

ELEKTRONISCHE VERMOGENCONTROLE

1. SCHAKELAARS EN CONVERTOREN

Jean Pollefliet

*“Theorie is alleen te rechtvaardigen als ’n vorm van praktijk.
De praktijk staat niet terecht voor ’t hooggerechtshof van de theorie.”*

Stephen Toulmin, wetenschapsfilosoof



ACADEMIA
PRESS

Uitgeverij Academia Press
Ampla House
Coupure Rechts 88
9000 Gent
België

www.academiapress.be

Uitgeverij Academia Press maakt deel uit van Lannoo Uitgeverij,
de boeken- en multimediativisie van Uitgeverij Lannoo nv.

ISBN 978 94 014 5752 1
D/2018/45/572
NUR 123

Jean Pollefliet
Elektronische vermogencontrole. Volume 1: Schakelaars en convertoren
Gent, Academia Press, 2018, 540 blz.

Eerste druk, 1986
Negende druk, 2018

Vormgeving cover: Jean Pollefliet (uitvoering: Keppie & Keppie)
Vormgeving binnenwerk: Nevelland Graphics en Keppie & Keppie

© De auteur

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever en de auteur.

Aan mijn vrouw Gilberte

WOORD VOORAF

Dit boek verscheen voor het eerst in 1986 om na 32 jaar een negende editie te bereiken.

Elke editie was een continu updaten, herschikken en toevoegen van items en hoofdstukken. Tegelijkertijd houden we blijvende aandacht voor het didactisch aspect. Dit aspect is niet enkel belangrijk voor studenten maar zeker ook voor die grote groep van geïnteresseerden die het boek gebruiken als zelfstudiemateriaal.

Nieuw in deze negende druk is onder meer het ontwerpen van geschakelde voedingen (hoofdstuk 13bis). Aan deze uitgave werd ook nog een viertalige woordenlijst toegevoegd met meer dan 600 technische termen uit de vermogenelektronica.

We behouden ook in deze uitgave het systeem van de witte en groene bladzijden. De groene bladzijden bevatten de wiskundige afleidingen die in een eerste benadering niet nodig zijn om de elektronische technieken te bestuderen. Met stijgend niveau en specialisatie heeft de lezer de mogelijkheid een aantal van de groene bladzijden in te schakelen en dit zonder de continuïteit van de studie te verstoren.

Om nog wat cijfermateriaal te geven, er zijn meer dan zevenhonderd figuren, een honderdtal foto's en meer dan vijftig opgeloste cijfervoorbeelden te vinden in het ganse boek.

De bedoeling van het boek is om de beginselen en toepassingen van de elektronische vermogencontrole te behandelen. Elektronische schakelaars en omvormers worden bestudeerd in volume 1 en aandrijftechnieken en positionersystemen krijgen hun beslag in volume 2.

De belangrijkste bron van informatie waren mijn studenten, vooral dan de honderden waarbij ik de mentor was voor hun thesis. Ik ben hen blijvend dankbaar. Het grootste deel van de inhoud van dit boek bestaat trouwens uit de neerslag van lessen, lezingen en projecten over een periode van veertig jaar.

We danken Lies Poignie van Academia Press voor de fijne samenwerking aan deze negende druk.

We danken eveneens dr. ir. P.J. van Duijsen voor de quote op de achterflap van het boek.

Tenslotte wensen we de gebruikers van het boek een vruchtbare studie toe.

Oostende, september 2018

Jean Pollefliet

e-mail: jean.pollefliet@telenet.be

INHOUDSTAFEL

DEEL 1 - HALFGELEIDERSCHAKELAARS

1. FILOSOFIE VAN DE VERMOGENCONTROLE

1. Controle van de elektrische energie met behulp van schakelaars	1.2
2. Schakelmatrix	1.3
3. Bestuurbare halfgeleiderschakelaars	1.4
4. Eigenschappen van schakelaars	1.4
5. Commutatie	1.5
6. Energie-omzetters	1.6
7. Vermogen-frequentiedomein	1.7
8. Evaluatie	1.8

2. VERMOGENDIODEN

1. Halfgeleiders	2.1
2. I - U karakteristiek van een junctiediode	2.2
3. Vermogendiode	2.3
4. Gegevens van een vermogendiode	2.7
5. Uittreksels uit databoeken	2.10
6. Evaluatie	2.14

3. TRANSISTOREN ALS SCHAKELAAR

1. Bipolaire junctietransistor (BJT)	3.2
2. Vermogenmosfet	3.13
3. IGBT	3.36
4. Evaluatie	3.59

4. THYRISTOREN

1. Shockleydiode	4.2
2. Eénrichtingsthyristor (SCR)	4.5
3. Diac	4.26
4. Tweerichtingsthyristor (triac)	4.26
5. Uitschakelbare thyristor (GTO)	4.36
6. Mos Controlled Thyristor (MCT)	4.43
7. Integrated gate commutated thyristor (IGCT)	4.44
8. Evaluatie	4.49

5. NOTITIES

1. Notities uit elektriciteit en wiskunde	5.1
2. Opto-elektronica	5.18
3. Hall-effect opnemers	5.22
4. Warmte-afvoer van halfgeleiders	5.24
5. Kleurencode voor weerstanden	5.29

6. Normalisatie van weerstands- en capaciteitswaarden	5.29
7. Kleurencode voor condensatoren	5.30
8. Type-aanduiding van halfgeleiders en IC's	5.30
9. Het skineffect	5.34
10. EMC – EMI	5.38
11. Si-oppervlakte van vermogenschakelaars	5.43
12. Afmetingen wikkeldraad (AWG)	5.44
13. Telecommunicatie	5.45
12. Transmissielijnen	5.46

6. COMPUTERSIMULATIES

1. Inleiding	6.1
2. Historiek: analoge simulaties	6.4
3. Simulaties met blokdiagrammen: SIMULINK	6.8
4. Simulaties van een elektrisch netwerk: SPICE	6.10
5. Multilevel model en simulatie: CASPOC	6.11

DEEL 2 ELEKTRONISCHE VERMOGENOMVORMERS

7. INDUCTIEF BELASTE GELIJKRICHTERS

1. Stroomverloop bij inductieve keten op sinusoidaal net	7.2
2. Stroom- en spanningsverloop bij inductief belaste éénfase gelijkrichter	7.6
3. Benaderingen bij de studie van de gelijkrichters	7.11
4. Enkelzijdige driefasengelijkrichter	7.11
5. Driefasen-brugschakeling	7.14
6. Tabel 7-3 : Eénfase gelijkrichters	7.21
7. Tabel 7-4: Driefasengelijkrichters	7.22
8. Evaluatie	7.23

8. GESTUURDE GELIJKRICHTERS (MUTATOREN)

1. Enkelzijdige éénfase-schakeling. Ohms belast	8.2
2. Enkelzijdige éénfase-schakeling. Ohms-inductief belast	8.6
3. Tabel 8-1: Eénfase vermogencontrole	8.10
4. Harmonischen in geval van een fase-aangesneden sinusoidale	8.11
5. Distorsievermogen	8.13
6. Volgestuurde B_2 - mutator. Ohms-inductief belast	8.18
7. Volgestuurde B_6 -mutator. Ohms belast	8.22
8. Volgestuurde B_6 -mutator. Ohms-inductief belast	8.31
9. Volgestuurde B_6 -mutator: dode tijd, harmonischen	8.45
10. Twaalfpulsige mutatoren	8.56
11. Evaluatie	8.57

9. WISSELSTROOMINSTELLERS (AC-Controllers)

1. AC-controller met fase-aansnijding	9.2
2. AC-controller met periodesturing	9.12
3. Turn-off snubber voor thyristoren	9.15
4. Solid state relays (SSR)	9.15
5. Ontstoring van thyristoren	9.17
6. Evaluatie	9.18

10. CYCLOCONVERTOREN

1. Continue cycloconvertoer	10.1
2. Trapezium-cycloconvertoeren	10.4

11. CONTROLE VAN THYRISTORSCHAKELINGEN

1. Ontsteekimpulsen	11.2
2. Impulstransformatoren	11.4
3. Stuur-IC voor SCR en triac	11.7
4. Triacsturing met diac	11.13
5. Evaluatie	11.14

12. HAKKERS

1. Werkingsprincipe	12.2
2. Soorten sturingen	12.3
3. Ohms en ohms-inductief belaste chopper	12.4
4. Gechopte weerstand	12.10
5. Stuur-IC voor hakers	12.12
6. Evaluatie	12.14

13. GESCHAKELDE VOEDINGEN

1. Basisprincipe geschakelde regelaar	13.2
2. Principe-opstellingen van convertoren	13.2
3. Geïsoleerde geschakelde voeding	13.14
4. Flyback convertoer	13.14
5. Forward convertoer	13.22
6. Controlestrategieën convertoer	13.24
7. Twee transistoren SMPS	13.27
8. Forward met meerdere uitgangen	13.28
9. Volle brug van het buck-type	13.28
10. Synchronie SMPS	13.28
11. Gebruikte componenten bij een SMPS	13.30
12. Overzicht gebruikte SMPS tot 2500W	13.31
13. Niet-ideale golfvorm	13.32
14. Digitaal SMPS-controlesysteem	13.33
15. Evaluatie	13.34
16. Design switched mode power supplies	13.35/13bis.1

14. INVERTOREN

A. DRIEFASENINVERTOREN

1. Spanning- en stroombroninverter	14.2
2. Schakelmatrix van een spanningsbroninverter	14.2
3. 180°-type inverter	14.3
4. Pulsfrequentie-omvormer met vaste DC-spanning	14.7
5. Pulsbreedtemodulatie (PBM)	14.10
6. PBM-strategieën	14.16
7. Harmonischen in een PBM-golf	14.19
8. 120°-type inverter	14.25
9. Gebruikte schakelaars bij driefaseninvertoren	14.26
10. Stuurketen voor een driefasen-inverterbrug van het 180°-type	14.28
11. Three-level invertoren	14.30

B. EENFASE INVERTOR

12. Principe-opstelling van een volle brug inverter	14.36
13. Unipolaire en bipolaire PBM	14.36
14. Volle brug met unipolaire PBM	14.38
15. Harmonischen bij unipolaire PBM	14.40
16. Evaluatie	14.41

15. TOEPASSINGEN VAN DE VERMOGENELEKTRONICA

1. Onderbrekingsvrije stroomvoorziening (UPS)	15.2
2. Hoogfrequent inductieve verwarming	15.10
3. Verbeteren arbeidsfactor (PFC)	15.14
4. Verlichting	15.17
5. Hernieuwbare energie	15.23
A. Windturbines	15.23
B. Fotovoltaïsche zonnepanelen	15.31
6. Elektronische motorcontrole	15.37
7. Elektrische positioneerstelsels	15.40
8. Hoogfrequente inductiekookplaat	15.42

EVALUATIE: ANTWOORDEN EV.1

VIERTALIGE WOORDENLIJST VO.1

TREFWOORDENREGISTER T 1

Volume 2: Elektronische motorcontrole

16. ELEKTRISCHE MACHINES
17. AANDRIJFSYSTEMEN
18. STROOM-, HOEKSTAND- EN TOERENTALOPNEMERS
19. SNELHEIDS- EN (OF) KOPPELREGELING VAN EEN DC-MOTOR
20. SNELHEIDS- EN (OF) KOPPELREGELING VAN EEN DRIEFASEN ASYNCHRONE MOTOR
21. ELEKTRONISCHE CONTROLE VAN HUISHOUDELIJKE MOTOREN, GESCHAKELDE RELUCTANTIEMOTOR, SYNCHRONE DRAAISTROOMMOTOR
22. ELEKTRISCHE POSITIESYSTEMEN
23. e-MOBILITY

1

FILOSOFIE VAN DE VERMOGENCONTROLE

INHOUD

1. Controle van de elektrische energie met behulp van schakelaars
2. Schakelmatrix
3. Bestuurbare halfgeleiderschakelaars
4. Eigenschappen van schakelaars
5. Commutatie
6. Energie-omzetters
7. Vermogen-frequentiedomein
8. Evaluatie

Elektronica was, in de eerste helft van de twintigste eeuw, synoniem voor telecommunicatie. Dit omvatte toen telefonie, radio- en TV-techniek. Tijdens de tweede wereldoorlog (W.O.II) kwam de radartechniek tot ontplooiing en werden de eerste elektrische servosystemen gebouwd. Het zijn deze servosystemen welke bijna onmiddellijk na W.O. II aanleiding gaven tot de industriële automatisering. Een nieuw deelgebied was gestart: de industriële of vermogenelektronica. Hierbij wordt, via elektronische technieken, het elektrisch vermogen gecontroleerd. Voorbeelden zijn: snelheids- en koppelregeling van motoren, temperatuurregeling van ovens en gebouwen, lichtsterkeregeling van lampen.

In zekere zin is elektronische vermogencontrole het huwelijk tussen typisch elektronische technieken en toepassingen die tot het vermogengebied behoren. Het is een moeilijke echtverbintenis omdat enerzijds sterkstromers zich niet gemakkelijk aanpassen aan elektronische componenten en μ s-tijdschalen en anderzijds hebben elektronici geen benul van motoren en megawattvermogens. Er is daarom een behoefte aan ingenieurs en technici welke deze twee vakgebieden beheersen.

Het controleren van elektrische vermogens is uiterst belangrijk geworden, o.a. om volgende redenen:

1. milieuvriendelijkheid: om reden van milieubehoud komt (schone) elektrische energie meer en meer aan bod.
2. de toepassingen vereisen meer en meer snelheid, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de vermogentechniek.
3. energiebesparend: het rendement wordt zeer belangrijk en de nauwkeurige controle van elektrische vermogens wordt een prioriteit.

Enkel de elektronica kan deze controle verwezenlijken.

1. CONTROLE VAN DE ELEKTRISCHE ENERGIE MET BEHULP VAN SCHAKELAARS

Om in de vermogenelektronica het elektrisch vermogen met maximaal rendement te controleren maken we altijd gebruik van **schakelaars**.

We gaan dit even verduidelijken. Veronderstel een weerstandsoven met een $R_v = 5\Omega$ aangesloten op een spanning van 500 V (fig. 1-1). Om het elektrisch vermogen in de oven te controleren is een regelbare weerstand R_1 geschakeld tussen bron en belasting R_v .

We berekenen voor enkele waarden van R_1 het vermogen geleverd door de bron en het vermogen opgenomen door de oven. Tevens bepalen we het rendement van deze schakeling: $\eta = \frac{P_{oven}}{P_{bron}}$.

De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in tabel 1-1.

Het rendement in functie van R_1 wordt voorgesteld in fig 1-2.

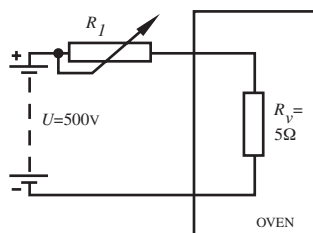


Fig. 1-1: Sturing oven via weerstand

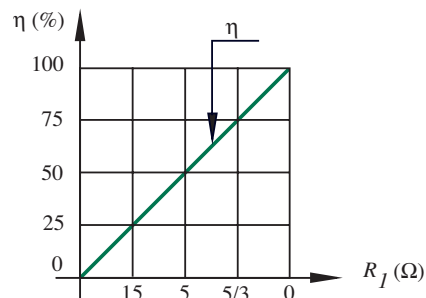


Fig. 1-2: Rendement van de opstelling in fig. 1-1

Tabel 1-1

$R_1 (\Omega)$	$P_{bron} (kW)$	$P_{oven} (kW)$	$\eta (\%)$
0	50	50	100
5/3	37,5	28,125	75
5	25	12,5	50
15	12,5	3,125	25
∞	0	0	—

We bekijken nu de schakeling in fig. 1-3 waarbij de serieweerstand vervangen is door een schakelaar S. Deze schakelaar wordt periodiek geopend en gesloten. We noemen t_{ON} de tijd dat S sluit en t_{OFF} de tijd dat S open staat. De tijden nodig voor het openen en sluiten van S worden verwaarloosd.

We bepalen als werkverhouding (duty ratio) van de schakeling:
$$\delta = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = \frac{t_{ON}}{T} \quad (1-1)$$

Hierbij noemen we T de periodetijd. Vermenigvuldigen met 100 geeft δ in %.

Tabel 1-2 geeft de berekende waarden van P_{bron} , P_{oven} en rendement η voor enkele waarden van δ .

Het rendement in functie van de werkverhouding is in fig. 1-4 weergegeven.

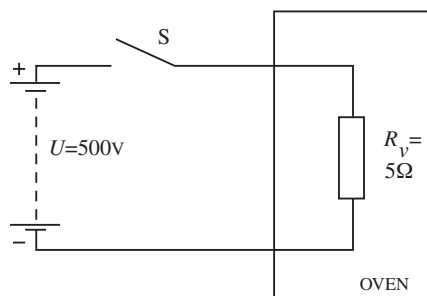


Fig. 1-3: Sturing oven via schakelaar

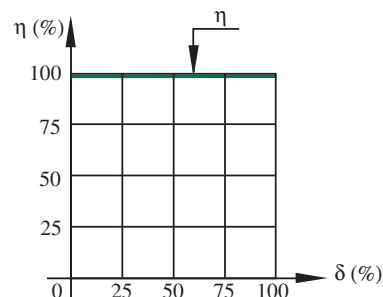


Fig 1-4: Rendement van de opstelling in fig. 1-3

Tabel 1-2

δ (%)	P_{bron} (kW)	P_{oven} (kW)	η (%)
0	0	0	—
25	12,5	12,5	100
50	25	25	100
75	37,5	37,5	100
100	50	50	100

Vergelijking van de ingevulde grafieken van fig. 1-2 met fig. 1-4 toont dat we om reden van rendement bij vermogencontrole nooit continu veranderlijke elementen gebruiken maar altijd schakelaars. Als de vermogenflux door deze schakelaars gevoerd wordt en deze **schakelaars** zijn daarenboven vermogenhalfgeleiders, dan spreken we van **vermogenelektronica**.

2. SCHAKELMATRIX

In feite is elke energie-omzetter te herleiden tot een schakelmatrix (fig. 1-5). De spanning tussen de b uitgangslijnen wordt gevormd door gekozen verbindingen met de a ingangslijnen gedurende een bepaald gedeelte van de werkingscyclus. Via gepaste controlesignalen worden de onderscheiden schakelaars bediend. De uitgangsspanning kan enkel bestaan uit segmenten van de ingangsspanning.

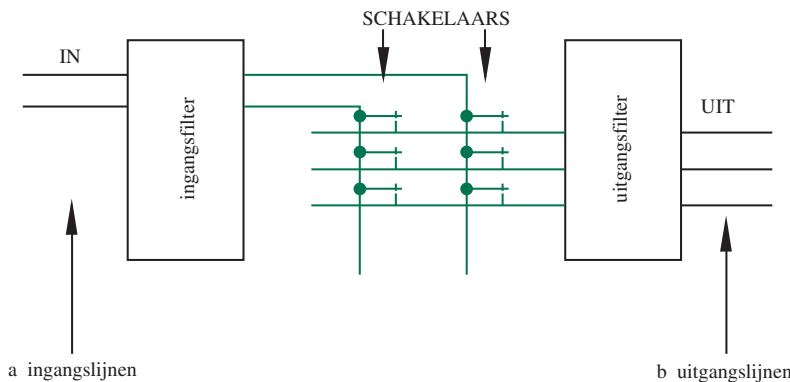


Fig. 1-5: Algemene schakelmatrix

Om a lijnen met b lijnen te verbinden zijn er $a \times b$ schakelaars nodig (fig. 1-5). In de opstelling van fig. 1-6 is er echter één lijn gemeenschappelijk tussen in- en uitgang zodat er op deze lijn geen schakelaar nodig is. Hier wordt $b = 1$ en $a = 1$ en volstaat $(a \times b)$ 1 schakelaar.

Op uitzondering van de triac zijn halfgeleiderschakelaars unidirectioneel, m.a.w. ze geleiden slechts in één zin. Om de schakeling bidirectioneel te maken, dit is met de uitgang en ingang omwisselbaar van functie, zijn er maximaal $2 \times a \times b$ schakelaars nodig. Voorbeeld: een gelijkstroommachine met ($b=$) 2 lijnen bidirectioneel verbinden met de ($a =$) 3 lijnen van een draaistroomnet vereist 12 schakelaars.

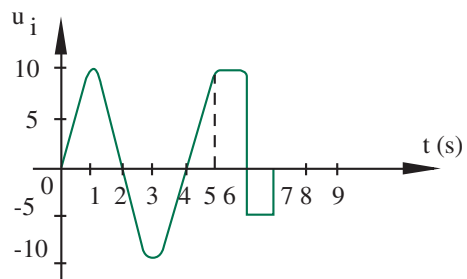
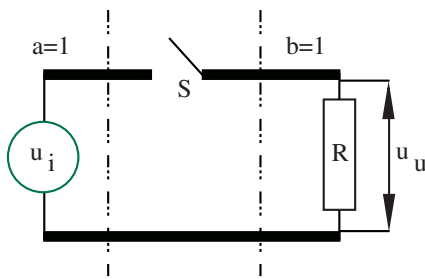


Fig. 1-6: Eenvoudige schakelmatrix

Filters

Door het schakelen ontstaan ongewenste frequenties in de voedingsleiding waardoor een ingangsfILTER nodig kan zijn (fig. 1-5). Anderzijds zal het schakelen aan de uitgang vaak voor een golfvorm zorgen die slechts een benadering is van de gewenste golfvorm. Een uitgangsfILTER helpt de ideale golfvorm te benaderen door ongewenste rimpelspanningen of -stromen te verwijderen uit de belasting. Filters dragen sterk bij tot kostprijs, gewicht en afmetingen van de installatie. Er moet bepaald worden of deze filters wel nodig zijn in het beschouwd geval en zo ja in welke mate er moet gefilterd worden.

3. BESTUURBARE HALFGELEIDERSCHAKELAARS

Wat de bestuurbaarheid betreft, onderscheiden we drie types van halfgeleiderschakelaars:

TYPE 1 = NIET-BESTUURBARE SCHAKELAAR

= DIODE: wordt vanzelf geleidend als de anode positief is t.o.v. de kathode en spert juist vóór de nuldoorgang van de anodestroom.

TYPE 2 = AAN-BESTUURBARE SCHAKELAAR

= THYRISTOR: wordt geleidend via een controlesignaal en spert vanzelf vóór de nuldoorgang van de anodestroom.

TYPE 3 = AAN/UIT-BESTUURBARE SCHAKELAAR

= TRANSISTOREN, GTO, MCT, IGCT: via controlesignalen worden deze schakelaars geleidend of gesperd.

Merk op dat met een stijgend typenummer meer mogelijkheden overeenkomen. Zo kan een type-2 schakelaar in de plaats komen van een type-1, maar niet omgekeerd.

4. EIGENSCHAPPEN VAN SCHAKELAARS

Een schakelaar is o.a. gekenmerkt door de spanning (U_{nominaal}) welke hij continu kan weerstaan in open toestand en de stroomsterkte (I_{nominaal}) welke hij kan geleiden in gesloten toestand.

Deze statische eigenschappen zijn te zien in fig. 1-7, waarbij het verschil tussen een ideale en een werkelijke schakelaar is aangegeven.

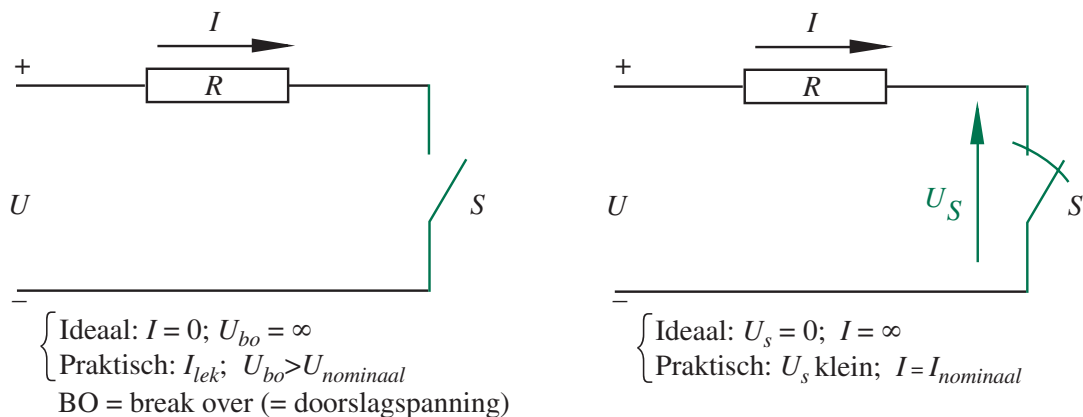


Fig. 1-7: Statische eigenschappen van ideale en werkelijke schakelaar.

Een schakelaar is ook nog gekenmerkt door zijn dynamische eigenschappen, met name de tijden om te sluiten (t_{on}) en te openen (t_{off}). Dit wordt in fig. 1-8 duidelijk gemaakt. Hierbij is terug het onderscheid te zien tussen ideale en werkelijke schakelaar.

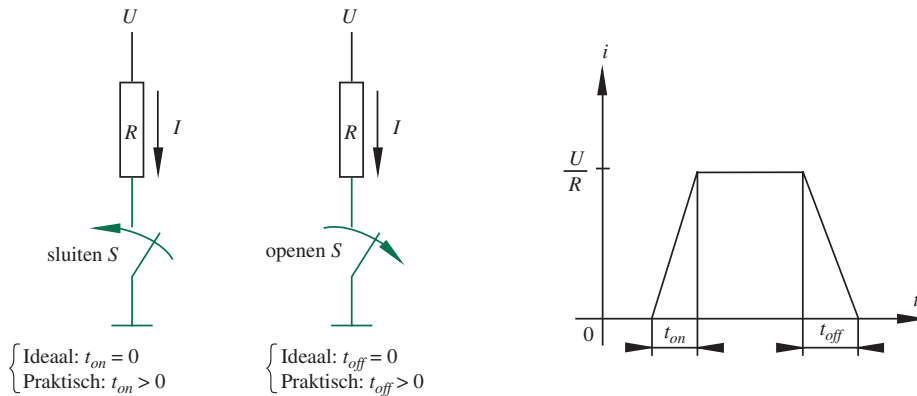


Fig. 1-8: Dynamische eigenschappen van een schakelaar.

We kunnen nu ook nog in fig. 1-9 de instelpunten A en B bepalen voor een schakelaar in een $I-U$ assenkruis. We doen dit zowel voor de ideale als voor de werkelijke schakelaar uit fig. 1-7.

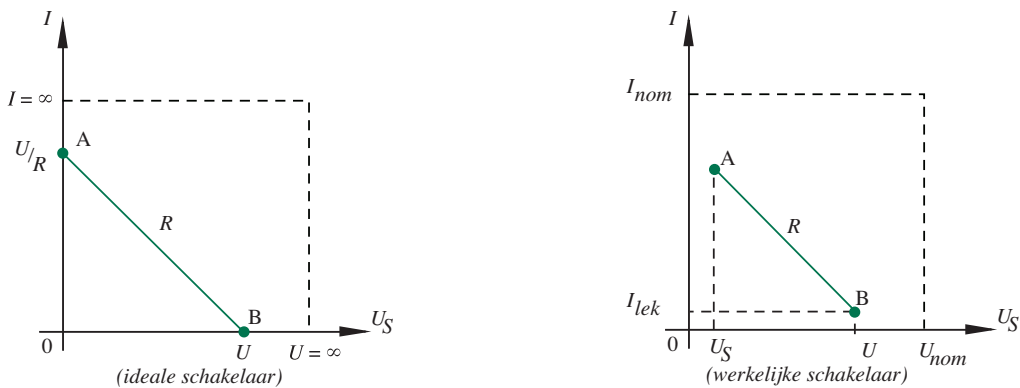


Fig. 1-9: Instelpunten schakelaar in $I-U$ assenkruis.

5. COMMUTATIE

Commutatie is het proces waarbij de stroom door de schakelaar onderbroken wordt. Is de voeding een wisselspanning dan kennen we de **natuurlijke** of **net-commutatie** (line commutation) omdat:

1. ofwel de stroom door de schakelaar nul wordt als gevolg van de nuldoorgangen van het net, of:
2. omdat de stroomketen overgeschakeld wordt via een andere schakelaar naar een hogere potentiaal.

Bij een type-3 schakelaar kan de commutatie “kunstmatig” gebeuren op willekeurig gekozen tijdstippen. Meestal spreekt men van gedwongen commutatie (forced commutation) maar in wezen is elke commutatie gedwongen zodat we liever de term **kunstmatige commutatie** gebruiken.

Anderzijds kan de belasting een zodanige karakteristiek hebben die de schakelaar tot commutatie dwingt, dit is dan **belastingscommutatie** (load commutation).

6. ENERGIE-OMZETTERS (POWER CONVERTERS)

Elektrische energie is in onze industriële wereld onder twee vormen ter beschikking:

1. als wisselstroomenergie via het distributienet (AC = alternating current = wisselstroom)
2. als gelijkstroomenergie via een accubatterij of via een bovenleiding en rail bij elektrische tractie (DC = direct current = gelijkstroom)

Behalve de twee distributievormen (DC en AC) van elektrische energie, onderscheiden we volgens de stroomvorm ook twee soorten van verbruikers:

1. gelijkstroomverbruikers
2. wisselstroomverbruikers.

Om de energiestroom te regelen tussen stroombron (DC of AC) en verbruiker (DC of AC) worden vier types van elektronische energie-omzetters (fig. 1-10) gebruikt:

1. **mutator** of gestuurde gelijkrichter (DC-controller): hierbij wordt de wisselspanning van het net omgezet in een regelbare gelijkspanning;
2. **wisselspanningsinsteller** (AC-controller): waarbij de wisselspanning van het net wordt omgezet in een regelbare wisselspanning met dezelfde frequentie;
3. **hakker** (chopper): een constante gelijkspanning wordt omgezet naar een andere, constante of regelbare gelijkspanningswaarde;
4. **invertor** (inverter): hierbij wordt een gelijkspanning omgevormd tot een al dan niet regelbare wisselspanning.

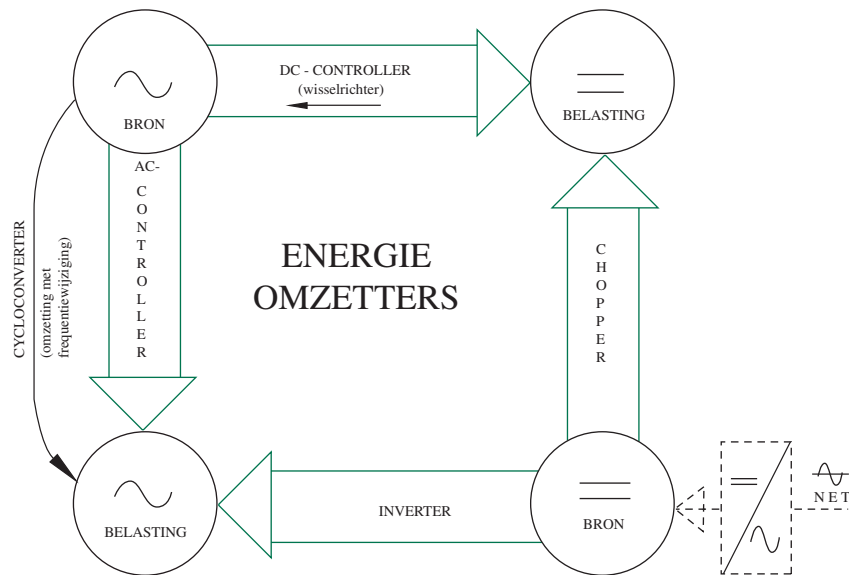


Fig. 1-10: Energie-omzetters

DC- en AC-controllers zijn natuurlijke commutatieschakelingen omdat de voeding een wisselspanning is. Als schakelaar komt de type-2 schakelaar in aanmerking. In een bepaalde situatie kan de DC-controller in de inverse zin werken als wisselrichter.

Hakker en invertor zijn kunstmatige commutatieschakelingen: zij gebruiken een type-3 schakelaar. Een bijzonder geval zijn de frequentie-omzetters. We onderscheiden hierbij ééntraps- en tweetraps-omzetters. Met een zogenaamde cycloconverter gebeurt de frequentiewijziging in één stap. Bij de tweetrapsomzetter wordt de AC-voeding gelijkgericht en deze gelijkspanning wordt via een invertor terug naar AC omgezet. Uitgangsamplitude en (of) -frequentie zijn veelal regelbaar.

7. VERMOGEN-FREQUENTIEDOMEIN

Fig. 1-11 geeft de "state-of-the-art" van de vermogenschakelaars. Op dit ogenblik zijn we, op één SCR van 8,5 kV na, voor thyristoren beperkt tot zowat 4 kV-4 kA. Dit is maximaal ongeveer 16 MW per schakelaar. We noemen dit het "midden-vermogen-domein". Een SCR noemt men tegenwoordig ook soms een PCT (Phase Controlled Thyristor). Er bestaan bijvoorbeeld single IGBT's voor 1200V-3600A, 1700V-2400A en 3300V-1500A. Bij IGBT's in halve brugschakeling vinden wij bijvoorbeeld types voor 1700V-1000 A. State-of-the-art zijn 150 en 200 mm Si-wafels met een dikte van 70 μm . De eigenschappen van SiC- en GaN-vermogenschakelaars zijn te vinden op p. 3.35.

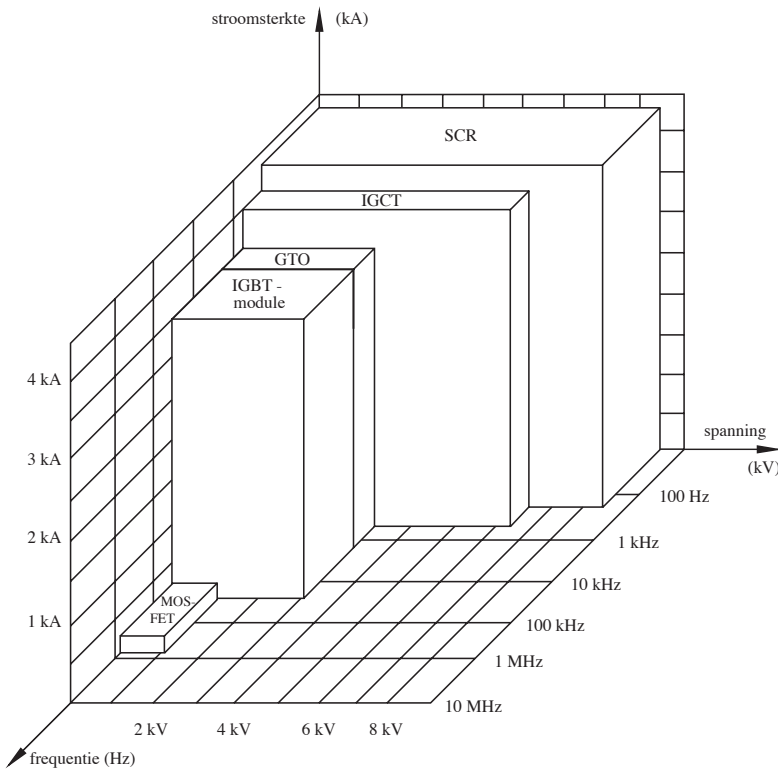


Fig. 1-11: Eigenschappen van Si-vermogenschakelaars

Elektrische energie over grote afstanden overbrengen kan economischer zijn met een DC-transmissie-systeem (verliezen kleiner dan 3% per 1000 km). Er zijn wel hoge investeringskosten aan begin en einde van de leiding! Zo is bij 400 kV-1200 MW de transmissie economischer met (U)HVDC ((Ultra) high voltage direct current) vanaf 250 km. Bij zee kabel is de economische afstand zelfs korter. In China en Brazilië waar de grote hydro-elektrische centrales op meer dan 1000 km van de grote steden liggen wordt (U)HVDC toegepast. Voorbeeld: HVDC op een spanning van 400 kV voor 140 km (130 km onder zee) tussen Richborough (UK) en Zeebrugge (België).

Een andere toepassing van HVDC is de verbinding tussen AC-netten met een verschillende frequentie. Zo bijvoorbeeld het Garabi back-to-back station tussen het 60 Hz-net van Brazilië en de 50 Hz van Argentinië.