



Tyristorien käyttö modernissa tehoelektronikassa

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan Kandidaatintyö

2023

Juho Ovaska

Tarkastaja: Tommi Kärkkäinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Juho Ovaska

Tyristorien käyttö modernissa tehoelektronikassa

Sähkötekniikan Kandidaatintyö

2023

34 sivua, 20 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: Tommi Kärkkäinen

Avainsanat: tyristori, SCR, GTO, IGBT, tehoelektronikka, tehoelektronikan sovellukset

Tässä kandidaatintyössä selvitetään tyristorien sovelluskohteet modernissa tehoelektronikassa ja selvitetään missä tehoelektronikan sovelluksissa tyristorikomponentit ovat mahdollisesti korvautuneet tai korvautumassa paremmilla puolijohdekytkimillä. Työ suoritetaan kirjallisuuskatsauksena tehoelektronikan kirjallisuuteen ja tutkimustietoon.

Tyristorit eroavat transistoreista ominaisuuksiltaan huomattavasti ja soveltuvat parhaiten matalataajuisiin suuritehoisiin sovelluksiin. Tyristoreilla on vaihtoehtoisiin komponentteihin nähden useita etuja, kuten vaihtoehtoisiin komponentteihin verrattuna pienet jännitehäviöt, sekä myös haittoja kuten niiden vaatimat snubberipiirit ja hankala sammuttaminen pakotetusti kommutoituna.

Suuritehoisissa tehoelektronikan sovelluksissa – kuten HVDC sähkönsiirrossa – tyristorit ovat vahvassa asemassa, sillä vaihtoehtoiset komponentit eivät kykene toistaiseksi HVDC-verkon suurimpiin teholuokkiin. Pienemmissä teholuokissa tyristorit ovat 2000- ja 2010-lukujen aikana vaihtoehtoisten komponenttien nimellisarvoissa tapahtuneet kehityksen vuoksi hiljalleen korvautumassa vanhan kaluston uusiutuessa ja vaihtoehtoisten komponenttien käytön muuttuessa taloudelliseksi. Teollisuuden moottorikäytöissä tyristorit ovat pitkälti korvautuneet vaihtoehtoisilla komponenteilla 1990- ja 2000-lukujen aikana.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Juho Ovaska

Use of thyristors in modern power electronics

Bachelor's thesis

2023

34 pages, 20 figures and 1 table

Examiner: Tommi Kärkkäinen

Keywords: thyristor, SCR, GTO, IGBT, power electronics, power electronics applications

This bachelor's thesis will determine where thyristors are used in modern power electronics and whether they have been replaced or are being replaced with alternative semiconductor switches. The thesis is done as a literature review into power electronics literature and research.

The properties of thyristors differ from transistors significantly and the best applications for thyristors are those with low frequency and high power. Thyristors have several advantages when compared to alternative components like a small on-state voltage drop and disadvantages like the snubber circuits they require and difficult turn-off when forcefully commutated.

In high power electronics applications, like the HVDC grid, thyristors have a strong foothold as alternative components can't currently withstand the high-end power requirements of the HVDC system. When it comes to smaller power levels, due to the increases in the nominal values of alternative components during the 2000s and 2010s, thyristors are slowly being replaced as equipment is renewed and the use of alternative components becomes economically viable. Industrial electric drives have seen the replacement of thyristors with alternative components during the 1990s and 2000s.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

V_F	kynnysjännite	[V]
V_{BR}	estosuuntainen läpilyöntijännite	[V]
V_{BF}	myötäsuuntainen läpilyöntijännite	[V]
V_{ON}	johtotilan jännitehäviö	[V]
V_H	pitojännite	[V]
V_A	anodijännite	[V]
V_C	kollektorijännite	[V]
V_G	hilajännite	[V]
I_F	kynnysvirta	[A]
I_{LR}	estosuuntainen vuotovirta	[A]
I_{LF}	myötäsuuntainen vuotovirta	[A]
I_H	pitovirta	[A]
I_A	anodivirta	[A]
I_C	kollektorivirta	[A]
I_G	hilavirta	[A]
R_s	sisäinen emitteriresistanssi	[Ω]
t_s	varausaika	[s]
t_v	jännitteen nousuaika	[s]
t_i	viran putoamisaika	[s]
β_{off}	sammutusvahvistus	[1]

Lyhenteet

SCR	piityristori (Silicon Controlled Rectifier)
GTO	hilalta sammutettava tyristori (Gate Turn-Off thyristor)
IGBT	eristehilabipolaaritransistori (Insulated Gate Bipolar Transistor)
BJT	bipolaaritransistori (Bipolar Junction Transistor)
MOSFET	eristehilatransistori (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)
HVDC	korkeajännitetasavirta (High Voltage Direct Current)
HVAC	korkeajännitevaihtovirta (High Voltage Alternating Current)

LCC	vaihekommutoitu muunnin (Line Commutated Converter)
VSC	jännitelähdemuunnin (Voltage Source Converter)
MMC	modulaarinen monitasomuunnin (Multilevel Modular Converter)
PWM	pulssisuhdemodulaatio (Pulse Width Modulation)
GaN	galliumnitridi (Gallium Nitride)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

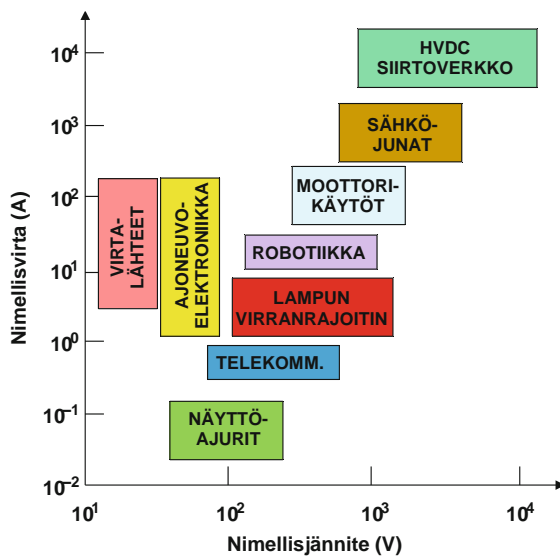
Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	7
2	Tutkimusmenetelmät	10
3	Puolijohdekytkimet.....	11
3.1	Diodit.....	11
3.2	SCR	13
3.3	GTO.....	16
3.4	IGBT	19
3.5	Yhteenveto	22
4	Sovelluskohteet.....	23
4.1	HVDC-siirtoverkko.....	23
4.2	Raidekäytöt	26
4.3	Teollisuuden suuntaajat.....	28
4.4	Moottorikäytöt.....	30
5	Johtopäätökset	31
	Lähteet	33

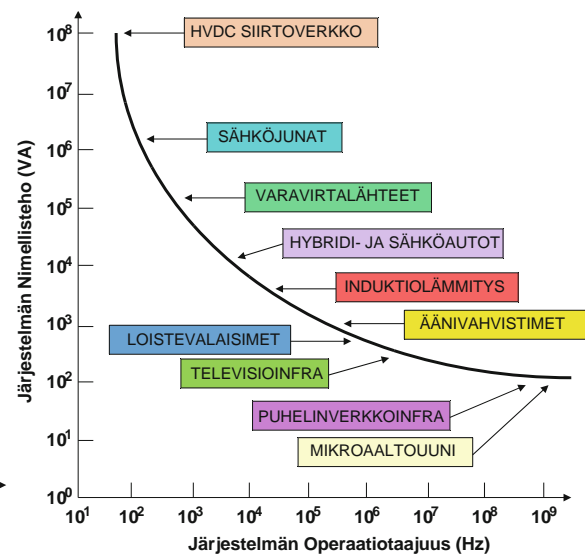
1 Johdanto

Tyristorit ovat eräs tehoelektronikan ja puolijohdekytkimien tärkeimmistä keksinnöistä, johtaen juurensa aina 1950-luvun loppupuolelle asti. Tyristorien kehitys jatkui niiden keksimisen jälkeen nopeasti ja jo vuonna 1970 yksittäinen tyristori kesti jo melkein 1kA virtaa ja 25kV:n jännitteen (Morris 1990 s. 60). Tyristorit korvasivatkin pian keksimisensä jälkeen aikaisemmin käytössä olleet tyhjiöputkikomponentit, kuten korkeajännitetasavirta (HVDC) -siirtoverkon elohopeasuuntaimet ja pienitehoisissa sovelluksissa tyratronit. Tyristorien nimi muodostuu englanninkielisistä sanoista ”thyatron transistor” (suomennettuna tyratronitransistori), sillä sen toiminta muistuttaa tyratronia, joka on ennen tyristoria käytössä ollut, ulospäin näkyviltä ominaisuuksiltaan samankaltainen elektroniputkikomponentti. Sanalla tyristori voidaan suomen kielessä viitata joko tyristoreihin komponenttiluokkana tai piityristoriin, joka on yksi monesta tyristorityypistä. Piityristorista käytetään myös nimeä SCR (Silicon Controlled Rectifier) (Krupali 2022). Epäselvyyksien välttämiseksi piityristorista käytetään tästä eteenpäin lyhennettä SCR.

Tehoelektronikka on hyvin laaja käsite, kattaen lukuisia sähkötekniikan sovelluksia. Sillä viitataan usein elektroniikkaan, jonka tarkoituksena on tehon ohjaaminen, säätäminen tai suuntaaminen. Tehoelektronikan sovelluksia voidaan tarkastella ja luokitella niiden nimellistehon (eli jännitteen ja virran) sekä toimintataajuuden perusteella. Esimerkiksi Baliga



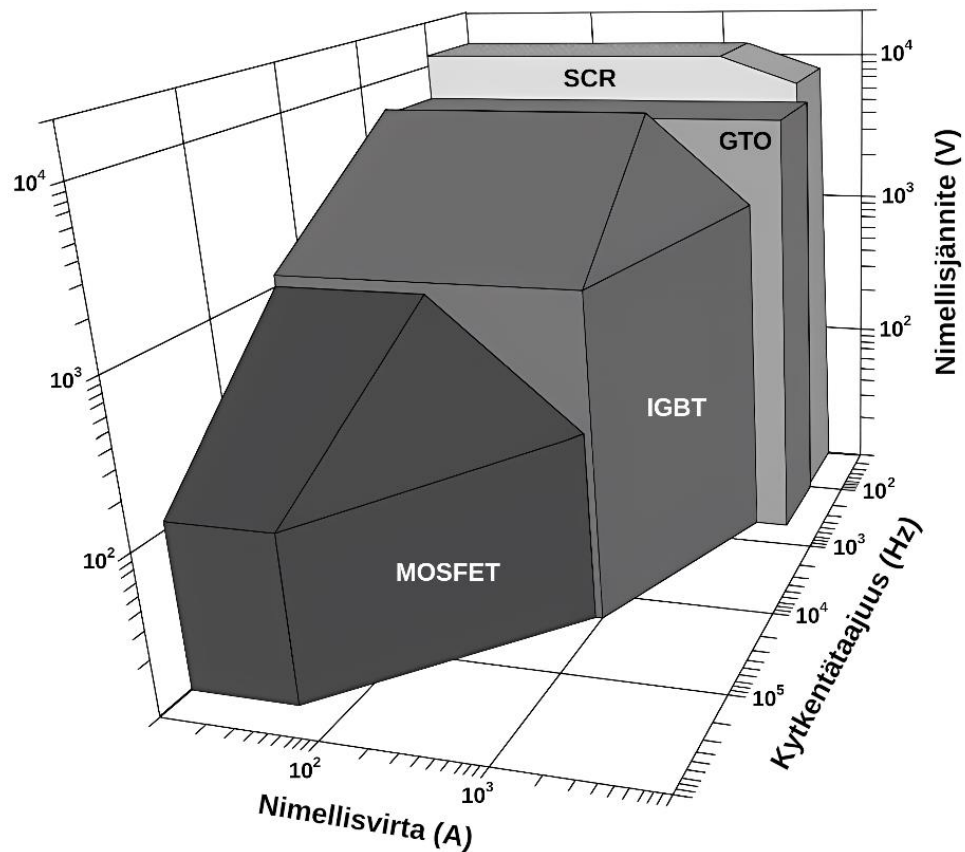
Kuva 1: Tehoelektronikan sovelluksia jännite-virta -as- teikolla. (Baliga 2019 s. 33)



Kuva 2: Tehoelektronikan sovelluksia taajuus-teho -as- teikolla. (Baliga 2019 s. 34)

(2019) antaa useita esimerkkejä tehoelektronikan eri parametriluokista, jotka on esitetty kuvissa 1 ja 2 (Baliga 2019 s. 33-34). Tehoelektronikka ulottuu suhteellisen pienitehoisista matkapuhelimista ja kodinkoneista aina siirtoverkkoihin asti, jolloin puhutaan jo gigawattiluokan tehoista.

Tyristoreilla on pitkä menneisyys tehoelektronikassa ja uusia tyristorityyppejä on kehitetty viimeisen 70 vuoden aikana useita erityyppisiin sovelluksiin. Vuosien saatossa on kuitenkin kehitetty useita tyristoreille vaihtoehtoisia puolijohdekytkintyyppisiä, joista huomattavimpana on eristehilabipolaaritransistori, eli IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Tehoelektronikan eri sovellukset vaativat komponenteilta eri ominaisuuksia, kuten tietynsuuruisen jännitteen- ja virrankeston tai kytkentätaajuuden. Tämän vuoksi komponenttien valinta tapahtuu sovelluskohtaisten vaatimusten perusteella, eikä yksi komponentti ole paras valinta kaikkiin sovelluksiin. Tehoelektronikan puolijohdekytkimien tyypillisiä toimintalueita on esitetty kuvassa 3, josta huomataan että tyristorit (SCR ja GTO) soveltuvat parhaiten matalille taajuuksille ja suurille tehoille (Lutz, et al. 2018 s. 28).



Kuva 3: Tehoelektronikan kytkeitä virta-jännite-taajuus -asteikolla. (Lutz, et al. 2018 s. 28)

Herää siis kysymys: Ovatko tyristorit edelleen tehoelektroniiikan paras kytkinvalinta suurille kytkentätehoille, vai onko jokin parempi kytkinkomponentti korvannut niitä joissain sovelluksissa?

Tässä työssä tarkastellaan ja vertaillaan tyristorien ja muiden tehoelektroniiikassa käytössä olevien puolijohdekytkinkomponenttien ominaisuuksia sekä selvitetään, onko joissain tehoelektroniiikan monista sovelluksista tapahtunut yllä mainittu tyristorien korvaantuminen ominaisuuksiltaan paremmilla komponenteilla vai onko tyristori kyseiseen sovellukseen ominaisuuksiltaan parhaiten soveltuva komponentti. Työn ensimmäisessä osiossa perehdytään eri tyristorityyppien sekä muiden tehoelektroniiikan puolijohdekytkimien teoriaan ja ominaisuuksiin ja toisessa osiossa tarkastellaan useampaa eri tehoelektroniiikan sovellusta niiden käyttämien puolijohdekytkimien osalta.

2 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus suoritetaan kirjallisuuskatsauksena, perehtymällä tehoelektroniikan kirjallisuuden ja mahdollisimman uuteen tutkimustietoon, joka on yleensä konferenssijulkaisun tai artikkelin muodossa.

Kirjallisuuden perustella selvitetään eri tyristorityyppien ja muiden puolijohdekytkinten keskeisimmät ominaisuudet, kuten ohjaussignaalin tyyppi (jännite vai virta), ohjaussignaalin aikatazon käyrämuoto, kytkemisnopeus, läpilyöntijännitteet esto- ja myötäsuuntaan, sekä muut komponentille mahdollisesti yksittäiset ominaisuudet. Komponentin toiminta tai sovellus jossa sitä käytetään asettavat vaatimuksia näiden parametrien suhteen. Esimerkiksi sovellus jossa puolijohdekytkintä käytetään voi tarvita tietyn jännitteen- ja virran keston ja komponentti voi asettaa maksimirajan kytkentätaajuudelle suhteen.

Tutkimustiedon perusteella pyritään selvittämään käytännön syyt, miksi tiettyä puolijohdekytkintä käytetään tietyssä sovelluksessa, eli mitä ominaisuuksia sovellus vaatii kytkin-komponentilta, sekä ovatko vaihtoehtoiset kytkin-komponentit korvanneet sovelluksessa mahdollisesti aikaisemmin käytössä olleen tyristorin. Tutkimustiedon julkaisuajankohdan tulisi asettua – mikäli mahdollista – ainakin 2010-luvulle, jotta saatu tieto on mahdollisimman ajankohtaista, tosin tämä ei välttämättä ole aina mahdollista. Tyristorien kanssa kilpailevien komponenttien (lähinnä IGBT:n) nimellisarvoissa 2000- ja 2010- lukujen aikana tapahtunut kehitys on havaittavissa viiveellä, kun komponentit siirtyvät tutkimuksesta markkinoille. Tutkimustiedosta selvitetään mahdollisimman tarkka ajankohta, jolloin siinä tarkasteltavat komponentti (tai komponentit) ovat olleet käytössä ja mahdollisuuksien mukaan komponentin sen aikaisia nimellisarvoja ja sovelluksen teholuokka. Näiden avulla kyetään toteamaan missä sovelluksissa ja teholuokissa tyristorikomponentit ovat mahdollisesti korvautuneet.

Työssä keskitytään aluksi tutkimaan puolijohdekytkimiä ja niiden ominaisuuksia erikseen, jonka jälkeen siirrytään tarkastelemaan tarkasteltuja komponentteja käyttäviä sovelluksia ja selvittämään eri komponenttien soveltuvuutta kyseiseen sovellukseen.

3 Puolijohdekytkimet

Puolijohdekytkimet ovat eräitä modernin elektroniikan tärkeimmistä komponenteista, jotka mahdollistavat sähkötehon (eli virran ja jännitteen) kytkemisen ja suuntaamisen. Puolijohdekytkimet perustuvat materiaaleihin joiden ominaisuudet ovat johteiden ja eristeiden väliltä. Tällaisia materiaaleja kutsutaan puolijohteiksi. Puolijohteiden resistiivisyys voi vaihdella 10^{-4} – $10^9 \Omega\text{cm}$ ja se putoaa lämpötilan noustessa, toisin kuin johteilla. (Lutz, et al. 2018 s. 21) Kiderakenteella puolijohteet ovat siis aineita, joiden kiderakenteesta vapautuu helposti varauksenkuljettajia, esimerkiksi lämmön tai ulkoisen jännitteen vaikutuksesta. Puolijohteiden johtavuutta voidaan muuttaa lisäämällä materiaaliin epäpuhtauksia, jotka tuovat puolijohdeen kiderakenteeseen ylimääräisiä varauksenkantajia.

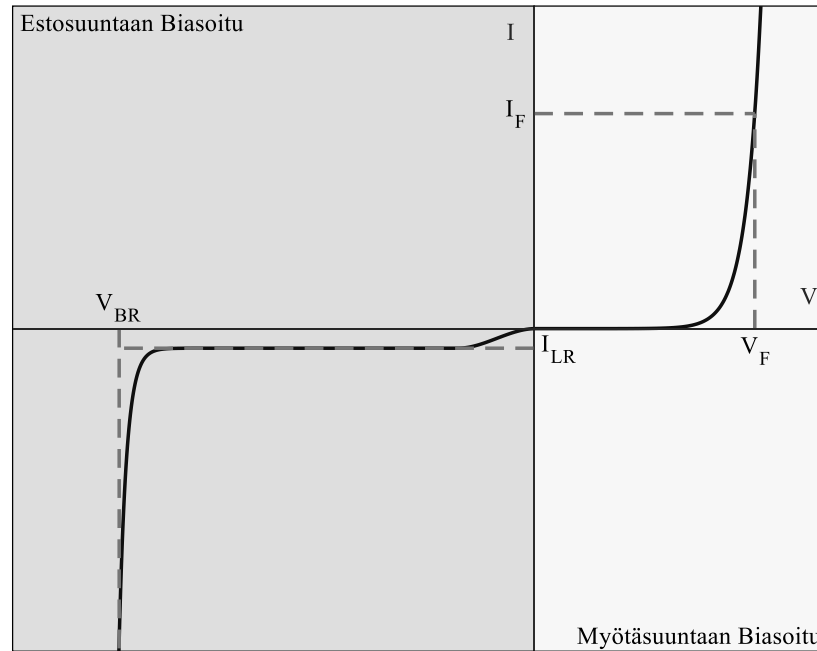
Lisäämällä kiderakenteeseen atomeja, joilla on kiderakenteen sitoutumisen jälkeen vapaa elektroni, saadaan N-tyyppin puolijohde ja lisäämällä atomeja, joilta puuttuu yksi elektroni kiderakenteeseen sitoutumiseen, saadaan P-tyyppin puolijohde. P-tyyppin puolijohde ei todellisuudessa sisällä varaukseltaan positiivisia varauksenkuljettajia, mutta kiderakenteessa olevat elektroniaukot käyttäytyvät positiivisten varaustenkuljettajien tavoin. (Lutz, et al. 2018 s. 35) Hyödyntämällä P- ja N-tyyppin puolijohteita erilaisilla epäpuhtauspitoisuuksilla, voidaan rakentaa lukuisia, ominaisuuksiltaan erilaisia puolijohdekomponentteja. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään yleisimpiä tehoelektroniikassa esiintyviä puolijohdekomponentteja.

3.1 Diodit

Diodit ovat zenerdiodia – joka ei ole tehoelektroniikan kannalta relevantti – lukuun ottamatta puolijohteiden yksinkertaisimpia sovelluksia. Diodi voi perustua joko Schottky-liitokseen, eli liitokseen metallin ja P- tai N-tyyppin puolijohdeen välillä tai PN-liitokseen, jossa puolijohde vaihtuu P-tyypistä N-tyypiksi samassa kiteessä. Schottky-diodit ovat PN-diodeja nopeampia, mutta niiden läpilyöntijännitteet ovat tyyppillisesti pienempiä. (Baliga 2019 s. 171, 207)

Diodeilla on kaksi toimintatilaa: myötäsuuntaan biasoitu ja estosuuntaan biasoitu. Myötäsuuntaan biasoituna diodi päästää lävitseen merkittävän määrän virtaa – joka riippuu eksponentiaalisesti sen yli olevasta jännitteestä (Kuva 4) – ja estosuuntaan biasoituna vain yleisesti merkityksettömän pienen vuotovirran estosuuntaan. Diodeilla pystytään siis ohjamaan

vaihtojännitteen positiivinen ja negatiivinen puolijakso eri suuntiin. Koska diodien johtavuutta ei pystytä kuitenkaan ohjaamaan ohjesignaaleilla, niiden sovellukset rajoittuvat tehoelektronikassa tyypillisesti pienitehoisiin suuntaajiin. on esitetty kuvassa 4 tyypillinen diodin ominaiskäyrä (Lutz, et al. 2018 s. 203, 284), jossa toimintatila vaihtuu virta-akselin yli kuljettaessa.



Kuva 4: Diodin tyypillinen ominaiskäyrä.

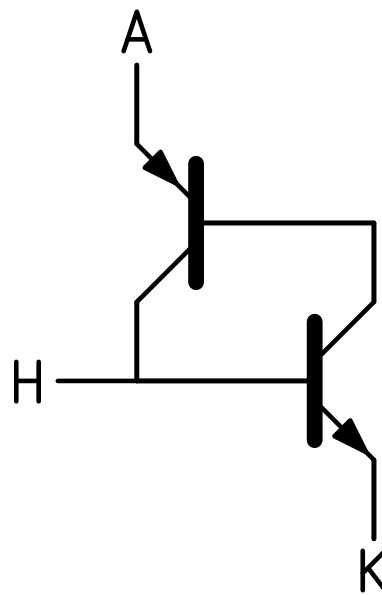
Kuvassa 4 näkyy diodin aiemmin mainittu eksponentiaalinen käyttäytyminen myötäsuuntaan biasoituna sekä myös vyöryläpilyönti, joka tapahtuu tarpeeksi suurella estosuuntaisella jännitteellä, eli läpilyöntijännitteellä. Vyöryläpilyönnissä puolijohdeessa tapahtuu voimakas virran moninkertaistuminen, joka tyypillisesti johtaa komponentin tuhoutumiseen. (Baliga 2019 s. 90) Diodille voidaan siis määrittää kuvaan merkityt läpilyöntijännite (V_{BF}), estotilan vuotovirta (I_{LR}) sekä kynnysjännite (V_F). Kynnysjännite on virran eksponentiaalisen käyttäytymisen vuoksi hankalaa määrittellä yksiselitteisesti, mutta esimerkiksi Lutz, *et. al.* (2018 s.119) määrittelevät sen olevan jännite, jolla puolijohde- virrantiheys on noin 5 A/cm. Kuvassa kynnysvirta I_F vastaisi tätä virrantiheyttä.

Diodeja monimutkaisimmilla puolijohdekomponenteilla on myös havaittavissa PN-liitok- sista ominaiskäyrän eksponentiaalinen käyttäytyminen, tosin komponentin mahdollisesti vaatima ohjaussignaali vaikuttaa ominaiskäyrän muotoon.

Diodit ovat siis hyödyllisiä yksinkertaisiin ja pienitehoisiin suuntaussovelluksiin, mutta ne eivät kuitenkaan sovellu monimutkaisempaan tehon ohjaamiseen, johon tarvitaan kytkeviä komponentteja.

3.2 SCR

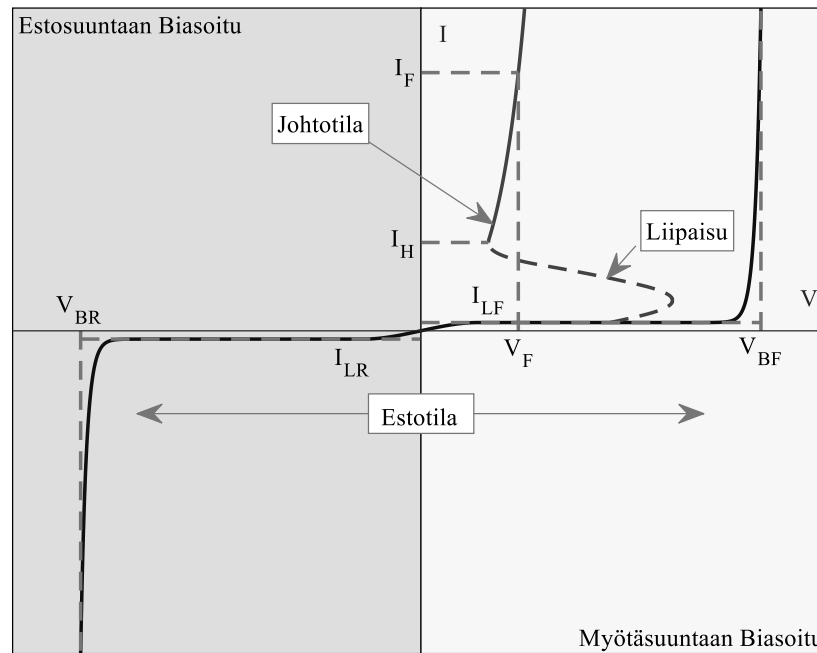
SCR eli piityristori on ensimmäinen puolijohdekytkin, jolla elektroniputkikomponentit alkoivat korvaantumaan. SCR on kytkinkomponentti, eli sen johtavuutta voidaan ohjata sähköisesti. Sillä on kolme terminaalaa: anodi (anode), katodi (cathode) ja hila (gate). SCR voidaan ajatella rakennetasolla – tarkastelematta oikeaa kolmiulotteista rakennetta tarkemmin – kahtena peräkkäin kytkettynä PN-liitoksena, jolloin sen sijaiskytkennäksi saadaan huomioiden sisäisiä resistansseja kuvassa 5 esitetty NPN- ja PNP-transistorin sarjaankytkentä (Lutz, et al. 2018 s. 315). SCR on virtaohjattu komponentti, eli anodin ja katodin välistä johtavuutta voidaan ohjata hilavirralla.



Kuva 5: SCR:n yksinkertaistettu sijaiskytkentä. (A = anodi, H = hila, K = katodi)

SCR sekä tyristorit yleensä, eroavat toiminnaltaan transistoreista huomattavasti. SCR:llä ei ole sisäisten bipolaaritransistorien positiivisen takaisinkytkennän takia transistoreille tyypillistä aktiivitilaa vaan SCR toimii aina kytkimenä, eli anodin ja katodin välinen johtavuus on aina liipaisun tai sammumisen aiheuttaman transientitilan ulkopuolella toinen ääriarvoistaan (Lutz, et al. 2018 s. 315-316). Toinen SCR:n tyristoreille tyypillinen ominaisuus on, että kun SCR on liipaisu johtavaan tilaan, johtavuuden ylläpitäminen ei vaadi jatkuvaa

hilavirtaa. Tämä on havaittavissa myös sijaiskytkennästä; kun molemmat sisäiset bipolaaritransistorit ovat saturaatiotilassa, ne ylläpitävät toistensa kantavirrat. SCR sammuu, kun anodivirta putoaa SCR:n ns. pitovirtaa pienemmäksi, jolloin sisäiset bipolaaritransistorit eivät enää kykene ylläpitämään toistensa kantavirtoja. SCR:n tyypillinen ominaiskäyrä on esitetty kuvassa 6 (Baliga 2019 s. 645).

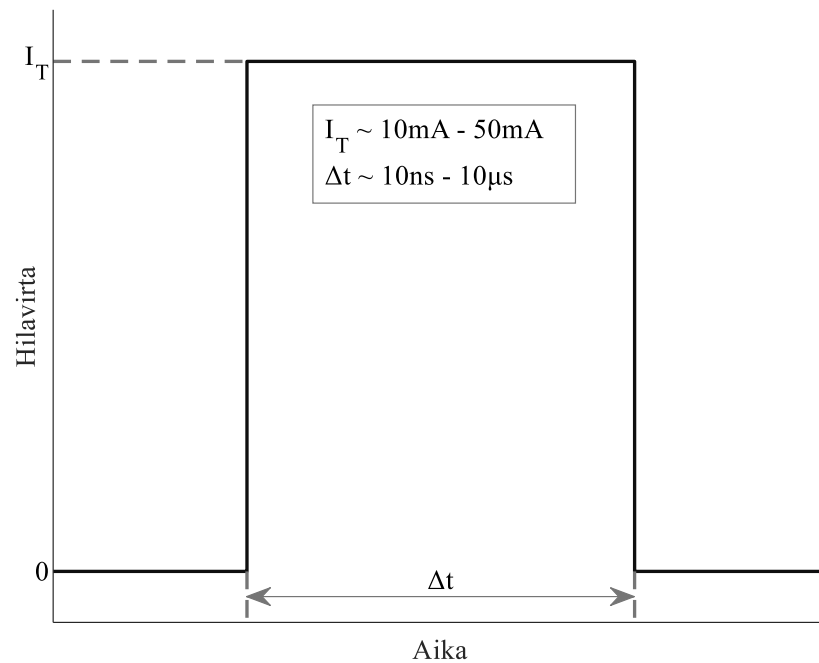


Kuva 6: SCR:n tyypillinen ominaiskäyrä.

Ominaiskäyrältä havaitaan SCR:n kaksi toimintatilaa: estotila ja johtotila. Estotilassa SCR:n läpilyöntijännitteet estosuuntaan (V_{BR}) ja myötäsuuntaan (V_{BF}) ovat symmetriset, mutta lämpötilan noustessa riittävästi V_{BF} alkaa laskemaan, jolloin läpilyöntijännitteiden välille syntyy epäsymmetria (Baliga 2019 s. 666-667). Kun SCR liipaistaan tarpeeksi suurella hilavirralla johtotilaan, se käyttäytyy anodivirran ollessa pitovirtaa (I_H) suurempi kuten PN-diodi (Baliga 2019 s. 669). Kun anodivirta putoaa alle I_H :n SCR sammuu, eli siirtyy takaisin estotilaan. Ominaiskäyrään on myös merkitty SCR:n vuotovirrat estotilassa myötäsuuntaan (I_{LF}) sekä estosuuntaan (I_{LR}).

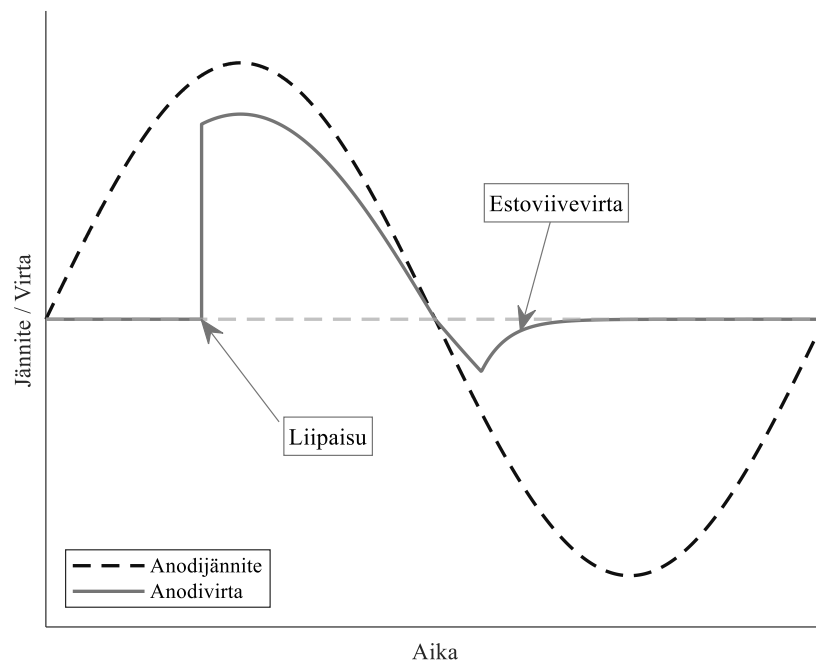
SCR ei vaadi johtotilan ylläpitämiseksi jatkuvaa hilavirtaa, vaan estotilasta johtotilaan siirtymiseen – eli liipaisuun – riittää, että hilalle syötetään riittävän pitkä virtapulssi. Liipaisuun vaadittavan virtapulssin pituus riippuu SCR:n rakenteesta sekä sitä biasoivan anodi-katodi -jännitteen suuruudesta ja on tyypillisesti kestoaltaan 10ns – 10 μ s (Baliga 2019 s. 679-683). Virtapulssin nousu- ja laskunopeudella ei ole liipaisuun kannalta väliä. Liipaisuun vaadittava

virran amplitudi on tyypillisesti kymmenien milliampeerien luokkaa (Baliga 2019 s. 672-674). Liipaisuun vaadittavan ideaalisen virtapulssin käyrämuoto on esitetty kuvassa 7. SCR voi myös tulla liipaistuksi, jos anodi-katodi -jännite muuttuu liian nopeasti (dV/dt liian suuri), jolloin SCR:n sisäinen kapasitanssi varautuu/purkaantuu ja kapasitanssin vetämä/syöttämä virta liipaisee sen (Lutz, et al. 2018 s. 321-322). Myös SCR:n puolijohteeseen osuvat riittävän energiset fotonit voivat liipaista sen, mutta tämä ei ole monien sovellusten kannalta relevanttia.



Kuva 7: SCR:n liipaisuun vaadittava hilavirtapulssi.

Koska SCR:n sammuminen vaatii anodi-katodi -jännitteen polariteetin muuttumisen, sitä käytetään yleensä vaihtojännitepiireissä, sillä SCR:n sammuttaminen DC-piirissä on hankalaa. Kun SCR:n anodi-katodi -jännite muuttuu estosuuntaan biasoivaksi ja SCR on johtavassa tilassa, se ei sammu heti vaan päästää virtatransientin estosuuntaan koska puolijohdemateriaali ei tyhjene välittömästi varauksenkantajista (Kuva 8) (Baliga 2019 s. 699). Tästä käytetään termiä estoviivevirta (reverse recovery).



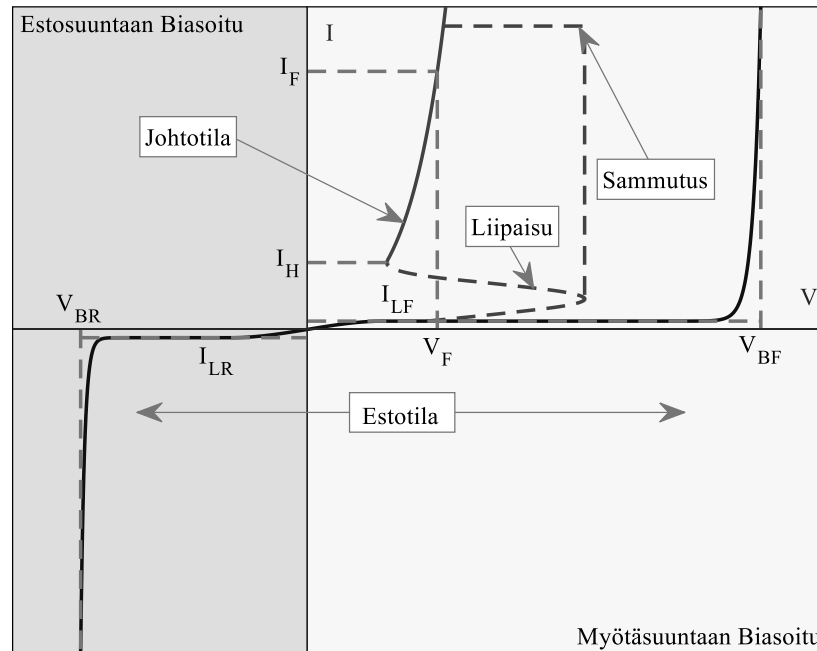
Kuva 8: SCR:n ajosykli sinimuotoisella vaihtojännitteellä.

Estoviivevirta on suurin rajoittavin tekijä SCR:n toimintataajuuden suuruudelle, sillä se aiheuttaa suuren tehohäviön (Baliga 2012 s. 43). SCR:n läpilyöntijännitteiden suuruudet vaikuttavat estoviivevirran keston, sillä läpilyöntijännite ja estoviivevirran kesto kasvavat puolijohteen pituuteen verrannollisina (Baliga 2012 s. 28-30). Tällöin mitä suurempi läpilyöntijännite SCR:lle valitaan, sen huonompi maksimitoimintataajuus sillä on, olettaen että tiettyä tehohäviöt halutaan rajoittaa tiettyyn arvoon. SCR:lle tyypillinen maksimitoimintataajuus on 200Hz – 300Hz, kun läpilyöntijännite on 5kV – 10kV (Baliga 2012 s. 55). SCR on siis käytännössä hyödyllinen vain, kun operoidaan verkkotaajuuksilla.

3.3 GTO

GTO eli hilalta sammutettava tyristori on 1980-luvulla kehitetty, ominaisuuksiltaan SCR:n kanssa samankaltainen kytkinkomponentti (Lutz, et al. 2018 s. 330). GTO eroaa rakenteeltaan SCR:stä siten, että se pystytään sammuttamaan syöttämällä hilalle negatiivinen virtapulssi, jonka suuruus on riippuvainen anodivirran suuruudesta. Negatiivisen virran voidaan ajatella poistavan varauksenkantajat puolijohdemateriaalista, jolloin sisäisten bipolaaritransistorien takaisinkytkentä katkeaa. GTO:t ovat myös tyypillisesti läpilyöntijännitteiltään asymmetrisiä ($V_{BR} < V_{BF}$), sillä niiden tyypillinen käyttökohde on DC-piiri, jossa estosuuntainen biasoituminen on mahdotonta (Baliga 2019 s. 715). Myös symmetrisiä GTO:ita on saatavilla, tosin läpilyönnin symmetrisyyden mahdollistava rakenne aiheuttaa suuremman

jännitehäviön johtotilassa, eli asymmetrinen GTO on parempi, jos läpilyönnin symmetrisyyttä ei tarvita. Asymmetrisen GTO:n tyypillinen ominaiskäyrä on esitetty kuvassa 9. Symmetrinen GTO eroaa tästä vain sillä, että estosuuntainen läpilyönti tapahtuu samalla etäisyydellä virta-akselista kuin myötäsuuntainen läpilyönti.



Kuva 9: Asymmetrisen GTO:n tyypillinen ominaiskäyrä.

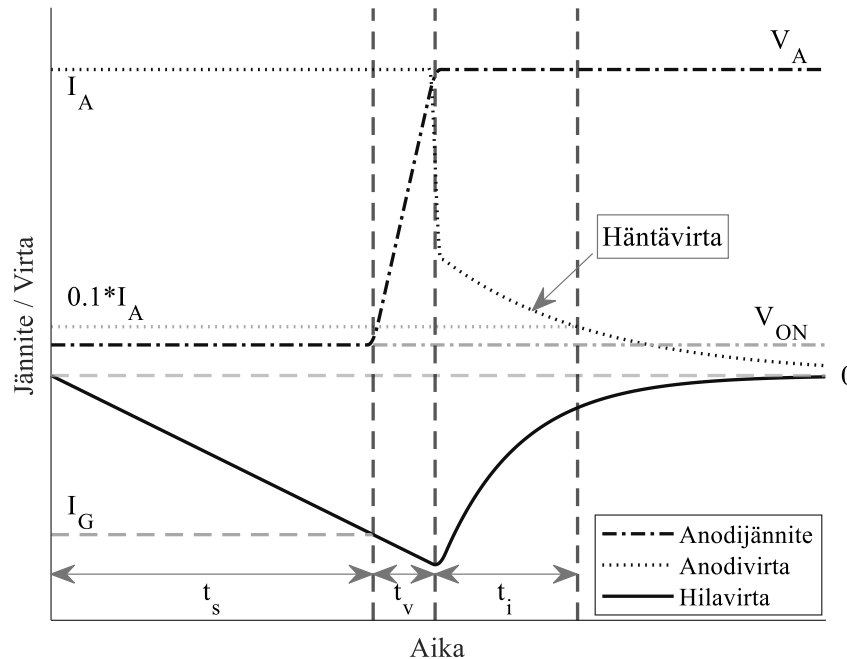
Ominaiskäyrältä havaitaan edellisessä luvussa käsitellyt seikat ja myös läpilyöntijännitteiden epäsymmetrisyys. GTO:n liipaisua ja pitovirran (I_H) alittamisen aiheuttamaa sammumista ei tässä luvussa käsitellä tarkemmin, sillä ne tapahtuvat GTO:lla samalla tavoin kuin SCR:llä.

Kuten aiemmin jo mainittiin, GTO:n sammuttamiseen tarvitaan anodivirran suuruudesta riippuva negatiivinen hilavirtapulssi. Koska sammuttamiseen vaadittava hilavirta riippuu anodivirran suuruudesta, voidaan GTO:lle määrittää sammutusvirtavahvistus (β_{off}) yhtälön 1 mukaisesti (Lutz, et al. 2018 s. 330).

$$\beta_{off} = -\frac{I_A}{I_G} \quad (1)$$

Sammutusvirtavahvistus on tyypillisesti 3 – 5, eli GTO:n sammuttamiseen tarvitaan liipaisuun nähden huomattavan suuri hilavirta. GTO:n sammuminen voidaan jakaa useampaan vaiheeseen ja se voidaan sammuttaa joko askelmallisella tai ramppimaisella virtapulsilla.

(Baliga 2019 s. 717) GTO:n sammutusaaltomuodot induktiiviselle kuormalle ramppimaisella hilavirtapulssilla on esitetty kuvassa 10.



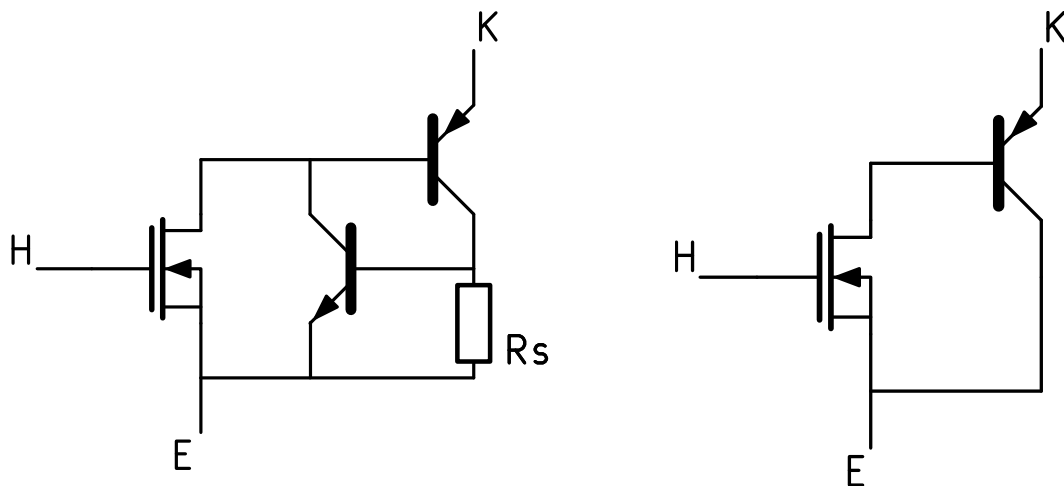
Kuva 10: GTO:n sammutus ramppimaisella hilavirtapulssilla. (induktiivinen kuorma)

GTO:n sammuminen tapahtuu kolmessa osassa (Baliga 2019 s. 717-737). Ensimmäinen osa (kuvassa t_s) on varausaika (storage time), jota ennen sisäisten bipolaaritransistorien positiivinen takaisinkytkentä ei katkea. Varastointiajan kestoa voi nopeuttaa joko kasvattamalla askelmaisen virtapulssin amplitudia tai nostamalla ramppimaisen pulssin kulmakerrointa. Toinen osa (kuvassa t_v) on jännitteen nousuaika (voltage rise time), jolloin anodi-katodi-jännite nousee johtotilan kynnyksjännitteestä (V_{ON}) takaisin estotilassa pidettävään jännitteeseen (V_A). Viimeinen osa on virran laskusaika (current fall time), jossa anodivirta putoaa nolnaan. Putoamisen aaltomuoto riippuu siitä, onko GTO symmetrinen vai asymmetrinen. Virran hidasta putoamista kutsutaan häntävirraksi.

Jäännösvirta on suurin rajoittavin tekijä GTO:n toimintataajuudelle, kun sen sammuttaminen suoritetaan negatiivisella hilavirtapulssilla (Baliga 2012 s. 123). Jäännösvirta aiheuttaa GTO:n sammussa suuren tehohäviön. GTO:n puolijohdemateriaalin ominaisuudet vaikuttavat jäännösvirran keston (Baliga 2012 s. 126). Tällöin mitä pienempi johtotilan kynnyksjännite (V_{ON}) GTO:lle valitaan, sen suuremmaksi jäännösvirran kesto muuttuu. GTO:n läpi-lyöntijännite ei juurikaan vaikuta jäännösvirran keston (Baliga 2012 s. 126, 147). Kytke-mishäviöt rajoittavat GTO:n taajuuden tyypillisesti satoihin hertzeihin.

3.4 IGBT

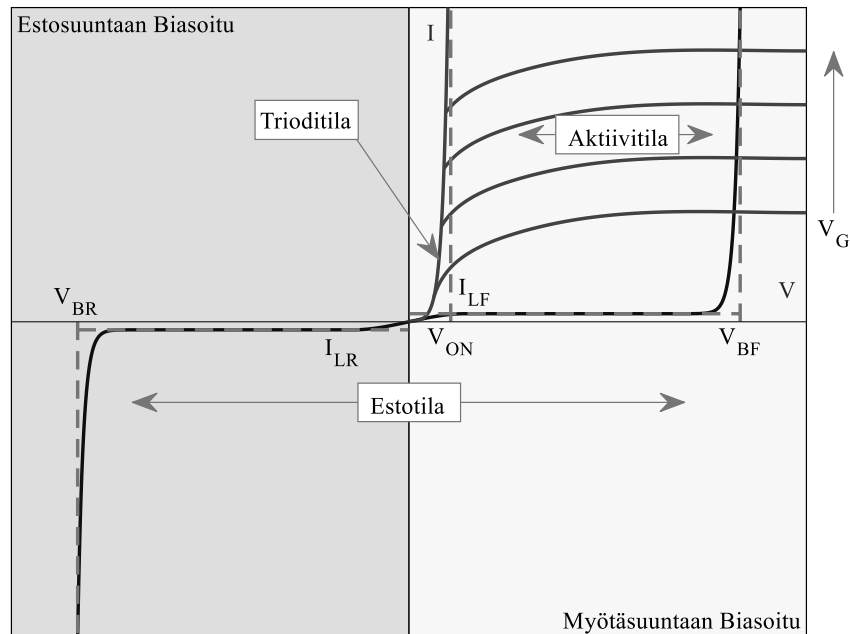
IGBT eli eristehilabipolaaritransistori on 1980-luvun alkupuolella kehitetty, rakenteeltaan hyvin tyristorien kanssa samanlainen puolijohdekytkin (Baliga 2019 s. 783, 788). Se voidaan mieltää MOS-rakenteella jänniteohjattavaksi bipolaaritransistoriksi, jonka tulo-ominaisuudet näyttävät ulospäin kanavatransistorille (eli korkea tuloimpedanssi ja jänniteohjaus) ja lähtöominaisuudet bipolaaritransistorille. IGBT:tä voidaan mallintaa kuvan 11 sijaiskytkennällä, joka ottaa huomioon IGBT:n sisäisen parasiittisen tyristorin (Baliga 2019 s. 766). IGBT:n puolijohderakenne suunnitellaan tyypillisesti siten, että sisäinen emitteriresistanssi R_s on mitättömän pieni, jolloin IGBT:n sisäinen NPN-transistori ei johda normaalitoiminnassa. Tällöin IGBT:n sijaiskytkentä yksinkertaistuu kuvan 12 sijaiskytkennäksi, jossa PNP-transistorin kantavirtaa ohjataan kanavatransistorilla. Esitetyt sijaiskytkennät ovat N-kanavaiselle IGBT:lle ja ne ovat P-kanavaiselle IGBT:lle samat, mutta sijaiskomponentit vaihtuvat komplementteikseen.



Kuva 11: IGBT:n sijaiskytkentä. (K = kollektori, E = emitteri, H = hila, R_s = sisäinen emitteriresistanssi) Kuva 12: IGBT:n sijaiskytkentä ilman parasiittista tyristoria. (K = kollektori, E = emitteri, H = hila)

Kuten kuvan 11 sijaiskytkennästä huomataan, IGBT:llä on sisäinen parasiittinen tyristori, joka on normaalitoiminnassa estotilassa. Jos IGBT:llä kytketään liian suuri virta, sisäisen emitteriresistanssin R_s yli putoava jännite voi liipaista IGBT:n parasiittisen tyristorin, jolloin kollektori-emitteri -virtaa ei voida enää ohjata hilajännitteellä, joka johtaa tyypillisesti komponentin hajoamiseen (Baliga 2019 s. 939). Parasiittinen tyristori voi myös tulla liipaistuksi muilla SCR-luvussa käsitellyillä mekanismeilla.

Vaikka IGBT:n rakenteeseen kuuluu parasiittinen tyristori, se käyttäytyy normaalitoiminnassa transistorin tapaan, eli hilajännitteellä voidaan ohjata kollektori-emitterivirtaa. N-kanavaisen IGBT:n ominaiskäyrä on esitetty kuvassa 13 (Baliga 2019, s. 764).

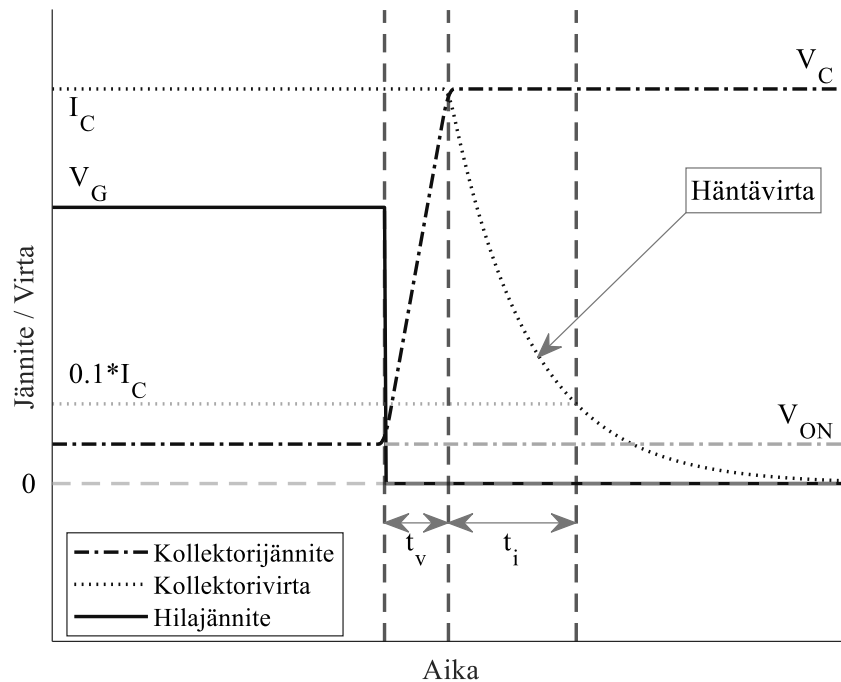


Kuva 13: IGBT:n tyypillinen ominaiskäyrä.

Kuten ominaiskäyrältä huomataan, IGBT käyttäytyy hyvin samankaltaisesti kanavatransistorien kanssa. Ominaiskäyrältä havaitaan kanavatransistoreille tyypilliset kolme toimintatilaa, tosin IGBT:itä ajetaan yleensä trioditilassa kytkimenä riittävän suurella hilajännitteellä (V_G), jolloin IGBT näyttää kytkettävälle piirille myötäsuntaan biasoidulta PN-diodilta (Baliga 2019, s. 764-765). IGBT on estotilassa, kunnes hilajännite (V_G) nousee pitojännitteen (V_H) yläpuolelle. IGBT:itä on läpilyöntijännitteiltään symmetrisiä (eli $V_{BR} = -V_{BF}$) – jolloin komponenttia voidaan operoida vaihtojännitteillä – sekä tasajännitesovelluksia varten asymmetrisiä, joiden estosuuntainen läpilyöntijännite (V_{BR}) on myötäsuntaista läpilyöntijännitettä (V_{BF}) huomattavasti pienempi. Johtotilassa (eli kun ajetaan trioditilassa kytkimenä) IGBT:n johtotilan jännitehäviö (V_{ON}) on riippuen komponentin läpilyöntijännitteistä sekä puolijohteen ominaisuuksista tyypillisesti 1–4 voltia (Baliga 2019, s. 812, 822 Baliga 2012, s. 343).

IGBT:n kytkentäilmiöitä voidaan tarkastella liipaisun (V_G ylittää V_H :n) sekä sammumisen (V_G alittaa V_H :n) osalta. Liipaisussa IGBT:n yli putoava jännite kasvaa hetkellisesti kollektorivirran noustessa virrantiheyden suuruudesta riippuen ennen kynnysjännitteeseen (V_{ON}) asettumista, aiheuttaen tehohäviöitä (Baliga 2019, s. 880–882). Tämä ei tyypillisesti

kuitenkaan ole rajoittava tekijä sovellusten kannalta (Baliga 2019, s. 922). IGBT:n sammumisessa on havaittava samankaltainen häntävirta kun GTO:lla, joka osoittautuu häviöiden kannalta rajoittavaksi tekijäksi. IGBT:n sammuminen induktiivisella kuormalla on esitetty kuvassa 14 (Baliga 2019, s. 896). Resistiivisellä kuormalla jännite ja kollektorivirta vääristyvät hieman.



Kuva 14: IGBT:n sammuminen induktiivisella kuormalla.

Kuten sammumiskäyrältä voidaan lukea, IGBT:n sammuminen tapahtuu kahdessa osassa: jännitteen nousu (t_v) ja virran lasku (t_i). Sammumisen kesto riippuu puolijohdemateriaalin ominaisuuksista, mutta jännitteen nousu kestää tyypillisesti n. 850ns ja virran laskuaika n. 11 μ s, jolloin koko sammumistapahtuma kestää n. 12 μ s (Baliga 2019, s. 901). Virranlaskussa tapahtuva häntävirta on suurin kytkentähäviöiden lähde IGBT:n normaalitoiminnassa. Kytkentähäviöiden suuruus on riippuvainen samoista puolijohteen ominaisuuksista, jotka määrittävät IGBT:n johtotilan jännitehäviöt (V_{ON}) (Baliga 2019, s. 931), jolloin komponentin suunnittelussa tulee tehdä kompromissi näiden suhteen. IGBT:n kytkentähäviöt ovat suurin kytkentätaajuutta rajoittava tekijä. IGBT:n maksimitoimintataajuudet vaihtelevat komponentin ominaisuuksista riippuen sadoista hertseistä kilohertzeihin (Baliga 2019, s. 925 Baliga 2012, s. 204, 228). IGBT:lla pystytään siis saavuttamaan suuremmat kytkentätaajuudet kuin GTO:lla. Asymmetrisillä IGBT:illä on tyypillisesti pienemmät häviöt (Baliga 2019, s. 931). IGBT:itä on saatavilla kaupallisesti jopa 6kV:n läpilyöntijännitteillä (Lutz, et al. 2018,

s 418-419). IGBT-rakenteita on tutkittu 20kV:n läpilöyntijännitteisiin asti, mutta näillä läpilöyntijännitteillä varustettuja komponentteja ei ole vielä ilmestynyt markkinoille (Lutz, et al. 2018, s. 419 Baliga 2012, s. 293).

3.5 Yhteenveto

Tyristorit eroavat siis transistoreista huomattavasti. Niillä ei ole transistoreille tyypillistä aktiivitilaa, vaan ne toimivat aina joko johto- tai estotilassa eli kytkimenä. Tyristorien etuna ja mahdollisesti myös haittana on se, että ne eivät tarvitse jatkuvaa ohjesignaalia johtotilassa pysymiseen toisin kuin transistorit.

Tämä ominaisuus on etu, kun halutaan tyristorin sammuvan kytkettävän virran alittaessa pitovirran (itsekommutointi) mutta tekee tyristorien käyttämisestä kytkimenä (pakotettu kommutointi) hankalaa. SCR:n pakotettu sammuttaminen vaatii monimutkaisen piirin joka kykenee hetkellisesti katkaisemaan sen kytkemän virran, jonka takia GTO:t suunniteltiin tähän tarkoitukseen. GTO pystytään sammuttamaan kytkettävästä virrasta riippuvalla, tyypillisesti suhteellisen suurella negatiivisella virtapulsilla jonka tuottaminen on hankalaa ja vaatii monimutkaista oheiselektroniikkaa.

Tyristorien kytkentätaajuudet ovat vaihtoehtoisin komponentteihin – kuten IGBT:hen – verrattuna hitaita ja niiden kytkentätaajuudet rajoittuvat tyypillisesti satoihin hertzeihin. SCR:ää pystytään tyypillisesti operoida verkkotaajuudella (50Hz) ja sen muutamalla ensimmäisellä monikerralla. GTO:t kytkenevät hieman suurempiin kytkentätaajuuksiin mutta ne eivät pääse yhtä suuriin kytkentätaajuuksiin kuin IGBT:t.

Tyristorikomponentit vaativat myös rajallisen jännitteen- ja virranmuutoskeston vuoksi kalliita snubberikomponentteja jotka aiheuttavat merkittäviä häviöitä. IGBT:t eivät tarvitse snubberipiirejä ja tarvitsevat tyypillisesti vain kollektorin ja emitterin välisen diodin suojaamaan virtapiikeiltä. Yksittäisillä tyristoreilla kyetään toistaiseksi kytkemään suurempia virtoja ja jännitteitä kuin yksittäisillä IGBT:illä joka tekee tyristoreista soveltuvampia suurimpiin teholuokkiin. Tyristoreilla on myös tyypillisesti pienemmät johtotilan jännitehäviöt.

4 Sovelluskohteet

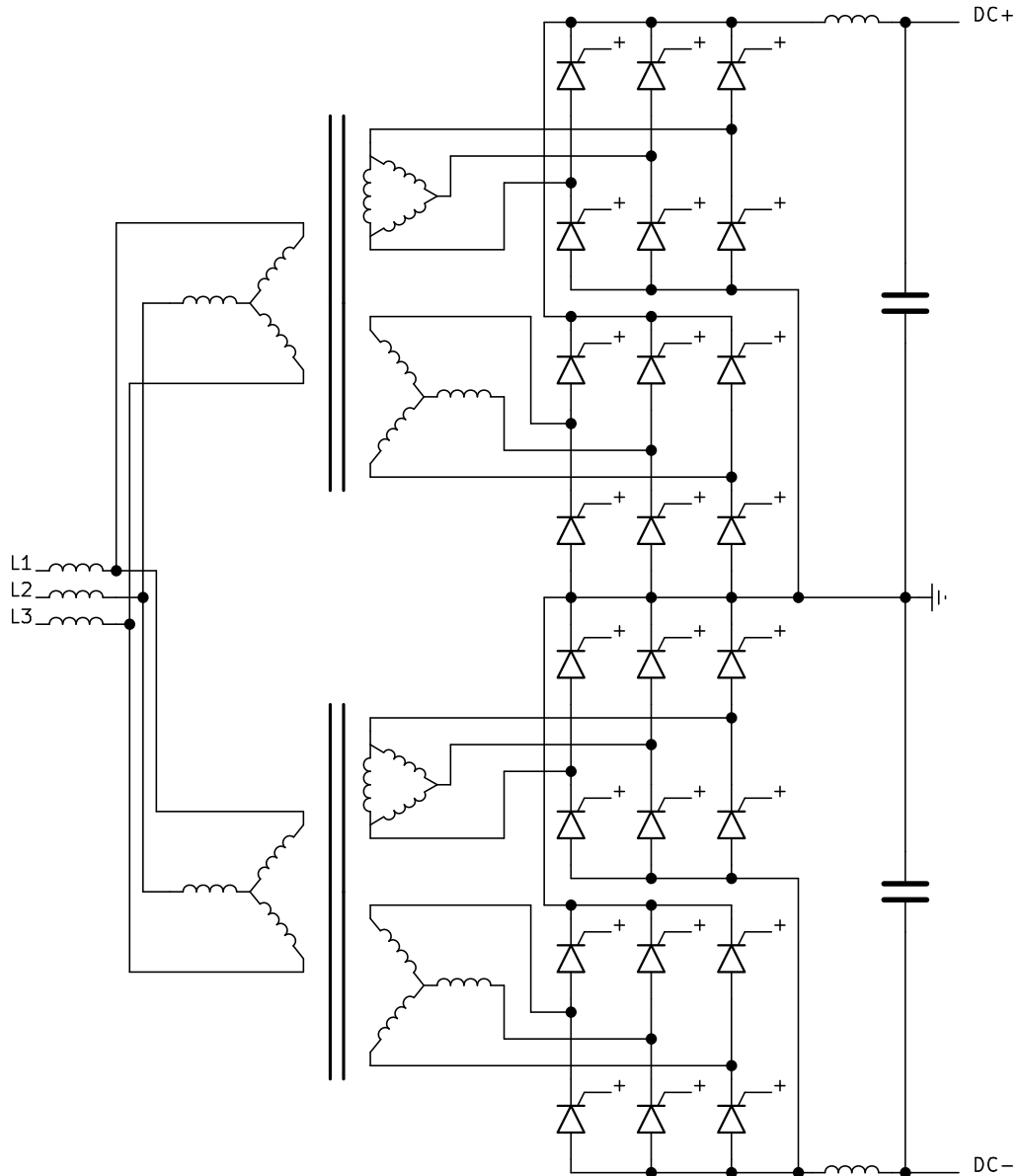
Puolijohdekytkimillä on tehoelektronikassa useita sovelluksia, mutta kuten johdannossa todettiin, tyristorien sovellukset keskittyvät lähinnä matalataajuisiin suuritehoisiin sovelluksiin, joissa suunnataan vaihtojännitteestä tasajännitettä tai invertoidaan tasajännitteestä vaihtojännitettä. Tyristorien tyypillisiä suuritehoisia sovelluskohteita ovat erityisesti HVDC-siirtoverkon muuntimet, moottorikäytöt – joiden tarkastelu rajoitetaan raidekäyttöihin – sekä muut teollisuuden suuntaajat ja invertterit. Tässä luvussa keskitytään tarkastelemaan näitä sovelluksia ja selvittämään ovatko tyristorit korvautuneet tai korvautumassa tulevaisuudessa paremmilla komponenteilla tarkastelluissa sovelluksissa.

4.1 HVDC-siirtoverkko

HVDC-siirtoverkko on eräs tyristorien ensimmäisistä sovelluskohteista, jossa ne korvasivat aikaisemmin käytössä olleet elektroniputkikomponentit (Morris 1990 s. 60). Nykyisissä HVDC-järjestelmissä on käytössä kaksi erilaista suuntaajatopologiaa: LCC (Line Commutated Converter) ja VSC (Voltage Source Converter) (Binder, et al. 2019). Myös monimutkaisempia suuntaajatopologioita, kuten MMC (Multilevel Modular Converter) – joka hyödyntää SCR:iä ja IGBT:itä – on tutkittu (Qingsong, et al. 2019). HVDC-järjestelmissä päästään suuriin teholuokkiin – eli suuriin jännitteisiin ja virtoihin – rajallisilla komponenttien nimellisarvoilla kytkemällä useita kytkimiä sarjaan ja/tai rinnan. Tällaista komponenttien yhdistelmää kutsutaan usein venttiiliksi (valve).

LCC on jo elehopeasuuntaajien ajasta käytössä ollut HVDC-suuntaustopologia, joka hyödyntää tätä nykyä SCR:iä (Binder, et al. 2017). LCC topologia on esitetty kuvassa 15 (kuvan kytkimet ovat edellä mainittuja useammasta komponentista rakennettuja venttiileitä). LCC-topologia perustuu SCR:n liipaisukulman ohjaamiseen kytketyn AC-verkon jännitteiden avulla. Koska SCR:n sammuminen vaatii sen että katodi-anodi -jännite alittaa nollatason, LCC tarvitsee toimiakseen ”jäykän” AC-verkon joka sisältää tahtikoneita jotka pakottavat verkon jännitteet sinimuotoisiksi, saaden SCR:t sammumaan. LCC ei siis kykene syöttämään täysin passiivista verkkoa. LCC vaatii tarkkaa loistehon kontrollia jännitteen stabiilina pitämiseksi, joka vaatii ylimääräisiä reaktiivisia komponentteja. LCC:n tehonsyöttösuunnan

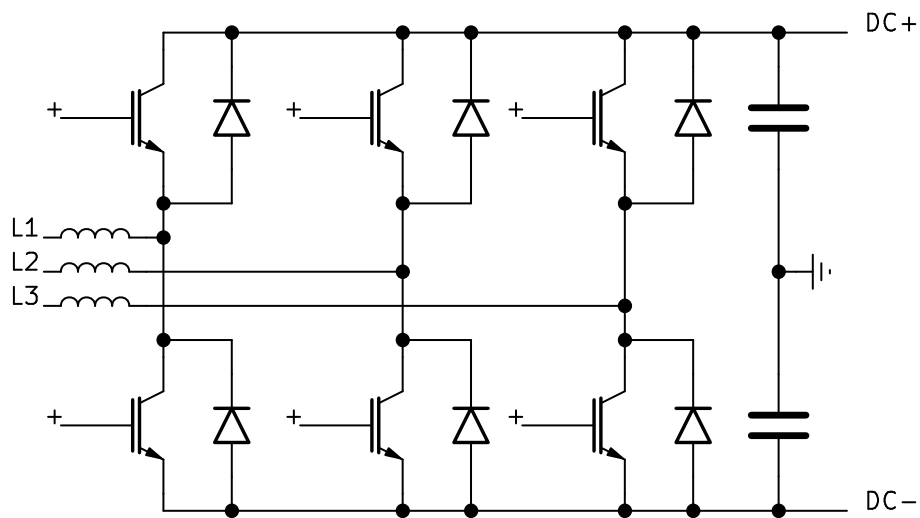
muuttaminen vaatii DC-linkin polariteetin vaihtamisen, joka tarkoittaa että linkin molemmissa päissä sijaitsevien ohjausyksiköiden tulee olla synkronoituja.



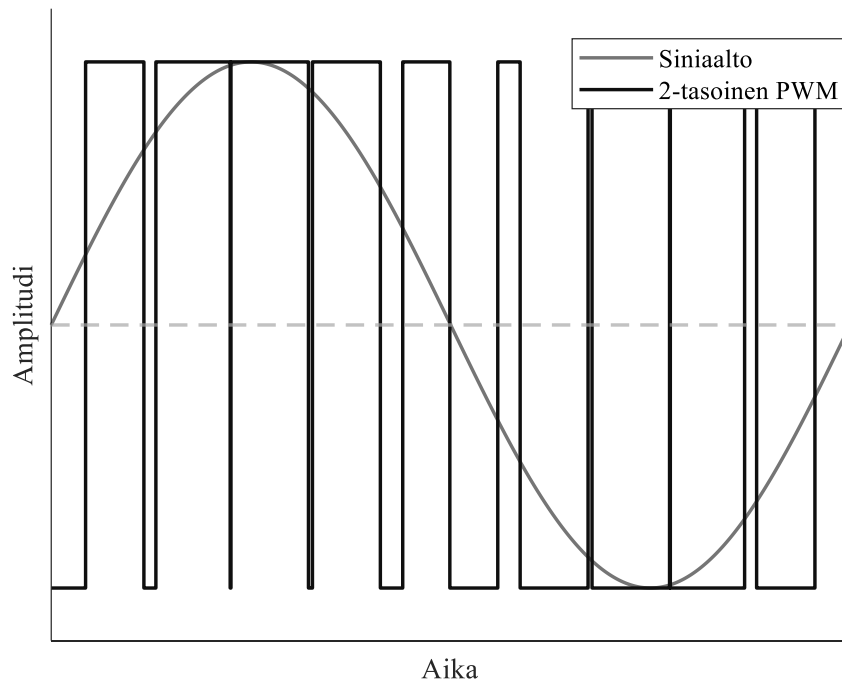
Kuva 15: LCC (SCR:t kuvaavat SCR-venttiilejä).

VSC on LCC:hen verrattuna suhteellisen uusi, ensimmäistä kertaa 1997-luvulla käyttöön otettu, jatkuvasti kehittyvä HVDC-suuntaajapologia, joka hyödyntää itsekommutoivia kytkimiä (Binder, et al. 2017). VSC voidaan toteuttaa GTO:illa, mutta niiden hankalan ajamisen takia IGBT:t ovat VSC:n yleisin komponenttivalinta. IGBT:itä hyödyntävän VSC:n kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 16. VSC:n toiminta ei riipu kytketystä verkosta, vaan ohjaus tapahtuu kytkimien korkeataajuisella pulssittamisella hyödyntäen pulssisuhdemodulaatiota (PWM). Siniaallon syntesointi PWM:llä on esitetty kuvassa 17 (kuvan kytkimet ovat

edellä mainittuja useammasta komponentista rakennettuja venttiileitä). VSC mahdollistaa päto- ja loistehon ohjaamisen erillisesti, jolloin niitä hyödyntävä HVDC-järjestelmä ei tarvitse reaktoreita loistehon kompensointiin. VSC:llä pystytään syöttämään puhtaasti passiivista verkkoa, sillä niiden ohjaus ei riipu syötettävän verkon jännitteestä. Myös tehon siirtosuunnan muuttaminen on huomattavasti helpompaa kuin LCC:llä, eikä se vaadi synkronointia DC-linkin molemmissa päissä.



Kuva 16: VSC (IGBT:t kuvaavat IGBT-venttiilejä).



Kuva 17: Kaksitasoinen siniaallon PWM.

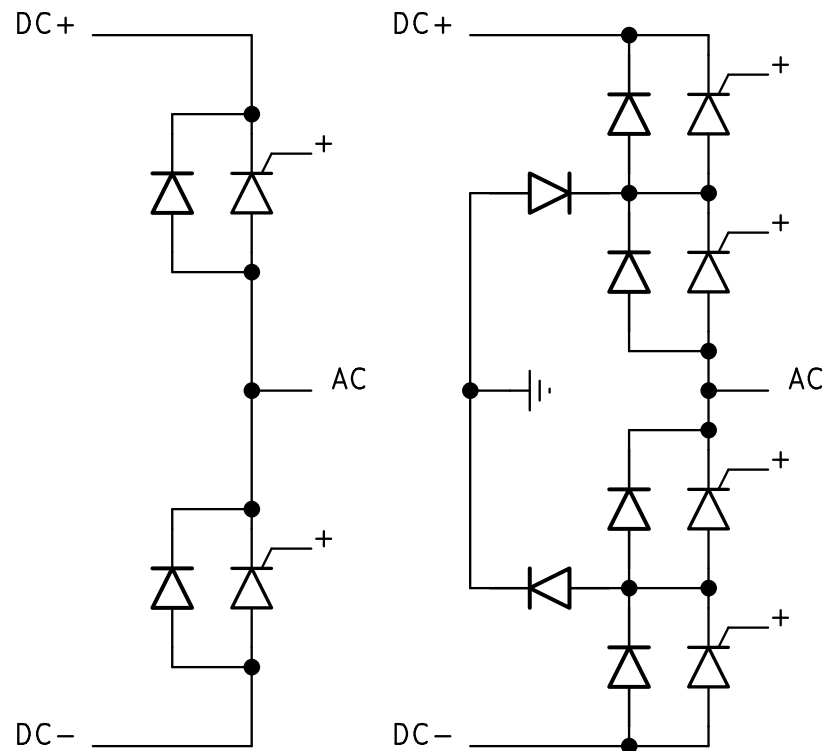
VSC:t ovat siis huomattavasti LCC:itä parempia, sillä niillä voidaan ohjata päätötehoa ja loistehoa erillisesti – eli reaktoreita ei tarvita – sekä syöttää puhtaasti passiivista verkkoa. VSC:illä tehonsiirron suunnan vaihtaminen on mahdollista vaihtamatta DC-linjan polariteettia ilman DC-linkin päiden välistä synkronointia, joka tekee siitä erinomaisen suuntaajan moniterminaalisiin HVDC-järjestelmiin (Binder, et al. 2017). Taulukosta 1 huomataan, että VSC:issä on tapahtunut huomattava kehitys puolikkaan vuosikymmenen aikana, mutta LCC:t ovat silti ainut valinta suuritehoisiin HVDC-linkkeihin (Kassakian, Jahns 2013, Binder, et al. 2017).

Taulukko 1: LCC:n ja VSC:n nimellisparametrien kehitys.

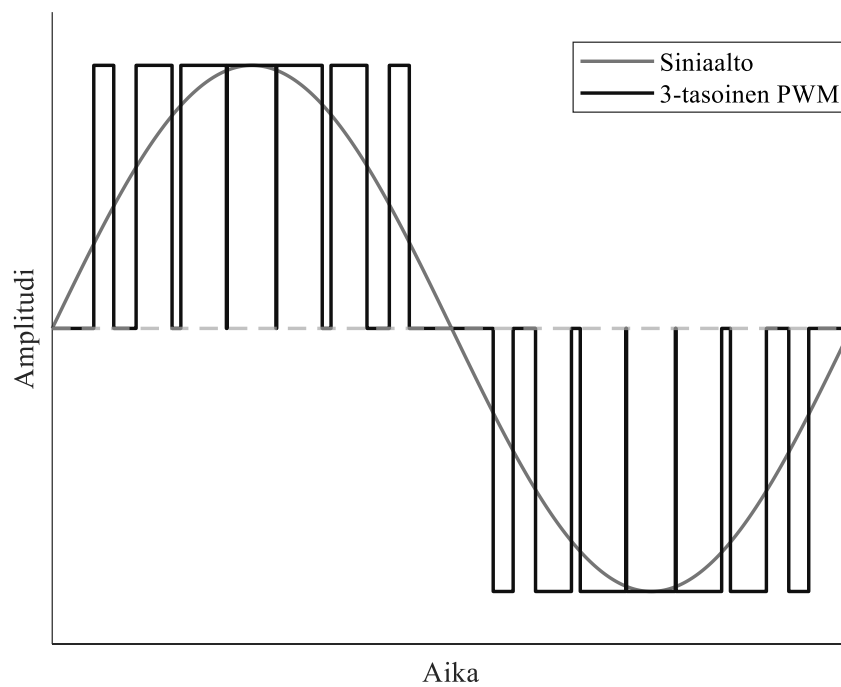
Vuosi	LCC (SCR)	VSC (IGBT)
2013	±800kV, 3GW	±150kV, 400MW
2017	±800kV, 7.2GW	±500kV, 2GW

4.2 Raidekäytöt

Tyristorien historia raidekäytöissä ulottuu jo viime vuosisadalle ja erityisesti GTO:t mahdollistivat 1980-luvun alkupuolella invertterien rakentamisen raidekäyttöjäen teholuokkaan ilman SCR:ien vaatimia kommutaatiopiirejä (White 1998). 1990-luvun lopulla useat raidekäytöt hyödynsivät jo GTO-pohjaisia inverttereitä. Raidekäytöissä (esim. junissa) on tyypillisesti kahdentyyppisiä inverttereitä, joista toista suuritehoisempaa käytetään moottorien ajamiseen (propulsion inverter) ja toista muiden sähköisten kuormien syöttämiseen (auxiliary inverter) (Eckel, et. al. 2005). Raidekäyttöjen inverttereissä GTO:t ja IGBT:t ovat kytkevältä osaltaan vaihdettavissa ja invertterit ovat tyypillisesti joko kaksi- tai kolmitasoisia (Kuva 18). Kaksitasoisella invertterillä syntesoitua aiemmin esitetty kuvan 17 aaltomuoto ja kolmitasoisella invertterillä enemmän siniaaltoa muistuttava kuvan 19 kolmen jännitetason aaltomuoto.



Kuva 18: Kaksi- ja kolmitasoinen yksivaiheinen invertteri.



Kuva 19: Kolmitasoisien invertterien lähtö, yksi vaihe.

Kolmitasoiset invertterit vaativat kaksinkertaisen määrän kytkinkomponentteja kaksitasoi-
siin inverttereihin verrattuna ja niillä saadaan puhtaampi siniaalto (Meyer, et. al. 1996). Kol-
mitasoisilla inverttereillä voidaan käyttää nimellisjännitteeltään puolet pienempiä

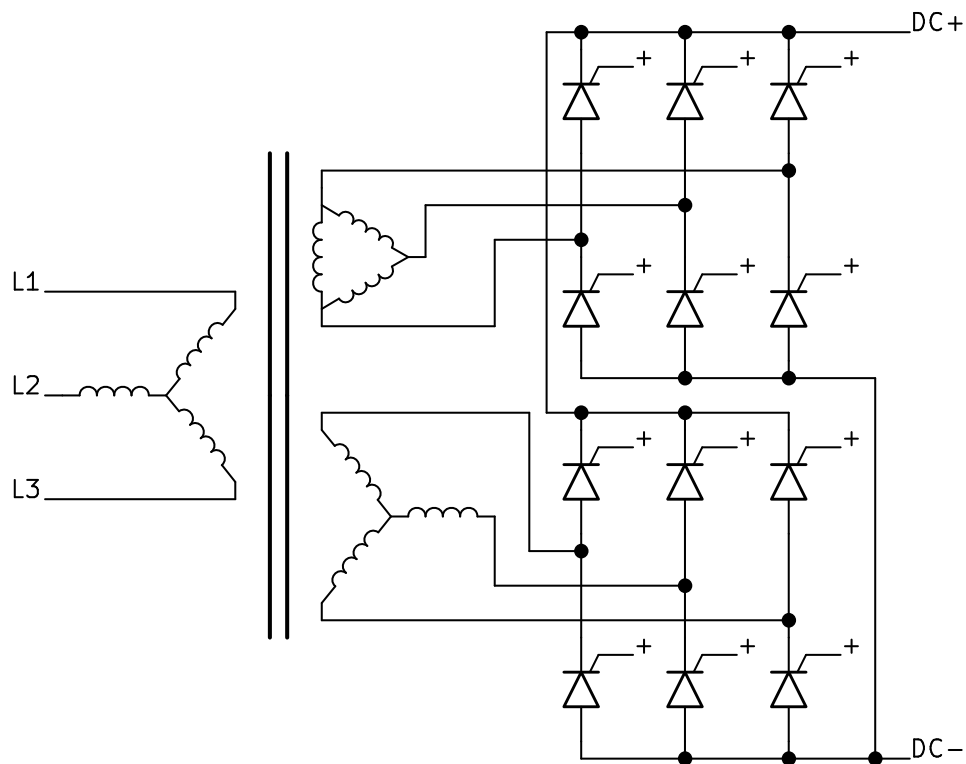
komponentteja kun kaksitasoisella invertterillä samalla välipiirin DC-jännitteellä, mutta 3.3kV:n IGBT:iden ilmestyessä markkinoille yksivaiheisten invertterien ratkentanen raidekäyttöjen teholuokassa tuli mahdolliseksi (Eckel, et al. 2005). Tarkastellen ainoastaan invertterin lähtösignaalin laatua, suurilla kytkentätaajuuksilla kolmitasoisen invertterin hyödyt kaksitasoiseen verrattuna ovat mitättömät.

Ensimmäinen IGBT-pohjainen invertteri ilmestyi raidekäyttöihin jo vuonna 1999 (Eckel, et al. 2005). IGBT:t olivat käytössä ajoinverttereissä 2000-luvun loppupuolella (Taufiq 2007). GTO:t eivät ole vielä kokonaan korvautuneet ja esimerkiksi vielä vuonna 2015 Intiassa olevat raidekäytöt hyödynsivät vielä kokonaan GTO-pohjaisia inverttereitä (Nagamani, et al. 2015).

Tulevaisuudessa GTO:t tulevat todennäköisesti häviämään raidekäyttöjen tehoelektronikasta vanhan kaluston uusiutuessa, sillä ne eivät vaihtoehtoisten komponenttien nimellisarvojen ja hintojen parantuessa tarjoa muita parempia ominaisuuksia. Myös IGBT:t saattavat tulevaisuudessa korvautua esimerkiksi GaN-transistoreilla, joiden käyttöä moottorikäytöissä on tutkittu jo 100kW:n teholuokassa (Das, et al. 2021).

4.3 Teollisuuden suuntaajat

Yleisellä tasolla tarkasteltuna SCR-pohjaiset suuntaajat olivat vielä viime vuosikymmenellä suuren luotettavuutensa vuoksi teollisuuden suuritehoisissa sovelluksissa yleisiä, erityisesti suurivirtaisissa (>1kA) sovelluksissa kuten valokaariuunit, elektrolysaattorit, lämmittimet ja virtalähteet (Solanki, et al. 2015). Tyypillisin teollisuudessa käytetty SCR-pohjainen suuntaustopologia (Kuva 20) hyödyntää 12 SCR:n kytkentää. Toistaiseksi IGBT ja GTO pohjaisia ratkaisuja ei ole näiden osalta laajalti käytössä, vaikka niitäkin löytyy markkinoilta ja niitä otetaan hiljalleen käyttöön (Solanki, et al. 2015, Naseri, Samet 2015).



Kuva 20: Tyypillinen SCR suuntaustopologia.

SCR-pohjaiset suuntaajat aiheuttavat huomattavan määrän häiriötä syöttävään verkkoon ja tarvitsevat huomattavan määrän suodattavia komponentteja häiriön pienentämiseksi siedettävälle tasolle (Naseri, Samet 2015). IGBT-pohjaiset suurilla ($\sim 1\text{kHz}$) taajuuksilla katkovat suuntaajat ovat tämän kannalta parempia ja tarvitsevat huomattavasti vähemmän suodatusta, sillä kytkemisestä aiheutuva häiriö voidaan siirtää suurille taajuuksille, joilla ei ole syöttävän verkon kannalta merkitystä. Suuri kytkentätaajuus mahdollistaa myös tarkemman ja nopeammin reagoivan lähdön jännitetason säädön. SCR-suuntaajissa liipaisukulman ohjaamien aiheuttaa kytkevään verkkoon kohdistuvan häiriön lisäksi ei toivottuja AC komponentteja suunnattuun DC:hen (Koponen, et al. 2021). IGBT:itä hyödyntävällä suuntaajalla päästään myös suurempiin hyötysuhteisiin kuin SCR:iä hyödyntävällä suuntaajalla, sillä SCR suuntaajan käyttämät vaiheensiirtomuuntajat aiheuttavat huomattavan suuren häviön (Naseri, Samet 2015). Veden elektrolyysissä IGBT-suuntaajalla saadaan 13% parempi hyötysuhde verrattuna SCR-suuntaajaan (Koponen, et al. 2021). IGBT-suuntaajalla tehokerrointa pystytään ohjaamaan ja se pystytään pitämään hyvin lähellä yhtä. SCR-suuntaajien tehokerroin on huono ja ne vaativat paljon loistehoa. DC valokaariuunissa IGBT-suuntaaja antaa stabiilimman valokaarijännitteen paremman säädettävyytensä vuoksi (Naseri, Samet 2015). Kustannusten kannalta IGBT-suuntaajat ovat tyypillisesti kalliimpia niiden käyttäminen on

taloudellista keski- ja matalatehoisissa sovelluksissa (<100MW). SCR-suuntaajat ovat edullisia ja luotettavia – jotka ovat taloudellisesta näkökulmasta tärkeämpiä ominaisuuksia verrattuna fysiikkaan – ja sopivat myös suuritehoisiin sovelluksiin.

4.4 Moottorikäytöt

Keskitehoisissa (100-900 kVA) moottorikäytöissä GTO-pohjaiset invertterit olivat vielä 1980-luvulla laajalti käytössä, korvattuaan 1970-luvulla käytössä olleet SCR:iä hyödyntäneet invertterit (Kerkman, et al. 1999). Jo 1990-luvun loppupuolella IGBT:stä oli tyristoreita ja bipolaaritransistoreja parempi vaihtoehto matala- ja keskitehoisten moottorikäyttöjen inverttereihin ja suurin osa sen aikaisista moottorikäytöistä hyödynsi niitä. Vuoteen 2003 mennessä suurin osa uusista teollisuuden moottorikäytöistä hyödynsi IGBT-pohjaisia invertteireitä (Jahns, et al. 2003). Tyristorit (GTO:t ja SCR:t) ovat käytössä suuritehoisissa (>1MW) sovelluksissa, sillä niiden suuremmat nimellisarvot tekevät niistä paremman vaihtoehdon IGBT:ihin tai muihin vaihtoehtoisiin puolijohdekytkimiin verrattuna. Nykyisin myös GaN-transistorit ja MOSFETit ovat vallanneet alaa moottorikäyttöjen matalista jännite- ja teholuokista (<600V), mutta IGBT:t ovat edelleen moottorikäyttöjen suosituin komponenttivalinta (Husain, et al. 2021).

5 Johtopäätökset

Tässä tutkimuksessa perehdyttiin tyristorien ja niille vaihtoehtoisiiin puolijohdekytkimien sovellusten kannalta olennaisiin ominaisuuksiin ja tyypillisiin sovelluksiin, tarkastellen tyristorien asemaa sovelluksissa.

Tyristorit ovat ominaisuuksiltaan soveltuvia suuritehoisiin ja matalataajuisiin kytkentäsovelluksiin, mutta niiden kommutointi on hankalaa. Tämä on totta erityisesti GTO:iden osalta, sillä niiden sammuttamiseen tarvittavan negatiivisen virtapulssin muodostaminen on hankalaa. Tyristorikomponentit vaativat myös snubberipiirin rajallisen jännitteen ja virran muutoksensiedon vuoksi.

IGBT:t ovat selvästi käytettävyyden näkökulmasta tyristoreja huomattavasti parempia, sillä niiden jänniteohjattavuus tekee niistä suhteellisesti helpompia ajaa sekä ja niitä pystytään kytkemään kilohertsien taajuudella. IGBT:t eivät kykene yhtä suuriin jännitteisiin ja virtoihin, kun tyristorit, mutta niiden ominaisarvojen kehittyessä, on oletettavissa, että tyristorikomponentit korvautuvat niillä tai joillain vaihtoehtoisilla kytkinkomponenteilla – kuten GaN-transistoreilla – tulevaisuudessa.

HVDC-teknologiassa tyristorit tulevat olemaan vielä lähitulevaisuudessa tärkeissä asemassa, sillä SCR-pohjainen LCC mahdollistaa moninkertaisen tehon kytkemisen verrattuna IGBT-pohjaiseen VSC:hen, tosin VSC:t ovat korvanneet LCC:t matalammassa teholuokissa, joissa niiden käyttäminen on taloudellista.

IGBT:iden nimellisarvojen kehittyminen 2000-luvulla on mahdollistanut GTO:iden korvaamisen raidekäyttöjen inverttereissä, tosin myös GTO:t ovat vieläkin käytössä. Teollisuudessa SCR pohjaiset suuntaajat ovat edelleen laajassa käytössä, sillä ne ovat luotettavampia ja halvempia kuin muilta osin paremmat ratkaisut. Vaihtoehtoisten komponenttien kehittyessä luotettavammiksi ja halvemmiksi SCR-suuntaajat tulevat häviämään teollisuudesta.

Matala- ja keskitehoisten moottorikäyttöjen osalta tyristorien korvautuminen tapahtui jo viime vuosisadan puolella ja IGBT on nykyisin tyypillisin komponenttivalinta kyseisten teholuokkien moottorikäyttöjen inverttereissä. GaN-transistorit ja MOSFETit tulevat tulevaisuudessa korvaamaan IGBT:itä matalissa jännite- ja teholuokissa.

Vaikka tyristoripohjaisille ratkaisuille on joissain tehoelektroniikan sovelluksissa parempia ratkaisuja, ne ovat kuitenkin edelleen ainut valinta suuritehoisiin matalataajuisiin kytkentäsovelluksiin. Teholuokissa joissa tyristorikomponentit voidaan korvata paremmilla kytkinkomponenteilla – kuten esimerkiksi IGBT:illä – tulevat hitaasti korvaamaan tyristoreita kun kalusto uusiutuu ja muiden kytkinkomponenttien käyttämisestä tulee taloudellisesti kannattavaa.

Lähteet

- Baliga, B.J. (2012) *Advanced High Voltage Power Device Concepts*. Raleigh, Pohois-Carolina, USA: Springer International Publishing.
- Baliga, B.J. (2019) *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. 2 painos. Raleigh, Pohois-Carolina, USA: Springer International Publishing.
- Binder, O. Hemdan, N.G.A. Kurrat, M. Pierri, E. (2017) ‘Challenges and opportunities for a European HVDC grid’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 70 s. 427–456
- Das, P.P Satpathy, S. Shah, S.S. Bhattacharya, S. Veliadis, V. (2021) ‘Paralleling of Four 650V/60A GaN HEMTs for High Power Traction Drive Applications’, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*
- Eckel, H.G. Bakran, M.M. Krafft, E.U. Nagel, A. (2005) ‘A new Family of Modular IGBT Converters for Traction Applications’, *European Conference on Power Electronics and Applications*
- Husain, I. Ozpineci, B.Islam, S. Gurpinar. E. Su, G.J. Yu, W. Chowdhury, S. Xue, L. Rahman, D. Sahu, R. (2021) ‘Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles’, *Proceedings of the IEEE*. 109(6) s. 1039-1059
- Ibrahim, F.N. Dessouky S.S. (2021) *Design and Implementation of Voltage Source Converters in HVDC Systems*. Cham, Sveitsi: Springer International Publishing.
- Jahns, T.M. Blasko, V. (2001) ‘Recent advances in power electronics technology for industrial and traction machine drives’, *Proceedings of the IEEE*. 89(6) s. 963-975
- Kassakian, J.G. Jahns, T.M. (2013) ‘Evolving and Emerging Applications of Power Electronics in Systems’, *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*. 1(2), s. 47-58
- Kerkman, R.J. Skibinski, G.L. Schlegel, D.W. (1999) ‘AC drives: year 2000 (Y2K) and beyond’, *Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*. s. 28-39

- Koponen, J. Poluektov, A. Ruuskanen, V. Kosonen, A. Niemelä, M. Ahola, J. (2021) 'Comparison of thyristor and insulated-gate bipolar transistor -based power supply topologies in industrial water electrolysis applications', *Journal of Power Sources*. 401
- Krupali, V.S. (2020) 'Evolution of Thyristors', *Journal of the Institution of Engineers (India)*. 101(5), s. 553-563
- Lutz, J. Schlangenotto, H. Scheuermann, U. Doncker, R.D. (2018) *Semiconductor Power Devices Physics, Characteristics, Reliability*. 2 painos. Cham, Sveitsi: Springer International Publishing.
- Meyer, M. Aeberhard, M. Ruegg, R. (1996) 'Influence of inverter design and control on the energy consumption of electric locomotives', *27 Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Baveno, Italia
- Morris, P.R. (1990) *A History of the World Semi-Conductor Industry*. Lontoo, UK: The Institution of Engineering and Technology.
- Nagamani, C. Somanatham, R. Kusuma Kumari, U. Chaitanya Kumar, U. (2015) 'Comparative performance of squirrel cage motors on GTO and IGBT drives for electric traction in India', *i-manager's Journal on Electrical Engineering*. 9(1)
- Naseri, F. Samet, H. (2015) 'A Comparison Study of High Power IGBT-Based and Thyristor-Based AC to DC Converters in Medium Power DC Arc Furnace Plants', *IEEE*.
- Qingsong, W. Fujin, D. Chengkai, L. Qian, H., Zhe, C. (2019) 'Thyristor-based modular multilevel converter HVDC systems with current interruption capability', *The Institution of Engineering and Technology: IET Power Electronics*.
- Solanki, J. Fröhleke, N. Böcker, J. Averberg, A. Wallmeier, P. (2015) 'High-current variable-voltage rectifiers: state of the art topologies', *IET Power Electronics*. 8(6) s. 1068–1080
- Taufiq, J. (2007) 'Power Electronics Technologies for Railway Vehicles', *Power Conversion Conference*. s. 1388-1393
- White, R.D. (1998) 'GTO and IGBT traction three phase inverter drives', *Power Electronics and Variable Speed Drives*. Lontoo, 21-23.09.1998. IET