

## Schakeltechniek in of uit?

**Citation for published version (APA):**

Damstra, G. C. (1993). *Schakeltechniek in of uit?* Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1993

**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](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

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

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# Schakeltechniek in of uit?

## INTREEREDE

Prof.dr. G.C. Damstra



Technische Universiteit Eindhoven

# INTREEREDE

Uitgesproken op vrijdag 5 maart 1993  
aan de Technische Universiteit  
Eindhoven.

Prof.dr. G.C. Damstra

Mijnheer de Rector Magnificus,  
Dames en Heren,

## Inleiding

Een continue elektriciteitsvoorziening is van levensbelang voor onze moderne samenleving. Deze is alleen mogelijk dankzij een netwerk van elektriciteitsbedrijven, samenwerkend in nationaal en internationaal verband. De elektriciteitsvoorziening komt tot stand door een infrastructuur, bestaande uit een groot aantal componenten in de keten van opwekking, transport, distributie tot en met het verbruik van de energie.

Wanneer de primaire omzetting van chemische of nucleaire bronnen en de thermodynamische cyclus voor dit betoog buiten beschouwing worden gelaten, begint het elektrotechnische deel van deze keten bij de generator. Hier wordt de rotatie van een turbine met een hoog rendement omgezet in elektrische energie bij een spanning van 10–20 kV.

Om het transport van de opgewekte energie mogelijk te maken wordt de spanning verhoogd tot enkele honderden kilovolt door middel van transformatoren. Op dit spanningsniveau vormen hoogspanningslijnen de verbinding met de verbruikscentra en de

koppeling met andere opwekeenheden in binnen- en buitenland. Bij de verbruikscentra wordt omlaag getransformeerd naar spanningsniveaus tussen 150 en 50 kV, waarbij lijnen en kabels worden toegepast voor de verbinding naar de hoofdverdelstations. Hier wordt de spanning opnieuw omlaag getransformeerd naar een niveau van 10–24 kV. Het middenspannings kabelnet distribueert de energie naar de bekende transformatorhuisjes waar een omzetting naar 220 V plaatsvindt. Het laagspanningskabelnet brengt de verbinding met de verbruikers tot stand.

Dames en Heren,

Deze prozaïsche uiteenzetting is wellicht nodig om u zich te laten realiseren dat de elektrische energie die via de meterkast te uwer beschikking wordt gesteld, reeds een lange weg heeft afgelegd. Na één keer opwekking, meerdere keren transformeren en kilometers lijnen en kabels wordt het produkt vrijwel traagheidsloos geleverd. Om er gebruik van te maken hoeft u alleen maar een schakelaar te bedienen.

Indien u reeds over een computergestuurde huisinstallatie beschikt hoeft u slechts een instructie in te voeren zodat er voor u wordt geschakeld, want geschakeld moet er worden. Bij u

thuis, op de kantoren, bij de industrie, in de havens, bij de spoorwegen, is er slechts economische bedrijvigheid zolang er geschakeld wordt; anders wordt het akelig stil in Nederland. Dienstensector, agrarische producten, transportbedrijven voor Europa, toerisme en windmolens, niet alleen die van Leeghwater, maar ook die van de elektriciteitsbedrijven vormen het toekomstbeeld en moeten voor vervangende werkgelegenheid zorgen. Een saai land bevolkt door ongelukkige ingenieurs, luidde de titel van een recent artikel over de vergeten industrie in Nederland. Maar zelfs in zo'n land gaat de elektriciteitsvoorziening door en moeten deskundige ingenieurs met bekwaamheden in de elektrische energietechniek worden opgeleid.

Op weg van generator naar verbruiker is de stroom tientallen malen door diverse schakelaars gegaan. Hier wordt liefst zo weinig mogelijk geschakeld, vele schakelaars staan dan ook in ingeschakelde toestand, jarenlang. Alleen dan wordt er stroom gevoerd en energie geleverd. Een uitgeschakelde schakelaar doet eigenlijk niets, is redundant en wacht op het moment dat zijn diensten gevraagd worden. Dat kan lang duren.

Onze elektriciteitsvoorziening is zo goed dat er bijna nooit iets misgaat. Soms zijn er kortsluitingen door blikseminslag op een bovengrondse lijn, door bulldozers die kabels kapot trekken, echter zelden door falende com-

ponenten. In zulke gevallen wordt van een schakelaar verwacht dat deze alert en doeltreffend reageert, het beschadigde netgedeelte uitschakelt en de volgschade tot een minimum beperkt. Een dergelijke schakelaar wordt een vermogensschakelaar genoemd.

Dit in tegenstelling tot een lastschakelaar, die alleen een belastingsstroom kan onderbreken. Scheidingsschakelaars, die overigens geen noemenswaardig schakelvermogen bezitten en aardingsschakelaars completeren het geheel. Hiermee is het mogelijk niet in gebruik zijnde netgedeelten veilig te aarden voor inspectie en onderhoud.

Het samenstel van vermogensschakelaars, scheiders, aarders, railsystemen en meettransformatoren wordt een schakelinstallatie genoemd, waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen open en gesloten installaties voor binnen- of buitenopstelling. Het zou te ver voeren alle bijzonderheden te behandelen, zodat we ons in het hierna volgende beperken tot de vermogensschakelaars.

Het zal u inmiddels duidelijk zijn geworden dat het vakgebied van de schakeltechniek veelomvattend is en dat de betrouwbaarheid en eenduidigheid van de toestanden "in of uit" maatschappelijk relevant zijn. Is het dan nodig bij schakeltechniek een vraagteken te plaatsen? Het is mij opgevallen dat intreededes, in het bijzonder bij elektrotechniek, de laatste tijd

vaker van vraagtekens worden voorzien. Is dat om de toehoorder in een zekere twijfel te laten delen of hem aan het denken te zetten? Voelen we ons onbegrepen als een roepende in de woestijn of moeten we anderen over "in of uit" laten beslissen? Het is immers in om te doen wat de markt vraagt; als de markt niets vraagt, moeten we gewoon ophouden, maar dan is het meestal ook definitief uit. "Nederland moet technischer, maar hoe?" is het onderwerp van de themadag van de Universiteit Twente, vandaag 5 maart. Misschien wordt daar het antwoord gegeven en kunt u het vanavond in de krant lezen.

## Schakeltechniek

Intussen ga ik verder met het onderwerp schakeltechniek; een vakgebied dat een veelheid zichtbare maar nog veel meer onzichtbare techniek, kennis en kunde in zich heeft.

Laten we de stationaire toestanden "in of uit" verder voor wat ze zijn. De schakeltechniek komt pas tot leven in het tussengebied van "in naar uit" of van "uit naar in". Dit is het gebied van de dynamica, de schakelverschijnselen, de transiënten en de interacties met de omringende elektrische netwerkcomponenten, maar ook met de mechanica. De vermogensschakelaar is tenslotte een mechanisch aangedreven werktuig, bedoeld om een aantal contacten in een korte tijd te bewegen. Deze contacten moeten in gesloten

toestand de stroom zonder oververhitting kunnen voeren en in open toestand de optredende spanning kunnen verdragen zonder door te slaan.

In de elektrische netwerktheorie wordt graag gebruik gemaakt van abstracte elementen zoals de actieve tweepolen, de ideale spanningsbron en de stroombron. Er zijn ook passieve tweepolen zoals de ideale weerstand, de capaciteit en de zelfinductie. De passieve vierpolen, de ideale transformator en de gyrator vervolmaken het geheel. Met deze abstracte elementen kunnen stationaire verschijnselen van complex samengestelde circuits, bijvoorbeeld de loadflow of de kortsluitstroom in een distributienet berekend worden alsof de wetten van Maxwell niet bestaan.

Door aan deze reeks van zeven een achtste element toe te voegen kunnen ook transiënte verschijnselen worden berekend. Dit element is de ideale schakelaar, gekenmerkt door een weerstand nul in gesloten toestand, een weerstand oneindig in open toestand en de eigenschap om oneindig snel, dus in een tijd nul van de ene naar de andere toestand te gaan. Voor het bepalen van de nu optredende transiënte verschijnselen moeten differentiaalvergelijkingen worden opgelost, de operatorenrekening van Laplace/Heaviside toegepast of wat tegenwoordig eenvoudiger is, een computerprogramma worden aangeschaft.

Het zal nu wellicht duidelijk zijn geworden dat de vermogensschakelaar bijna een ideale schakelaar is met weerstand vrijwel nul, respectievelijk vrijwel oneindig; maar een tijd nul dat kan niet. De schakelaar is gebonden aan de traagheidswetten van Newton die maken dat een contactbeweging niet oneindig snel kan verlopen. De stroomvoerende lichtboog die tussen de zich met eindige snelheid openende contacten gevormd wordt, heeft echter zeer bijzondere eigenschappen die maken dat de overgang van geleidende naar niet-geleidende toestand zeer snel kan plaatsvinden.

## Historie

De oude Grieken onderscheidden reeds aarde, water, lucht en vuur, door Prometheus ontstolen aan de goden waarvoor hij als straf aan een rots werd gekluisterd. Wij spreken van de aggregatietoestanden vaste stof, vloeistof, gas en de vierde aggregatietoestand het plasma, heter dan het vuur van Prometheus. Plasma is een mengsel van moleculen en neutrale atomen, ionen en elektronen die stroomgeleiding mogelijk maken en des te beter naarmate de temperatuur hoger is. In 1813 ontdekte Davy de lichtboog door twee contacten die verbonden waren met een grote batterij van de Royal Society in Londen, van elkaar te verwijderen. Dit experiment leverde echter niet alleen een verblindende boog als lichtbron op maar ook een schakelaar. Door de contactaf-

stand verder te vergroten hield de stroom vanzelf op en was de lichtboog verdwenen.

De eerste elektriciteitsvoorzienings-systemen (Edison 1882 in New York en Smit 1886 in Kinderdijk) werkten met gelijkspanning. Er is weinig bekend over de toen gebruikte schakelaars. Alle aandacht was net als nu gericht op de opwekking, de distributie en de ontwikkeling van verbruikstoestellen. Het schakelen was veelal geen probleem door de betrekkelijk kleine vermogens. Voor het uitschakelen van kortsluitstromen werd gebruik gemaakt van smeltveiligheden die aanvankelijk in lucht en later in zand betrouwbaar bleken te werken.

Merkwaardig dat deze vorm van beveiliging tegen overbelasting en kortsluiting tot de dag van vandaag in de midden- en laagspannings distributie nog in grote aantallen wordt toegepast. Compact, goedkoop en betrouwbaar. Het gedrag van smeltveiligheden is nog steeds een van de onderzoekactiviteiten van onze vakgroep. Omstreeks 1900 was de strijd tussen gelijkspanning en wisselspanning ten gunste van de laatste beslist. De eerste wisselstroomschakelaars waren dan ook afgeleid van de gelijkstroomschakelaar en schakelden in lucht. Bij toename van de vermogens maar ook bij de hogere spanningen die nu konden worden toegepast, ontstonden problemen, die echter telkens weer inventief werden opgelost door constructieve maatregelen.

Men zou kunnen stellen dat de ontwikkeling van de schakeltechniek een voortdurende confrontatie is geweest tussen de creatieve mens en de weerbarstige materie om de wispelturige lichtboog te kunnen beheersen.

### **Luchtschakelaars**

Ook de moderne laagspanningsvermogensschakelaars schakelen nog steeds in atmosferische lucht, waarbij grote kortsluitstromen tot 200 kA beheerst kunnen worden. Bij het optimaliseren van de hiervoor benodigde bluskamers spelen nog steeds de ervaring en resultaten van proefnemingen een grote rol. Onze vakgroep is eveneens actief op het gebied van laagspanningsschakelaars en de bijbehorende beveiliging, niet alleen theoretisch maar ook experimenteel. Dit type schakelaar bouwt evenals de smelveiligheid een hoge boogspanning op die de netspanning moet overtreffen, zodat in meerdere of mindere mate kortsluitstroombegrenzing optreedt. Deze manier van stroomonderbreking is gekenmerkt door een grote energiedissipatie, bepaald door het produkt van de hoge boogspanning en de begrensde kortsluitstroom geïntegreerd over de lichtboogtijd. Dit maakt het principe minder geschikt voor toepassing bij hoge spanningen, hoewel later het verbeterde Deion-principe ook toegepast is voor middenspanningsschakelaars.

### **Olieschakelaars**

Schakeltechniek was en is nog vaak een empirisch vak. De onbekende experimentator moet aan het eind van zijn Latijn geweest zijn om te trachten boogblussing te verkrijgen met olie. Hij trok een wisselstroomboog onder olie en dit bleek veel beter te schakelen dan in lucht. Het schakelmedium was een waterstofbel gevormd door dissociatie van koolwaterstoffen. Wel bleek de olie door de overgebleven kooldeeltjes zwart te worden. Dit maakt dat de olie na een paar fikse kortsluitingen afgeschakeld te hebben, vernieuwd moet worden.

De hogere doorslagspanning van olie ten opzichte van lucht maakt een kleinere contactafstand mogelijk. De boogspanning is klein ten opzichte van de netspanning, zodat de onderbreking bij een stroomnuldoorgang plaatsvindt zodra de wederkerende spanning zonder herontsteking wordt verdragen.

De olieschakelaar, in onwaarschijnlijk veel uitvoeringsvormen, heeft het toneel van de schakeltechniek bijna een eeuw lang bepaald. Ook in Nederland is een essentiële bijdrage geleverd aan deze ontwikkeling door Hazemeijer sinds 1907 en door Coq sinds 1916. Zij ontwikkelden niet alleen schakelaars maar ook aanrakingsveilige schakelinstallaties met metaalomhulling waarvoor massa of olie en later kunststoffen als isolatiemedium worden toegepast. De zogenaamde



bulk-oil-types uit de beginjaren werden opgevolgd door minimum-oil-types sinds de jaren vijftig. Voor de hogere spanningen is de olieschakelaar door buitenlandse fabrikanten succesvol verder ontwikkeld.

Men moet zich realiseren dat in Nederland vele duizenden olieschakelaars in industrie- en distributienetten staan opgesteld waarvan vele met minimaal onderhoud nog in bedrijf zullen kunnen blijven tot na het jaar 2000. Sommige elektriciteitsbedrijven en industrieën willen om reden van uitgestelde investeringspolitiek oud schakelmateriaal nog in bedrijf houden en zouden graag een wetenschappelijk verantwoorde uitspraak over de te verwachten restlevensduur hebben. Anderen verkiezen tijdige vervanging door modern materieel zodra de onderhoudskosten te hoog worden, de onderhoudsstaf die ermee om kon gaan met VUT is vertrokken of reserve-onderdelen niet meer beschikbaar zijn. De vakgroep is gaarne bereid bedrijven die hier problemen verwachten met raad en daad bij te staan.

### **Persluchtschakelaars**

Door problemen met exploderende olieschakelaars in de jaren dertig maakten de persluchtschakelaars een sterke ontwikkeling door die tot in de jaren tachtig zou voortduren. Door de lichtboog in een straalbuis met een hoge-druk-luchtstroom te beblazen werd een intensieve koeling verkre-

gen met een snel diëlektrisch herstel na de stroomnuldoorgang. De persluchtschakelaars zijn heel betrouwbaar maar ook berucht om het lawaai van de expanderende lucht, die vanuit een voorraadvat van 15 bar in de lichtboogzone en vervolgens naar buiten werd geblazen.

De grootste types in Nederland, toegepast in het 380 kV net, hebben zes onderbrekingselementen per fase. In Canada zijn persluchtschakelaars toegepast voor 765 kV met acht elementen en in Rusland voor 1100 kV zelfs met twaalf elementen per fase. Bij toepassing voor zeer lage omgevingstemperaturen kan perslucht ook vandaag nog van voordeel zijn. Een belangrijke toepassing is nog steeds het onderbreken van zeer grote stromen boven 100 kA als generator schakelaar in centrales en kortsluitlaboratoria. Hierbij wordt druklucht tot 80 bar gebruikt.

Dergelijke schakelaars worden ook gebruikt in het spoelcircuit van de Joint European Torus, het fusie-experiment van de Europese Gemeenschap in Culham, zoals we tijdens de zeer geslaagde Engeland-excursie van het draaistroom dispuut Waldur hebben kunnen zien.

### **Vacuumschakelaars**

De goede diëlektrische eigenschappen van vacuum waren al bekend door de ontwikkeling van röntgen-

buizen sinds het begin van deze eeuw. Omstreeks 1930 werden in Californië experimenten uitgevoerd met bewegende contacten in een glazen vacuümvat, waarbij 15 kV en 100 A werd onderbroken. Sinds de tweede wereldoorlog zijn vacuümschakelaars gebruikt voor het schakelen van zenderantennes.

Aangezien de kennis van de vacuümtechniek voornamelijk ontwikkeld werd door fabrikanten van elektronenbuizen heeft reeds in 1957 overleg met Philips plaatsgehad over de aanmaak van experimentele vacuümschakelbuizen. Men vond het echter een activiteit die te ver verwijderd was van hun produktprogramma.

Intussen had Reece bij de Electrical Research Association in Engeland bemoedigende resultaten geboekt en de typische ontladingsvormen van de diffuse vacuümboog bestudeerd. Het bleek dat bijzonder zuiver gasarm contactmateriaal toegepast moet worden om te voorkomen dat de vacuümboog overgaat in een hoge druk boog zonder noemenswaardig onderbrekingsvermogen.

Aan de Technische Hogeschool in Eindhoven was in 1967 de Vakgroep Hoge Stroom en Hoge Spanningen op initiatief van professor Ter Horst begonnen met een onderzoekprogramma aan gepompte demontabele vacuümpopstellingen. De ontwikkeling werd later bij Hazemeijer, inmiddels Holec, voortgezet en leidde in 1973 tot

de eerste proefproductie van vacuümbuizen met een restgasabsorptie door een ingebouwd getter voor het in stand houden van het vacuüm op lange termijn. Door ingenieurs van deze Technische Universiteit is aan deze ontwikkeling een wezenlijke bijdrage geleverd.

Het stroomtransport in een vacuümboog vindt plaats door een groot aantal kathodevoetpunten, die elk circa 100 A voeren. De kathode voetpunten worden voortdurend gevormd en verdwijnen ook weer. In de vakgroep is destijds veel onderzoek verricht aan deze fenomenen. Zeer merkwaardig is dat de parallelle stroombanen elkaar niet aantrekken, zoals uit de Lorentzkracht zou volgen, maar elkaar schijnen af te stoten. Boven een zekere kritische stroom van circa 7000 A treedt echter een contractie op waarbij de boogspanning plotseling stijgt van ongeveer 20 V tot 200 V. Bij nog grotere stroom is de grens van het afschakelvermogen spoedig bereikt doordat de metaaldampvorming sterk toeneemt en een hoge-drukboogtype ontstaat. Door boogrotatie met een radiaal magneetveld of stabilisatie met een axiaal veld kan deze bovengrens van de afschakelstroom worden opgevoerd. Vooral de laatste methode is zeer effectief gebleken voor heel grote onderbrekingsvermogens. In Japan worden bijvoorbeeld vacuümschakelaars vervaardigd voor 14 kV bij 100 kA en toegepast in de eigenbedrijf installaties van elektrische centrales. De productie van vacuümschakelbuizen

in Japan, Amerika, Engeland en Duitsland loopt in de honderdduizenden. Het Nederlandse aandeel hierin is ondanks de inventieve start 20 jaar geleden te gering gebleven.

Pogingen om vacuumschakelaars ook voor hogere spanningen te ontwikkelen waren technisch en vooral economisch minder succesvol, zodat de toepassing optimaal is voor spanningen tot 36 kV. Een voordeel van de vacuumschakelaar is de korte contactbeweging, waardoor compacte mechanische aandrijvingen kunnen worden toegepast met een lange levensduur.

### **SF<sub>6</sub>-schakelaars**

Het chemisch inerte gas zwavelhexafluoride heeft een molecuul bestaande uit een zwavelatoom omringd door zes fluoratomen. Door de ontwikkeling van de fluorchemie, ondermeer voor de produktie van uraanhexafluoride, kan SF<sub>6</sub> tegenwoordig in grote hoeveelheden gefabriceerd worden. De doorslagspanning is ongeveer driemaal zo hoog als lucht, zodat het als isolatiegas goed bruikbaar is in gasgeïsoleerde schakelinstallaties en transformatoren.

Ook als schakelmedium heeft SF<sub>6</sub> veel betere eigenschappen dan lucht door de betrekkelijk lage dissociatie en ionisatietemperaturen, de snelle recombinatie, de goede warmtegeleiding en het vermogen elektronen te

binden door negatieve ionen te vormen. De eerste SF<sub>6</sub>-schakelaars waren afgeleid van de bekende persluchtschakelaars, het tweedruksysteem met een voorraadvat voor gecompriëerde SF<sub>6</sub> en een opvangvat waarin het gas na de lichtboog beblazen te hebben werd opgevangen.

In het eerste geheel gesloten 420 kV station Maasvlakte is dit principe gebruikt, waarbij slechts drie onderbrekingselementen per fase worden toegepast. Voor die tijd (1974) een grote prestatie van de Nederlandse industrie. Toch was een dergelijk systeem erg complex en al snel ontwikkelde men het eendruksprincipe, de pufferschakelaar. Hierbij werd de benodigde druk eerst tijdens de contactbeweging opgebouwd door een compressiezuiger. De extra arbeid die deze compressie vraagt, moet echter wel door de mechanische aandrijving worden geleverd. Hiervoor moesten krachtige hydraulische aandrijvingen worden ontwikkeld.

De toepassing van de SF<sub>6</sub> schakelaar breidde zich uit naar hogere spanningen, maar ook naar de middenspanning. Hier was echter de zware aandrijving een groot bezwaar zodat gezocht werd naar andere oplossingen. Onderzoek aan roterende bogen in een magnetisch veld in het begin van de jaren zeventig gaf aan dat hier mogelijkheden lagen. Voor middenspanning heeft dit geleid tot diverse succesvolle produktontwikkelingen bij buitenlandse fabrikanten. Een

poging om het roterende boogprincipe ook voor hoogspanning te gebruiken was echter te hoog gegrepen.

Het werd langzamerhand duidelijk dat de drukopbouw door de boogenergie zelf in belangrijke mate de gasstroming beïnvloedde. Te beginnen bij middenspanning werd dit meer en meer toegepast in de vorm van zelfblaasschakelaars die een aanzienlijk geringere aandrijfenergie nodig hebben. Zodoende konden pneumatische en motorveermechanismen weer een kans krijgen. Deze ontwikkeling heeft zich zodanig versneld dat ook bij schakelaars voor de hogere spanningen door optimalisatie van de verschillende volumina rondom de eigenlijke straalbuis zekere vormen van zelfbeblazing worden toegepast. Deze ontwikkeling bij de grote fabrikanten wordt meer en meer ondersteund door computerberekeningen van de gasstroming en de drukopbouw waarbij gebruik wordt gemaakt van meerdimensionale rekenmethoden uit de aerodynamika, de gasturbines en de rakettechniek.

Voorlopig lijken er nog geen grenzen gesteld aan de ontwikkelingsmogelijkheden van de SF<sub>6</sub>-schakelaar ook voor zeer hoge spanningen. Momenteel worden in Japan SF<sub>6</sub>-schakelaars ontwikkeld voor 1200 kV met slechts twee of drie onderbrekingselementen. Dit betekent dat 420 kV-schakelaars binnen afzienbare tijd slechts één onderbrekingselement per fase kunnen hebben.

## Lichtboogmodellering

Uit deze bloemlezing van schakelmedia, vormen en uitvoeringen zou geconcludeerd kunnen worden dat schakeltechniek alleen maar een gebied van empirie, uitvinden, ontwerpen en evolutie is, met vallen en opstaan. Voor een belangrijk deel is dat nog steeds zo.

De modelvorming en de ontwerpformules die kort na het begin reeds hun toepassing vonden bij de constructie van generatoren en transformatoren, ontbreken in de schakeltechniek.

Een basisformule die, afgeleid van de inductiewet, het vermogen van een transformator of generator aangeeft als produkt van frequentie, toerental, magnetische inductie, actief ijzeroppervlak, stroomdichtheid en actief wikkeliingsoppervlak, toont aan dat dit vermogen met de vierde macht van de lineaire afmetingen toeneemt. Het gewicht neemt met de derde macht toe, zodat een grotere transformator of generator relatief lichter uitvalt.

Ook in de schakeltechniek is al vroeg getracht tot een zekere modelvorming te komen. Omstreeks 1900 bepaalde mrs. Ayrton de statische karakteristieken van diverse lichtbogen en vond de afnemende boogspanning bij toeneemende stroom.

Vele fysici kwamen in de ban van de lichtboog en trachtten het waargenomen gedrag te herleiden tot voorspel-

bare en berekenbare grootheden, zoals Cassie in Engeland (1938) en Mayr in Duitsland (1943). Deze modellen zijn gebaseerd op fysische begrippen als convectie en conductie om de warmte-afgifte van de boog naar de omgeving in rekening te brengen. Dit leidde tot eerste-orde-differentiaalvergelijkingen voor de boogweerstand met boogspanning, vermogen en een tijdconstante als karakteristieke parameters.

Deze tijdconstante is een grootheid die aangeeft in welke tijd de boog zijn geleidbaarheid verliest. Hiermee werd het dynamische karakter van de boog tot uitdrukking gebracht en konden booginstabiliteiten bij een parallel geschakelde capaciteit worden verklaard.

Het oplossen van de interactie van lichtboog en circuitvergelijkingen om de afschakelgrens vast te stellen gaf nogal problemen. Aanvankelijk werden door Mayr mechanische en analoge computers gebruikt.

Op de CIGRE (Congres Internationale des Grands Reseaux Electriques) in Parijs werd in 1960 het initiatief genomen door een aantal leden van het studiec comité nr. 3 Schakelmaterieel tot het oprichten van de Current Zero Club. De eerste vergadering vond plaats bij KEMA. Hiermee was een intensief contact op wetenschappelijk niveau tussen experts van verschillende, zelfs concurrerende, bedrijven mogelijk geworden. Begrippen als

thermische en diëlektrische herontsteking, stroomvervorming bij de nuldoorgang, current chopping, na-stroom, transiënte wederkerende spanning en korte-lijnfouten begonnen bredere bekendheid te krijgen. Alleen de lichtboog bleef voor verrassingen zorgen, zoals tijdconstanten die niet constant zijn en onvoorspelbaar gedrag in het diëlektrische regime. Met de toepassing van SF<sub>6</sub> werd het beeld dat bij perslucht weliswaar niet geheel begrepen maar toch redelijk consistent was, wederom aan het wankelen gebracht, om over vacuum maar helemaal niet te spreken.

Getracht werd de oorspronkelijke vergelijkingen van Cassie en Mayr zo te modificeren dat een aanpassing aan de waarnemingen mogelijk werd, de zogenaamde fenomenologische modellen.

Door CIGRE werd een werkgroep 13.01 opgericht om de grenzen en toepassingen van deze modellen te rubriceren. Dit werk wordt binnenkort afgerond. Deze fenomenologische modellen zijn vooral geschikt om beproevingscircuits en netwerkcombinaties met elkaar te vergelijken. Het is echter geen ontwerpgeredenschap voor de schakelaarfabrikant. In verschillende researchlaboratoria is getracht de boogverschijnselen, de warmte-overdracht, de massastroming en de energiebalans numeriek op te lossen met behulp van eindige elementen. Dit leidde aanvankelijk tot onwaarschijnlijk lange rekentijden.

Door toepassing van snelle parallel-computers is er mogelijk een uitweg uit deze impasse. Blijft echter het probleem dat de  $SF_6$ -reacties in en rondom de lichtboog met een snelle dissociatie en recombinitie op een tijdschaal van microseconden tot milliseconden niet bekend zijn. Ook de ablatie van het straalbuismateriaal, meestal een soort Teflon, onder invloed van de sterke UV-straling is moeilijk te modelleren evenals het elektrodynamische gedrag van de hoge-stroomboog.

Toch worden temperatuur, druk en stromingsprofielen tweedimensionaal berekend door gebruik te maken van stromingsmodellen uit andere vakdisciplines. De boog wordt dan voorgesteld als een warmtebron met bekende energie-input. Deze technieken worden door verschillende grote fabrikanten toegepast, waarbij ook de interactie op de mechanische aandrijving wordt gesimuleerd. Door de toenemende concurrentie is echter de openheid die de oprichters van de Current Zero Club voor ogen stond, geringer geworden. Een wetenschappelijke discussie en verificatie van elkaars resultaten is dan ook vrijwel uitgesloten. De rol die een universiteit hierin kan spelen is gering, tenzij in de vorm van langlopende contractresearch met een industrie die bereid is hier veel tijd en mankracht aan te besteden. De ervaring die in de vakgroep op het gebied van magnetohydrodynamica is opgebouwd kan hier wellicht een toepassing vinden.

## Beproevingstechnieken

Bij een experimenteel vak als schakeltechniek heeft het experiment en de beproeving altijd een beslissende rol gespeeld. Om de betrouwbaarheid van de "in"- en de "uit"-stand te verifiëren zijn betrekkelijk geringe vermogens nodig. Hoge stroombronnen bij een lage spanning respectievelijk hoge spanningsbronnen bij een lage stroom zijn in vele laboratoria beschikbaar. Om echter het afschakelvermogen te beproeven moeten hoge stromen en hoge spanningen geleverd worden. Het openbaar elektriciteitsnet is hiervoor echter minder geschikt, zodat reeds voor de eerste wereldoorlog in het buitenland kortsluitlaboratoria met netonafhankelijke generatoren werden gebouwd. Bij KEMA kwam de eerste generator van 500 MVA in 1937 in bedrijf. Ook toen reeds bemoeide de politiek zich met de zaak. De diplomatie van professor Van Staveren wist te voorkomen dat het kortsluitlaboratorium bij de Technische Hogeschool in Delft kwam. Door de vele studenten kon de geheimhouding niet worden gegarandeerd, terwijl de sterke magnetische velden andere laboratoria met gevoelige meetinstrumenten zouden kunnen storen!

Na de oorlog waren herstel en uitbreidingen noodzakelijk. De aandeelhouders van KEMA waren de mening toegedaan dat de grootste vermogensschakelaars in het eigen laboratorium beproefd moesten kunnen

worden. In 1950 was 1500 MVA en in 1962 4500 MVA geïnstalleerd. Een nieuw complex, het De Zoeten Laboratorium 4, werd in 1973 in bedrijf gesteld met 8800 MVA, verdeeld over vier generatoren en acht transformatoren (kosten 50 miljoen gulden), en een uitbreidingsmogelijkheid tot 17000 MVA. Zover zou het echter niet komen. De onverwacht snelle ontwikkeling van de SF<sub>6</sub>-schakelaars maakte dat andere wegen moesten worden ingeslagen.

In plaats van de directe beproeving moest de indirecte beproevingstechniek verder worden ontwikkeld. De indirecte of synthetische beproeving gebruikt aparte bronnen om de stroom en de wederkerende spanning te leveren. Het idee dateert al van voor de oorlog maar Weil-Dopke en Slamecka wisten na 1945 bruikbare stroom- en spanningsinjectie-circuits te ontwikkelen die in de laboratoria van fabrikanten voor ontwikkelingsproeven werden gebruikt. Typeproeven werden echter in directe beproevingscircuits uitgevoerd, ook al vanwege de door de IEC gevraagde O-C-O schakelcycli voor snelle wederinschakeling. Later werden vergelijkende proeven uitgevoerd aan de equivalentie om directe en synthetische beproevingen te verifiëren.

De synthetische installatie bij KEMA kwam in bedrijf in 1979 en maakt proeven tot 420 kV 80 kA mogelijk. Dit is 30.000 MVA door een extra investering van slechts 7 miljoen gulden.

Maar voor de laatste ontwikkelingen van 800- en 1200 kV-schakelaars is ook het synthetische circuit met stroominjectie niet meer toereikend. Hiervoor moeten drietraps circuits worden toegepast met gecombineerde stroom- en spanningsinjectie. Ook hier lopen fabrikanten voorop met installaties voor ontwikkelingsproeven. Het is echter de vraag of een onafhankelijk kortsluitlaboratorium de investeringen voor zo'n uitbreiding (circa 5 miljoen gulden) zal kunnen financieren gezien het geringe gebruik door een kleine klantenkring. Misschien vindt men het na 2000 weer gewoon om schakelaars in supra-nationale elektriciteitsvoorzieningssystemen te gebruiken die niet kunnen worden beproefd; zoals honderd jaar geleden ook het geval was.

Een vermogensschakelaar moet ook in staat zijn stromen te onderbreken tot 10 % van de nominale kortsluitstroom. Daaronder ligt het gebied van de kleine inductieve en capacatieve stromen. Elektriciteitsbedrijven schakelen tegenwoordig dagelijks smoorpoelen en condensatoren in verband met de spanningsregulatie en de blindstroomcompensatie. Door professor Van den Heuvel is er een intensieve samenwerking geweest met CIGRE WG 13.02 over het schakelen van kleine inductieve stromen. Hierover zijn vele publikaties verschenen.

Momenteel is het schakelen van capacatieve stromen een activiteit van CIGRE WG 13.04. Het gebied van de

kleine stromen is bij uitstek geschikt gebleken voor theoretische en experimentele studies. Daarmee wordt een lijn doorgetrokken van onderzoek in de vakgroep naar boogstabiliteit, stroombreking, meervoudige herontstekingen en diëlektrisch herstel, zowel in vacuüm als in andere media. Deze onderwerpen leveren interessante afstudeerprojecten op.

## **Instrumentatie**

Waarom in een voordracht over schakeltechniek gesproken over instrumentatie? De reden is dat de schakeltechniek en in het bijzonder de voor de ontwikkeling en beproeving benodigde kortsluitlaboratoria door de jaren heen een essentiële bijdrage hebben geleverd aan de innovatie van meettechnieken. De statische metingen met behulp van wijzerinstrumenten voor spanning-, stroom- en vermogensmeting zoals gebruikelijk in proefvelden voor transformatoren en machines zijn in een kortsluitlaboratorium, waar de proeven veelal in fracties van seconden aflopen, van geen betekenis.

Voor dynamische metingen moesten oscillogrammen worden opgenomen, aanvankelijk met zelfontworpen spiegelgalvanometers, later met kathodestraalbuizen. Door het grote aantal verschijnselen dat gelijktijdig moet worden geregistreerd zijn meerkanaalsystemen nodig. Een film, bevestigd op een sneldraaiende trommel,

vormde de tijdbasis. De film werd naderhand nat ontwikkeld in een donkere kamer. Deze techniek is nog tot ver in de jaren zeventig in gebruik geweest.

Duddel in Engeland, Baron in Frankrijk, Dekker bij KEMA en Griesen bij Hazemeijer hebben hun kortsluitlaboratoria open gegeven zonder welke de snelle verschijnselen die optreden bij het schakelproces niet zouden kunnen worden waargenomen. Men kan zelfs stellen dat de kwaliteit van een kortsluitlaboratorium nog meer door zijn instrumentatie dan door zijn vermogen wordt bepaald. Uiteraard spelen hierbij de medewerkers die de moeilijke metingen goed kunnen uitvoeren en interpreteren een beslissende rol.

Zelf heb ik de instrumentatie altijd een warm hart toegedragen. Dit is niet vreemd wanneer men bedenkt dat ik afstudeerde in Delft bij de leerstoel Meet- en Hoogspanningstechniek van professor Heijn. Enige jaren student-assistentie maakten dat de studie weliswaar langer duurde dan de nominale 4,5 jaar voor elektrotechniek, maar leverden een schat aan praktische ervaring op. Men zou dit tegenwoordig een ontwerpersopleiding noemen.

In de periode bij Hazemeijer Research (later Holec) in Hengelo ontstond het idee verbeterde registratiemethoden voor het kortsluitlaboratorium te ontwikkelen. Hoewel aanvankelijk nog gedacht werd aan



elektro-mechanische oplossingen, bracht een suggestie van professor Bosman van de vakgroep Instrumentatie van de Universiteit Twente ons op het idee digitale opslag te overwegen.

Na mijn overgang naar KEMA in 1974 werd een prototype aldaar gerealiseerd. Dit resulteerde in de ontwikkeling van een serie zeskanaals transiëntrecorders, welke nog steeds in gebruik zijn. Recentelijk zijn een zeskanaals 50 MHz 10 Bit systeem en een snelcamera voor 1 miljoen beelden per seconde ontwikkeld met lichtgeleider data-overdracht tussen beproevingsobject en meetruimte voor verificatiemetingen en onderzoek aan schakellichtbogen. Hiermee kunnen storingen ten gevolge van snelle transiënten in de beproevingshal worden voorkomen. Dergelijke meetsystemen zijn niet verkrijgbaar omdat er geen markt voor is.

Ik ben wat dieper op deze zaak ingegaan, omdat ook aan de TU Eindhoven een samenwerking met vakgroepen die een elektronische, optische en instrumentele achtergrond hebben tot de mogelijkheden behoort die wellicht stage- en afstudeerprojecten kunnen opleveren.

### **Toekomst van de schakeltechniek**

De toestand van de schakeltechniek lijkt tamelijk geconsolideerd. De perslucht- en olieschakelaars worden niet

meer ontwikkeld, en in mindere mate gefabriceerd.

Voor nieuwe installaties is het vacuüm voor middenspanningen tot 36 kV en SF<sub>6</sub> vanaf midden-, hoogspanning tot ultrahogspanning favoriet. De isolatiesystemen zijn voor de middenspanning lucht, kunststof of SF<sub>6</sub>. Voor de hogere spanningen is het SF<sub>6</sub> in porcelein omhulsel voor buitenopstelling of in metaal omhulsel bij de zogenaamde gasgeïsoleerde systemen (GIS).

Een dikwijls gestelde vraag is: waarom worden deze mechanisch werkende schakelaars niet door elektronische elementen vervangen? Temeer daar de vermogenslektronika en de HVDC conversie tot zulke grote prestaties in staat blijken te zijn. Hierbij valt te denken aan de Cross Channel tussen Frankrijk en Engeland van 2000 MW over 40 km, de Fenoskan tussen Finland en Zweden van 500 MW over 250 km en de door de Sep geplande verbinding van Noorwegen en Nederland met 500 MW over 500 km.

Een nadere analyse leert echter dat toepassing van dergelijke technieken voor transmissieschakelaars tot wanstaltige afmetingen, hoge kosten en een geringere bedrijfszekerheid leidt. Eerder zal de schakeltechniek de HVDC te hulp komen met hoogspanningsgelijkstroomschakelaars voor multiterminal systemen.

Voor lagere gelijkspanningen van 600-3000 V behoort een zogenaamde hybride schakelaar met halfgeleider-elementen en vacuumschakelaar tot de reële mogelijkheden. Aansluitend aan reeds eerder uitgevoerd onderzoek overweegt de vakgroep een project in deze richting te initiëren, waarbij samenwerking met industrie en gebruikers noodzakelijk is. Ook liggen er aanrakingspunten met elektro-mechanica en vermogenselektronika.

Een andere optie is de toepassing van supergeleiders die zoals bekend onder de kritische temperatuur een verwaarloosbare weerstand hebben. Bij de lage-temperatuur- supergeleiders ligt die bij enkele graden boven het absolute nulpunt. Het ligt voor de hand deze overgang als schakelement te benutten. Zodra de stroom een kritieke waarde overschrijdt, houdt de supergeleiding op en wordt het metaal normaal geleidend. Hiermee is in principe een stroombegrenzing te bereiken. De reststroom moet echter wel tijdig door een hulpschakelaar worden onderbroken om oververhitting tegen te gaan.

Volgens dit principe worden in Frankrijk en Japan onderzoeken uitgevoerd om tot een stroombegrenzende middenspanningsschakelaar te komen. De afmetingen van de benodigde cryostaten en koelmachines zijn echter aanzienlijk, terwijl opschaling naar hogere spanningen min of meer lineair met de draadlengte zal verlopen. Ook uit een CIGRE-studie blijkt

dat uit deze hoek voorlopig geen grote concurrentie te verwachten is.

Zo blijft voorlopig de schakellichtboog, het beheerste plasma, op eenzame hoogte als de enige mogelijkheid compacte, goedkope en betrouwbare vermogensschakelaars te maken. Wel zal het mechanische ontwerp in de toekomst nog meer aandacht moeten krijgen. Uit CIGRE-enquetes in 1980 en 1990 is gebleken dat de meeste fouten tijdens bedrijf een mechanische oorzaak hebben. Het is nog niet bewezen dat de toepassing van diagnostische of permanente monitoring van schakelfuncties een wezenlijke verbetering zal geven. Wel moet rekening worden gehouden met een toenemende integratie van elektronische systemen in en bij de schakelinstallaties. Ook de mogelijkheid synchroon in of uit te schakelen behoort tot de mogelijkheden. Hiermee kunnen transiënten bij het schakelen van transformatoren, reactoren, condensatorbanken en lange lijnen worden verminderd.

## Epiloog

Het is merkwaardig te moeten constateren dat de schakelaar die in het geheel van de elektriciteitsvoorziening een bescheiden dienende rol speelt, geen energie opwekt, transporteert of verbruikt, voor zijn ontwikkeling en kwaliteitshandhaving zeer kostbare beproevingsfaciliteiten nodig heeft, die niet alleen door de industrieën

bekostigd en rendabel bedreven kunnen worden.

Om over dergelijke faciliteiten te kunnen beschikken is een visie nodig die uitstijgt boven een economisch rekensommetje: wat kost het en wat verdient je eraan? Onze voorgangers hebben blijkbaar van een voldoende mate van visie getuigd, anders zouden we nu niet die faciliteiten hebben zowel bij TU, KEMA als de weinige overgebleven industriële laboratoria. Het is zaak de handen ineen te slaan en niet dit erfdeel te laten verkommeren door korte- termijndenken en het najagen van winst-utopiën.

Dames en heren studenten,

Gelukkig kan ik ook zeggen *dames* en ligt de tijd dat alleen heren elektrotechniek gingen studeren achter ons. De laatste promotie bij professor Van den Heuvel leverde zelfs een vrouwelijke doctor in de technische wetenschappen op. Zonder studenten kan een Universiteit niet bestaan. Onderzoek is weliswaar een hoog en verheven doel, onderwijs is en blijft een hoofdtaak die veel inspanning van hoogleraren en staf vraagt. Nu blijkt de belangstelling voor technische studies bij de aankomende generatie gering te zijn. Elektrotechniek, niet alleen de Energietechniek, maar ook de

Telecommunicatie en Informatika zitten niet meer in de lift.

Verontrusten zoals de president van het KlvI, rectores magnifici en bestuurders van de Technische Universiteiten hijsen de noodvlag en waarschuwen dat Nederland afglijdt door een aversie tegen de techniek; en dat in een verenigd Europa waar de grenzen juist zijn open gegaan. Als verklaring wordt vaak genoemd dat Nederland altijd meer een land van kooplieden dan van technici is geweest. Er zijn echter voorbeelden genoeg waar geen antithese tussen deze verschillende belevingswerelden doch een synthese de basis vormde voor gezonde industrieën met goedlopende produkten.

Er is ook een andere sociaal-psychologische verklaring gegeven door een vrouwelijke collega uit Amsterdam. De technische faculteiten hebben deze teruggang aan zichzelf te danken. Men maakt het de studenten veel te moeilijk, zij kiezen liever voor managerfuncties met goede carrièremogelijkheden waarbij het moeilijke denkwerk graag aan techneuten wordt overgelaten, aannemende dat die er wel zullen zijn.

In veel bedrijven ziet men ook dat de feitelijke techniek zich meer en meer afspeelt op HTO-, MTO- of LTO-niveau. Is er in een dergelijke industriële ambiance nog plaats voor creatieve ingenieurs aan wie de ruimte wordt gegeven innovatief bezig te zijn?

Ik spreek de hoop uit dat velen de mogelijkheden van het vak schakeltechniek zullen benutten, om hun kwaliteiten als elektrotechnisch ingenieur een extra dimensie te geven. Het is nog niet te laat om deskundigheid, creativiteit en ondernemerschap op het gebied van de schakeltechniek voor Nederland te behouden. Wellicht dat een mogelijke opvolger omstreeks de eeuwwisseling een intreedende zal houden waarbij de vraagtekens door uitroepetekens zijn vervangen.

## **Besluit**

Tot slot wil ik gaarne nog enige dankwoorden uitspreken.

De leden van het College van Bestuur van deze Universiteit dank ik voor deze benoeming en voor het in mij gestelde vertrouwen. De faculteit Elektrotechniek, in het bijzonder de dekaan professor Leo Rietjens, dank ik om hun voordracht voor deze functie. De collegae hoogleraren van de faculteit en de medewerkers van de vakgroep wil ik danken voor het jaar van wederzijdse stimulering en interessante discussies dat achter ons ligt. Er is nog een boeiende weg te gaan door de tuinen van de schakeltechniek.

De directie van KEMA, in het bijzonder Jan Blom, ben ik zeer erkentelijk voor de mogelijkheid die geboden wordt deze functie in deeltijd te verrichten, naast ons onderzoekwerk in Arnhem. Hiermee is de mogelijkheid tot een nuttige samenwerking gelegd.

De contacten met de collegae van de technische universiteiten van Delft, Twente en Aken stellen wij zeer op prijs. Het verheugt ons professor Möller te begroeten en hem te danken voor de samenwerking in CIGRE en Current Zero Club.

Mijn dank gaat ook uit naar staf en medewerkers van het De Zoeten Laboratorium en het Hoogspanningslaboratorium van KEMA voor de jarenlange vruchtbare samenwerking. In het bijzonder de medewerkers van de afdeling onderzoek van het De Zoeten Laboratorium, die met mij de vele ups en downs, inherent aan onderzoekwerk in het moeilijke gebied van de schakeltechniek hebben doorgemaakt, ben ik uitermate dankbaar voor hun inzet, volharding en toewijding.

Ook de ondersteuning vanuit de Centrale Werkplaats en Instrumentatiedienst is altijd optimaal geweest, waardoor vele geesteskinderen tot leven kwamen en unieke experimentele faciliteiten konden worden opgebouwd. Deze vormen met de voortreffelijke uitrusting van de vakgroep een mogelijkheid tot opleiding in experimentele vaardigheden voor afstudeerende ingenieurs, ontwerpers in opleiding en promovendi.

Geachte aanwezigen, mijn oprechte dank voor uw geduld om bijna een uur te luisteren naar een voordracht over verschijnselen die zich in een fractie van een seconde afspelen en zonder welke een betrouwbare elektriciteitsvoorziening niet mogelijk is.

Vormgeving en druk:  
Reproductie en Fotografie van de CTD  
Technische Universiteit Eindhoven

Informatie:  
Academische en Protocolaire Zaken  
Telefoon (040-47)2250/4676



Geert Christiaan Damstra werd in 1930 te Enschede geboren. Na het behalen van het HBS diploma in 1948 begon de studie voor elektrotechnisch ingenieur aan de Technische Hogeschool in Delft, waar hij in 1955 cum laude afstudeerde bij professor Heyn. De militaire dienst werd vervuld als officier bij de Verbindingsdienst, waarna hij in 1957 in dienst trad bij Hazemeyer te Hengelo. De volgende jaren gaf hij leiding aan het research laboratorium, de ontwikkelingslaboratoria en de keuringsafdelingen. In 1974 werd hij hoofd van het onderzoek van het de Zoeten Laboratorium van de N.V. KEMA te Arnhem. Hij heeft in 1980 de Siemensprijs ontvangen. Hij is sinds 1960 actief in Cigré op het gebied van schakelmateriaal, speciaal reporter en lid van verschillende werkgroepen, daarnaast voorzitter van de Current Zero Club.

De benoeming tot deeltijdhoogleraar bij de Technische Universiteit Eindhoven voor het vakgebied Schakeltechniek volgde in 1991.