



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

IGB-transistorien rinnankytkentä

Paavo Paakkunainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energia, sähkötekniikan koulutusohjelma

Paavo Paakkunainen

IGB-transistorien rinnankytkentä

Kandidaatintyö, 2010

25 sivua, 14 kuvaa

Tarkastaja: TkT Lasse Laurila

Hakusanat: IGBT, rinnankytkentä, virranjako, parametrien mittaaminen, lajittelu

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan IGB-transistorien rinnankytkentää ja siinä usein esiintyvää virran epäsymmetristä jakaantumista. Työssä esitellään yleisempien IGB-transistorien rakenteet ja tarkastellaan niiden tärkeimpiä ominaisuuksia. IGBT:n parametrien sekä ulkoisen piirin vaikutusta virran jakaantumiseen selvitetään. Vaikuttavien tekijöiden pohjalta pyritään esittämään tarvittavat toimenpiteet sekä mittaustavat, joilla virran jakaantumista voidaan tasoittaa ja saada toteutettua luotettava IGB-transistorien rinnankytkentä.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT Energy, Department of Electrical Engineering

Paavo Paakkunainen

Parallel connection of IGBTs

Thesis for the Degree of Bachelor of Science in Technology, 2010

25 pages, 14 figures

Examiner: D.Sc. Lasse Laurila

Keywords: IGBT, parallel connection, current sharing, parameter measurements,
screening

In this thesis the behaviour of the parallel connection of IGBTs is studied. The most general IGB-transistor structures are presented with their main features. The effect of the IGBT parameters and outer circuitry to current sharing are discussed. In the end, the paper gives necessary steps and screening measurement methods for reliable parallel connection.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	II
ABSTRACT	III
SISÄLLYSLUETTELO	1
KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	2
1. JOHDANTO.....	3
2. IGBT	4
2.1 Perusrakenne	4
2.2 IGBT:n kytkentäominaisuudet.....	5
2.3 Punch-Through	6
2.4 Non-Punch-Through	7
2.5 Field-Stop	8
3. VIRRRAN JAKAANTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	9
3.1 IGBT:n parametrit	9
3.1.1 $V_{CE(on)}$	9
3.1.2 $V_{GE(th)}$	10
3.2 Liitoslämpötila	11
3.3 Pääpiirin induktanssi.....	13
3.4 Hilaohjaus	13
3.5 Kytkentätaajuus ja pulssisuhde	14
4. PARAMETRIEN MITTAAMINEN.....	16
4.1 $V_{ce(sat)}$	16
4.2 $V_{GE(th)}$	17
4.3 Lajittelumittaus.....	18
4.4 Kaupalliset mittalaitteet.....	18
5. SARJAVASTUSTEN KÄYTTÖ.....	19
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	21
LÄHTEET	22

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

C	Collector, kollektori
CE	Collector-Emitter, kollektorin ja emitterin välinen arvo
G	Gate, hila
GE	Gate-Emitter, hilan ja emitterin välinen arvo
E	Emitter, emitteri
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, hilaeristetty bipolaaritransistori
j	Junction, liitos
max	Maksimi
min	Minimi
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
n	Puolijohdemateriaali, joka sisältää enemmistön negatiivisia varauksia.
NPT	Non-Punch-Through, ei-läpilyövä
on	Johtavuustila
p	Puolijohdemateriaali, joka sisältää enemmistön positiivisia varauksia.
PT	Punch-Through, läpilyövä
sat	Saturaatio
th	Threshold, liipaisu
σ	Haja
C	Kapasitanssi
g_{fs}	Transkonduktanssi
I, i	Virta
L	Induktanssi
R	Resistanssi
T	Lämpötila
U	Jännite

1. JOHDANTO

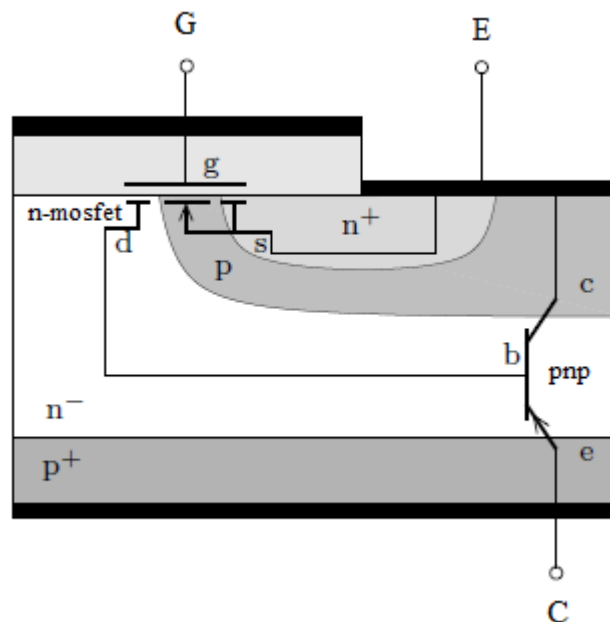
IGBT-transistori on suosittu tehokytkin helpon ohjattavuuden, nopeuden sekä pienien päästöhäviöiden ansiosta. IGBT-sirun virrankesto rajoittuu kuitenkin noin 200 ampeeriin valmistusteknisistä syistä. Tämän takia haluttaessa käsitellä suuria virtoja IGBT-transistoreilla, joudutaan turvautumaan rinnankytkentään. Suuri IGBT-moduuli voi kyetä jopa 3500 ampeerin virrankestoisiin, jolloin IGBT-siruja on kytketty useita rinnan moduulin sisällä. Luotettavan rinnankytkennän toteuttamiseksi joudutaan kuitenkin huolehtimaan, että jokainen IGBT toimii turvallisen toiminnan alueella. Suurimmaksi ongelmaksi nousee virran epätasainen jakaantuminen transistorien kesken. Tästä syystä joudutaan perehtymään virran jakaantumiseen vaikuttaviin tekijöihin rinnankytkennässä. Eri IGBT tyyppien ominaisuudet tulevat tällöin tarkastelun alle rinnankytkennän näkökulmasta. Tärkeimmät IGBT:n ominaisuudet ovat lämpötilakerroin sekä parametrien toleranssit. Helpoimmissa tapauksissa pelkkä ulkoisen piirin huolellinen suunnittelu riittää, mutta joskus joudutaan turvautumaan jopa transistorien parametrien mittaamiseen sekä lajitteluun tuotannossa.

2. IGBT

IGBT eli hilaeristetty bipolaaritransistori on vakiinnuttanut paikkansa suosittuna teho-kytkimenä. IGBT:ssä on pyritty yhdistämään MOSFET:n helpon ohjattavuuden sekä bipolaaritransistorin hyvät johtavuusominaisuudet. Nykyään IGBT-moduuleita on saatavilla jopa 6500 voltin jännite- ja 3500 ampeerin virtakestoisuuksilla. (Hitachi, 2010)

2.1 Perusrakenne

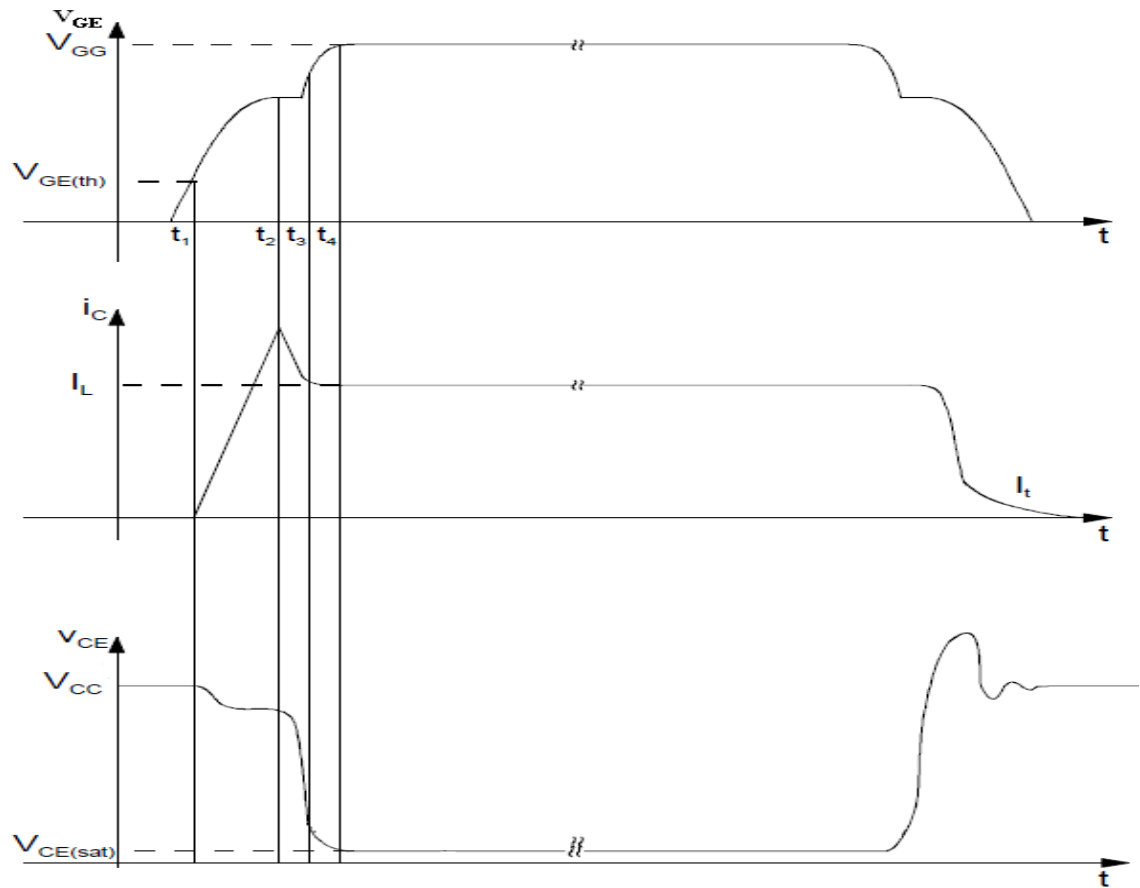
IGBT:n perusrakenne käsittää neljä puolijohdekerrosta, joita voidaan yksinkertaisimmillaan mallintaa kuvan 2.1 mukaisella sijaiskytkennällä, jossa avaustyyppisen n-kanavaisen MOSFET'in avulla ohjataan pnp-transistorin kantavirtaa. IGBT:n virta koostuu MOSFET'in kautta kulkevasta elektronivirrasta sekä transistorin aukkovirrasta. Eri-tyyppisten IGB-transistorien eroavaisuudet johtuvat eri valmistustekniikoista sekä siitä sisältääkö rakenne puskurikerrosta. (Bock, 2005)



Kuva 2.1 IGBT:n perusrakenne sekä sijaiskytkentä. (Bock, 2005)

2.2 IGBT:n kytkentäominaisuudet

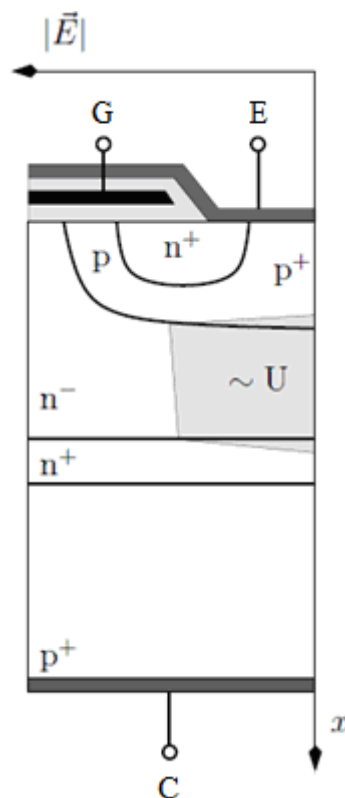
Kuvassa 2.2 on esitetty tyypilliset IGBT:n V_{GE} :n, i_C :n sekä V_{CE} :n käyttäytyminen kytkinkäytössä. IGB-transistoria päälle kytkettäessä hila-emitterijännite kasvaa kahdessa eri vaiheessa, johtuen puolijohdekerrosten kapasitanssien muuttumisesta jännitteen funktiona. Vaiheiden välisiä kytkentähetkiä, jolloin V_{GE} pysyy lähes muuttumattoman kutsutaan Miller-ilmiöiksi. IGBT:n sammutuksessa esiintyy bipolaaritransistorista tuttu virran häntä, jonka pituus ja amplitudi riippuvat käytettävästä rakenteesta. (Semikron, 2007)



Kuva 2.2 IGBT:n kytkentäkäyrät. (Semikron, 2007)

2.3 Punch-Through

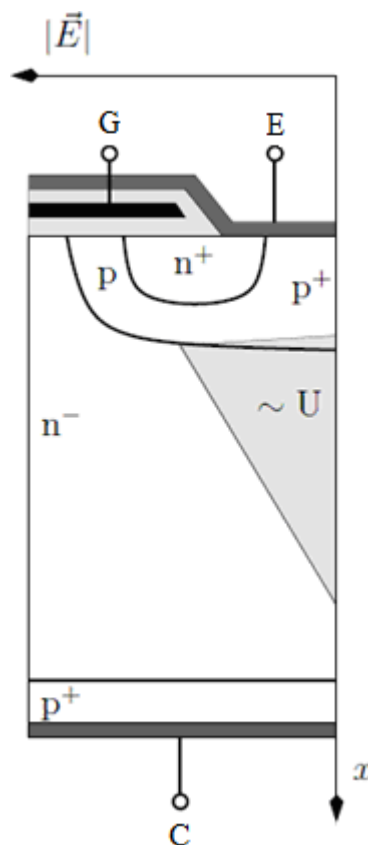
PT-tyyppisen hilaeristetyn bipolaaritransistorin valmistus perustuu MOSFET-tekniikkaan. Siinä aloitusmateriaalina eli substraattina käytetään p^+ -tyyppiä seostettua piikiekkoa, joka muodostaa komponentin kollektorin. Kollektorin päälle muodostetaan vahvasti seostettu n^+ -tyypin puskurivyöhyke sekä n^- -tyypin ajautumisalue epitaksiaalimenetelmällä. Paksulla ajautumisalueella saavutettaisiin suuri estosuuntainen jännitekestoisuus, mutta epitaksiaalimenetelmän hitaudesta sekä päästöhäviöiden kasvamisesta johtuen sitä on pyritty minimoimaan lisäämällä vahvasti seostettu n^+ -tyypin puskurivyöhyke substraatin ja ajautumisalueen väliin. Puskurivyöhykkeellä saavutetaan IGBT:n sisäisen varauksen väheneminen sekä poiskytkennässä esiintyvän virran häntän lyhentäminen. PT-tyypin IGBT:tä ei yleensä valmisteta yli 1200 voltin jännitekestoisuuksilla johtuen epitaksiaalimenetelmän hitaudesta. Ajautumisalueen haittana on estosuuntaisen jännitekestoisuuden aleneminen muutaman kymmenen voltin tasolle. Tyypillisesti samoilla estojännitekestoisuuksilla PT-tyyppisen IGBT:n päästötilan ovat pienemmät kuin NPT-IGBT:n, mutta sen sijaan oikosulkuominaisuudet ovat huonommat. Kuvassa 2.3 on esitetty PT-tyypin rakenne. (Bock, 2005), (Mohan, 1995)



Kuva 2.3 PT-IGBT:n rakenne. (Bock, 2005)

2.4 Non-Punch-Through

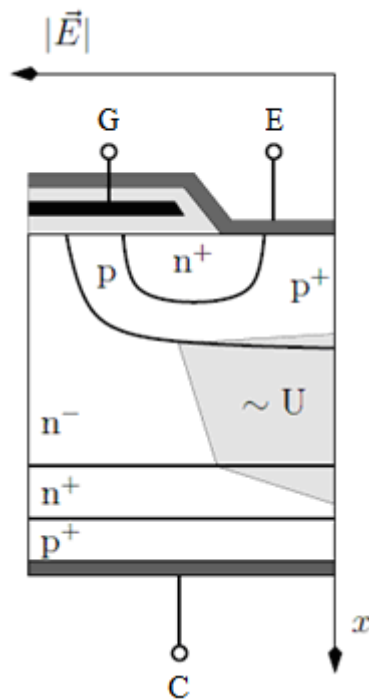
Suuri jännitekestoisuus vaatii pitkän ajautumisalueen, ja epitaksiaalimenetelmän hitaudesta johtuen on kehitetty toisenlaisen rakenteen omaava IGBT suurempaa jännitekestoa ajatellen. NPT-IGBT:ssä ei ole puskurikerrosta lainkaan, minkä takia ajautumisalueesta tehdään pitkä. Valmistus aloitetaan käyttämällä alustana heikosti seostettua n^- -tyypin piikiekkoa, joka muodostaa komponentin ajautumisalueen. Kollektori rakennetaan diffuusion avulla. Rakenne on yksinkertainen ja edullinen valmistaa. NPT-tyypin etuna ovat hyvät oikosulkuominaisuudet sekä hyvä jännitekestoisuus. NPT-IGBT ei ole yhtä nopea kuin PT-tyyppinen, koska sammutuksessa esiintyy pitkä ja pieni amplitudinen virran häntä. Koska IGBT:n rakenne on symmetrinen, on sen estosuuntainen jännitekesto yhtä suuri kuin myötäs suunnassa. Kuvassa 2.4 on esitetty NPT-tyyppisen IGBT:n rakenne. (Bock, 2005), (Mohan, 1995)



Kuva 2.4 NPT-IGBT:n rakenne. (Bock, 2005)

2.5 Field-Stop

Tänä päivänä puolijohdeiden valmistusmenetelmät ovat niin kehittyneitä, että pystytään käsittelemään todella ohuita piikiekkoja. Tämä on mahdollistanut PT- ja NPT-tyyppisten IGBT:iden yhdistämisen niin sanotuksi Field-Stop-rakenteeksi. Field-Stop-IGBT:n valmistaminen aloitetaan n^- -tyypin substraatilla, joka muodostaa komponentin ajautumisalueen. Tämän päälle muodostetaan n^+ -tyypin puskurikerros sekä p^+ -tyypin kollektori diffuusiolla. Sammutuksessa esiintyvä virran häntä on lyhyt. Muita Field-Stop IGBT:n hyviä puolia ovat laaja turvallisen toiminnan alue, hyvät oikosulkuominaisuudet sekä pienemmät häviöt kuin NPT-IGBT:illä. (Bock, 2005), (Khanna, 2003)



Kuva 2.5 Field-Stop-IGBT:n rakenne. (Bock, 2005)

3. VIRRAN JAKAANTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Käsiteltäessä suuria virtoja tehokytkimillä joudutaan usein käyttämään rinnankytkettyjä transistoreita, koska yhden IGBT:n puolijohdesirun koko on valmistusteknisistä syistä rajoittunut 2-3 cm²:iin. Suurissa moduuleissa IGB-transistoreita voi olla jopa kymmeniä rinnankytkettynä. Tällöin joudutaan ottamaan huomioon tehotransistoreiden valmistuksesta aiheutuvat parametrieroavaisuudet sekä layout-suunnittelu virran tasaisen jakaantumisen takaamiseksi. Virran jakaantumista voidaan tarkastella erikseen staattisissa sekä dynaamisissa tilanteissa. (Khanna, 2003)

Staattisessa tilassa virran jakaantumiseen IGB-transistorien kesken vaikuttavat virran-kulkureittien impedanssit. Pienemmän impedanssin omaava reitti kuljettaa suuremman osan virrasta. Tämän takia rinnankytkettyjen transistorien pitäisi olla johtavuusominaisuuksiltaan sekä piirilevyvedoiltaan mahdollisimman samanlaisia. Dynaamiseen tilanteeseen vaikuttavat IGBT:n parametrit sekä piirien induktanssit ja hilaohjauspiiri. (Bock, 2005)

3.1 IGBT:n parametrit

3.1.1 $V_{CE(on)}$

Rinnankytkettyjen komponenttien yli vaikuttaa aina sama jännite. Paremmat johtavuustilan ominaisuudet omaava IGB-transistori joutuu täten kuljettamaan suuremman osan virrasta lävitseen, jotta jännite pysyisi samana. IGB-transistorin johtavuustilan häviöt määräävät kollektori-emitteri-jännite $V_{CE(on)}$, jonka suuruus vaihtelee eri IGBT:iden välillä liitoslämpötilan T_j , kollektorivirran I_C sekä liipaisujännitteen $V_{GE(th)}$:n funktiona. Kuvassa 3.1 on esitetty erään IGB-transistorin $V_{CE(on)}$:n ominaiskäyrät.

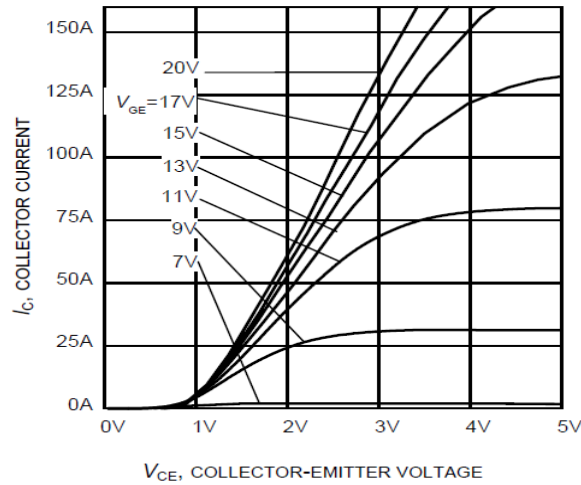


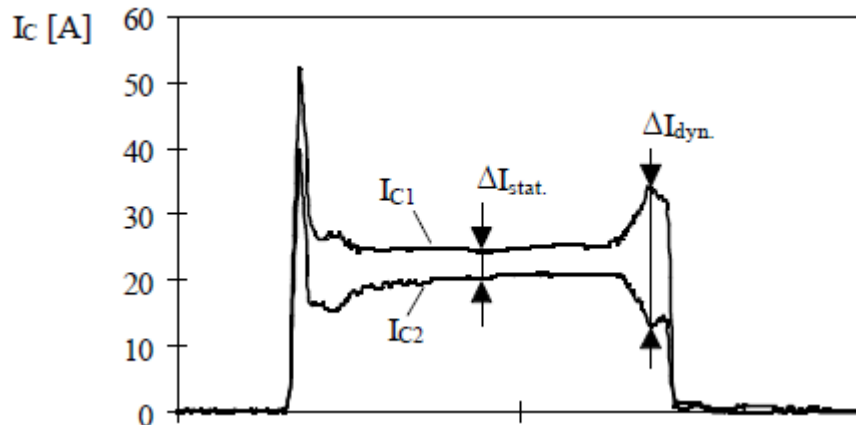
Figure 5. Typical output characteristic
($T_j = 25^\circ\text{C}$)

Kuva 3.1 Erään IGBT:n kollektori-emitterijännite kollektorivirran sekä hila-emitterijännitteen funktiona. (Infineon, 2009)

Kuvasta 3.1 huomataan, että IGBT:n johtavuustilan kollektori-emitterijännite $V_{CE(on)}$ saadaan minimoitua käyttämällä suurta hila-emitterijännitettä V_{GE} . Tällöin IGBT:n transkonduktanssi g_{fs} on suurimmillaan eli kollektori-emitterijännite kasvaa hitaimmin kollektorivirran funktiona. Virran epätasainen jakaantuminen korostuu etenkin pienillä virroilla, koska pienikin transkonduktanssin eroavaisuus muuttaa oleellisesti V_{CE} :tä.

3.1.2 $V_{GE(th)}$

IGBT-transistori siirtyy johtavaan tilaan, kun hila-emitterijännite nousee liipaisujännitettä $V_{GE(th)}$:ta suuremmaksi. Koska pienemmän liipaisujännitteen omaava transistori siirtyy johtavaksi ja sammuu hitaammin, se joutuu rinnankytkennän dynaamisissa tilanteissa hetkellisesti suuren virtarasituksen kohteeksi. Tilannetta pahentaa usein käytettävä yhteinen hilajännite, joka lisää Miller-efektin aikana suuremman transkonduktanssin omaavan IGBT:n virtarasitusta. Kuvassa 3.2 on esitetty virranjako, kun rinnankytketyillä IGBT-transistoreilla on eri kynnysjännitteet.

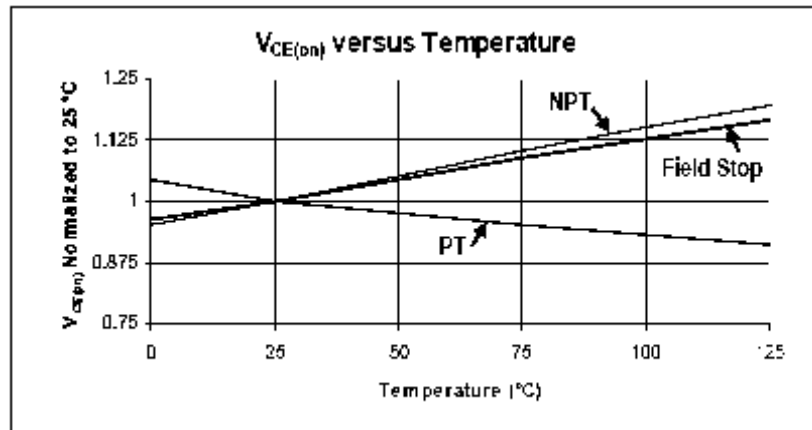


Kuva 3.2 Kahden rinnankytketyn IGBT:n virran käyttäytyminen eri $V_{GE(th)}$:illä. (Semikron, 2007)

3.2 Liitoslämpötila

Puolijohdekomponenttien hajoaminen ei ole niinkään suuresta virrasta johtuva, vaan se on suoraan sidoksissa liitoslämpötilaan. Keskimäärin 7-10 asteen liitoslämpötilan nousu puolittaa komponentin odotetun eliniän. Tämän takia IGBT-transistorien rinnankytkennässä on syytä syventyä myös komponenttien lämpötilakäyttäytymiseen sekä jäädytykseen.

IGBT:n lämpötilakäyttäytyminen johtuu pääosin neljästä tekijästä. Positiivista kollektori-emitterijännitteen $V_{CE(on)}$ lämpötilakerrointa tuottavat puolijohde-metallikontaktien resistanssit sekä varaustenkuljettajien liikkuvuuden väheneminen, joka aiheuttaa MOSFET-kanavan resistanssin sekä pnp-kannan jännitteen kasvun. Negatiivista lämpötilakerrointa sen sijaan synnyttävät varaustenkuljettajien eliniän pidentyminen, joka synnyttää korkean kuljettajatiheyden pnp-kannalla laskien $V_{CE(on)}$:ta. Toisaalta varaustenkuljettajien eliniän pidentyminen kasvattaa IGBT:n sisäistä varausta sekä sammutushäviöitä. Myös jännitehäviö myötäsuuntaan biasoidun emitteri-kannan ylitse laskee lämpötilan funktiona. Kuvassa 3.3 on esitetty eri IGBT-tyyppien suuntaa-antava $V_{CE(on)}$:n käyttäytyminen nimellisvirralla lämpötilan funktiona. (Bock, 2005)



Kuva 3.3 Eri IGB-transistorien tyyppien käyttäytyminen liitoslämpötilan funktiona nimellisvirralla. (APT, 2004)

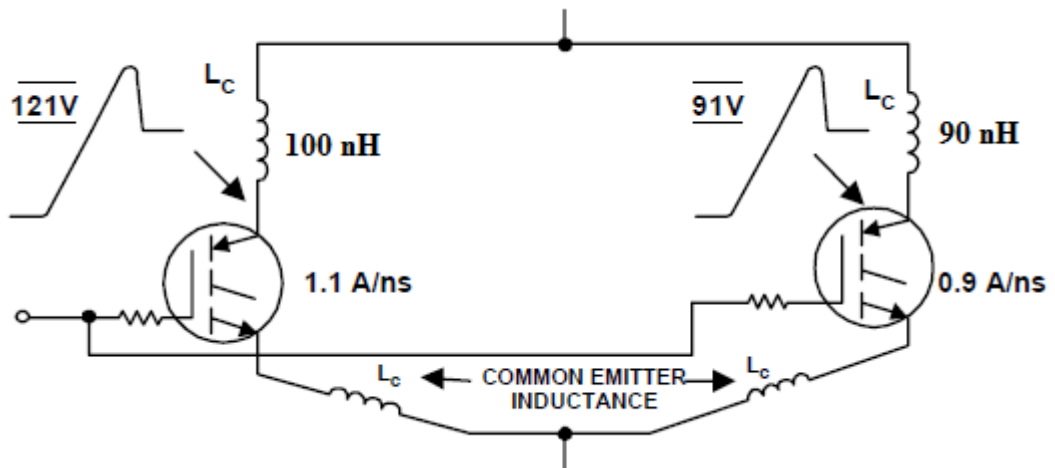
Kuvasta 3.3 nähdään, että PT-tyyppisellä IGB-transistorilla on negatiivinen lämpötilakerroin. Tämä on huono ominaisuus rinnankytkentää ajatellen, koska se voi aiheuttaa niin sanotun virran karkaamisilmiön rinnankytkennässä. Tällöin alkutilanteessa paremmat johtavuustilan ominaisuudet omaava IGBT johtaa suuremman osan virrasta lävitseen samalla lämmeten lisää. Negatiivinen lämpötilakerroin pienentää edelleen $V_{CE(on)}$:ia lisäten virranjohtavuutta, kunnes komponentti hajoaa. Tämän takia PT-IGBT:t tulee aina lajitella, ellei rinnankytkennässä käytetä merkittävää komponenttien ylimitoitusta. (Selgi, 2007)

NPT- ja Field Stop-tekniikalla tätä ongelmaa ei ole, koska positiivinen lämpötilakerroin toimii automaattisena virranjakautumisen tasoittavana. Pienemmän $V_{CE(on)}$:n omaava transistorin kautta kulkee suurempi virta, joka lämmittää komponenttia samalla nostaen haaran impedanssia ja samalla tasoittaen virtaa. Huonona puolena on jännitehäviöiden kasvu. NPT- ja Field-Stop-IGBT:n $V_{CE(on)}$:n käyttäytyy yleensä pienillä virran arvoilla melko muuttumattomana riippumatta liitoslämpötilasta. Sen sijaan suurilla virroilla lämpötilakerroin kasvaa nopeammin.

Kaikilla IGB-transistoreilla on rakenteesta riippumatta negatiivisen lämpötilakertoimen omaava liipaisujännite $V_{GE(th)}$, joka on noin -12 mV/K. Rinnankytkennässä on tärkeää toteuttaa lämpötilan takaisinkytkentä asentamalla kaikki IGBT:t samaan jäähdytyslementtiin, jolloin lämpö siirtyy kuumemmasta komponentista kylmempään. Transistorien etäisyydellä toisistaan sekä jäähdytyslementin mitoituksella pystytään vaikuttamaan takaisinkytkennän suuruuteen. (Selgi, 2007)

3.3 Pääpiirin induktanssi

Kytkeätilanteissa IGB-transistorien kanssa sarjassa olevat haarojen hajainduktanssit hidastavat virran muutosnopeuksia ja synnyttävät haitallisia ylijännitteitä. Kuvassa 3.4 on esitetty esimerkki haarojen epäsymmetriasta.



Kuva 3.4 Eri hajainduktanssien sekä virran muutosnopeuden vaikuttaminen kollektorijännitteisiin sammutustilanteessa. (IRF, 1997)

Kuvasta 3.4 nähdään, että 10 prosentin poikkeavuus hajainduktansseissa sekä kollektorivirran muutosnopeuden erot saavat aikaan 20 prosentin eron kollektorijännitteessä, kun IGBT:t sammutetaan. (IRF, 1997)

Pääpiirissä olevat induktanssit ja resistanssit rajoittavat myös virran nopeaa siirtymistä rinnankytketyltä haaralta toiselle, joten luotettavan toiminnan takaamiseksi kaapeloinnin pitää olla mahdollisimman lyhyt sekä symmetrinen.

3.4 Hilaohjaus

IGBT:tä ohjataan kytkemällä hila-emitterijännitteellä. Rinnankytkettävien IGB-transistorien hilaohjauspiirien ollessa samanlaiset, se IGBT jolla on suurempi transkonduktanssi g_{fs} johtaa suuremman osan virrasta.

Tehollista ohjausjännitettä vähentävät rinnankytkennässä haarojen emitteriresistanssit sekä -induktanssit:

$$V_{GE} = V_{ohjaus} - V_{RE} - L_{\sigma E} \frac{di_C}{dt}. \quad (3.1)$$

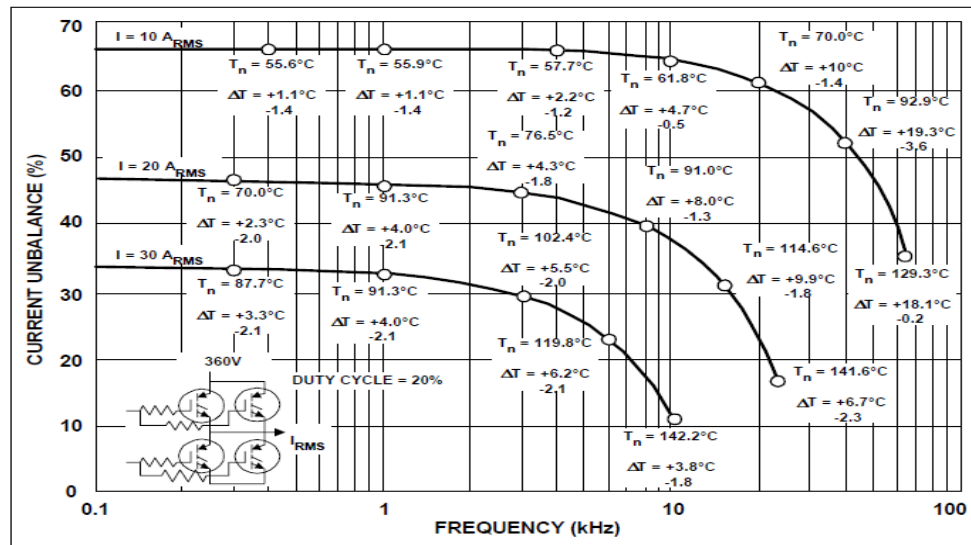
Tämän takia emitterin johdotukset on syytä pitää mahdollisimman lyhyinä sekä symmetrisinä.

Rinnankytkettyjä transistoreita ohjataan yleensä yhteisellä hilapiirillä kustannusten sekä mahdollisten viive-erojen takia. Mikäli rinnankytkettyjen transistorien hilaohjaukset eivät ole kuitenkaan tiukasti kytketty toisiinsa, pystytään V_{CE} :stä riippuvalla Miller-kapasitanssilla vähentämään virran epäsymmetriaa. Tämän johtuu siitä, että pienemmän liipaisujännitteen omaava IGBT alkaa laskea koko haaran yli olevaa jännitettä samalla vähentäen hitaamman IGBT:n Miller-kapasitanssia. Tällöin hitaamman transistorin kytkentä nopeutuu ja virranjako tasaantuu. (IRF, 2007)

Jokaisella IGBT:llä on suositeltavaa käytettävän myös omaa pieni toleranssista hilavasusta, koska se rajoittaa loiskomponenteista aiheutuvaa värähtelyä. Hilaohjaukseen pystytään haluttaessa sisällyttämään virran tasaista jakaantumista lisääviä ominaisuuksia, mutta niiden toteuttaminen on usein liian kallista johtuen tarpeesta mitata jokaisen haaran virtaa. (Joyce, 2001)

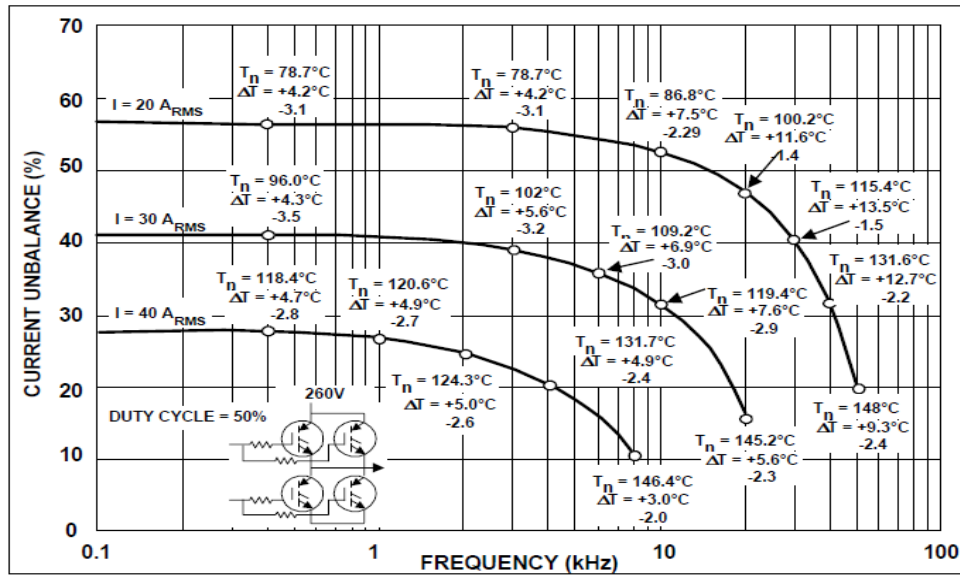
3.5 Kytkentätaajuus ja pulssisuhde

IGBT-transistoreita käytetään tehokytkiminä ja niiden kytkentätaajuudet voivat olla jopa kymmeniä kilohertsejä. Tällöin pienemmän liipaisujännitteen $V_{GE(th)}$ omaava IGBT joutuu toistuvasti kytkentätilanteessa suuren virtarasituksen kohteeksi. Koska IGBT:n liipaisujännitteellä on aina negatiivinen lämpötilakerroin, pitäisi tämän aiheuttaa virran karkaamisilmiön sekä lopulta komponentin tuhoutumisen. Tätä ei kuitenkaan käytännössä tapahdu, vaan taajuuden kasvaminen saa aikaan virran epäsymmetrian piene-
nemisen, mikäli IGBT:llä on positiivinen lämpötilakerroin. Kuvassa 3.5 on esitetty virran epäsymmetria kolmella eri kollektorivirran arvolla. (IRF, 1997)



Kuva 3.5 Virran jakaantuminen kahden rinnankytketyn IGBT:n välillä taajuuden funktiona kolmella eri virran arvolla. (IRF, 1997)

Pulssisuhteen kasvattamisella saadaan lisättyä virran tasaantumista, kuten kuvasta 3.6 ilmenee.



Kuva 3.6 Pulssisuhteen kasvattamisen vaikutus virran jakaantumiseen. (IRF, 1997)

4. PARAMETRIEN MITTAAMINEN

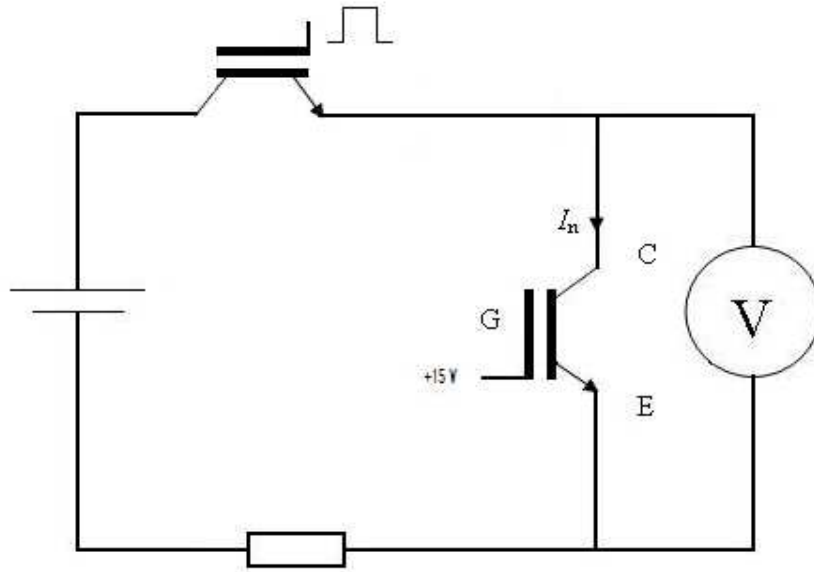
Rinnankytkettävien IGB-transistorien välillä halutaan virran jakautuvan mahdollisimman symmetrisesti luotettavan toiminnan takaamiseksi. Tällöin joudutaan joissakin tapauksissa suorittamaan lajittelu, jossa rinnankytkettävät transistorit valitaan tiettyjen parametrien suhteen samanlaisiksi. Tässä kappaleessa esitellään mittauskytkenät tärkeimpien virranjakoon vaikuttavien parametrien määrittelemiseksi.

4.1 $V_{CE(sat)}$

Kollektori-emitterijännite $V_{CE(sat)}$ määritellään hila-emitterijännitteen funktiona nimellisvirralla. Saturaatioon viittaaminen on hieman virheellistä, koska IGBT toimii oikeasti tällöin lineaarisella alueellaan eikä saturaatiossa.

Kuvassa 4.1 on esitetty mittauskytkenä $V_{CE(sat)}$:n määrittämiseksi. Testattava IGBT on syytä kytkeä jäähdytysriipaan, ettei sen lämpeneminen vaikuta mittaustulokseen. IGBT laitetaan johtavaan tilaan kytkemällä hila-emitterijännitteeksi esimerkiksi 15 voltia. Teholähteeksi tarvitaan suuri tasajännitelähde, ja mikäli se ei kykene syöttämään testattavan IGBT:n nimellisvirtaa, voidaan rinnalle kytkeä energiavarastoksi suuri kondensaattoripatteristo. Virtaa säädetään käyttämällä toista tehotransistoria, jonka avulla piirin virta nostetaan nimellisvirran arvoon hetkeksi ja samalla testattavan IGBT:n yli saadaan mitattua $V_{CE(sat)}$. Piiriin voidaan tarvittaessa lisätä virran nousunopeutta rajoittava kuristin tai kuormavastus. (Joyce, 2001)

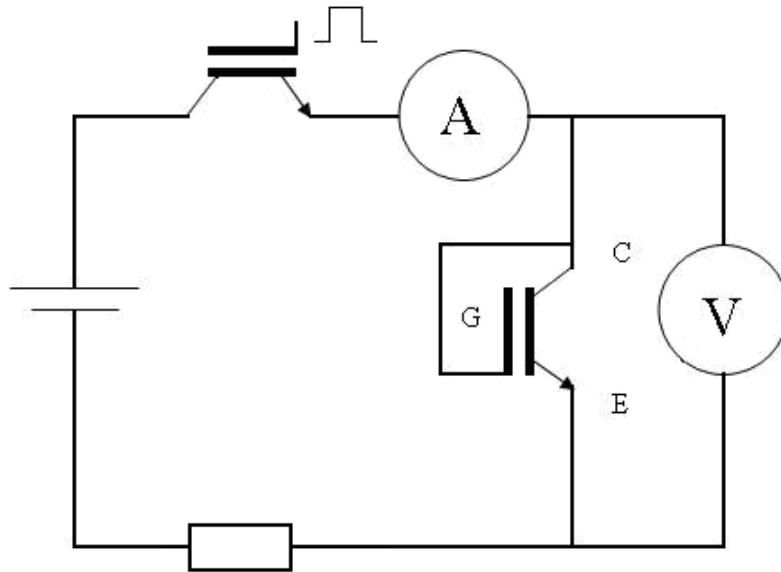
PT-IGB-transistorien rinnankytkennässä $V_{CE(sat)}$:n mittaaminen on tärkeämpää negatiivisen lämpötilakertoimen takia. Rinnankytkettävät IGBT:t lajitellaan esimerkiksi 0,1 voltin tarkkuudella. Jotkut valmistajat tekevät tämän lajittelun jo tuotannossaan ja merkitsevät komponenttinsa tiettyjen saturaatiojänniterajojen mukaan. Saturaatiojännitteen $V_{CE(sat)}$ perusteella lajittelu toimii parhaiten pientä kytkenätaajuutta käyttäessä. (Neacsu, 2006)



Kuva 4.1 Mittauskytkentä $V_{CE(sat)}$:n määrittämiseksi.

4.2 $V_{GE(th)}$

Liipaisujännitteen $V_{GE(th)}$ mittaamiseen tarvitaan säädettävä tasajännitelähde, vastus sekä kaksi yleismittaria tai oskilloskooppi. IGBT:n kollektori sekä hila oikosuljetaan keskenään, jolloin IGBT:n sanotaan toimivan diodi-moodissa. Tasajännitelähteen jännitettä nostetaan, kunnes piirissä kulkee komponentin datalehdessä $V_{GE(th)}$:n kohdassa mainittu testausvirta, jolloin hila-emitterijännite on saavuttanut liipaisujännitteen arvon. Kuvassa 4.2 on esitetty mittaamiseen soveltuva kytkentä. (Joyce, 2001)



Kuva 4.2 Mittauskytkentä $V_{GE(th)}$:n määrittämiseksi.

4.3 Lajittelumittaus

Pienellä muokkauksella kuvan 4.2 $V_{GE(th)}$:n mittauskytkennästä pystytään toteuttamaan lajittelumittaus, joka ottaa huomioon IGBT:n $V_{CE(sat)}$:n, liipaisujännitteen $V_{GE(th)}$ sekä transkonduktanssin g_{fs} . Tässä mittauskytkennässä jätetään kuvan 4.2 virtaa rajoittava vastus pois. Mittaus perustuu virran nostamiseen merkittävään osaan virran nimellisarvosta, jonka jälkeen mitataan IGBT:n yli oleva kollektori-emitterijännite. Mittaus on syytä suorittaa pulssimaisella jännitteellä sekä mahdollista jäähdytysriipaa käyttäen, ettei testattavan IGBT:n lämpötilan ehdi nousta oleellisesti. Useat IGB-transistorien valmistajat suosittelevat tätä lajittelumittauksia, varsinkin jos kytkentätaajuus on korkea.

(IRF, 1997)

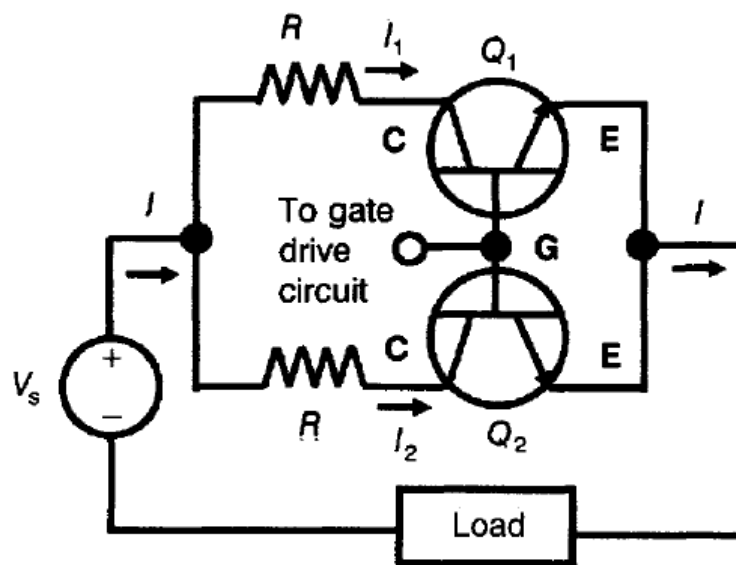
4.4 Kaupalliset mittalaitteet

Puolijohdekomponenttien ominaiskäyrien mittaamiseen on olemassa myös kaupallisia mittalaitteita (*curve tracer*), joissa on yhdistetty oskilloskooppi sekä ohjelmoitava teholaähde. Tällä laitteella pystytään mittaamaan tehokomponenttien ominaiskäyrät helposti. Lähteessä (Etesters, 2010) on lueteltu kaikki markkinoilla olevat tähän tarkoitetut lait-

teet. Tuotannossa lajittelumittauksen täytyy olla nopea ja se voidaan toteuttaa esimerkiksi Labviewin avulla.

5. SARJAVASTUSTEN KÄYTTÖ

Yksi vaihtoehto virran epäsymmetrian tasoittamiseksi on pienten vastusten kytkeminen IGB-transistorien kanssa sarjaan.



Kuva 5.1 Sarjavastusten käyttäminen IGB-transistorien kanssa. (Khanna, 2003)

Sarjavastusten mitoituksessa voidaan käyttää apuna datalehdessä annettuja minimi ja maksimi $V_{CE(sat)}$:n arvoja nimellisvirralla. Lisäksi tarvitsee päättää kuinka suuri virran epäsymmetria sallitaan. Tyypillinen arvo on pienempi kuin 20 prosenttia, kun toinen haara johtaa IGBT:n nimellisvirran.

Oletetaan, että kuvan 5.1 rinnankytkennässä olevan IGBT:n Q_1 yli on datalehdessä mainittu $V_{CE(sat)min}$, samalla kun se johtaa lävitseen nimellisvirran. Sen sijaan IGBT:n Q_2 ylitse on suurin datalehdessä annettu kollektori-emitterijännite $V_{CE(sat)max}$ ja sen lävitse pitää johtaa x prosenttia pienempi virta kuin I_1 .

Tällöin voidaan johtaa Kirchhoffin jännitelain avulla:

$$RI_1 + V_{CE(sat)min} = RI_1 \left(\frac{100 - x}{100} \right) + V_{CE(sat)max} . \quad (5.1)$$

Josta saadaan laskettua sarjavastuksen arvoksi:

$$R = \frac{V_{CE(sat)max} - V_{CE(sat)min}}{I_1 - I_1 \left(\frac{100 - x}{100} \right)} . \quad (5.2)$$

Sarjavastusten lisäämisen huonona puolena ovat niiden aiheuttamat jännitehäviöt sekä lisäkustannus. Lisäksi sarjavastuksilla voidaan tasoittaa vain staattisten tilanteiden virran jakautumista, mutta dynaamisissa tilanteissa epäsymmetria voi olla vielä merkittävä. Transienttitiloja varten voidaan vastukset korvata sarjakuristimilla. (Khanna, 2003)

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena oli tutkia IGB-transistorien toimintaa rinnankytkennässä sekä selvittää siinä esiintyvään virran jakaantumiseen vaikuttavia tekijöitä. Työssä ilmenee, että NPT- sekä Field-Stop-IGBT:t soveltuvat hyvin rinnankytkentään positiivisen lämpötilakertoimensa ansiosta. PT-typin IGBT:ssä joudutaan sen sijaan valitsemaan rinnankytkettävät IGBT:t lajittelumittausten perusteella, mikäli ei käytetä transistorien rajua virrankeston ylimitoitusta. Rinnankytkettävät transistorit tulisi aina kytkeä samaan jäähdytyslementtiin termisen takaisinkytkennän takaamiseksi. Rinnankytkennässä ulkoisen piirin suunnittelu pitää toteuttaa mahdollisimman symmetrisesti sekä lyhyitä johdotuksia käyttäen, jotta hajainduktanssien sekä -resistanssien vaikutus virran jakaantumiseen minimoituisi. Hilaohjaus on yleensä parasta toteuttaa käyttäen yhteistä hilaohjainpiiriä, jolloin pystytään pääsemään eroon viive-eroista. Se on usein myös taloudellisesti edullisin ratkaisu. Hilaohjauspiirien tulee olla mahdollisimman symmetriset toisiinsa nähden sekä hajainduktanssit tulee minimoida layout-suunnittelulla. Jokaisella IGB-transistorilla tulee käyttää omaa pieni toleranssista hilavastusta vähentämään mahdollisia värähtelyjä kytkentätilanteissa. Sarjavastusten käyttö virranjaon tasoittamiseksi on huono ratkaisu johtuen lisäkustannuksista sekä häviöistä.

LÄHTEET

- (Hitachi, 2010) Hitachin kotisivut. Saatavissa: <http://www.hitachi.co.jp/products/power/pse/products/igbt/hight/datasheet/index.html>
[Viitattu 15.09.2010]
- (Bock, 2005) Bock, B. 2005, Switching IGBTs in parallel connection or with enlarged commutation inductance. Ruhr-University. Dissertation. s.18, 55-57, 60-61,
- (Mohan, 1995) Mohan, N., Undeland, T., Robbins, W. 1995. Power Electronics: Converters, Applications and Design. Second Edition. John Wiley & Sons Inc. ISBN: 0-471-58408-8, s.626, 636-637
- (Infineon, 2010) Datalehti: IKW40N120T2. Revision 2. 2010
Saatavissa: <http://www.infineon.com>
- (Semikron, 2007) Semikron. 2007. Application Notes.
Saatavissa: http://www.semikron.com/skcompub/en/application_manual-193.htm
[Viitattu 27.08.2010]
- (APT, 2004) Dodge, J. 2004. Application Note APT0408: IGBT Technical Overview. Saatavissa: <http://www.microsemi.com/micnotes/APT0408.pdf> [Viitattu 10.06.2010]
- (Selgi, 2007) Selgi, L., Sorrentino, G. Fragapane, L., Melito, M. 2007. Preliminary experimental evaluation on PT-IGBT in parallel connection. EPE 2007, Power Electronics and Applications, 2007 European Conference. IEEE. ISBN: 978-92-75815-10-8
- (IRF, 1997) International Rectifier. 1997. Application Note: Application Characterization of IGBTs.
Saatavissa: <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an990.pdf>
[Viitattu 06.06.2010]

- (IRF, 2007) International Rectifier. 2007. Application Note: Paralleling Of Power MOSFETs For Higher Power Output
Saatavissa: <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/para.pdf>
[Viitattu 28.09.2010]
- (Neacsu, 2006) Neacsu, D. 2006. Power-Switching Converters: Medium and High Power. CRC Press. ISBN: 0-824-72625-1
- (Etesters, 2010) Verkkajulkaisu. Saatavissa: http://www.etesters.com/see/Curve_Tracers [Viitattu 12.08.2010]
- (Joyce, 2001) Joyce, J. 2001. Current Sharing and Redistribution in High Power IGBT Modules. University of Cambridge. Dissertation. s.57-59
- (Khanna, 2003) Khanna, V. 2003. The Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) – Theory and Design. John Wiley & Sons Inc. ISBN: 0-471-23845-7, s.421-422, 465-468