor de hoogste onderbrekingsvermogens vindt plaats met **synthetische beproevingstechnieken**.

Men maakt daarbij gebruik van het gegeven dat onder kortsluitstroom-condities **vóór de nuldoorgang de stroom groot is** bij een lage (boog)spanning (hun produkt is slechts een fractie van het kortsluitvermogen) en **na de nuldoorgang de spanning hoog moet zijn** bij een lage stroom. In de synthetische beproevingstechniek maakt men daarom gebruik van:

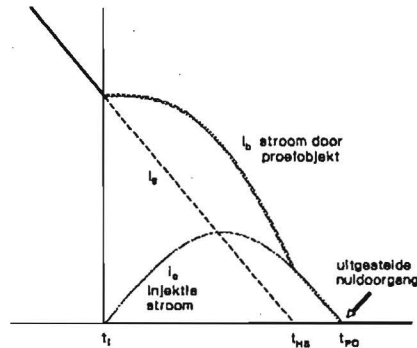
- een stroombron (kortsluitgenerator) bij relatief lage spanning;
- een spanningsbron (geladen condensator) met een TRV-netwerk.

Rond de nuldoorgang wordt het spanningscircuit pas geactiveerd; dit circuit kan immers maar weinig energie leveren.

Wordt het spanningscircuit kort (enkele honderden μs) voor de nuldoorgang bijgeschakeld, dan wordt de resulterende boogstroom de som van de generatorstroom (i_g) en de condensatorstroom.

De nuldoorgang van de boogstroom (i_b) wordt hierdoor uitgesteld. Om $S_i = \omega \hat{I}_g$ niet aan te tasten is de stroom uit de spanningsbron bijv. 500 Hz en

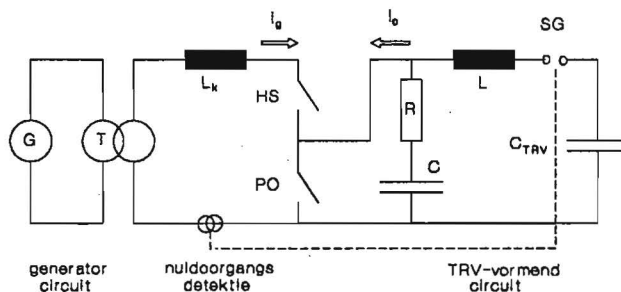
$\hat{I}_c = 0.1 \hat{I}_g$. Men noemt deze superpositie-methode wel "stroominjectie", zie fig. 11.13.



Figuur 11.13 Stroominjectie

Een veel gebruikt circuit voor synthetische beproeving is het zg. "Weil-Dobke"circuit, op basis van parallel-stroominjectie, zie fig. 11.14.

In serie met het proefobject (PO) is een hulpschakelaar (HS) aangebracht. De vonkbrug (spark-gap SG) wordt geleidend op moment t_i (zie fig. 11.13), waarna de 500 Hz-stroom gaat lopen en de hulpschakelaar onderbreekt op t_{HS} en het proefobject op t_{PO} . Na t_{PO} wordt de TRV geheel bepaald door de elementen R, C, L.



Figuur 11.14 Weil-Dobke circuit.

KEMA beschikt over een WeilDobke-circuit waarmee synthetisch getest kan worden tot 120 kA (stroombron) en 970 kV (topwaarde van de TRV), geschikt voor zowel stroom- als spanningsinjectie. De hiermee uitgevoerde beproevingen zijn steeds enzelfasig.

In gasgeïsoleerde schakelinstallaties (GIS) echter, zijn alle drie de fasen in één omhulling aanwezig, zodat er sprake kan zijn van een aanzienlijke wisselwerking tussen naburige componenten. Deze wisselwerking is elektrodynamisch (krachten op geleiders en boog), gasdynamisch (invloed van stromingen op het uitschakelmechanisme) en diëlektrisch (produktie van hete booggassen en decompositie produkten) van aard. Ook kunnen grote fasespanningen tussen de dicht naast elkaar gemonteerde geleiders tot doorslag leiden.

Dit betekent dat dergelijke omsloten schakelaars alleen **driefasig** adequaat beproefd kunnen worden. KEMA heeft ten behoeve hiervan recentelijk een driefasen synthetisch beproevingscircuit in gebruik genomen voor het beproeven van GIS-schakelaars tot 245 kV, 63 kA.

Het gebruik van een (stroom)bron met een lagere spanning (\hat{U}_g) dan de netspanning (\hat{U}_n) waarvoor de schakelaar ontworpen is, betekent dat de waarde van de relatieve boogspanning $u_g' = u_b/\hat{U}_g$ in het testcircuit groter is dan de relatieve boogspanning in het net $u_n' = u_b/\hat{U}_n$. Dit heeft, zoals in par. 6.2.1 uiteengezet is, gevolgen voor de moeilijkheidsgraad van de onderbreking.

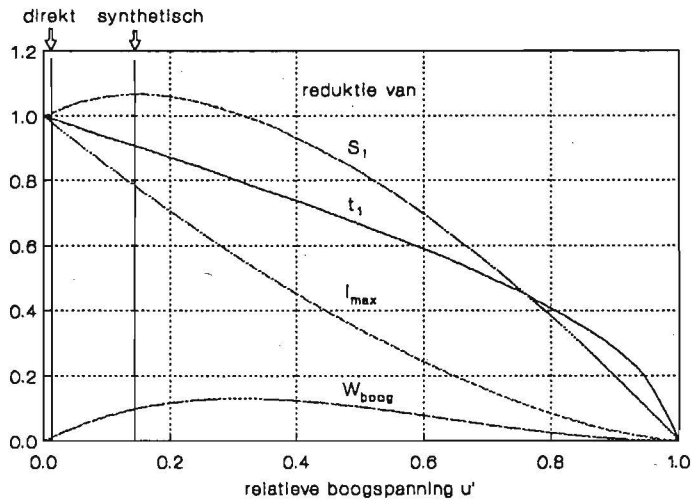
Dit wordt toegelicht aan de hand van een voorbeeld van een schakelaar met twee bluskamers ($n = 2$) voor 170 kV en een (konstant veronderstelde) boogspanning van 1.2 kV.

De maximale relatieve boogspanningen per kamer worden:

$$u_n' = \frac{1.2}{0.5 \cdot 170 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}} = 0.017 \quad \text{en} \quad u_g' = \frac{1.2}{0.5 \cdot 16} = 0.15$$

als $\hat{U}_g = 16$ kV en bij verwaarlozing van de boogspanning over de hulpschakelaar (HS in fig. 11.14). In fig. 11.15 (kopie van fig. 6.6) is te zien dat de synthetisch beproefde schakelaar een verlaagde \hat{I}_k maar een verhoogde boogenergie en een verhoogde S_i te zien krijgt, in vergelijking met de parameters in een 170 kV-net.

Het is duidelijk dat dit gevolgen heeft voor de moeilijkheidsgraad van de onderbreking. Het IEC heeft derhalve adviezen opgesteld voor de uitvoering van synthetische beproeving, waarin maximale toleranties aangegeven zijn voor de reductie van \hat{I}_k , S_i en t_1 .



Figuur 11.15 Reductie van de onderbrekingsparameters t.g.v. synthetische beproeving.

11.3 Beproeving van schakelaars voor laagspanning.

Vermogensschakelaars voor laagspanning worden altijd direct beproefd. De IEC normen voor laagspanningsvermogensschakelaars zijn te vinden in IEC 60947-2 en in IEC 60898 (2002) waar het kleine schakelaars betreft (installatie-automaten).

De moeilijkheidsgraad van de stroomonderbreking door LS-schakelaars wordt minder door de spanningsparameters (S_u , A , u_1) dan door de stroomparameters bepaald; bij deze laatste dan vooral door \hat{I}_k , vanwege de **thermische belasting** van de bluskamer.

In beproevingsvoorschriften is bij een bepaald onderbrekingsvermogen altijd de arbeidsfaktor ($\cos\varphi$) van het beproevingscircuit voorgeschreven (de TRV vorm - zo belangrijk voor HS-schakelmaterieel - is niet nauwkeurig vastgelegd).

Rated short-circuit breaking capacity I_{cn} (amperes)	Standard power-factor	Minimum required rated short-circuit making capacity (n times rated short-circuit breaking capacity) $n \times I_{cn}$
$I_{cn} \leq 1\,500$	0.95	$1.41 \times I_{cn}$
$1\,500 < I_{cn} \leq 3\,000$	0.9	$1.42 \times I_{cn}$
$3\,000 < I_{cn} \leq 4\,500$	0.8	$1.47 \times I_{cn}$
$4\,500 < I_{cn} \leq 6\,000$	0.7	$1.53 \times I_{cn}$
$6\,000 < I_{cn} \leq 10\,000$	0.5	$1.7 \times I_{cn}$
$10\,000 < I_{cn} \leq 20\,000$	0.3	$2.0 \times I_{cn}$
$20\,000 < I_{cn} \leq 50\,000$	0.25	$2.1 \times I_{cn}$
$50\,000 < I_{cn}$	0.2	$2.2 \times I_{cn}$

Tabel 11.4 Arbeidsfaktor en inschakelstroom voor LS-schakelaars (IEC 60947-2).

In tabel 11.4 (IEC 60947-2 tabel I) is het verband tussen kortsluitstroom en voorgeschreven $\cos\varphi$ aangegeven. Zoals te zien is, wordt een kortgesloten circuit **meer inductief naarmate de kortsluitstroom groter is**: netdelen (van fabrieksinstallaties) waarin zeer grote kortsluitstromen kunnen ontstaan (meestal dichtbij de voedingstrafo) zijn altijd gedimensioneerd voor grote nominale stromen (tot ca. 5 kA), waarvoor geleiders nodig zijn met grote diameter (rails). Bij kortsluiting wordt de stroom dan ook bijna uitsluitend begrensd door de inherente zelfinductie.

Voor een **nulpuntsblusser** is eenvoudig in te zien dat een resistief circuit een makkelijkere onderbreking vormt dan een inductief circuit: $u_{AB} = 0$ op $i = 0$ resp. $u_{AB} = \hat{U}_n$ op $i = 0$.

Voor een **gedwongen nuldoorgangs-blusser** kan het circuit in fig. 6.2. gebruikt worden. Hierin geldt:

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{1}{L_k} (\hat{U}_n \cos \omega t - u_b - i_k R_k)$$

zie par. 6.2. Aan deze vgl. is te zien dat de stroom pas (naar nul) zal afnemen als $di_k/dt < 0$, dus als $u_b + i_k R_k > \hat{U}_n \cos \omega t$. Hieruit volgt dat dit bij een lagere boogspanning zal gebeuren naarmate R_k groter is. Bij afwezigheid van R_k (het puur inductieve geval zoals behandeld in par. 6.2) zal de vereiste boogspanning (en daarmee de boogenergie) maximaal moeten zijn. Dit vormt dan ook de moeilijkste onderbreking.

Merk op dat op grond van tabel 11.4 een schakelaar altijd in staat moet zijn een grotere stroom in te schakelen dan te onderbreken.

LS-lastschakelaars (motorschakelaars) en contactors zijn ontworpen voor een zeer groot aantal schakelhandelingen. Om deze reden zijn beproevingen van levensduur en betrouwbaarheid belangrijk. Hiertoe zijn gebruikscategorieën gedefinieerd aan de hand van de toepassing van de schakelaar, zie tabel 11.5 (uit Schmelcher: Low Voltage Handbook). Voor elk van de categorieën zijn beproevingscycli en aantallen voorgeschreven.

Utilization category	Typical application for which the item is intended	Normal duty ¹⁾						Occasional duty						Test duty (specified On/Off operations)	
		making			breaking			making			breaking			VDE 0660	IEC 158
		I/I_c	U/U_c	$\cos \varphi$ or L/R	I/I_c	U/U_c	$\cos \varphi$ or L/R	I/I_c	U/U_c	$\cos \varphi$ or L/R	I_c/I_c	U_c/U_c	$\cos \varphi$ or L/R		
A.C.															
AC1	Non-inductive or slightly inductive loads, resistance furnaces	1	1	0.95	1	1	0.95	1.5	1.1	0.95	1.5	1.1	0.95	20 × On-Off	30 × On, separate 25 × Off
AC2	Starting of slip-ring motors without plugging	2.5	1	0.65	1	0.4	0.65	4	1.1	0.65	4	1.1	0.65		
AC2 ²⁾	Starting of slip-ring motors with plugging	2.5	1	0.65	2.5	1	0.65	4	1.1	0.65	4	1.1	0.65		
AC3	Starting of squirrel-cage motors switching off motors during running	6	1	0.35 ³⁾	1	0.17	0.35 ³⁾	10	1.1	0.35 ³⁾	8	1.1	0.35 ³⁾		
	$I_c \leq 100$ A	6	1	0.35	1	0.17	0.35	8	1.1	0.35	6 ^{*)}	1.1	0.35	2 × 25 × On-Off, separate 100 × On	150 × On, separate 25 × Off
AC4	Inching, plugging, reversing	6	1	0.35 ³⁾	6	1	0.35 ³⁾	12	1.1	0.35 ³⁾	10	1.1	0.35 ³⁾		
	$I_c \leq 100$ A	6	1	0.35 ³⁾	6	1	0.35 ³⁾	10 ³⁾	1.1	0.35 ³⁾	8 ^{*)}	1.1	0.35 ³⁾		
	$I_c > 100$ A	6	1	0.35	6	1	0.35	10 ³⁾	1.1	0.35	8 ^{*)}	1.1	0.35		

Tabel 11.5 Categorieën van motorschakelaars en contactors (IEC 60947-2). I_c : rated current; I : making current; I_c : breaking current; U_c : rated voltage; U : no-load voltage; U_c : recovery voltage.

13.1 Inleiding

Bij uitbreiding van MS-installaties nemen de nominale stroom en de kortsluitstroom toe. De logische stap is dan ook de aanwezige schakelinstallaties uit te breiden en te verzwaren, zodat de nieuwe situatie weer binnen gegarandeerde waarden komt. Ook voor schakelinstallaties verderop in het net kan de geplande uitbreiding gevolgen hebben. Al met al kunnen daardoor noodzakelijke investeringen, nodig bij een uitbreiding met meer dere of grotere transformatoren of het aankoppelen van een Warmte-Kracht-generator, onverwacht hoog uitvallen.

Indien het thermische vermogen van de railsystemen overschreden wordt is vervanging van de gehele installatie te verkiezen, waarbij uiteraard ook het kortsluitvermogen zal moeten worden verhoogd.

Als het thermische vermogen nog voldoende reserve heeft en alleen het kortsluitvermogen overschreden wordt is een of andere vorm van stroombegrenzing te overwegen. Hierbij kan gedacht worden aan begrenzing van de kortsluitstroom, al of niet inclusief de piekwaarde van de asymmetrische stroom. Ook is een aanzienlijke begrenzing van de duur van de kortsluitstroom wenselijk en mogelijk zonder de selectiviteit aan te tasten. Tussen de klassieke staffeltijden van 0,5 - 3 sec., waarbij vooral in de voedingsstations de langste tijden optreden (dan wel een extra stroombegrenzer, die in fracties van een halve periode moet werken) ligt nog een groot gebied van mogelijkheden.

Door verlenging van de tijden in het overbelastingsgebied en verkorting van de tijd in het kortsluitgebied (z.g. directe-trip) is een betere en veiligere bedrijfsvoering mogelijk met als voordelen:

- minder lichtboog-energie op de foutplaats;
- minder kans op secundaire explosies;
- grotere veiligheid van personeel en derden;
- kortere duur van spanningsdalingen;
- langere duur van korte overbelastingen;
- mogelijkheid grotere motoren te laten aanlopen.

Tot dusver zijn een aantal pilot-projecten tussen TUE en een aantal E-bedrijven in uitvoering, waarbij de directe-trip weer wordt gebruikt met als uiteindelijk doel de tijden in de voedingstation te reduceren van 3 naar 0,3 s. Aan het begin van deze nieuwe aanpak is gerapporteerd op de CIRED-1995 en is een en ander op een vorige PATO-cursus toegelicht. Ook aan gebruikers van industriële installaties biedt deze aanpak mogelijkheden om in voedingsstations met aanmerkelijk kortere tijden uit te kunnen en een veiliger bedrijfsvoering mogelijk te maken.

Laten we de tijdbegrenzing verder rusten en keren we terug naar "echte" stroombegrenzing. Ook voor dit onderwerp bestaat internationaal belangstelling. Op de CIGRE-1996 is door Studiecomitee-13 Schakelmateriaal een werkgroep (13-10) onder leiding van Prof. Greenwood (USA) ingesteld om toepassingen en eigenschappen van stroombegrenzers (Current Limiters) te beschrijven. Er is een internationale enquête gehouden bij vele E-bedrijven. Als nederlands lid van deze werkgroep verzorg ik deze enquête bij onze E-bedrijven, waar ook ervaring bij industriële installaties van groot belang is.

13.2 Passieve stroombegrenzing

Deze kan worden verkregen door:

1. vergroting van de kortsluitimpedantie van de voedende transformatoren;
Nadeel: vereist een groter aantal trappen op de regelwikkeling.
2. vergroting van de reactantie van generatoren;
Nadeel: vereist een sterkere compounding.
3. gebruik van smoorspoelen in de voedingsvelden;
Beperking: zie 1 en 2.
4. gebruik van smoorspoelen als railkoppelingen;
Extra verliezen door vereffeningstromen tussen de railsecties.
5. koppelsmoorspoel met middenaftakking (duplex);
Door mutuele koppeling minder spreidingsverlies bij symmetrische belasting.

6. smoorspoelen op uitgaande velden.

Beperking kortsluitvermogen op de achterliggende kabelinstallaties.

De gekapitaliseerde verliezen zijn ongeveer gelijk aan de hoge aanschafkosten. Ruimtebeslag is aanzienlijk groter dan het bijbehorend schakelveld.

Door de introductie van een reactantie -bedoeld om de stroom te begrenzen- treedt ook een spanningsverlies bij de belastingstroom op.

Voorbeeld:

10 kV; 500 MVA; 28,8 kA.

Begrenzing tot 250 MVA leidt tot: $X_L = 0,2 \Omega$; $L = 0,64 \text{ mH}$; $X/R = 50$; $R = 4 \text{ m}\Omega$;

$I_n = 500 \text{ A}$;

$u_x = 100 \text{ V} = 1,7\% \times U_n$; $u_r = 2 \text{ V}$; $P = 1 \text{ kW/fase}$.

Bij 3300 uur bedrijfstijd per jaar over 20 jaar is dit 200.000 kWh. Bij 15 ct/kWh dus $f = 30.000$.

Dit is ongeveer gelijk aan de aanschafprijs van de begrenzendesmoorspoel.

Het voordeel van passieve stroombegrenzing is dat er niets verandert en snelle wederinschakeling zonder meer kan worden toegepast.

13.2.1. Resonante kortsluitbegrenzer

Om een sterkere stroombegrenzing mogelijk te maken zou de reactantie verder moeten worden vergroot. Dit impliceert ook een groter spanningsverlies ten gevolge van de belastingstroom. Door serie-condensatoren op te nemen kan bij resonantie de impedantie weer worden verlaagd. Bij kortsluiting zou een ontoelaatbare hoge spanning over de spoel en de condensatoren ontstaan. Daarom is parallel aan de condensatoren een ijzerkern-spoel geplaatst, die bij verzadiging de resonantie verstemt en de stroom begrenst.

Bij het eigen bedrijf van de Amer-centrale is in de jaren '70 een dergelijke installatie (800 A; 10 kV) in bedrijf geweest[1]. Het spanningsverlies was slechts 2%, terwijl bij kortsluiting ten minste 30% impedantie werd bereikt. Deze installatie is overigens niet meer in bedrijf.

In het Research Laboratorium van Hazemeijer is in die tijd een onderzoek uitgevoerd naar de resonante koppeling van twee laagspanning railsystemen. De klassieke oplossing, met een koppelschakelaar, hoewel niet stroombegrenzend, bleek toch te verkiezen in verband met kosten en afmetingen.

Momenteel wordt bij onze leerstoel op de TUE nagegaan in hoeverre een resonante begrenzer een reële optie kan zijn voor het aansluiten van een Warmte-Kracht-koppeling zonder een toename van het kortsluitvermogen te veroorzaken [2].

13.3 Actieve stroombegrenzing

In dit geval treedt er geen automatisch herstel op na het begrenzen van de kortsluitstroom en speelt de hersteltijd een grote rol bij de betrouwbaarheid van de energievoorziening.

Stroombegrenzing met behulp van smeltveiligheden is een beproefde techniek met als voordelen:

- lage kosten;
- kleine afmetingen;
- effectieve begrenzing;
- lage kapstroom;
- selectiviteit ten opzichte van bovenliggende waarden;
- beveiliging bij overbelasting (Fullrange).

Nadelen zijn:

- noodzakelijke vervanging na het aanspreken;
- geen snelle wederinschakeling;
- beperking van I_{nom} tot circa 1 kA bij laagspanningssystemen en tot 200 A bij middenspanningssystemen.

Voor laagspanningsnetten zeer veel toegepast, bepaalt het mede de grote betrouwbaarheid van deze netten.

Voor middenspanningsnetten alleen bij MS/LS-transformatoren door beperkte nominale stroom.

Er zijn pogingen gedaan zelfherstellende smeltveiligheden te ontwikkelen met Natrium/Kalium onder hoge druk, onder andere in het reeds genoemde Research Laboratorium van Hazemeijer/HOLEC. In Japan heeft dit zelfs tot een serieproductie geleid voor laagspanningstoepassingen. In Nederland zijn ons geen toepassingen bekend.

13.3.1. I_s -begrenzers/Pyrobreakers

Om aan de beperkingen van de lage nominale stroom te ontkomen, wordt parallel op de smeltveiligheid een contactbus aangebracht. Hierdoor loopt grotendeels de belastingstroom. In geval van een kortsluiting wordt met behulp van een di/dt-detector binnen ongeveer 0,1 ms bepaald of de begrenzer geactiveerd moet worden. Door een explosieve lading te ontsteken scheurt de buis open en ontstaat een lichtboog die echter blust, doordat de stroom op de parallelgeschakelde smeltveiligheid commuteert. Na korte tijd smelt deze en begrenst daarmee de kortsluitstroom. Een goede afstemming van de smelttijd van de veiligheid is een eerste vereiste om herontsteking van de lichtboog in de exploderende contactbus te voorkomen.

Voordelen zijn:

- hoge nominale stroom tot 4 kA;
- lage verliezen bij bedrijfsstroom;
- toepasbaar tot circa 36 kV;
- kleine afmetingen.

Nadelen zijn:

- reparatietijd na het aanspreken;
- relatief duur;
- selectiviteitsproblemen;
- gevoeligheid voor gewijzigde netomstandigheden;
- gevoelig voor nabije-fouten en het schakelen van condensatorbanken.

Een fraaie maar dure oplossing om de verliezen bij stroombegrenzende smoorspoelen te verkleinen is het parallelschakelen van een I_s -begrenzer en een smoorspoel. Bij, al of niet terecht, aanspreken ten gevolge van een kortsluiting, blijft de voeding -weliswaar met een toegenomen spanningsverlies- via de smoorspoel intact.

13.3.2. Supergeleidende stroombegrenzer

Hierover is veel literatuur aanwezig en in verschillende landen werden proefprojecten uitgevoerd [3,4,5]. Onderscheid wordt gemaakt tussen de lage-temperatuur-supergeleiders (niobium-titaan en niobium-tin) werkende bij helium-temperatuur (4 K) en de hoge-temperatuur-supergeleiders (bismuth- en yttrium-koperoxyde) werkende bij stikstoftemperaturen (77 K). In principe is de weerstand bij een supergeleider zeer laag tot nul zodat hoge stromen bij lage verliezen gevoerd kunnen worden; wel zijn er verliezen door de cryogene koelinstallatie. Bij het overschrijden van een kritische stroomwaarde wordt de supergeleidende toestand opgeheven. Een normaal geleidende draad of band heeft een veel hogere weerstand waarmee een kortsluitstroom zou kunnen worden tot enkele malen de nominale stroom. Hierbij treedt een enorme dissipatie op, zodat de begrensde stroom snel door een klassieke schakelaar moet worden onderbroken. Mocht dit om welke reden dan ook mislukken, is een explosie het gevolg.

Dit type stroombegrenzers wordt het resistieve type genoemd. Het grote nadeel is de lange koeltijd om na een kortsluiting weer supergeleidend te worden, zodat snelle wederinschakeling niet mogelijk is.

Er bestaan ook inductieve typen waarbij een soort transformator door een supergeleidende wikkeling kortgesloten wordt, dan wel door een gelijkstroom voor-magnetisatie verzadigd wordt. Dit type heeft nogal grote afmetingen doordat de transformator in feite gedimensioneerd moet worden voor de normale

stroom en spanning. Dit is in de grootte-orde van de bestaande HS/MS-transformatoren. Afgezien van speciale voorzieningen op het cryogene gebied is dit geen prettig vooruitzicht.

Toch worden in Frankrijk, Engeland, Duitsland en Japan diverse pilot-projecten uitgevoerd. Opschaling tot waarden die nu in de energievoorziening van belang zijn, lijkt echter nog in een ver verschiet en voor de net-ingenieur is supergeleiding op dit moment geen reële optie.

13.3.3 Lichtboog schakelaars

Stroombegrenzing kan ook worden verkregen door een snelle boogspanningopbouw. Dit in tegenstelling tot de klassieke schakelaar die bij een stroom-nuldoorgang blust, maar daardoor de piek van de kortsluitstroom vrijwel onbeperkt doorlaat.

De bekende Stotz en installatie-automaten voor laagspanning zijn in meer of mindere mate stroombegrenzend. In de jaren zestig is getracht ook grotere laagspanningsautomaten stroombegrenzend te maken, door de bluskamer zodanig te ontwerpen dat de snelle boogspanningopbouw werd verkregen. Hierbij doet zich het probleem voor dat hoge nominale stromen zwaardere contacten behoeven en die zijn moeilijker snel te openen.

Ook voor middenspanning zijn pogingen in die richting ondernomen, maar de geweldige ontwikkeling van moderne vermogensschakelaars (vacuüm en SF₆) hebben de interesse doen verminderen. Deze schakelaars kunnen door de zeer geringe boog-tijdconstante met een geringe boogspanning volstaan, terwijl de stroombegrenzer juist tegen de dissipatieberg moet opklimmen. Voor gelijkstroomschakelaars is boogspanningsopbouw nog steeds een veel toegepast principe omdat hier geen nuldoorgangen optreden. Het snel wederinschakelen is voor deze mechanische apparaten geen beperking.

13.3.4 Hybride schakelaars

Het heeft niet aan pogingen ontbroken om met combinaties van schakelende contacten, halfgeleidende elementen en tegenstroominjectie (uit voor-geladen condensatoren) tot effectieve stroombegrenzing te komen. Dit noemen we een hybride schakelaar. Voor gelijkstroom wordt dat principe toegepast bijvoorbeeld door ACEC ten behoeve van de NS (1500 V; 2 kA) [6].

Momenteel worden in onze capaciteitsgroep aan de TUE promotie- en afstudeeronderzoeken uitgevoerd, waarbij eveneens van tegenstroom-injectie gebruik wordt gemaakt. Het is mogelijk bij beperkte steilheid van de kortsluitstroom voldoende snel de opeenvolgende processen uit te voeren zoals:

1. detectie binnen 0,1 ms;
2. snelle contactopening (door een elektrodynamische aandrijving) binnen circa 0,4 ms;
3. tegenstroom-injectie (vanuit een geladen condensator) met halfgeleiders;
4. stroomonderbreking bij de kunstmatige nuldoorgang;
5. spanningsopbouw op de condensator -door uitwisseling veldenergie met het net;
6. begrenzing door dissipatie in metaaloxide-elementen.

Voordat wederinschakeling mogelijk is moet aan alle beginvoorwaarden, zoals laden van de injectiecondensator etc., worden voldaan.

Waar gelijkstroom voor deze technieken een reële toekomst biedt is de complexiteit bij draaistroom en de grotere stroomsteilheid een principiële probleem. In de jaren '80 is door EPRI in Amerika een project opgestart om 18 kA -bij 132 kV- met deze technieken te begrenzen. Het doel was vervanging van oud schakelmateriaal uit te stellen. Volgens de gemaakte analyses zouden miljoenen dollars kunnen worden bespaard. Na vele jaren research was het verkregen resultaat 9 kA bij 50 kV en werd het project gestopt. Ook de hybride schakelaar is op dit moment geen oplossing van de problematiek van toenemende kortsluitvermogens.

13.4 Toepassingen van kortsluitstroombegrenzers

Stroombegrenzers kunnen op diverse plaatsen worden toegepast:

- in het voedingsveld
- in een langskoppelveld
- in een afgaand veld
- in een eigen-opwekkings koppelveld

Er is een selectiviteitsprobleem indien stroombegrenzende elementen en gewone niet-stroombegrenzende schakelaars achter elkaar worden geschakeld. Een fout in een afgaande kabel kan een hoger liggende stroombegrenzer doen aanspreken, waardoor meerdere verbruikers ten onrechte worden afgeschakeld.

Gebruik van stroombegrenzers in een langskoppelveld is minder kritisch. Als deze aanspreekt blijven beide helften autonoom, vooropgesteld dat er geen overbelasting in een van beiden optreedt. Smeltveiligheden hebben naast een zeer goede stroombegrenzing het voordeel van goede onderlinge selectiviteit. Dit komt wellicht tot uitdrukking in de goede beschikbaarheid van laagspanningsneten, die vrijwel uitsluitend met smeltveiligheden worden beveiligd.

- | | |
|------------------------|-----------|
| • LS - transformator | 400-600 A |
| • LS - verdeelrek | 125-250 A |
| • LS - straatverdeler | 63-160 A |
| • LS – huisinvoer | 35-63 A |
| • LS - huisinstallatie | 6-16 A |

Bij toepassing van MS smeltveiligheden aan de primaire zijde van de transformator is een goede selectiviteit ten opzichte van de laagspanningszijde mogelijk, afhankelijk van het transformator vermogen (100-630 kVA; 10-63 A). Door het ontbreken van goede smeltveiligheden van grote nominale stroom (>300A) is beveiliging van de ringkabels in veel gevallen niet mogelijk en worden niet stroombegrenzende schakelaars als ring-voedingsschakelaar toegepast. Indien het railsysteem een te hoog kortsluitvermogen heeft (350-500 MVA) ten opzichte van de lastschakelaars (250 MVA) in de ringen worden in de voedingsvelden stroombegrenzende smoorspoelen opgenomen die het kortsluitvermogen beperken. Om de verliezen in deze smoorspoelen te beperken is wel voorgesteld I_s begrenzers parallel te schakelen. Het kostenplaatje wordt echter wel ongunstig:

- | | |
|-------------------------------|---------------------------|
| • afgaand veld | fl. 10.000 |
| • smoorspoel | fl. 30.000 |
| • gecapitaliseerde verliezen. | fl. 30.000 (over 30 jaar) |
| • I_s begrenzer | fl. 30.000 |
| • vervang elementen | fl. 10.000 (per operatie) |

De toepassing van resonante koppelingen is technisch mogelijk, maar relatief duur door de benodigde smoorspoelen, condensatoren en verzadigde ijzerkern smoorspoelen. In het geval van eigen opwekking met een aanzienlijk vermogen, zou de economie van het geheel bekeken moeten worden in verhouding tot de kosten van een aparte HS aansluiting.

De supergeleidende en hybride schakelaars zijn nog niet inzetbaar voor de gevraagde vermogens (10-20kV ; 1-2 kA).

13.5 Tijdsbegrenzing

Het beheersen van de toenemende kortsluitstromen kan eenvoudig worden verkregen door een aanzienlijke tijdreductie. Een effectief middel is de toepassing van de directe trip ($6-8 * I_n$) in de

ringvoeding van het MS distributienet. Hierbij kan de bestaande beveiliging ($1-1,2 I_n$; 0,5-1 sec) worden gehandhaafd. Daardoor valt de kortsluitduur terug tot de eigentijd van de schakelaar (ca. 40-100msec) + de relaistijd (10-40msec). Een veelgehoord argument om de directe trip niet te gebruiken is het foutief uitschakelen tengevolge van de inrush-stroom van de distributietransformator. Door de Technische Universiteit Eindhoven is onderzoek uitgevoerd aan individuele transformatoren en een groep transformatoren in een windmolenpark. Hierbij bleek geen ongewenste uitschakeling op te treden door de verzadiging van de stroomtransformatoren door de gelijkstroomcomponent van de inrush-stroom.

Sinds 1995 zijn diverse electriciteitsbedrijven door ons benaderd. Enkele zijn reeds overgegaan om de directe trip in te voeren

- EDON Noord-Oost-Polder
- REMU Woerden en Mijdrecht
- ENW Zaandam
- NRE Eindhoven

Tot dusver zijn bemoedigende resultaten verkregen.

Indien alle ringvoedingsschakelaars van directe trip zijn voorzien, kan overwogen worden de hoofdvoedingsschakelaars op directe trip + kleine tijdvertraging in te stellen (0,2-0,5 sec). Ten opzichte van de oorspronkelijke tijden van 2 -3 sec is een aanzienlijke schadereductie te verwachten. Dit speelt een grote rol in het extreme geval van een railfout die een uitval van het gehele station kan veroorzaken.

Ook de stamvoedingskabels tussen hoofd- en onderverdeelstation zijn gebaat bij korte tijden. Overigens kan dit ook worden verkregen door een direct werkende differentiaal beveiliging..

13.6 Conclusies

- Het moge duidelijk zijn dat stroombegrenzing niet zo eenvoudig is als het lijkt. De klassieke, niet-begrenzende schakelaars kunnen alle ontwikkelingen nog steeds aan met lage kosten en kleine afmetingen (vacuüm en SF₆).
- Tijdige vervanging van te klein geworden schakelinstallaties (met eventueel hergebruik op plaatsen met minder kortsluitvermogen) blijft te verkiezen. Hierbij moet uiteraard de kosten in relatie tot het hele project worden gezien en niet van de schakelinstallatie alleen.
- Stroombegrenzing in voedingsvelden lijkt ongewenst in verband met slechtere selectiviteit en onnodige uitval van een groot aantal verbruikers.
- Stroombegrenzing in koppelvelden is een reële mogelijkheid, waarbij de verliezen echter moeten worden meegenomen.
- Stroombegrenzing in afgaande velden is soms gewenst om gebruik van (last)schakelaars met beperkter kortsluitvermogen te continueren.

Kortsluitduurbegrenzing is veel goedkoper en effectiever uit te voeren dan kortsluitstroombegrenzing. Dit heeft als bijkomend voordeel dat spanningsdeuken korter duren en minder klachten van de gebruiker zullen optreden.

Stroombegrenzing maakt het net in feite zachter waardoor ook afgelegen kortsluitingen tot grotere spanningsdaling op hoofdrailsysteem leiden. Een groot aantal verbruikers zullen de spanningsdaling ervaren.

- Het gebruik van kortsluitstroombegrenzende LS smeltveiligheden is meest bepalend voor de betrouwbaarheid van de laagspanningsdistributie.

- Voor middenspanning kunnen kortsluitstroombegrenzende MS smeltveiligheden alleen worden toegepast als transformator-beveiliging als gevolg van de beperkte nominale stroom.
- Met I_s begrenzers kunnen hoge nominale stromen worden verkregen tot meerdere kiloampères.
- Toepassing van kortsluitstroombegrenzers kan tot selectiviteitsproblemen voeren met de achter liggende niet begrenzende schakelaars.
- Kortsluitstroombegrenzing met passieve elementen is relatief duur; de investeringskosten en bedrijfskosten zijn hoog.
- Supergeleidende en hybride stroombegrenzers zijn nog niet beschikbaar voor praktische MS toepassingen.
- Kortsluit-tijdbegrenzing door toepassing van directe trip op ringvoedingsschakelaars kan aanzienlijke schadereductie opleveren.
- Dit is een essentiële voorwaarde om de kortsluittijden in verdeel- en hoofdvoedingsstations te kunnen begrenzen tot 0,2-0,5 sec in plaats van 2 - 3 sec.

13.7. Literatuur

- [13.1] Toepassing van kortsluitstroombegrenzers in de Amercentrale van de PNEM.
T.J.M.Peters, *Elektrotechniek* 52 (1974) 5 apr., pp. 280-284.
- [13.2] Principles of FCL by a resonant LC circuit.
G.C. Caraday, *IEE Proc.C*, vol.139, no.1 Jan 1992, pp. 1-6.
- [13.3] Superconducting technology for current limiters and switchgear.
G.C. Damstra, A.Greenwood, A. Sabot, H.H. Schramm, *Cigre '90*, sect. 1.1, pp. 1-7.
- [13.4] Operation of superconducting FCL in electrical networks
E. Baltzer, H. Schmitt, W. Schulz, *Cired '97*, Publ. No. 438, pp. 4.5.1-4.5.6.
- [13.5] A.M. Wolsky, H.E. Dijk, *Energietechniek* 4, jrg. 75, apr. '97, pp. 228-232.
- [13.6] A super high-speed intelligent circuit breaker.
P. Collart, S. Pellichero, GEC/Alsthom, *Techn. Rev.*, No. 9, 1992, pp. 3-47.
- [13.7] Limitation of arc energy during faults in distribution networks.
J.G.J. Slood, G.C. Damstra, J.v. Herel, R. Waumans, *CIREN* 1995, Brussel, pp. 4331-4333.

APPENDIX III: SCHAKELAAR DIAGNOSTIEK

A3.1 Plaatsbepaling.

De betrouwbaarheid van HS schakelaars is hoog. Uit enquêtes uitgevoerd in CIGRE verband (JANSSEN, 1994) naar storingen met SF₆ enkeldruk schakelaars blijkt dat de kans op ernstige storingen (Major Failures) 0.0067 per jaar is en op kleine storingen (Minor Failures) die niet catastrofaal zijn voor het onderbreken van de stroom 0.0475 per jaar. Dit betekent ook dat, gezien de resultaten van een eerdere enquête, de kans op ernstige storingen daalt. De kans op kleine storingen daarentegen daalt niet! Gezien deze trend en de hoge kosten van onderhoud over de levensduur van de schakelaar kan men zich afvragen of er niet minder onderhoud gepleegd zou kunnen worden met behoud van beschikbaarheid en betrouwbaarheid. Uit diverse studies blijkt het financieel aantrekkelijk van preventief onderhoud (inspecties en revisies die kostbaar zijn op vaste tijdstippen) over te stappen op toestand afhankelijk onderhoud. Kosten besparingen zijn mogelijk door het optimaliseren van vervanging(stijdstip) van materieel en het reduceren van kosten voor onderhoud en niet geleverde energie. Wel zijn meer inspecties nodig waarbij uitgebreide diagnose apparatuur wordt gebruikt of is het aanleggen van monitor systemen noodzakelijk. De kosten hiervan mogen uiteraard niet te hoog zijn en de beschikbaarheid ervan moet uiterst groot zijn.

In dit hoofdstuk zullen we de doelstelling van schakelaar diagnostiek bespreken (A3.2), nagaan hoe diagnostische parameters aan HS schakelaars gemeten kunnen worden (A3.3) en hoe de metingen verwerkt kunnen worden tot kengetallen die de toestand van de schakelaar beschrijven (A3.4). Tenslotte zal uit voorbeelden van metingen aan schakelaars (A3.5) en voorbeelden van commercieel verkrijgbare meetapparatuur (A3.6) blijken dat veel van het gepresenteerde al in praktijk gebracht wordt. Geavanceerde diagnostiek van de boogontlading wordt gebruikt in wetenschappelijk onderzoek en ontwikkeling van nieuwe schakelaars. Dit onderwerp valt buiten het bestek van deze appendix. De principes en toepassing staan beschreven in (Jones, 1988)

A3.2 Eisen diagnose systeem.

De eisen die we stellen aan een diagnose systeem zijn:

- Kosten effectief wat bijvoorbeeld blijkt uit FMEA (failure mode and effect analysis)
- Hoge betrouwbaarheid bijvoorbeeld middels zelftest faciliteiten en strenge afname keuringen
- Kan beginnende fouten signaleren zodat catastrofale fouten voorkomen kunnen worden
- Levert eenvoudig interpreteerbare informatie

Een diagnose systeem kan op verschillende manieren gebruikt worden bijvoorbeeld voor:

- afname keuringen
- inspecties ten behoeve van onderhoud
- bepalen van het einde van de economische of technische levensduur

Dit betekent dat de uitvoering van de hardware (sensoren, A/D omzetter, dataopslag) en de software (presentatie metingen, analyse en classificatie fouten en advies over te ondernemen acties) afhangt van de beoogde toepassing en de aanwezige faciliteiten zoals bedrijfsmiddelen registratie systeem en onderhoudsplanning.

Kosten besparingen door het gebruik van diagnose voor toestandsbepaling zijn te behalen op het gebied van:

- investeringskosten door optimaal uitnutten levensduur
- voorkomen storingen (garanderen beschikbaarheid, beperken vervolgschade)
- optimaliseren onderhoud (aanpassen inspectie en revisie termijnen)

Parameters die de toestand van de schakelaar beschrijven zijn voor

- het mechanisch systeem o.a. de ontgrendeltijd, de schakeltijd, de tijd voor de volledige contactbeweging, de contactsnelheid, de doorschot

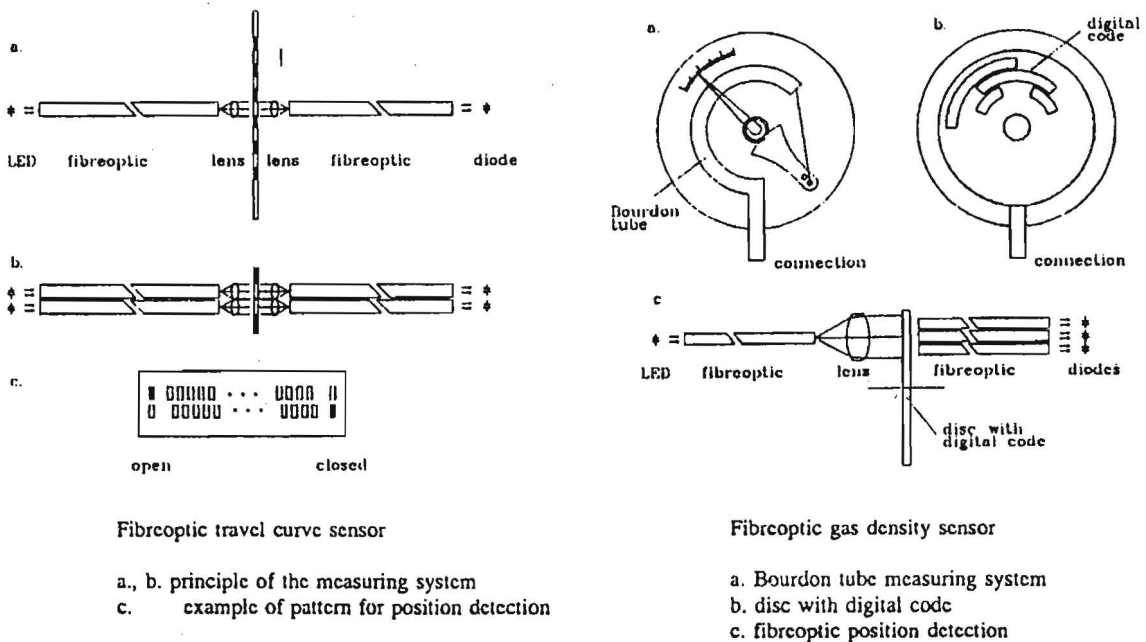
- het elektrische systeem de contactweerstand, de contactafbrandlengte, de aanwezigheid, sterkte en soort partiële ontladingen
- het gassysteem de gasdruk, de gaslek, de drukopbouw tijdens schakelen, de aanwezigheid van vocht en decompositieproducten van SF₆ gas
- het secundair systeem de relai-tijd, de motorstroom (grootte en duur) voor het opwinden van de veer of voor de compressor, de tripspoelstroom (tijdstip, grootte, duur).

De keus die hieruit gemaakt moet worden voor een specifiek diagnosesysteem hangt af van het type schakelaar en de storingen (verwacht of uit ervaring) die gedetecteerd moeten worden volgens de FMEA en de kosten/baten analyse.

A3.3 Meetprincipes.

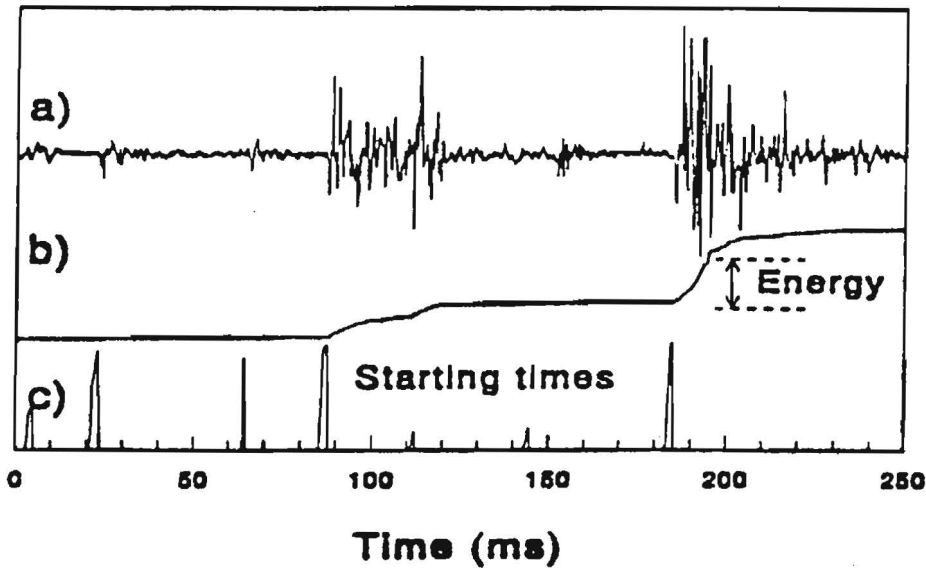
De laatste jaren zijn veel sensoren ontwikkeld en meetapparatuur voor het registreren van fysische grootheden en het berekenen van kengetallen voor de conditie. Een overzicht is te vinden in de algemene literatuur (Proc. CIGRE symposium, Proc. National Power Conf. en boek van GR Jones). We beperken ons hier tot enkele voorbeelden.

Voor de meting van de **contactbeweging** worden resistieve en inductieve verplaatsings-opnemers gebruikt die aan het mechaniek van de schakelaar bevestigd moeten worden. Dit betekent dat de schakelaar eerst vrijgeschakeld moet worden voor de meting kan worden uitgevoerd. Een alternatief is een optische sensor die contactloos verplaatsing of rotatie kan meten (zie figuur 1 uit Karrenbauer, 1993). Omdat de meting contactloos is wordt de werking van het mechaniek niet beïnvloed. Bovendien geeft de optische sensor geen EM-storing door aan de registratieapparatuur.



Figuur 1. Optische sensoren voor het meten van verplaatsing van het schakelcontact en rotatie van een drukmeter volgens (Karrenbauer, 1993)

De werking van de aandrijving kan bewaakt worden met **trillingsmetingen**. Hiervoor worden versnellingsopnemers met bijenwas of magnetische klemmen op een geaard onderdeel van de schakelaar bevestigd, bijvoorbeeld op iedere pool één. De meting kan geschieden zonder de schakelaar uit bedrijf te nemen. De trillingsmeting wordt gecombineerd met een meting van de **tripspoelstroom** voor tijdsynchronisatie. De tripspoelstroom zelf bevat informatie over het ontgrendelen van de aandrijving, de trillingsmetingen over de totale contactbeweging.



Figuur 2. Trillingsmeting op de aandrijving van een 150 kV schakelaar. Het trillings signaal (a) bestaat uit een aantal uitbarstingen waarvan de energie (b) en het begintijdstip (c) wordt berekend.

Met drukopnemers kan de **drukopbouw** door de boogontlading in het blusgas tijdens schakelen worden geregistreerd. Een statische drukmeting geeft in combinatie met de temperatuur informatie over de **gasdichtheid** en over lange tijd de gaslek. Dit wordt belangrijk als er milieueisen gesteld gaan worden aan de emissie van SF₆ gas dat een broeikasgas is.

Slijtage van de schakelaarcontacten is af te leiden uit meting van de **contactweerstand**. Deze meting levert ook het tijdstip van contact opening/sluiting. KEMA (Verhaart, 1995) heeft een methode ontwikkeld om in enkele minuten alle contacten door te meten van een regelschakelaar in een vermogenstransformator.

Een voorbode van elektrische doorslag is de aanwezigheid van **partiële ontladingen**. Voor detectie wordt meestal gebruikgemaakt van:

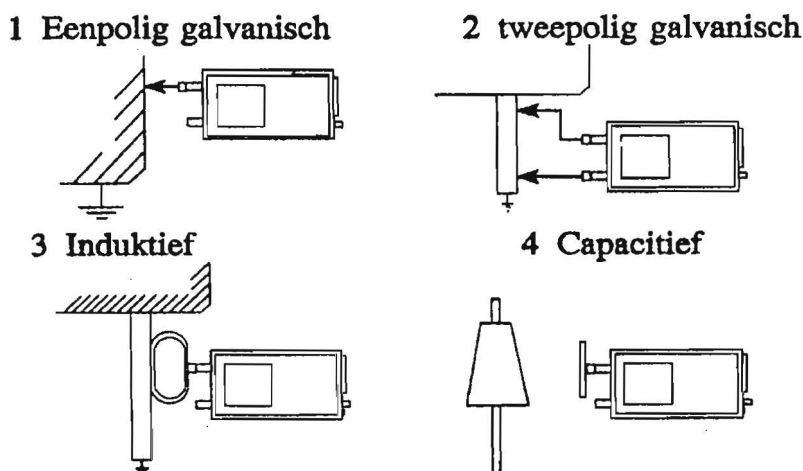
- Akoestische detectie
met ultrasonische opnamer (30-150 kHz)
- Elektrische detectie
conventioneel tot 2 MHz met koppelcondensator (volgens IEC 270)
Lemke-sonde tot 5 MHz met capacitieve of inductieve sonde (zie figuur 3)
VHF detectie (50-300 MHz) met capacitieve sonde
UHF detectie (300-2000MHz) met antenne

Daarnaast zijn de ontladingen ook optisch te detecteren of af te leiden uit chemische analyse van het isolatiegas. Deze technieken worden niet gebruikt voor bewaking met uitzondering van optische vonkdetectie bij kabeleindsluitingen.

A3.4 Verwerking gegevens.

Wanneer voor de registratie van signalen een transiënt recorder wordt gebruikt en de bemonsteringsfrequentie 10 kHz is, worden er in een halve seconde 5000 metingen gedaan per kanaal. Het is niet zinnig deze waarden allemaal te bewaren. De metingen worden verwerkt tot enkele getallen die iets zeggen over de toestand van de schakelaar. Zo wordt uit de curve voor de contactbeweging de contactsnelheid, de totale slag, het tijdstip van contactscheiding en de doorschot berekend en bewaard in een database. Vervolgens wordt gecontroleerd of de waarden binnen of buiten de specificaties vallen.

Detectie HF transient EM-veld met Lemke sonde



Figuur 3. Aansluitmogelijkheden van de LEMKE-sonde voor pd metingen

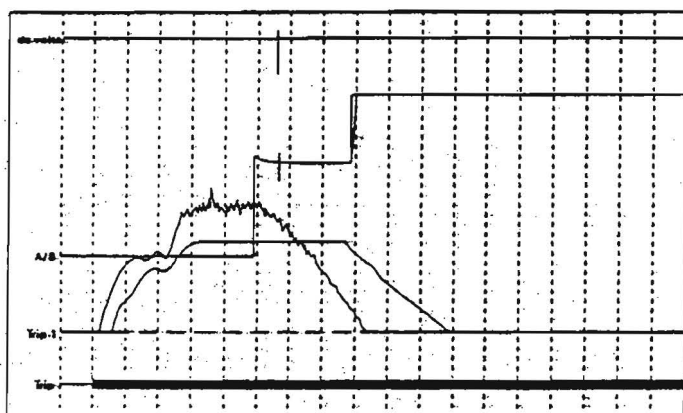
Bij de trillingsmetingen worden de starttijden van uitbarstingen bepaald en extra trillingsverschijnselen opgespoord. Uit testen bij KEMA met een 150 kV SF₆ schakelaar waar beginnende fouten in zijn aangebracht is gebleken dat het type fout opgespoord kan worden uit de kengetallen van de trillingsmetingen (lekke oliedemper, te lage vuldruk, verkeerd afgestelde aandrijving, contactafbrand, te trage contactbeweging, te trage ontgrendeling, zie Poorts, 1995).

Bij partiële ontladingsmetingen is het ontladingspatroon over één fase van de 50 Hz testspanning karakteristiek voor het type ontlading: corona treedt op op het spannings maximum, ontladingen door zwevende electrodes na de nuldoorgangen en ontladingen door metaaldeeltjes gedurende de gehele fase. De patronen kunnen gekarakteriseerd worden met statistische parameters (Kreuger, 1992). Door een databank aan te leggen met vingerafdrukken van diverse soorten fouten kan de patroonherkenning geautomatiseerd worden. Voor de patroonherkenning kan ook gebruik gemaakt worden van fractale analyse.

A3.5 Praktijk voorbeelden.

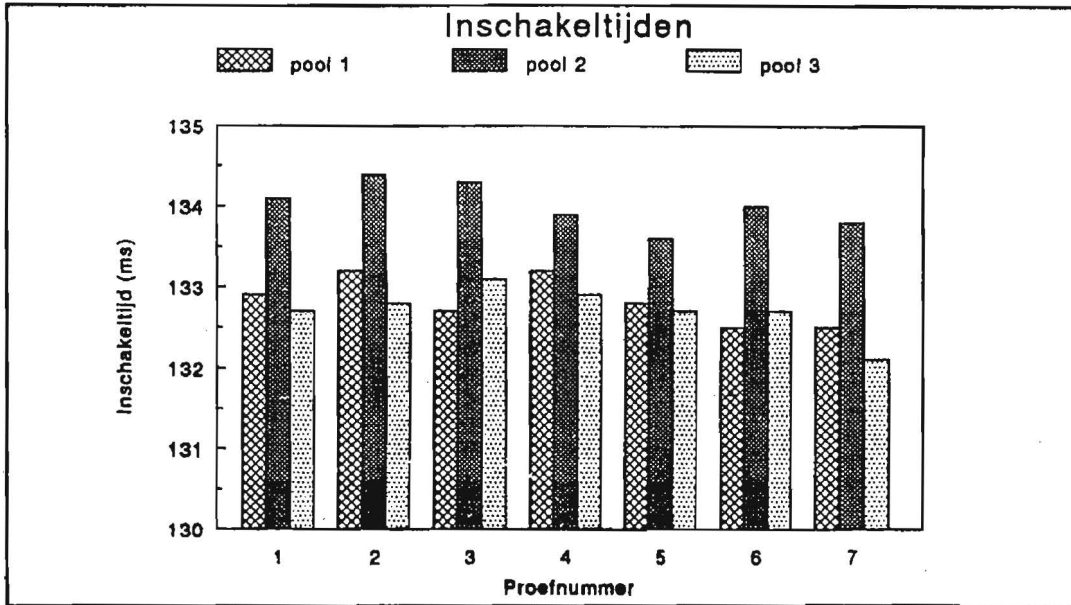
- Meting aan een 16 kV schakelaar met een Hathaway recorder RTR-84.

Door de meting te vergelijken met een referentiemeting kunnen afwijkingen worden opgespoord. In dit geval opent de schakelaar correct (A en B vallen samen) maar is de tripspoelstroom veel te hoog. De spoel dient onmiddellijk vervangen te worden!



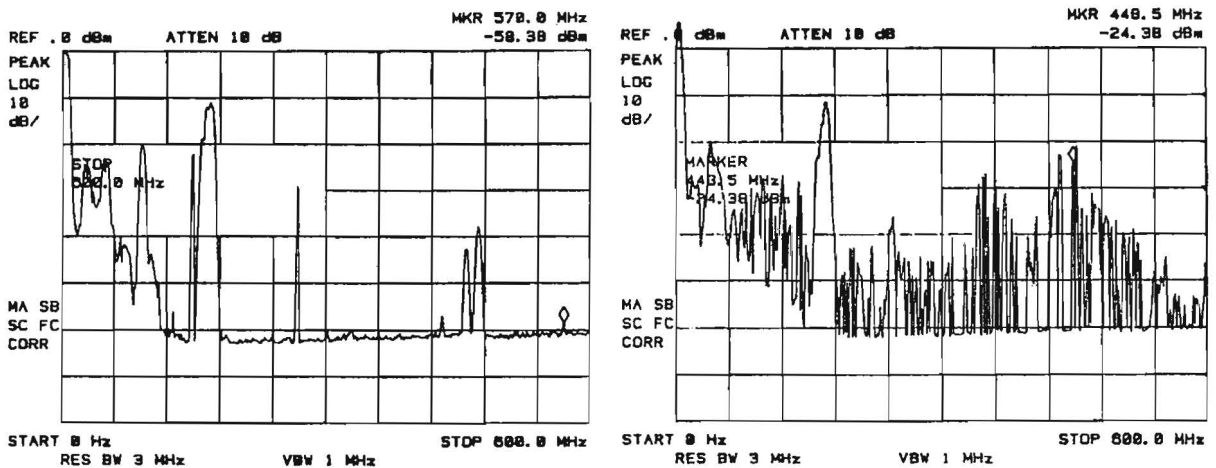
Figuur 4. Contact opening (A en B) en tripspoelstroom van een referentie metingen en een inspectie-meting.

- Meting gelijkloop polen van een 3-fase schakelaar uit trillingsmetingen (Fig. 5). Door op iedere pool een trillingssensor te bevestigen kan de inschakeltijd bepaald worden. Pool 2 dient bijgesteld te worden.



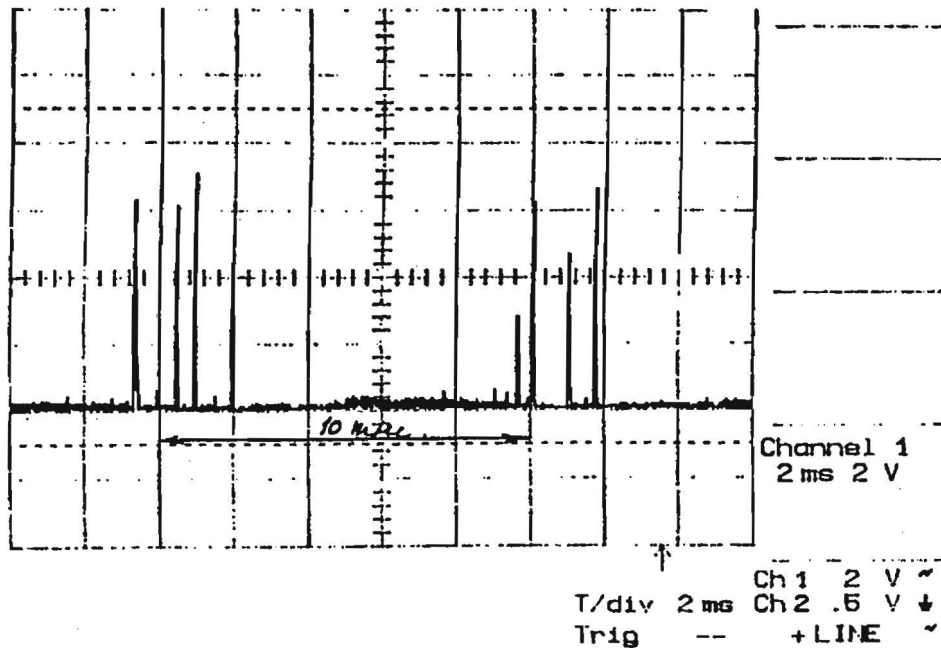
Figuur 5. Inschakeltijden van 3 polen van een SF₆ schakelaar, bepaald uit het trillings signaal.

- pd meting in een 220 kV GIS installatie tussen een machine transformator en kabeleindsluiting bij een opwekeenheden (Fig. 6). Het detectieniveau is 0,1 pC. Links GIS zonder pd en rechts GIS met partiële ontladingen ter grootte van 2 pC.



Figuur 6. pd meting met een frequency analyser en UHF antenne op een GIS onderdeel. De achtergrond bestaat uit signalen tot 100 MHz en enkele zenders (links).

- pd meting met lemke-sonde aan 50 kV schakelmaterieel. Ontladingen over een steunisolator geven aanleiding tot de getoonde signalen (Fig. 7.).



Figuur 7. *pd meting met een Lemke-sonde op een 50 kV oliearme schakelaar.*

A3.6 Commerciële meetsystemen.

Een aantal firma's brengt meetapparatuur op de markt om off-line of on-line inspecties mee uit te voeren zoals:

- Doble Engineering Company: INSITE diagnose systeem
- MONITEC
- Hathaway: RTR-84 Breaker Condition Monitor (Response Recorder)
- Leading Edge Research: STS 110 Advanced Circuit Breaker Test & Analysis System
- Rochester: X-BT100 Expert Breaker Tester
- KEMA schakelaar meetstelsel (trillingen, contactbeweging, tijden hulpcontacten)
- KEMA Tap-changer tester (diagnose transformator regelschakelaar)
- Haefely: TEAS pd ontladingsdetector met software voor classificatie en patroonherkenning

Ook bestaan er reeds enkele systemen die geschikt zijn voor permanente installatie zoals:

- Diagnostic Monitoring Systems: UHF pd monitor voor GIS
- GEC Alsthom: SF₆ gasdichtheid monitor
- ABB: SF₆ gasdichtheid monitor

A3.7 Samenvatting.

Schakelaar diagnostieken voor off-line en on-line diagnose zijn ontwikkeld voor toestandsbepaling. Ze vinden toepassing bij inspecties en, bij GIS, ook als monitor. Voor het automatisch verwerken en interpreteren van metingen moet nog veel praktijkervaring verzameld worden om kennisregels te kunnen formuleren die in expert-systemen gebruikt kunnen worden.

A3.8 Literatuur diagnostiek schakelaars.

Algemeen:

- [1] Proc. CIGRE Symposium "Diagnostic and Maintenance Techniques", Berlijn 1993
- [2] Proc. National Grid Conference on "Condition Monitoring in High Voltage Substations", Dorking 1996
- [3] G.R. Jones, High pressure arcs in industrial devices, Diagnostic and monitoring techniques. Cambridge University Press 1988.
- [4] A.L.J. Janssen et al. A summary of the final results and conclusions of the second international enquiry on the reliability of high voltage circuit-breakers. CIGRE, Paris 1994, Report 13-202
- [5] H. Karrenbauer and C. Neumann. A concept for self-checking and autocontrol of HV circuit-breakers and its impact on maintenance and reliability, Proc. CIGRE Symp, Berlin 1993 paper 120-03
- [6] F.H. Kreuger, E. Gulski and W.A. Sonneveld. Diagnosis in GIS by statistical analysis of discharges, CIGRE session 1992, Paris, paper 15/23-04.
- [7] C.J.H.M. Poorts and W.R. Rutgers. Condition monitoring techniques for circuit-breakers. Proc. 13th Int Conf. on Electricity Distribution, Brussels 1995, paper 1.12
- [8] H.F.A. Verhaart, A diagnostic to determine the condition of the contacts of the tap changer in a power transformer, Proc. 13th Int. Conf. on Electricity Distribution, Brussels 1995, paper 1.13.

prof. dr. W.R. Rutgers
KEMA Transmission & Distribution

SCHAKELAAR DIAGNOSTIEK

W.R. Rutgers
KEMA TDP, Arnhem

T&D Power



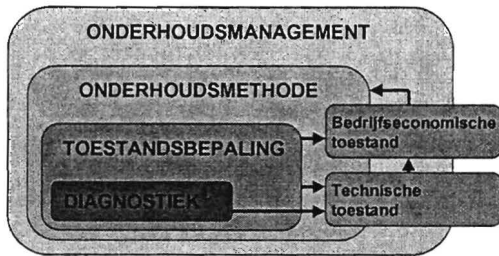
INHOUD

- Plaatsbepaling
- Eisen diagnose systeem (voor TAO)
- Meetprincipes
- Verwerking gegevens
- Praktijk voorbeelden
- Commerciële meetsystemen
- Vooruitzichten

T&D Power



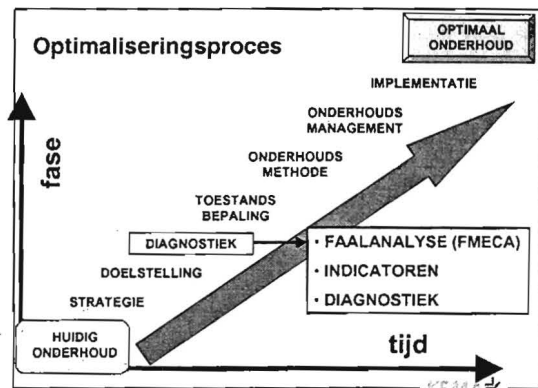
OPTIMALISEREN VAN ONDERHOUD



T&D Power



Optimaliseringsproces



T&D Power



DOEL TAO SCHAKELAARS:

- Verminderen kosten onderhoud
- Fout detectie in een vroeg stadium
- Verhogen betrouwbaarheid en beschikbaarheid
- Levensduur verlenging dure bedrijfsmiddelen
- Aansprakelijkheid (nalatigheid)

T&D Power

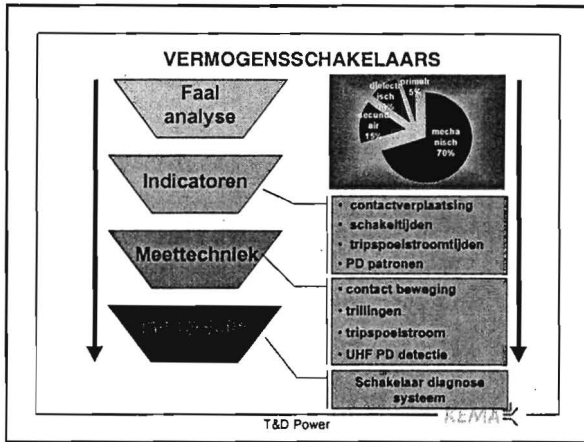


SCHAKELAAR FOUTEN (indicatief)

- | | |
|---------------------|-----|
| • Mechanisch | 65% |
| • Electrisch | 5% |
| • Secundair systeem | 20% |
| • Gas (vacuüm) | 5% |
| • Diëlectrisch | 5% |

T&D Power





SCHAKELAAR DIAGNOSTIEKEN

Contact beweging	Mechanisme
Trillingen	Mechanisme
Trip spoel stroom	Secondary
Gas dichtheid	Lekkage
Olie analyse	H.S. Isolatie
Partiële ontladingen	H.S. Isolatie
Vacuüm	Lekkage

T&D Power KEMA

- ### INDICATOREN
- Contact afstand
 - Contact snelheid of versnelling
 - Contact doorschot
 - Start tijden trillingen uitbarstingen
 - Schakel tijden
 - Trip spoel stroom, max. waarde, duur, etc.
 - PD, intensiteit, grootte, patroon
 - Gas dichtheid verloop, vacuüm
 - Olie conditie, gas, vocht, deeltjes
- T&D Power KEMA

Schakelaar Diagnose Systeem

Aandrijving/secondair

- Contact verplaatsing
- Trillingen
- Tripspoelstroom
- Contact weerstand

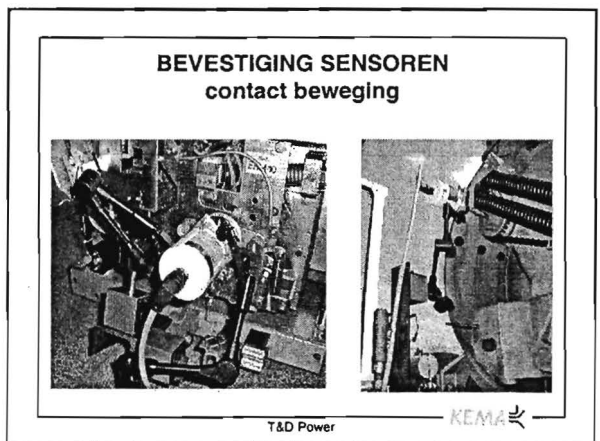
Dielectrische toestand

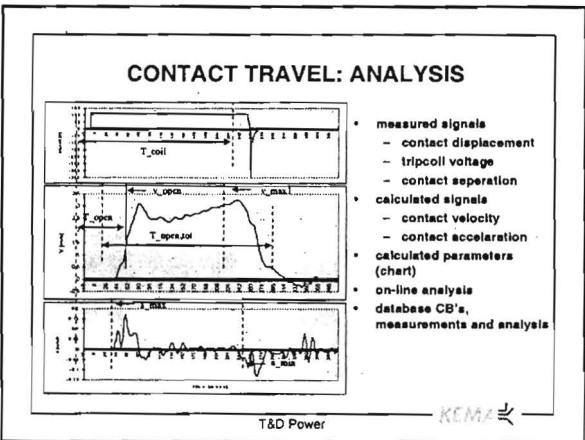
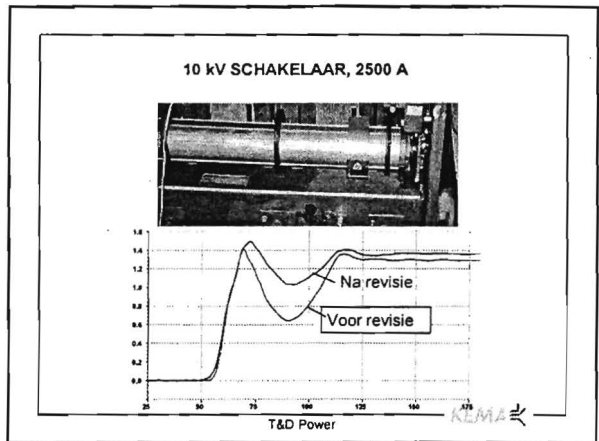
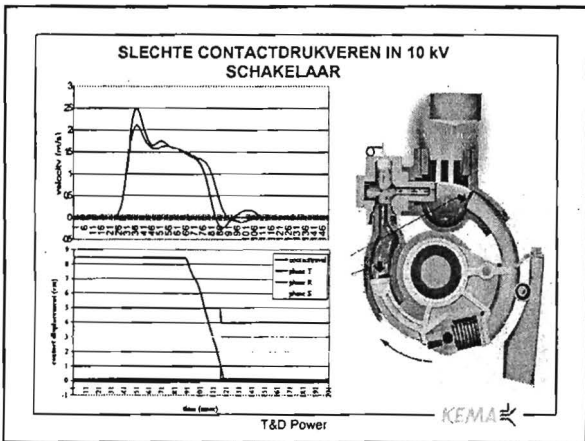
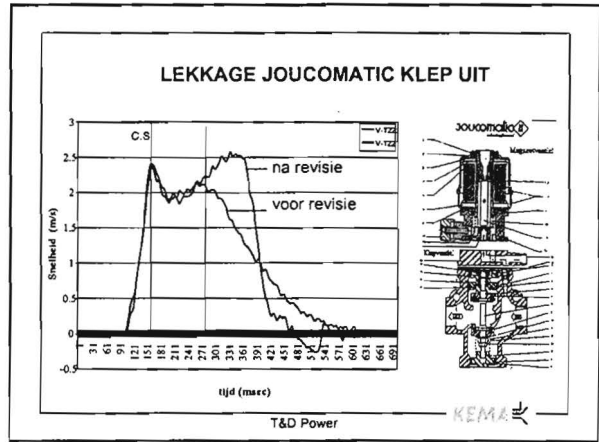
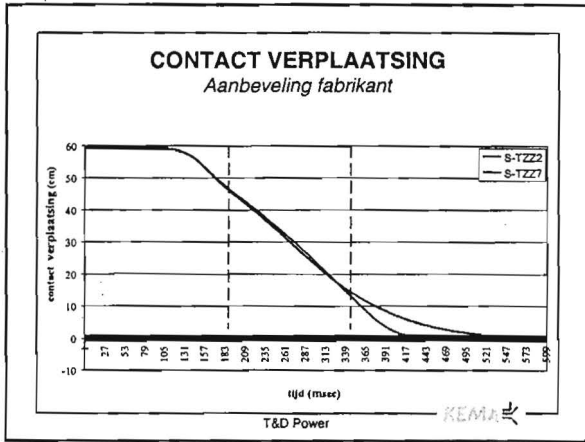
- On-line PD
- gas, vacuüm, olie

Visuele inspectie

T&D Power KEMA

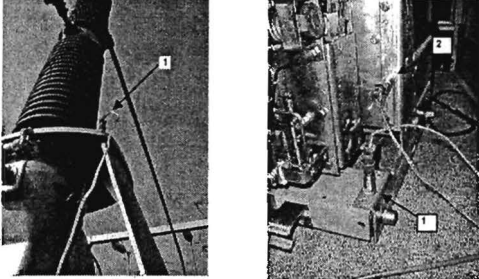
- ### CONTACT BEWEGING CRITERIA
- Fabrikant en gespecialiseerde bedrijven
 - Uit de praktijk
 - Uit KEMA R&D projecten
 - Door KEMA opgesteld, metingen door E-bedrijven (13 systemen in gebruik)
 - Door onderhouds afdelingen
 - Circuit breaker database (fingerprints, kennis regels, criteria voor indicatoren)
- T&D Power KEMA





- ### TRILLINGS METINGEN
- Montage zonder vrijchakelen (1e schot)
 - Gemeten signalen:
 - tripspoel spanning (open/dicht)
 - tijdstip contact scheiding
 - (drie) trillings signalen
 - Berekende indicatoren voor uitbarstingen:
 - start tijdstip
 - energie
- T&D Power KEMA

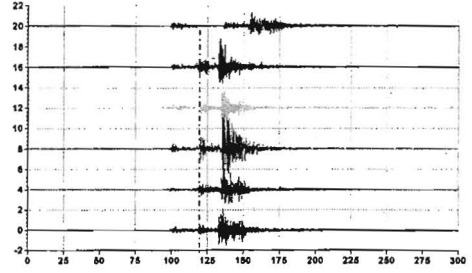
BEVESTIGING SENSOREN trillings metingen



T&D Power

KEMA

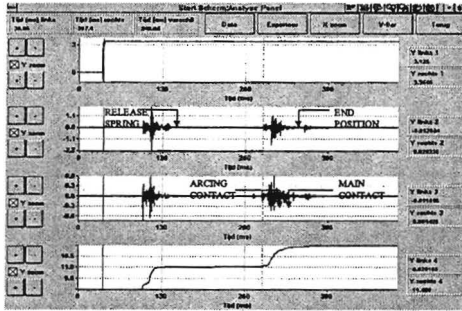
AFWIJKING IN INSCHAKELING



T&D Power

KEMA

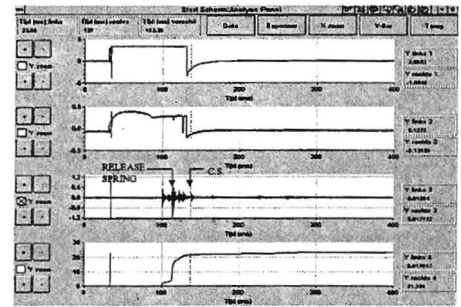
VIBRATION ANALYSIS closing operation 1



T&D Power

KEMA

VIBRATION ANALYSIS opening operation 1



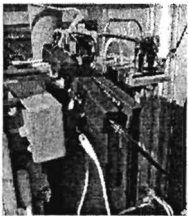
T&D Power

KEMA

SENSOREN SPOELSTROOM EN PD

Spoelstroom

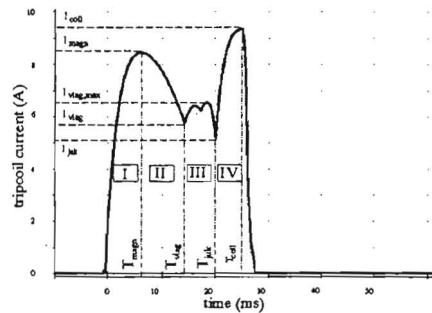
Partial Discharge



T&D Power

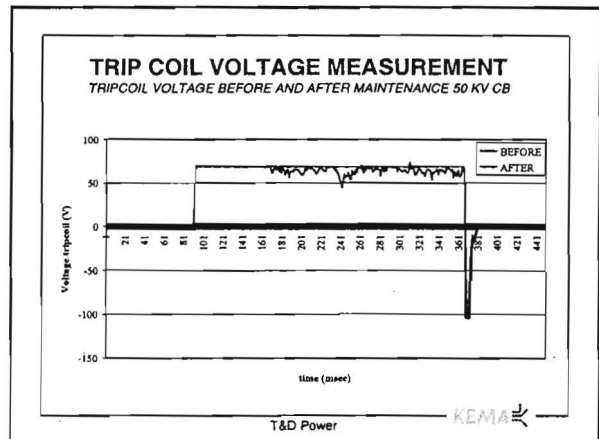
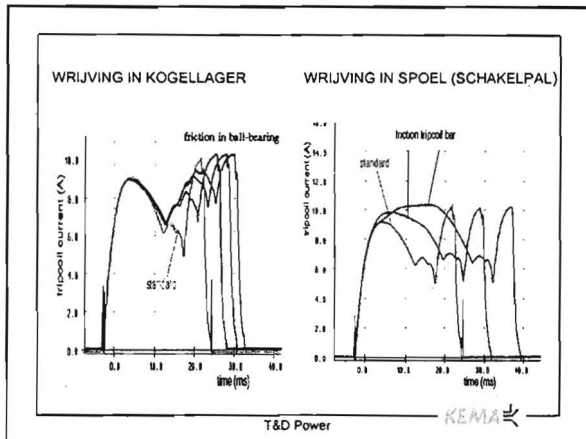
KEMA

TRIPSPOEL STROOM

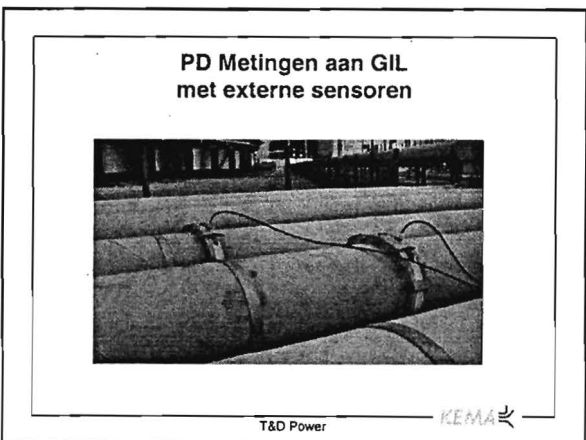
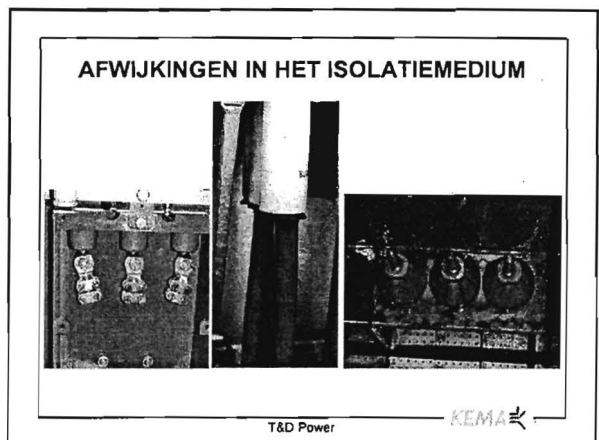


T&D Power

KEMA



- PROBLEMEN uit de PRAKTIJK**
- CONTACTVERPLAATSING
 - 10 kV
 - contactdrukveren
 - openniveau VS bak
 - in/uitschakelprobleem
 - demper (vacuüm)
 - demper (lucht)
 - 50 kV
 - contactdruk
 - schakelcontact
 - lekkage drukventiel
 - demping railkiezer
 - problemen walscontacten
 - 150 kV
 - lekkage demper
 - TRILLINGEN / TRIPSPOELSTROOM
 - 10 kV
 - slechte kogellager D-as
 - slecht werkende spoel
 - spontane uitschakeling
 - uitschakelveer
 - slechte demping
 - verhoogde contactdruk
 - schakelcontact
 - 50kV
 - vervulde walsen
 - demping
- T&D Power KEMA



- OVERIGE PROBLEMEN**
- Afgebroken onderdelen
 - Tijdverschillen in beweging verschillende fasen
 - Partiële ontladingen in GIS en GIL
 - Partiële ontladingen in doorvoer isolatoren, kabeleindsluitingen en railzen
 -
- T&D Power KEMA

CONCLUSIES

- Kosten reductie mogelijk door invoering TAO; meer inspecties en minder (selectief) onderhoud
- Mogelijkheden voor detecteren van fouten in een vroegtijdig stadium: minder storingen en levensduur verlenging
- Beperkte mogelijkheden voor on-line monitoring aan oude apparatuur
- Aanpak voor MS and HS verschillend

T&D Power



TOEPASSINGS GEBIEDEN

- Storings analyse
- Afname keuringen
- Inspecties t.b.v. TAO
- Controle na reparatie
- Monitoring kritische componenten
- Synchroon schakelen
- Sensor signalen ook voor sturen/b/b

T&D Power



VOORUITZICHTEN

- Schakelaars met ingebouwde sensoren en diagnostische functies
- Integratie van monitoren en besturing: Get more out of your system
- data mining als meer informatie toegankelijk / beschikbaar is (in digitale vorm)
- integratie van expert systemen in toestands bepaling en TAO

T&D Power



APPENDIX IV: TIJDCONSTANTEN IN ELEKTRICITEITSNETTEN EN HUN RELATIE TOT VERMOGENSSCHAKELAARS

Door het asymmetrische karakter van de kortsluitstroom wordt in het algemeen de onderbreking moeilijker: zowel de boogtijd als de gevoerde stroom worden immers vergroot.

Door de kortere openingstijden van moderne schakelaars, de snelle detektietijden en de lagere boogspanningen in vergelijking met vorige generatie schakelaars krijgt de schakelaar een steeds groter aandeel van de asymmetrische stroom in de boogfase te verduren. Bovendien zijn er redenen om te vermoeden dat ook de tijdconstante van de asymmetrische stroom toeneemt, en daarmee de thermische belasting van de onderbrekingskamer en de electrodynamische belasting van schakelaar onderdelen; de asymmetrische piek wordt immers hoger bij grotere tijdconstanten (zie hoofdstuk 3).

In vrijwel alle gevallen worden vermogensschakelaars voor Nederland wat betreft hun kortsluitgedrag beproefd volgens IEC 60056 (1987), die uitgaat van een tijdconstante van 45 ms voor alle netten. Om een aantal redenen dienen er vraagtekens te worden gezet bij de correctheid van deze waarde van 45 ms, vooral in middenspanningsnetten:

1. In een net in de groei worden vaak bestaande transformatoren vervangen door exemplaren met een grotere MVA-waarde. Om nu het kortsluitvermogen in het station niet te laten toenemen tot boven de maximaal toelaatbare waarde van de componenten, wordt meestal een trafo gekozen met een grotere ϵ_k dan zijn voorganger. Dit vergroot de trafo-induktiviteit. Tegelijkertijd is meestal de weerstand van de windingen kleiner. Beide effecten vergroten de tijdconstante ($\tau = L/R$) van de trafo.
2. In industriële netten neemt het aandeel van de eigen opwekking de laatste jaren sterk toe. Ten behoeve van de netstabiliteit, minimalisatie van de verliezen en maximale betrouwbaarheid staan deze opwekeenheden zo kort mogelijk op de (middenspannings-) rail. Synchrone generatoren reageren op een kortsluiting met een zeer grote tijdconstante en met asymmetrische stromen waarvan het gelijkstroomlid de wisselstroom component zelfs kan overtreffen (zie appendix "Generator schakelaars").
3. Ter begrenzing van kortsluitstromen kunnen spoelen worden geplaatst. Ook deze vergroten de tijdconstante.

Elk van deze redenen - en zeker een combinatie - kan de tijdconstante groter maken dan waarvoor de schakelaar ontworpen en (meestal) beproefd is.

Typische waarden van de tijdconstante van diverse componenten staan in het onderstaande overzicht:

Trafo	150 MVA	400/150 kV	$\tau = 300$ ms
Trafo	63 MVA	150/10 kV	$\tau = 200$ ms
150 kV lijn	2*20/224 mm ²	5.6 m geleiderafstand	$\tau = 15$ ms
150 kV XLPE kabel	3*1*1200 mm ²	Al	$\tau = 20$ ms
10 kV XLPE kabel	3*1*400 mm ²	Al plat	$\tau = 5$ ms
Smoorspoel	10 kV, 2750 A		$\tau = 250$ ms
Generator	10 kV, 52 MVA		$\tau = 260$ ms

Uit het overzicht blijkt dat de lokatie van de schakelaar sterk de mate van asymmetrie bepaalt: voor schakelaars in transformator-gevoede onderstations zijn duidelijk grotere tijdconstanten van toepassing dan voor schakelaars in een vermaasd net met veel kabels/lijnen. Verder is het noodzakelijk een onderverdeling te maken naar spanningsniveau:

A4.1 Middenspanning (<72.5 kV).

De huidige waarde van $\tau = 45$ ms is voldoende voor netten gevoed door kabels. Een veel grotere waarde (orde 100 ms) is van toepassing voor trafo-gevoede netten met kortsluitstromen in de buurt van de maximale kortsluitstroom die de schakelaar kan onderbreken. Dergelijke condities kunnen problematisch

zijn. In situaties met significant lagere kortsluitstromen dan waar de schakelaar voor ontworpen is, kan een overschot aan kortsluitstroom-onderbrekingsvermogen wellicht het effect van de grotere tijdconstante compenseren: een 50 kA schakelaar, beproefd met $\tau = 45$ ms is waarschijnlijk toereikend voor een lokatie met 40 kA kortsluitstroom met een grotere tijdconstante.

Deze gedachtengang is uitgangspunt van de (Amerikaanse) ANSI normering.

Rekenvoorbeeld: ANSI hanteert de faktor S als verhouding tussen asymmetrische en symmetrische stroom:

$$S = \frac{I(t_0)}{I_{symm}} = \sqrt{1 + 2 \left[\exp\left(-\frac{t_0}{\tau}\right) \right]^2}$$

$$I(t) = \sqrt{I_{symm}^2 + I_{DC}^2(t)}$$

met t_0 de tijd tussen het begin van de sluiting en de contactscheiding, I_{symm} de RMS waarde van de symmetrische stroom en i_{DC} de momentane waarde van het gelijkstroomlid.

Stel $t_0 = 40$ ms (10 ms detektietijd + 30 ms mechanische openingstijd), dan volgt met $\tau = 45$ ms: $S = 1.16$. In een net met veel grotere tijdconstante $\tau = 130$ ms wordt $S' = 1.44$, zodat in deze gedachtengang het onderbrekingsvermogen van een adequate schakelaar een faktor $S'/S = 1.24$ hoger moet zijn.

A4.2 Hoogspanning (>72.5 kV).

Hoogspanningsnetten worden gewoonlijk gedomineerd door lijnen, waardoor de bestaande waarde van 45 ms voor de tijdconstante toereikend lijkt te zijn. Ook hier vereisen speciale situaties, in het bijzonder grote kortsluitvermogens in transformator-gevoede stations aandacht, waarbij een hogere 'rating' schakelaarvermogen of speciale beproevingen uitkomst kan bieden, analoog aan de situatie in middenspanningsnetten.

Een enquête onder een zestal Nederlandse distributiebedrijven leert dat in het Nederlandse net in meerderheid de huidige 45 ms adequaat wordt geacht voor 150/110 kV. TenneT hanteert voor het 380 kV net eveneens een waarde van 45 ms, behalve voor 10% van de lokaties waar 120 ms gehanteerd wordt.

Voor netten met zeer hoge spanning (> 380 kV) neemt (door de grotere geleider afstand) de tijdconstante weer toe.

A4.3 Generatoren.

Standaard (general purpose) vermogensschakelaars worden toegepast tot generator vermogens van ca. 20 MVA. Daarboven moeten speciale generator schakelaars worden ingezet (zie ook Appendix "generator schakelaars").

Voor deze situatie is een tijdconstante van 45 ms in het algemeen onvoldoende. Beproeving met $\tau = 133$ ms is aanbevolen in de IEEE standaard voor generator schakelaars IEEE C37.013 (1997). In die gevallen waarbij het aanwezige kortsluitvermogen tenminste één stap van de R10 serie beneden de onderbrekingscapaciteit van de schakelaar ligt, is beproeving met $\tau = 45$ ms mogelijk toereikend.

Afhankelijk van de wijze van opwekking (net- of generator gevoed) verschilt de tijdconstante in beproevingscircuits aanzienlijk, maar ligt in het algemeen boven 45 ms.

Overigens wordt in IEC (te) weinig aandacht besteed aan asymmetrische stromen. Gekoppeld aan de minimale tijd tot contactscheiding (openingstijd) vermeerderd met een halve periode voor detectie (openingstijd + detectie tijd = t_0) wordt het vereiste percentage asymmetrie vastgelegd door:

$$p(t_0) = \frac{I_{DC}(t_0)}{\sqrt{2} I_{symm}} = \exp\left[-\frac{t_0}{\tau}\right]$$

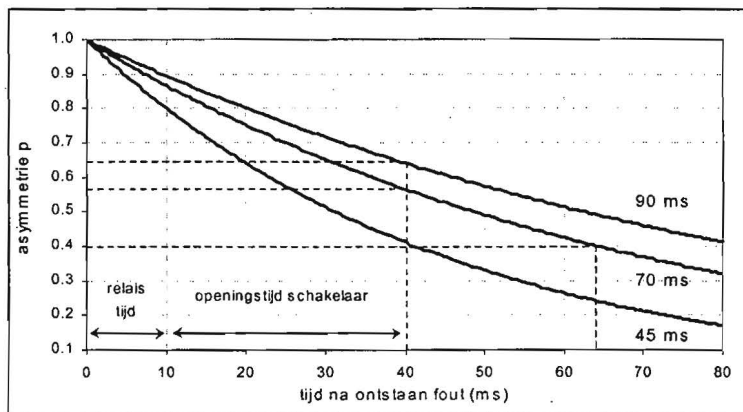
In het beproevingscircuit wordt het moment van contactscheiding zodanig gelegd dat het door de fabrikant gegarandeerde percentage asymmetrie in het betreffende circuit wordt gerealiseerd.

Rekenvoorbeeld (zie figuur): stel het beproevingscircuit heeft $\tau = 70$ ms en de fabrikant wenst een asymmetrie van 40% te laten verifiëren, dan geldt: $t_0 = 64$ ms. Als de openingstijd 30 ms bedraagt, moet de opening dus 34 ms worden vertraagd in het beproevings laboratorium om de 40% asymmetrie te bereiken. Als deze schakelaar **zonder inschakel vertraging** in een net komt met 90 ms tijdconstante, dan is het asymmetrie-percentage echter 65%; t_0 is dan immers geen 64 ms, maar ca. 10 ms (detektie) + 30 ms

(openingstijd) = 40 ms).

De netbeheerder dient zich duidelijk bewust te zijn van deze omstandigheid.

Overigens lijkt IEC af te stappen van het belang van asymmetrie op het moment van contact-scheiding. In een recente studie van een IEC Task Force wordt voorgesteld de asymmetrie op de nuldoorgang van blussing (dus na t_0 + de boogtijd) als maatgevend te beschouwen voor de zwaarte van de schakelactie. Deze overweging wordt echter vooralsnog niet verwerkt in de formulering van de nieuwe IEC 60056 standaard (geldig vanaf eind 2000), maar zal als aanbeveling gelden.



In de gereviseerde versie van IEC 60056 wordt voor de aanbevolen waarde van de tijdconstante een onderscheid gemaakt worden tussen midden- en hoogspanning, en zal de middenspannings-tijdconstante een waarde krijgen van 45 of 120 ms, afhankelijk van de toepassing van de schakelaar. De waarde 120 ms is daarbij een alternatief voor die gevallen waarin de schakelaar in een trafo gevoed station staat. De alternatieve tijdconstante voor hoogspanningsnetten (naast de gehandhaafde 45 ms) wordt 60 ms voor het spanningsbereik 72.5 – 420 kV en 75 ms voor spanningen vanaf 550 kV.