

7 Elektronica componenten

Thyristoren

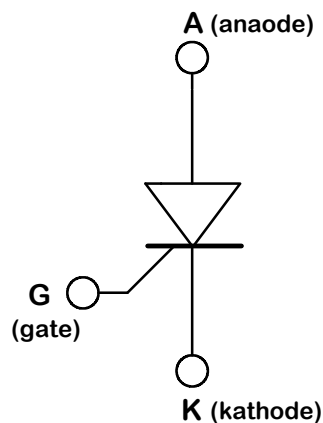
7.1 Eénrichtingsthyristoren

7.1.1 Toepassingsgebied

Eerder bespraken we het schakelgedrag van bipolaire junctie-transistoren en MOSFET's. Wanneer echter *grote vermogens* dienen doorgeschakeld te worden maken we geen gebruik van transistoren maar van '**thyristoren**'.^[31] Thyristoren zijn speciaal ontworpen om deze klus te klaren. We treffen deze vermogen-component vooral aan bij motorcontrollers, gestuurde gelijkrichters, lichtdimmers, elektronische beveiligingsschakelingen,...

7.1.2 Schemasymbool

Figuur 7.1 toont het schemasymbool van een zg. éénrichtings-thyristor. Onmiddellijk valt de gelijkenis op met een 'gewone' *gelijkrichterdiode*. In het schemasymbool herkennen we anode en kathode en ontdekken we een derde aansluitklem: de **gate**.

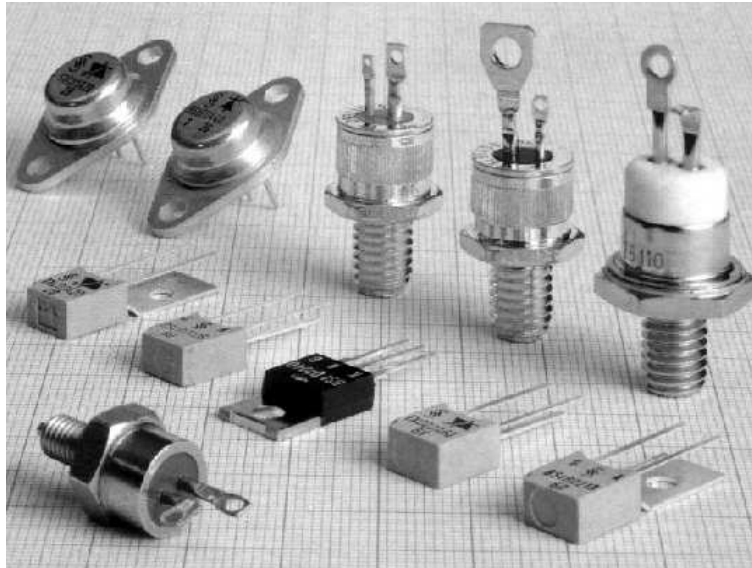


△ Fig.7.1 | Schemasymbool van een SCR.
Bron: W. Van Wichelen

[31] De term 'thyristor' is een verzamelnaam. Meestal gebruiken we de term 'SCR' (Silicon Controlled Rectifier): genoemd naar zijn voornaamste toepassing. Hij werd door Bell Laboratories ontwikkeld in 1956.

7.1.3 Packages

Al naar gelang van de toepassing en het vermogen van de te schakelen verbruikers, zal je thyristoren aan treffen in de best passende behuizing. Je vindt ze in alle maten en gewichten. In figuur 7.2 zie je een mooie collectie afgebeeld:



△ Fig.7.2 | Verschillende packages van thyristoren.
Bron: <https://learn.mikroe.com>

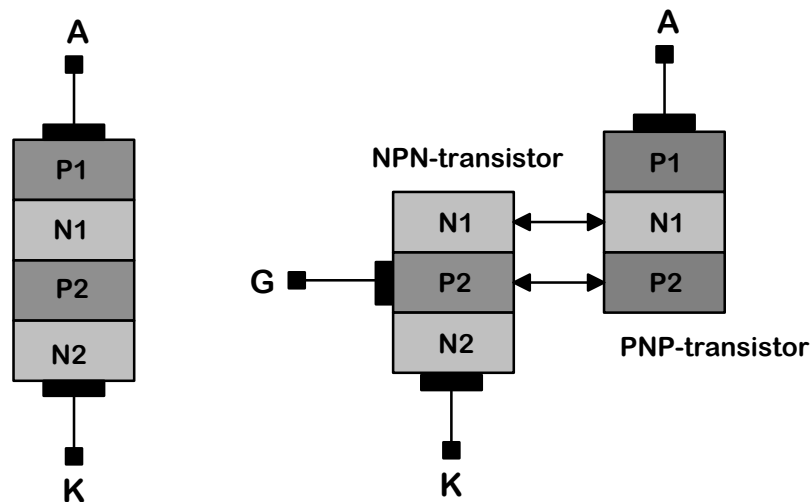
7.1.4 Principe van een SCR

Principe

Een éénrichtingsthyristor kan je opvatten als een **stuurbare diode** of **stuurbare gelijkrichter**. In het Engels: '**Silicon Controlled Rectifier**', kortweg: SCR. Het aansturen gebeurt via de gate aansluitklem.

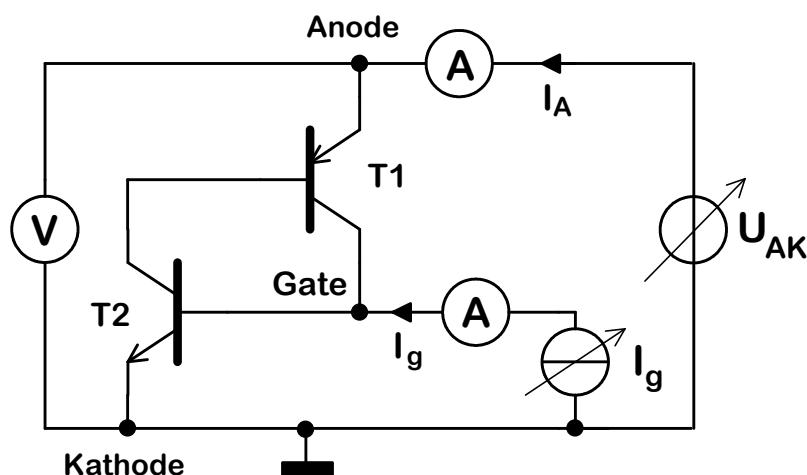
Vierlagen structuur

Figuur 7.3 toont de halfgeleideropbouw van een éénrichtings-thyristor. Je bemerkt een vierlagenstructuur en met wat verbeelding kan je deze structuur opvatten als een samensmelting van een PNP- en een NPN-junctietransistor.



△ Fig.7.3 | Halfgeleideropbouw van een éénrichtingsthyristor.
Bron: W. Van Wichelen

Het gebiedje N_1 vormt zowel de basis van de PNP-BJT als de collector van de NPN-BJT. Het gebiedje P_2 is zowel de collector van de PNP-BJT als de basis van de NPN-BJT. De aansluitklem bij P_2 wordt de *gate* (G) genoemd. Wanneer je deze gateklem zou wegnippen dan bekom je een zogenaamde '**shockleydiode**'.

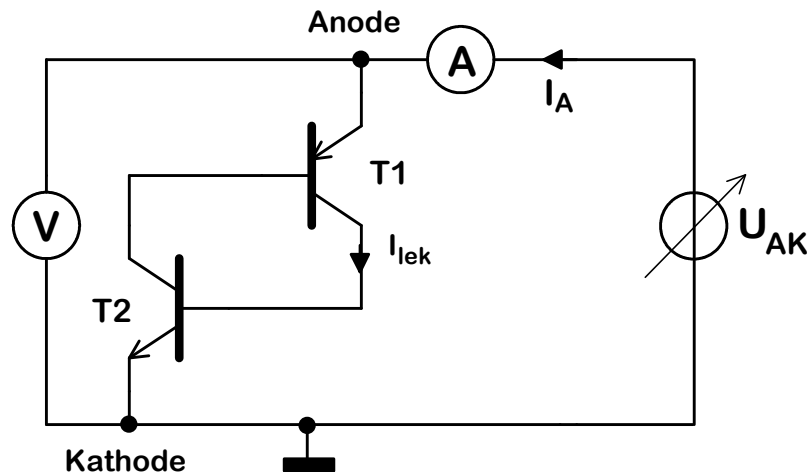


△ Fig.7.4 | Transistor-equivalent van een éénrichtingsthyristor.
De meettoestellen dienen om de U/I-karakteristiek op te kunnen nemen.
Bron: W. Van Wichelen

Figuur 7.4 toont het transistorequivalent van een SCR. Een constante stroombron bepaalt de gatestroom en een regelbare spanningsbron legt de anode/kathode-spanning aan. We laten bij een bepaalde gatestroom de waarde van U_{AK} toenemen en noteren hierbij de meteruitslagen. Vervolgens herhalen we de meting, maar nu laten we U_{AK} negatief worden.

7.1.5 Schakelgedrag bij open gate

We laten de gate-klem open liggen: I_G is dus nul.



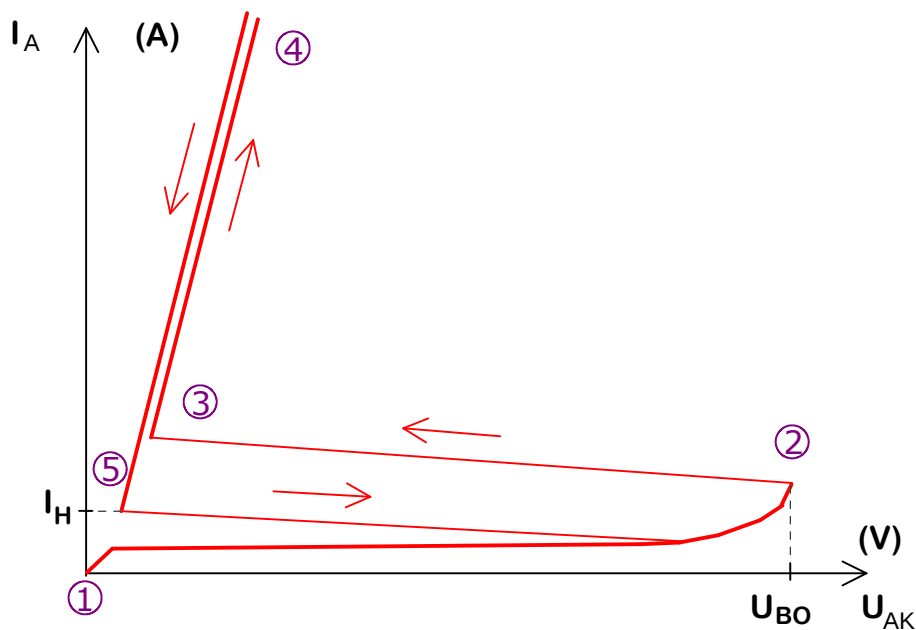
△ Fig.7.5 | Transistor-equivalent van een éénrichtingsthyristor. Meting van de U/I-karakteristiek bij open gate.
Bron: W. Van Wichelen

Ontstaan van lekstroom

We weten dat we een junctietransistor kunnen vergelijken met een schakelaar. Deze schakelaar is verre van ideaal. Wanneer een BJT gesperd is, zal er nog een klein lekstroompje vloeien van enkele μA 's. De weerstand tussen collector en emitter is dan zeer groot maar niet *oneindig* groot. Zo is ook de weerstand van een geleidende BJT niet volledig nul. Bij aanvang van ons experiment is $U_{AK}=0V$ (punt 1 in de grafiek van figuur 7.6). Er kan geen stroom vloeien want beide transistoren zijn immers gesperd. Als we nu U_{AK} voldoende laten toenemen, dan zal er een kleine **lekstroom** ontstaan. Deze lekstroom is dan de collectorstroom van T_1 en tevens de basisstroom voor T_2 .

Ontsteken van de vierlagen structuur

We laten U_{AK} verder toenemen. Op een bepaald ogenblik is de lekstroom aangezweld tot een serieuze basisstroom voor T_2 . T_2 zal beginnen geleiden. Dit geleiden van T_2 heeft nu een *lawine-effect* tot gevolg! Immers, bij het geleiden van T_2 wordt de basis van T_1 naar massa getrokken. De emitter van T_1 ligt nu zeker 0,7V hoger dan de basis van T_1 . T_1 zal nu ook in geleiding treden: de lekstroom is nu geen kleine lekstroom meer, maar een *aanzienlijke* collectorstroom. T_1 stuurt de tweede transistor nu onherroepelijk in verzadiging. De basis van T_1 'plakt' bijgevolg definitief aan massa. De twee transistoren sturen op deze manier elkaar in saturatie: ze zijn zo in een innige 'omhelzing' dat ze moeilijk uit deze toestand gehaald kunnen worden. Dit plotse geleiden gebeurt bij de '*break over voltage*' (punt 2 en 3 in de grafiek van figuur 7.6). We zeggen dan dat de 4-lagenstructuur **ontsteekt**.



△ Fig.7.6 U/I-karakteristiek van een shockleydiode bij open gate.
Bron: W. Van Wichelen

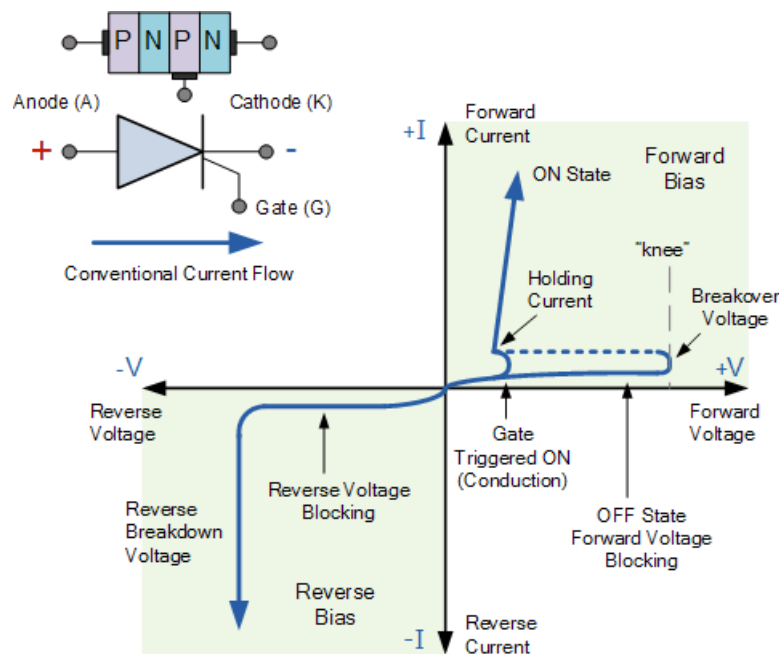
Doven van de shockleydiode

De shockleydiode is ontstoken en de structuur is in geleiding (punt 3 en 4 in de grafiek van figuur 7.6). Er vloeit nu een bepaalde anodestroom I_A . Hoe kunnen we deze structuur nu uit geleiding krijgen? Hoe halen we met andere woorden dat innige transistorpaartje nu uit elkaar? Wanneer U_{AK} voldoende gedaald is, zal de structuur sperren. Dit sperren gebeurt echter bij een andere U_{AK} dan het ontsteken. Dit is te verklaren doordat we die 'innige omhelzing' dienen te doorbreken.

Technisch zegt men dat de shockleydiode '**dooft**' wanneer de anodestroom daalt tot onder de zg. '**houdstroom**' (I_H : punt 5 in de grafiek van figuur 7.6).

7.1.6 Schakelgedrag bij aangestuurde gate

Laten we nu stroom ($I_G > 0$) injecteren in de gate. We spreken nu niet meer van een shockleydiode (2 aansluitingen), maar van een **éénrichtingsthyristor** of **SCR** (3 aansluitingen). Het is logisch dat de SCR nu eerder ontsteekt: we hoeven nu niet te wachten tot een kleine lekstroom aanzwelt tot een ernstige basisstroom voor T_2 . Het 'shockley-effect' wordt dus eigenlijk vervroegd.



△ Fig.7.7 | U/I-karakteristiek van een SCR bij aangestuurde gate.
Bron: <https://www.electronics-tutorials.ws>

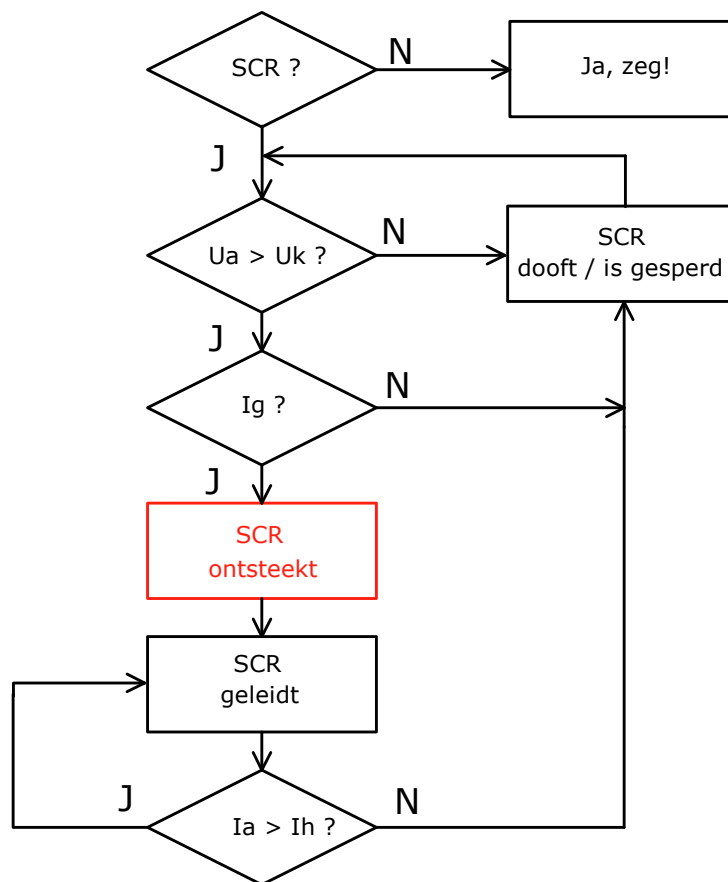
7.1.7 Ontsteken en doven van een SCR

Als we de gateklem laten open liggen is $I_G=0$. Maken we nu de spanning op de anode positief t.o.v. de kathode, dan zal de SCR niet geleiden. De SCR staat dan wel in doorlaat gepolariseerd, maar om hem te doen geleiden is er een bijkomende voorwaarde nodig: er moet een gatestroom I_G geïnjecteerd worden.

Schakelgedrag van een SCR

- Er kan een gatestroom (bv. $I_G=10\text{ mA}$) vloeien wanneer je een positieve spanning (bv. $U_{GK}=0,6\text{ V}$) plaatst op de gate t.o.v. de kathode. De SCR **ontsteekt**.
- Zolang de anode op een hogere spanning staat dan de kathode, blijft de SCR **geleiden**.
- Wordt de kathodespanning nu positiever dan de anodespanning, dan zal de SCR **sperren**.
- Bij **polarisatie in sper** kan de SCR niet ontsteken.

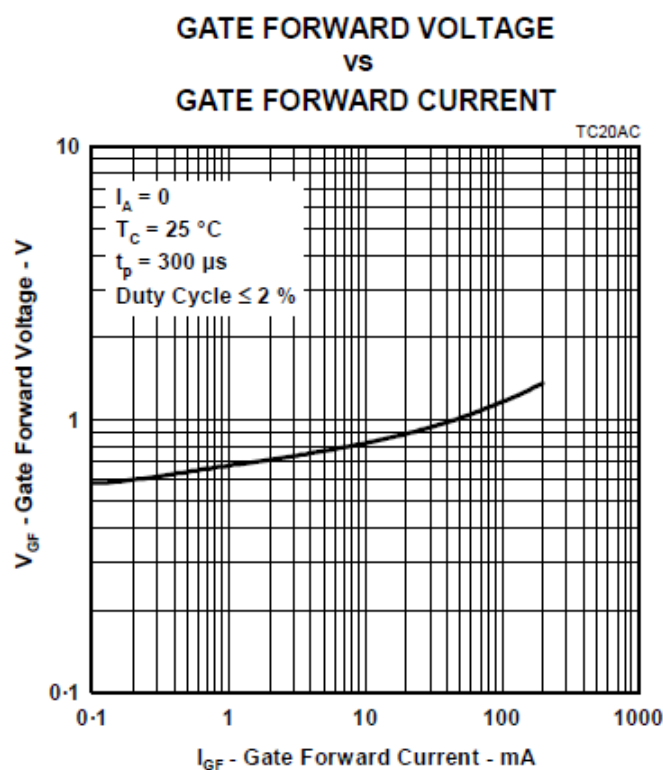
De flowchart van figuur 7.8 beschrijft het SCR-schakelgedrag:



△ Fig.7.8 Flowchart van het SCR-schakelgedrag.
Bron: W. Van Wichelen

7.1.8 Type gatesturing

De gate hoeft niet *continue* stroom te voeren: eenmaal een SCR ontstoken krijg je hem niet meer uit geleiding of de stroom door de component moet gezakt zijn tot omzeggens nul. Figuur 7.9 toont de gatespanning in functie van de gatestroom van een praktische SCR (TIC106). Bij het opnemen van de grafiek volstond een gatepuls met een pulsbreedte van $300\mu\text{s}$ bij een duty cycle van 2%.^[32] Om een SCR te ontsteken passen we dus pulsen met een bepaalde breedte of impulstreinen toe.^[33] Dankzij impulsstreinen kunnen we de **vermogendissipatie** in de gate beperken. Afhankelijk van de aard van de te schakelen belasting beslis je welk type **gatesturing** je toepast.



△ Fig.7.9 Gatespanning en gatestroom van SCR TIC106.
Bron: Datasheet Power Innovations Limited

Schakelen van ohmse belastingen

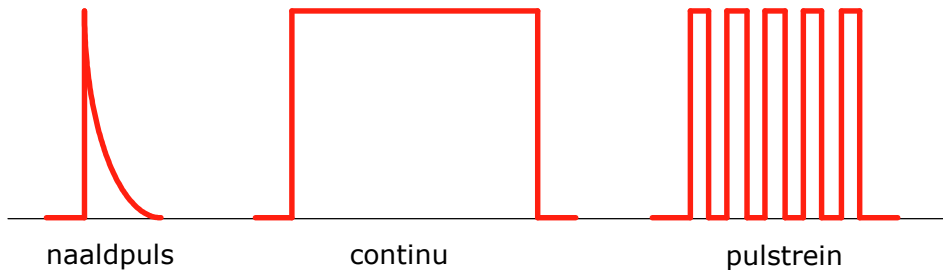
Om ohmse belastingen te schakelen (gloeilampen, verwarmingsweerstand, ...) volstaat een kortstondige **naaldpuls**.

[32] Duty Cycle (arbeidscyclus): het percentage van een periode (tijd om een aan-en-uit-cyclus te voltooien) waarin het signaal actief is.

[33] Impulstrein: reeks van vlug opeenvolgende naaldpulsen.

Schakelen van ohms/inductieve belastingen

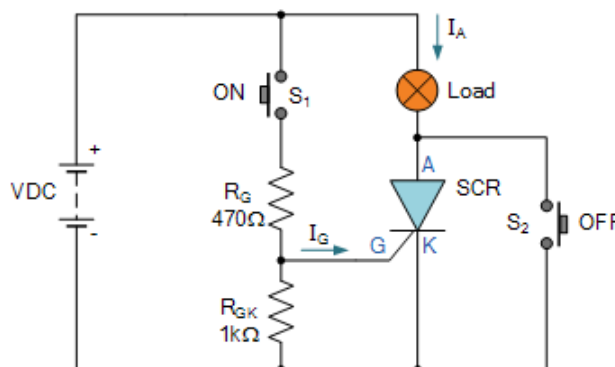
Bij inductieve belastingen (elektromotoren, contactorspoelen,...) moet de gatestroom iets langer duren en passen we **impulstreinen** toe. Als gevolg van de inductiviteit van de belasting zijn stroom en spanning niet meer in fase: de stroom door de thyristor ijlt immers na op de aangelegde netspanning.



△ Fig.7.10 | Type gatesturing
Bron: W. Van Wichelen

7.1.9 SCR op DC-regime

We kunnen de SCR gebruiken als een **DC-schakelaar** om grote DC-stromen IN en UIT te schakelen op het commando van een kleine gatepuls. Je moet er wel op letten dat de thyristor zich gedraagt als een soort impulsschakelaar: eenmaal geactiveerd blijft de belasting (R_L) immers ingeschakeld. Je zal dus een manier moeten bedenken om hem terug te kunnen *resetten*. Figuur 7.11 toont het principe. Bedienen van S_1 doet de SCR ontsteken en de lamp zal ingeschakeld worden. Laten we S_1 nu los dan zal de lamp blijven branden. Door op S_2 te duwen sluiten we de SCR kort en zakt de anodestroom (I_A) onder de houdstroom (I_H). Laten we S_2 vervolgens los, dan zal de SCR doven en de lamp bijgevolg ook.



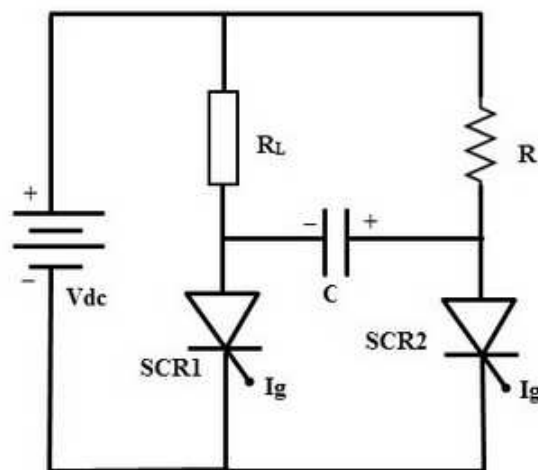
△ Fig.7.11 | Principe van een SCR op DC-regime
Bron: <http://www.electronics-tutorials>

Let op!

Vermits een DC-spanning geen nuldoorgangen bezit, zal de SCR (eenmaal hij ontstoken is) nooit meer uit geleiding treden zonder hulp van buitenaf.

Gedwongen commutatie

Een **doofcircuit** zal er voor moeten zorgen dat de anode/kathode-spanning eventjes kortgesloten wordt. De stroom door de thyristor zal op die manier eventjes nul worden. Dit heet **gedwongen commutatie**.^[34] Figuur 7.12 laat een mogelijkheid zien waarbij de ene thyristor (SCR_1) de belasting (R_L) inschakelt en een tweede thyristor (SCR_2) de eerste dooft zodat de belasting terug uitschakelt. Een RC-seriekring zorgt voor de gedwongen commutatie door de stroom door SCR_1 eventjes negatief te maken. Nu zou je kunnen denken dat we het probleem hebben doorgeschoven...want wie gaat er nu SCR_2 doven? Dit gebeurt vanzelf bij aansturing van de gate van SCR_1 om de belasting (R_L) in te schakelen.



△ Fig.7.12 | Gedwongen commutatie.
Bron: <http://www.electronicshub.org>

[34] Gedwongen commutatie of 'forced commutation': proces waarbij de stroom door de thyristor onderbroken wordt op een vooropgesteld tijdstip m.b.v. extra stuur-elektronica.

7.1.10 SCR op AC-regime

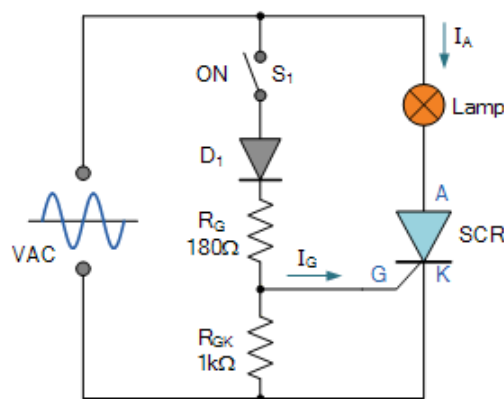
Natuurlijke commutatie

Op AC-regime zal de SCR een ander gedrag vertonen. In tegenstelling tot een DC-spanning (waarbij de polariteit constant blijft) zal het voedende AC-net periodisch van polariteit wisselen. Hierdoor zal de thyristor automatisch doven bij inverse polariteit. We spreken dan van **natuurlijke commutatie**.

Let op!

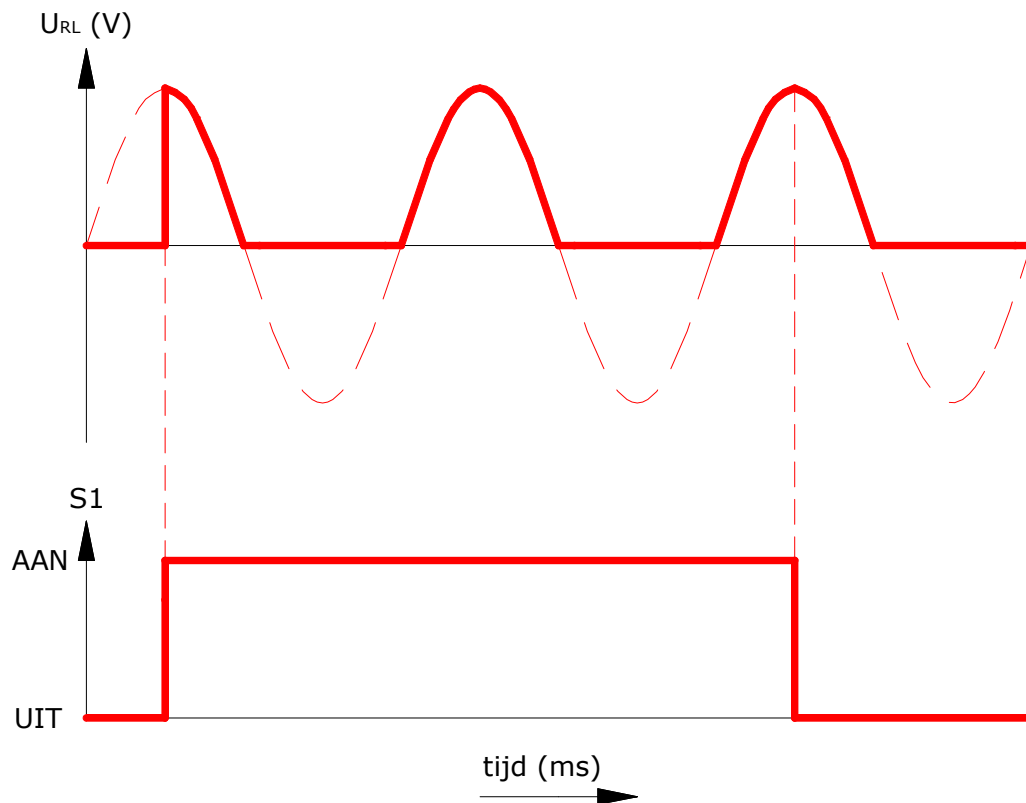
Een SCR op **AC-regime** (bij zuiver *ohmse* belasting) dooft *automatisch* tijdens de nuldoorgang van de negatieve alternantie.

In de figuur 7.13 is het ontsteek-circuit sterk gelijkend op het ontwerp van figuur 7.11. We hebben enkel diode D_1 toegevoegd en de OFF-schakelaar S_2 weggelaten.



△ Fig.7.13 | Principe van een SCR op AC-regime.
Bron: <http://www.electronics-tutorials>

Diode D_1 voorkomt inverse polarisatie van de gate. Gedurende de positieve alternantie is de SCR voorwaarts gepolariseerd maar zolang schakelaar S_1 open staat, kan de SCR niet ontsteken want de gatestroom is nul. Gedurende de negatieve alternantie kan de SCR *nooit* ontsteken ongeacht de toestand van S_1 . Wanneer we S_1 sluiten zal er kort na de nuldoorgang van de positieve alternantie gatestroom geïnjecteerd worden zodat de thyristor kan ontsteken. Gedurende de positieve helft van het voedende AC-net zal de lamp dus branden om vervolgens gedurende de negatieve helft te doven. Zolang S_1 gesloten blijft, ontvangt de lamp slechts de *helft* van het beschikbare vermogen. Het gevolg hiervan is dat de lamp op *halve* sterkte zal branden. Figuur 7.14 illustreert dit.



△ Fig.7.14 | Spanning over de belasting bij een één-thyristorschakeling op AC-regime.
Bron: W. Van Wichelen

Laboproef 10

Onderzoek het schakelgedrag van een SCR (TIC106D) op AC- en DC-regime. Op DC-regime schakelt de SCR een gelijkspanning door naar een gloeilampje. Op AC-regime levert de secundaire van een transformator de energie voor het lampje.

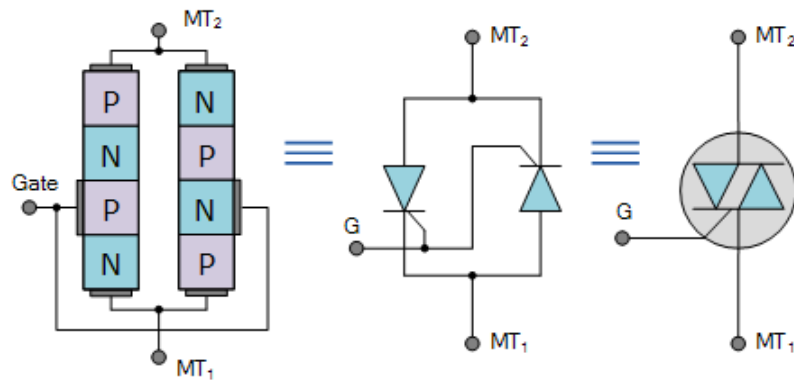
7.2 Tweerichtingsthyristoren

7.2.1 Triac-thyristoren

Definitie

De '**TRIAC**' (TRIode for Alternating Current) is een vermogenshalfgeleider die in *beide* richtingen geleidend kan worden gemaakt. Met behulp van een extra *triggercircuit* kan het moment van inschakelen worden ingesteld.

7.2.2 Schemasymbool



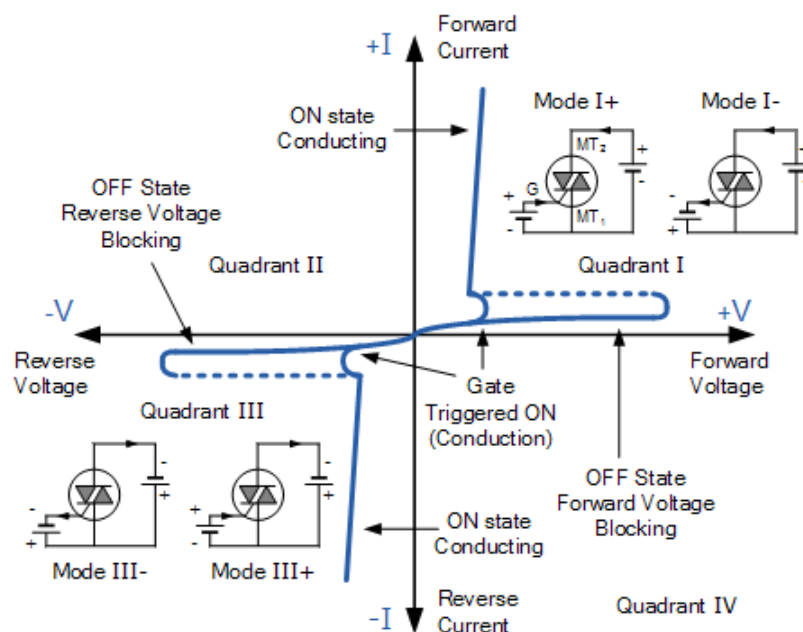
△ Fig.7.15 Fysische opbouw, SCR-equivalent en schemasymbool van een TRIAC.
Bron: <http://www.electronics-tutorials.ws>

De opbouw van een TRIAC kunnen we opvatten als twee anti-parallel geschakelde SCR's. In werkelijkheid bestaat de TRIAC echter uit één halfgeleiderkristal. In tegenstelling tot de SCR kan bij de TRIAC niet gesproken worden van *anode* en *kathode*. We spreken daarom van hoofdaansluitelektrode MT₁ en hoofdaansluit-elektrode MT₂.^[35] Het aansturen gebeurt via de gate.

[35] 'MT' staat voor 'Main Terminal'

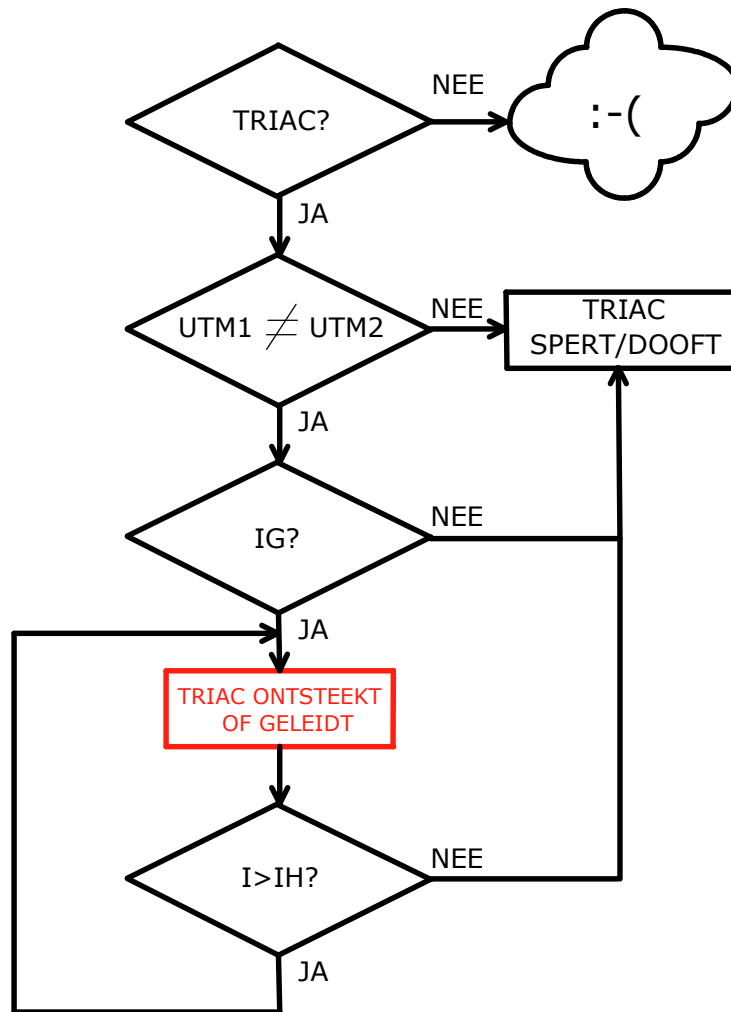
7.2.3 Ontsteken en doven van een TRIAC

Het ontsteken of inschakelen van een TRIAC is te vergelijken met dat van een SCR. Er is echter één belangrijk verschil: een SCR kan alleen met een positieve ontsteekstroom worden ingeschakeld. De TRIAC kan zowel met een positieve als een negatieve ontsteekstroom worden getriggerd. Een geleidende TRIAC dooft als de doorlaatstroom van de TRIAC kleiner wordt dan de houdstroom. Dit komt dus overeen met het uitschakelen van een SCR. Wordt over de elektroden MT_1 en MT_2 een spanning aangesloten, maar vloeit er geen of onvoldoende gatestroom, dan zal de TRIAC niet ontsteken. In tegenstelling tot de SCR kan de TRIAC de stroomdoorgang in beide richtingen blokkeren.



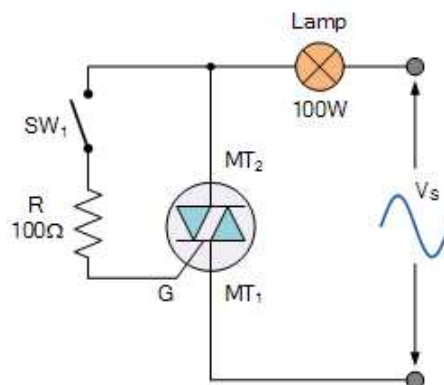
△ Fig.7.16 TRIAC-ontsteekmethoden in 4 kwadranten.
Bron: <http://www.electronics-tutorials.ws>

Figuur 7.16 toont de vier manieren die mogelijk zijn om een TRIAC te ontsteken. Ontsteekwijze (mode) I- en ontsteekwijze III+ zijn minder gevoelige configuraties die een iets grotere gatestroom (I_G) vergen. De meest gebruikte manieren om een TRIAC te triggeren zijn ontsteekwijzen I+ en III-. Figuur 7.17 toont de flowchart van het TRIAC-schakelgedrag.



△ Fig.7.17 | Flowchart van de TRIAC
Bron: W. Van Wichelen

7.2.4 Principe van een AC-controller



△ Fig.7.18 | Principe van een AC-controller
Bron: <http://www.electronics-tutorials.ws>

Figuur 7.18 toont het principeschema van een eenvoudige **AC-controller**. Wanneer de schakelaar SW_1 open staat gedraagt de TRIAC zich als een open kring en er zal geen stroom vloeien doorheen de lamp. Als we de schakelaar SW_1 sluiten zal er een gatestroom geïnjecteerd worden. De weerstand $R_G = 100\Omega$ begrenst de waarde van deze gatestroom I_G . Zolang SW_1 in de AAN-positie staat zal de volledige sinusspanning doorgeschakeld worden naar de lamp en zodoende wordt het beschikbare vermogen volledig benut. De lamp zal nu branden op *volle* sterkte.

7.2.5 Toepassingsgebied

We passen TRIAC's toe voor het schakelen en sturen van wisselstromen en wisselspanningen. Het stroom- en spanningsgebied waarin TRIAC's verkrijgbaar zijn is minder groot dan dat van de SCR. Een reden hiervoor is dat het spanningsverlies over de geleidende TRIAC groter is en daarmee ook het vermogensverlies. Daarom geven we voor grote wisselstromen de voorkeur aan tegengesteld parallel geschakelde SCR's in plaats van de TRIAC. Het vermogensverlies blijft dan beperkt. De TRIAC vinden we terug in eenvoudige regelingen van kleine vermogens, zoals lichtdimmers, huishoudelijke apparaten en handgereedschap. TRIAC's zijn ongeschikt voor hoge spanningen, grote stromen en hogere frequenties dan de netfrequentie van 50Hz.

Laboproef 11

Onderzoek het schakelgedrag van een TRIAC (TIC206D) op AC-regime. De secundaire van een transformator levert de energie en de in te schakelen verbruiker is een gloeilampje.

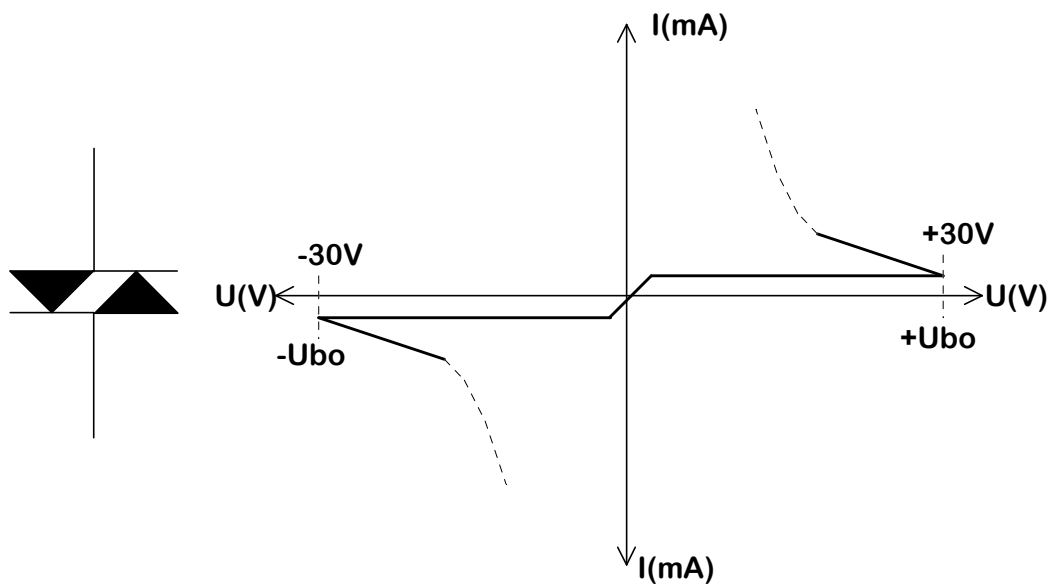
7.2.5 DIAC-triggerdiode

Definitie

De benaming '**DIAC**' staat voor 'Diode for Alternating Current'. Ze wordt meestal als *trigger-diode* gebruikt om TRIAC's te doen ontsteken.

Karakteristiek

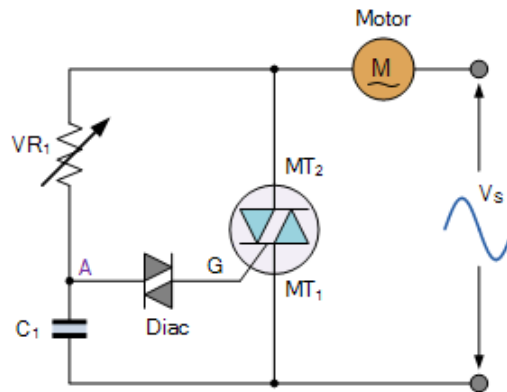
Bestudeer even de grafiek van figuur 7.19. Wanneer de spanning over de klemmen de *break over voltage* bereikt, dan slaat de component plots door. Op dat moment verkrijgt hij een zeer lage weerstandswaarde. De stroom door de DIAC neemt dan plots toe, en de spanning over de klemmen daalt dan ook plots. De DIAC kan in beide richtingen geleidend worden gemaakt.



△ Fig.7.19 | Grafiek en schemasymbool van de DIAC.
Bron: W. Van Wichelen

Fase-aansnijding

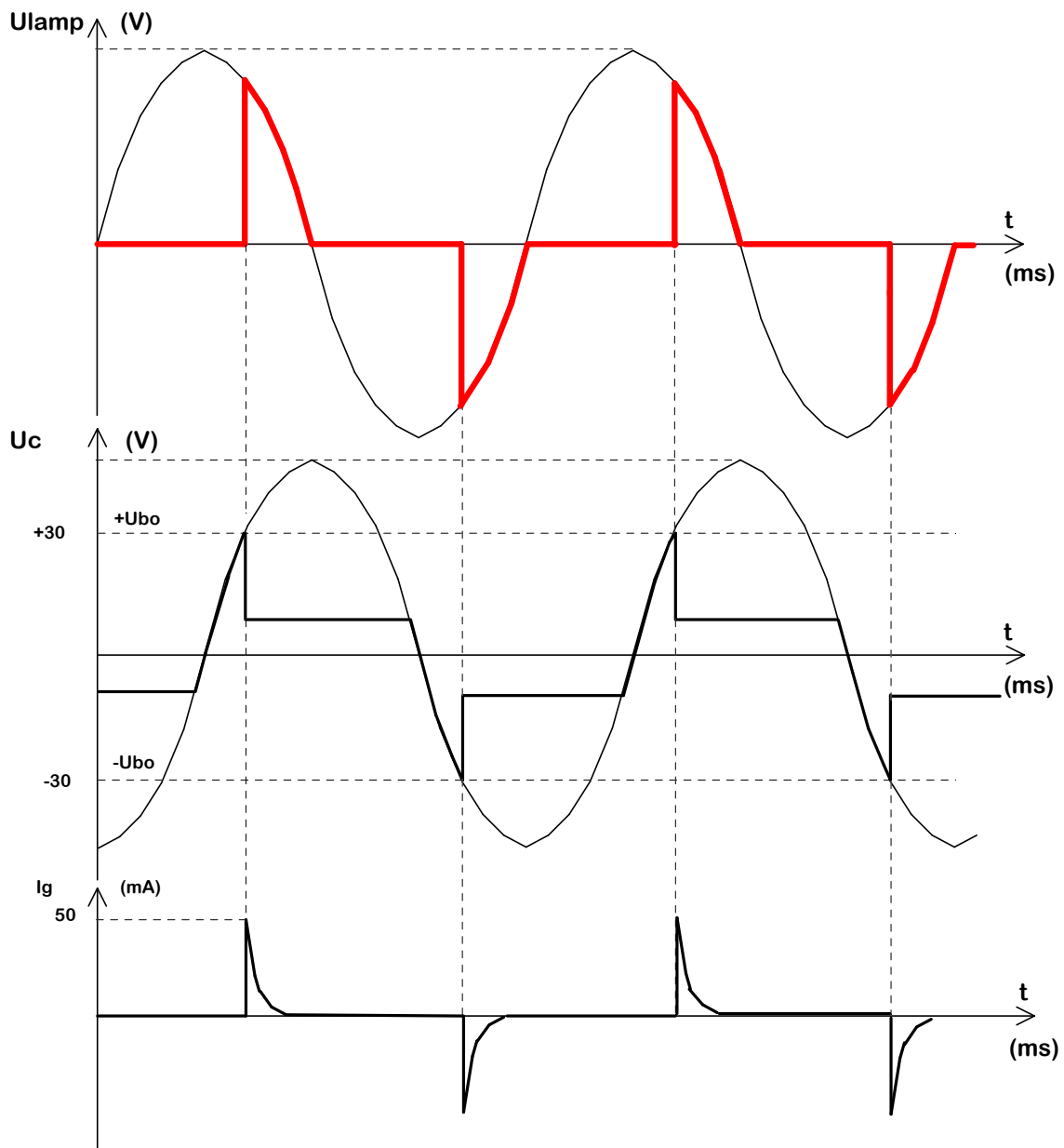
Figuur 7.20 toont een eenvoudige AC-controller die gebruik maakt van **fase-aansnijding**.^[36] De TRIAC controleert de motorspanning en bijgevolg ook het motortoerental. De regelbare weerstand VR_1 controleert de faseverschuiving tussen de gestroom en de voedende netspanning.



△ Fig.7.20 Principe van een AC-controller die gebruik maakt van TRIAC en DIAC.
Bron: <http://www.electronics-tutorials.ws>

Op deze manier kan de motor op verschillende tijdstippen van een periode van de netspanning ingeschakeld worden. De trigger-spanning wordt afgetakt van een tijdsbepalend RC-netwerk. Loopt de condensatorspanning voldoende op dan zal de DIAC plots doorslaan en also de TRIAC doen ontsteken door de ontlaadstroom van condensator C_1 . Omdat de TRIAC nu geleidt zal hij het triggercircuit ($VR_1 + C_1$) kortsluiten en de motor zal gedurende de rest van de alternantie de volle spanning ontvangen. Bij de nuldoorgang zal de TRIAC terug doven en het proces kan weer van vooraf aan beginnen.

[36] Fase-aansnijding is het schakelprincipe voor wisselspanning waarmee het vermogen van een belasting kan worden gereduceerd. Een nadeel van deze methode is dat de mooie sinusvorm teniet gedaan wordt. Zo ontstaan er hogere harmonischen (stoorsignalen) die erg nadelig kunnen zijn.



△ Fig.7.21 | Signaal/tijd-diagram van een AC-controller die gebruik maakt van TRIAC en DIAC.
 Bron: W. Van Wichelen