



Tehoelektroniikan opetussolu

Opinnäytetyö

Mikko Niskanen

Sähkötekniikan koulutusohjelma
Teollisuuden sähköasennukset ja automaatio

Hyväksytty ____ . ____ . ____ _____

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU TEKNIikka KUOPIO

Koulutusohjelma

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Tekijä

Mikko Niskanen

Työn nimi

Tehoelektronikan opetusolu

Työn laji

Insinöörityö

Päiväys

12.05.2010

Sivumäärä

57+32

Työn valvoja

yliopettaja Vesa Vauhkonen

Yrityksen yhdyshenkilö

Yritys

Savonia-ammattikorkeakoulu sähkötekniikan osasto

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehostaa sähkötekniikan opiskelijoiden opetusta ja oppimista Savonia-ammattikorkeakoulussa. Työssä pyrittiin luomaan mahdollisimman selkeä sekä havainnollinen opetusolu tehoelektronikan opetuksen tukemiseksi. Projektin toteuttamisen mahdollisti Semikron Oy:n lahjoittamat tehoelektronikan komponentit.

Insinöörityön alkuosassa selvitettiin, millaisia tehoelektronikan komponentit ovat ja millaisiin sovelluksiin ne soveltuvat. Lisäksi suunniteltiin esittelytaulut tehoelektronikan peruskomponenttien esittelyyn. Esiteltävät komponentit jaettiin neljään ryhmään: diodit, tyristorit, IGBT-transistorit sekä SkiiP-teknologiat.

Työn loppuosassa käsitellään kahta erilaista esittelykytkentää, joilla on tarkoitus demonstroida IGBT-transistorin sekä tyristorin toimintaa. IGBT-transistorin toimintaa esitellään 1-vaiheisella vaihtosuuntaajakytkennällä, jota voidaan ohjata erilaisilla modulointimenetelmillä, esimerkiksi pulssinleveysmoduloinnilla (Pulse Width Modulation, PWM). PWM-signaali syntyy, kun kolmioaaltoa ja siniaaltoa verrataan toisiinsa. Kolmioaalto syötetään operaatiovahvistimen invertoivaan napaan ja siniaalto ei-invertoivaan napaan. Tällöin operaatiovahvistimesta saadaan positiivinen pulssin, kun siniaalto on suurempi kuin kolmioaalto ja päinvastoin. Näin muodostettu ohjaussignaali syötetään erillisen ohjaimen kautta IGBT-transistoreille.

Esittelytaulut saatiin suunniteltua valmiiksi ja vaihtosuuntaajakytkennän todettiin testauksen yhteydessä toimivan oikein. Toimintaperiaate selvitettiin tyristorin toimintaa kuvaavasta kytkennästä sekä suoritettiin kytkennän alustava suunnittelu.

Avainsanat

Tehoelektronikka, diodi, tyristori, transistori, IGBT, PWM,

Luottamuksellisuus

julkinen

SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree Programme

Electrical Engineering

Author

Mikko Niskanen

Title of Project

Teaching Cell of Power Electronics

Type of Project

Final Project

Date

12 May 2010

Pages

57 + 32

Academic Supervisor

Mr Vesa Vauhkonen, Principal Lecturer

Company Supervisor

Company

Savonia University of Applied Sciences, Department of Electricity

Abstract

The aim of this final project was to enhance the teaching and learning of electrical engineering students at Savonia University of Applied Sciences. This final project aimed at creating a teaching cell to support the teaching of power electronics. The project was made possible by Semikron Ltd's donation of power electronics components.

First Semikron Ltd's donation was checked out to see what power electronics components there were and what applications they are suitable for. Secondly, the presentation boards of the basic power electronics components were designed. The presented components were divided into four categories, diodes, thyristors, IGBT transistors and SkiiP technologies. Thirdly, two different demonstration circuits, aimed at demonstrating the fields of action of the IGBT transistors and thyristors were drawn up.

As a result, the IGBT transistor operation is presented with a one-stage inverter circuit, which can be controlled with a different modulation scheme such as Pulse Width Modulation, PWM. The PWM signal is generated when the sine wave and triangle wave are compared with each other. The sine wave is fed to the non-inverting terminal of the operational amplifier and the triangle wave to the inverting terminal. The operational amplifier provides positive pulses when the sine wave is greater than the triangle wave, and vice versa. This control signal is then fed through a separate controller to IGBT transistors. The thyristor circuit operation was described and the preliminary design was made. The result of the entire project was good and the benefits of the project could easily be demonstrated.

Keywords

power electronic, diode, thyristor, IGBT, PWM,

Confidentiality

public

Alkusanat

Tämä tutkintotyö on tehty Savonia-ammattikorkeakoulun sähkötekniikan osastolla. Työn valvojana ja tarkastajana on toiminut yliopettaja Vesa Vauhkonen.

Kiitän Vesa Vauhkosta haastavasta ja mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta, sekä opastuksesta. Kiitoksia myös sähköosaston henkilökunnalle yhteistyöstä ja avusta työn parissa.

Lopuksi haluan erityisesti kiittää rakasta vaimoani Liisaa kotona saamastani tuesta.

Kuopiossa ____ . toukokuuta 2010

Mikko Niskanen

Sisällys

Sisällys	5
1 JOHDANTO	6
2 TEHOELEKTRONIIKAN AKTIIVISET KOMPONENTIT	7
2.1 Diodit	7
2.2 Ohjattavat kytkinkomponentit	9
2.3 Komponenttien suojaus	18
3. VALITUT KOMPONENTIT JA NIIDEN ESILLEPANO	23
4 DEMONSTRAATIOKYTKENTÖJEN VALINTA.....	25
4.1 Puolisiltakytketty IGBT-vaihtosuuntaaja	25
4.1.1 Pulssinleveysmodulointi	26
4.2 Tyristorisuuntaaja	28
5 IGBT-VAIHTOSUUNTAAJAN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS	30
5.1 Ohjauspiirin toteutus.....	30
Kolmioaalto-oskillaattori	31
Sinaaalto-oskillaattori	34
Vertailija	36
PWM-signaalin invertointi ja ohjauspiirin erotus	38
5.2. Piirilevyn suunnittelu ja toteutus	42
5.3 Mittaustulokset	44
5.4 Mittaustulosten kommentointi	51
6 TYRISTORISUUNTAAJAN ALUSTAVA SUUNNITTELU	52
7 YHTEENVETO	55
LÄHTEET.....	56
LIITTEET	57
Komponenteista esitettävät tiedot.....	57
Mittaustulokset.....	78
Valokuvat esittelytaulusta.....	87

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on ollut tehostaa tulevien sähkötekniikan opiskelijoiden opetusta ja oppimista Savonia-ammattikorkeakoulussa. Työssä on pyritty täydentämään tehoelektroniiikan opetusjärjestelyitä sekä luomaan mahdollisimman selkeä sekä havainnollinen opetussolu tehoelektroniiikan opetuksen tukemiseksi. Projektin toteuttamisen mahdollisti Semikron Oy:n lahjoittamat tehoelektroniiikan komponentit.

Opetussolu muodostuu useista erilaisista tehoelektroniiikan komponenteista, joita voidaan lisätä ja poistaa solusta tarvittaessa. Itse solu on pyörillä liikuteltavissa, joten se on helposti kuljetettavissa eri opetustiloihin. Pelkkien komponenttien esittelyn lisäksi suunniteltiin opetusta ja komponenttien toimintaa havainnollistavia kytkentöjä, jotka ovat helposti toteutettavissa. Kytkenät suunniteltiin yhteistyössä opettajien kanssa. Omaksi osuudekseni jäi komponenttien esittelyjen suunnittelu ja kytkentöjen käytännön toteutuksen suunnittelu sekä testaus.

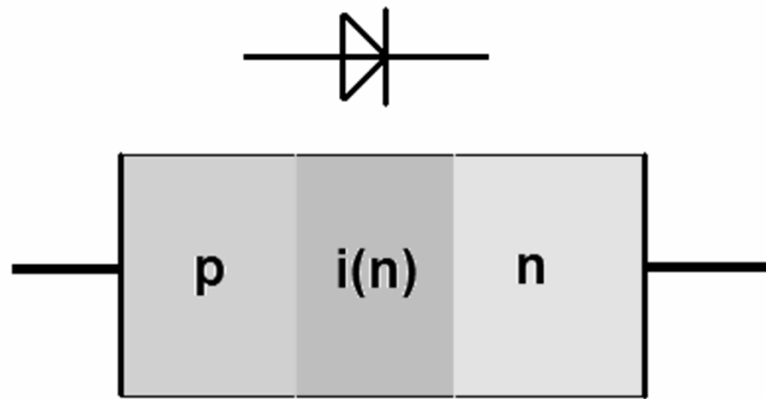
2 TEHOELEKTRONIIKAN AKTIIVISET KOMPONENTIT

Tehoelektroniikka on elektroniikkaa, jolla käsitellään suuria tehoja. Tehoelektroniikka poikkeaa pientehoelektroniikasta merkittävästi. Esimerkiksi puolijohdekomponentit vaativat lähes aina jonkinlaisen suojapiirin. Tehoelektroniikkaa käytetään säätämään laitteiden tehoa tai moottorin pyörintänopeutta elektronisesti. Puolijohteet toimivat ohjattuina on- off- kytkiminä.

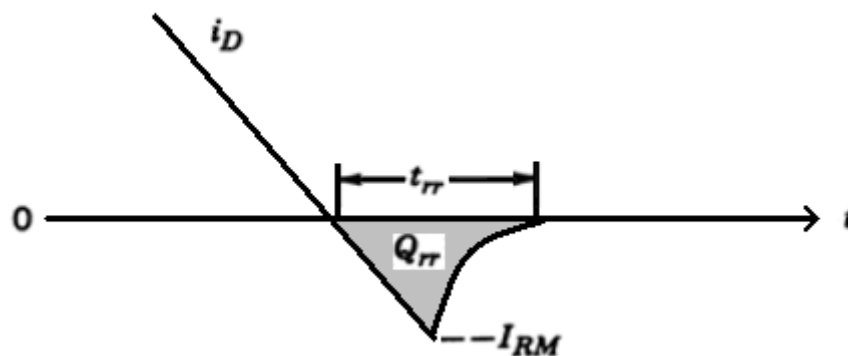
2.1 Diodit

Diodi on yksinkertaisin puolijohdekomponentti. Se läpäisee virtaa vain toiseen suuntaan eli sen resistanssi on hyvin pieni tai suuri, riippuen virran suunnasta. Tehoelektroniikassa diodia käytetään yleensä kytkimenä tai tasasuuntaamaan vaihtovirtaa. Yleisimmin käytettyjä diodityyppejä ovat PIN-, Avalanche - sekä Schottky-diodit.

PIN-diodi kestää suuria estosuuntaisia jännitteitä. Näissä komponentin keskialue on heikosti saostettua N-tyyppistä piitä. Rakenne on nähtävissä kuvassa 2.1. Heikosti saostetun alueen tarkoituksena on juuri jännitekestoisuuden lisääminen. Estotilassa PIN-diodin vuotovirta on hyvin pieni, mutta johtavassa tilassa PIN-diodi ei merkittävästi eroa normaalista PN-diodista. Jännitehäviö on hiukan suurempi i-alueen suuremman resistiivisyyden vuoksi. Jos virta laskee nopeasti nolnaan, aiheuttaa laaja liitosalue ongelmia, koska diodi ei menekään heti estotilaan. Tästä seuraa ns. takavirta, jolloin diodi johtaa jonkin aikaa myös estosuuntaan. Diodin takavirran kestoaika, jota merkitään lyhenteellä t_{RR} , on esitetty kuvassa 2.2. PIN-diodit eritelläänkin juuri takavirran kestoajan mukaisesti nopeisiin ja hitaisiin tyypeihin. Hitaat soveltuvat vain 50 - 60 Hz verkkotaajuuksille. Johtoviive (t_{ON}) on aika, joka diodilta menee johtavuuden aikaansaamiseksi. Aika ei ole suuri, mutta voi olla haitallisen pitkä suojauskytkennöissä. /2/



Kuva 2.1 Diodin piirrosmerkki ja PIN- diodin rakenne./2/

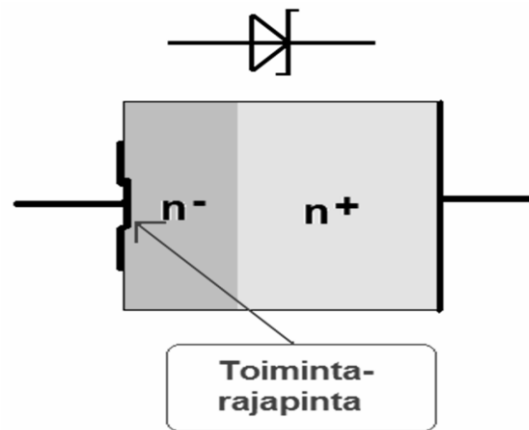


Kuva 2.2 Diodin takavirta.

Soft recovery PIN -diodeissa sähkökenttä jakautuu epätasaisemmin, jolloin takavirta on pienempi ja muoto pyöreämpi. Muutoin se häviää jännitekestoisuudessaan ja jännitehäviöissään perusmallille. /2/

Avalanche-diodi kestää estosuuntaisen purkauksen, mikä on seurausta tasaisesta sähkökentän jakaumasta koko liitosalueella. Vaadittava tasainen saostus saadaan aikaan vain neutronisäteilytettyyn piihin. /2/

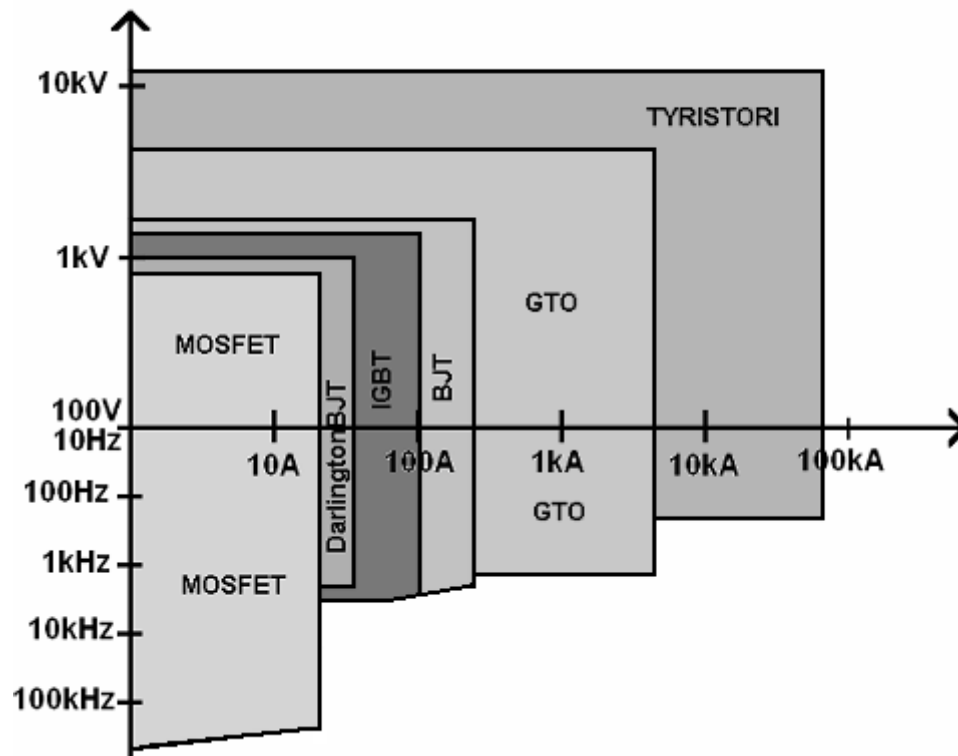
Schottky-diodi perustuu metallin ja kahden N-tyypin puolijohteen rajapintayhdistelmään kuva (2.3). Rajapinnoista toinen on heikosti ja toinen vahvasti saostettu. Toimintarajapinta muodostuu heikommin saostetun puolijohteen ja metallin välille. Schottky-diodin etuja ovat nopeus ja pieni kynnyksjännite eli siis pienet häviöt. Ongelmana on vaatimaton jännitekestoisuus, parhaimmillaankin alle 100 V. Schottky-diodia käytetään yleisesti hakkuriteholähteissä. /2/



Kuva 2.3 Schottky-diodin piirrosmerkki ja rakenne./2/

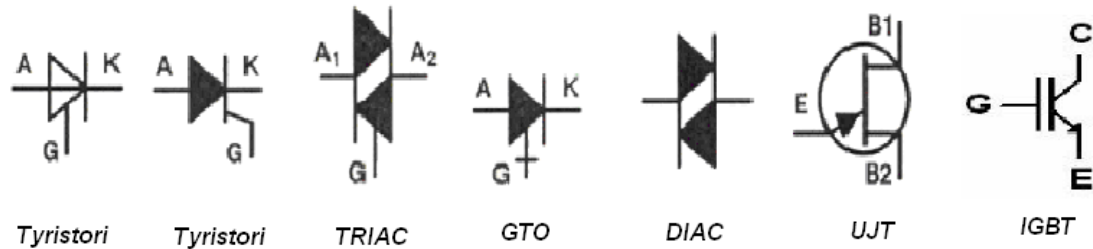
2.2 Ohjattavat kytkinkomponentit

Kuvassa 2.4 on esitetty suuntaa antava kaavio eri kytkinkomponenttien toiminta-alueista. Kaaviosta on nähtävissä, kuinka komponenteilla siirrettävä teho kasvaa lähes samassa suhteessa, kuin komponenttien kytkentätaajuus pienenee.



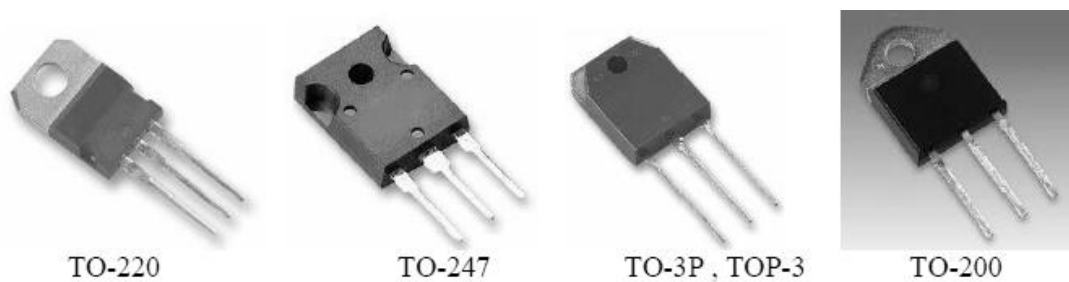
Kuva 2.4 Kytkekomponenttien tyypilliset toiminta-alueet. /2/

Kuvassa 2.5 on esitetty tyypillisiä käytössä olevia kytkinkomponenttien piirrosmerkkejä.



Kuva 2.5 Tehoelektroniikan komponenttien piirrosmerkkejä./2/

Pienemmillä tehonkestoilla ja häviötehoilla käytetään piirilevyille juotettavia komponentteja, joista esimerkkejä on nähtävissä kuvassa 2.6.



Kuva 2.6 Pienillä tehoilla käytettäviä koteloitintapoja./2/

Suuren tehonkeston omaavissa tehokomponenteissa käytetään moduulityyppistä koteloitintia kuva (2.7).



Kuva 2.7 Suuritehoisten komponenttien koteloitintapoja./2/

Kytinkäytössä olevaa transistoria ohjataan joko johtamattomaksi (auki) tai johtavaksi (kiinni).

Tärkeimpiä toimintakriteerejä ovat:

- maksimivirta
- maksimi auki-tilan jännitteensieto
- johtavan tilan jännitehäviö
- tilanvaihtojen nopeus ja niistä riippuvat tehohäviöt
- ohjausenergian tarve
- ohjausjännitteen tarve
- ulkoisten komponenttien tarve.

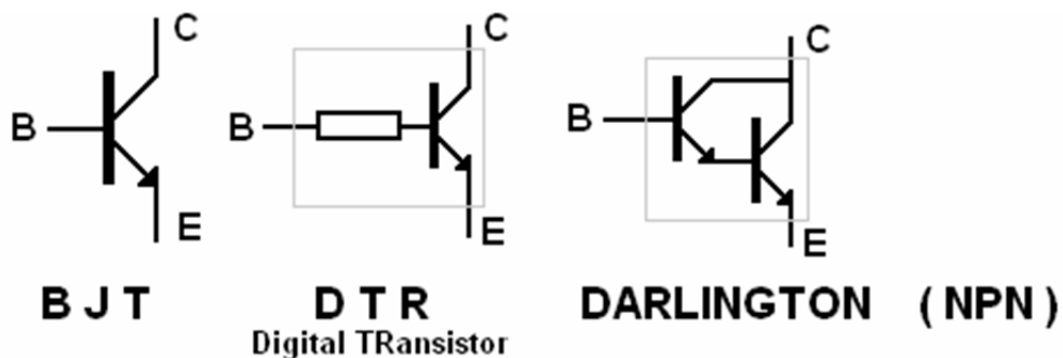
Tärkeimmät tehoelektroniiikan transistorit ovat BJT, MOSFET, FET sekä IGBT.

Bibolaaritransistoria ohjataan kantavirralla, jonka tulee kytkinkäytössä olla aika suuri.

Darlington-kytketyssä transistorissa on kaksi tai useampia transistoreita sarjassa, joista ensimmäisellä ohjataan varsinaisen tehoasteen kantavirtaa. Tällainen kytkentä vähentää ohjausenergian tarvetta, mutta hidastaa asteen toimintaa muutostilanteissa.

Darlington-kytkettyjä transistoreita on saatavana valmiina, mutta ne voidaan toteuttaa myös erilliskomponentein. DTR-transistori sisältää kannalla sisäänrakennetun resistanssin kuva 2.8. /2/

BJT-transistoreiden yleisiä ominaisuuksia ovat johtavan tilan pienet jännite- ja tehohäviöt suurilla virroilla. Hitaahko muutos johtavaksi taas aiheuttaa tehohäviöitä. Lisäksi ne vaativat paljon ohjaustehoa. /2/

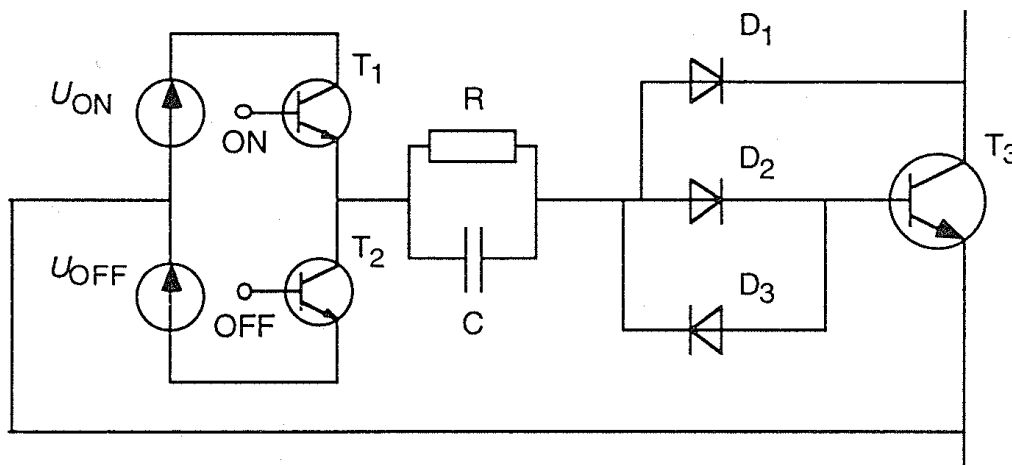


Kuva 2.8 Yleisimmät BJT-kytkintransistorirakenteet (NPN)./2/

BJT vaatii täysin johtavaksi mennäkseen ylioheutta eli hieman suurempaa kantavirtaa kuin transistorin vahvistuserroinluvasta h_{fe} voisi päätellä. Tämän vuoksi

kytkinkäytössä määritellään oma virtavahvistuskertoimensa, kyllästystilan virtavahvistus. Kytkeä- ja sammutustilanteissa virran tulisi olla vieläkin suurempi (sammutustilanteessa lievä negatiivinen piikki), jotta kytkeytymis- ja sammutusaika saataisiin mahdollisimman lyhyiksi, eikä tarpeettoman suurta kantavirtaa pidettäisi yllä koko aikaa. Liian suuri kantavirta hidastaa avautumisaikaa. Pienitehoisissa piireissä voidaan käyttää pelkkää kantavastusta. Suurempitehoisissa piireissä on käytettävä lisäksi rinnan kytkettyä kondensaattoria tai ohjausmuuntajaa. /2/

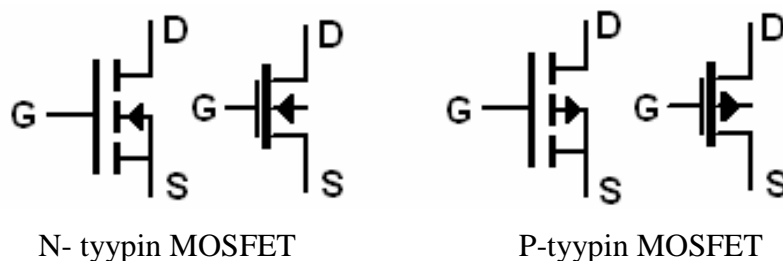
Kuvassa 2.9 on esitetty esimerkkinä Barker-clamp-kantaohjauspiiri. Barker-clamp-kytkennän muodostavat diodit $D_1 \dots D_3$. Mikäli transistorin kollektoripotentiaali yrittää pudota kantapotentiaalin alapuolelle, ohjaa diodi D_1 osan kantavirrasta kannan ohitse. Kollektori-emitterijännite ei siis voi olla kanta-emitterijännitettä pienempi. Kondensaattorin C tehtävänä on syöttää päällekytkentä- ja katkaisuvaiheen aikana ylimääräinen kantavirtapulssi. Näin taataan kantavirran nopea reagointi ohjaustransistorien T_1 ja T_2 toimintaan. Vastus R rajoittaa kantavirran suuruuden jatkuvassa tilassa. /5/



Kuva 2.9 Barker-clamp-kantaohjauspiiri. /5/

MOSFET:illa ei voida kytkeä kovinkaan suurta virtaa, maksimissaan vain muutama kymmenen ampeeria. Vaatimaton virrankesto on seurausta siitä, että MOSFET:n johtavan tilan tehohäviöt kasvavat virran neliössä. MOSFET:n johtavan tilan resistanssi ja jännitekesto ovat käänteisiä parametreja, eli jännitteenkeston lisääminen kasvattaa johtavan tilan resistanssia ja samalla myös johtavan tilan häviöitä.

MOSFET:n hyviä puolia ovat pienet kytkentähäviöt oikein ohjattuna. Tästä seuraa mahdollisuus käyttää suurta kytkentätaajuutta. Myös ohjauspiirin rakenne on yksinkertainen. Kytkintransistoreina käytetään ainoastaan N-tyypin FET-transistoreja. Kuvassa 2.10 on esitetty MOSFET:sta käytetyt piirrosmerkit. /2/



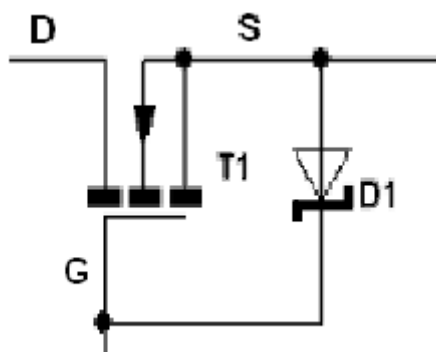
Kuva 2.10 N- ja P-tyypin MOSFET:sta käytetyt piirrosmerkit./2/

MOSFET:a ohjataan jännitteellä, joka on tyypistä riippuen 3 V ... 10 V täysin johtavaksi saamista varten.

MOSFET:n yleisiä ominaisuuksia ovat:

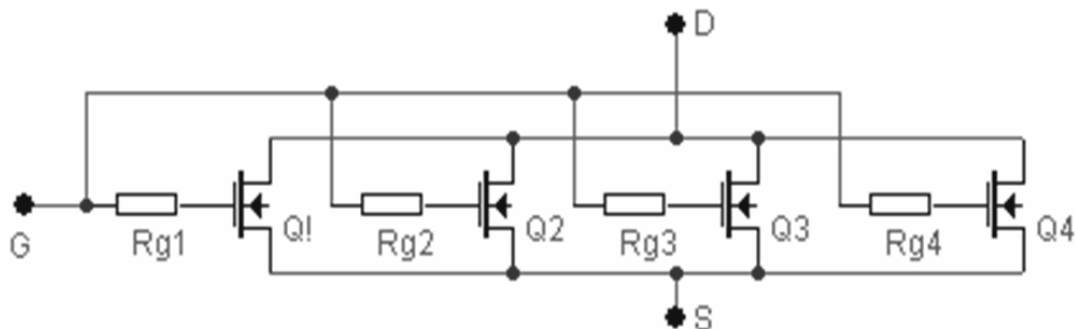
- tilanvaihdot ovat nopeat
- ohjausenergian tarve on pieni
- johtavan tilan tehohäviö kasvaa virran neliössä
- ohjaustehon tarve kasvaa kytkentätaajuuden kasvaessa.

FET:n hilan resistanssi on lähes ääretön, mutta hilan kapasitanssi drainille ja varsinkin sourceelle on suurehko. Miller-kapasitanssi lisää vielä DG-välin kapasitanssin vaikutuksen monikertaiseksi. Tämän vuoksi myös FET-ohjauspiirin on pystyttävä antamaan muutostilanteessa suurehko virta. Miller-efekti saa aikaan avaustilanteessa lisää ongelmia. DG-välisen jännitteen nousun vuoksi kapasitanssi DG-välillä syöttää virtaa hilalle. Tämä voi saada aikaan värähtelytaipumusta ja pahimmillaan jännite voi nousta niin ylös, että hilan läpilyöntikestoisuus ylittyy ja GS-välillä tapahtuu läpilyönti, joka tuhoaa komponentin. Hilapiirillä tuleekin tämän vuoksi olla pieni resistanssi. Resistanssin tulisi olla suuruusluokkaa 10 Ω ... 50 Ω, jottei ylitettäisi DS-välin suurinta sallittua dU/dt -arvoa. Hilalta maahan on lisäksi suositeltavaa kytkeä nopea zener-suoja, kuten kuvassa 2.11, varsinkin jos sarjavastus on suurehko. Rinnankytkennässä on käytettävä erillisiä hilavastuksia. /2/



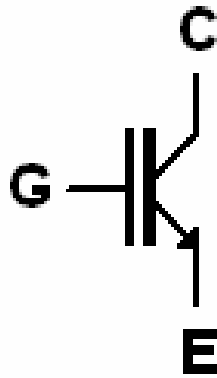
Kuva 2.11 FET:n suojaus zener-diodilla.

FET:llä johtavuus huononee lämpötilan noustessa, joten suoraa rinnankytkentää voidaan (ja tuleekin) käyttää. Jokaisella FET:llä tulee olla oma hilavastuksensa (muutama kymmenen ohmia).



Kuva 2.12 FET:n rinnankytkentä./2/

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) -komponentti on kehitetty yhdistämällä bipolaaritransistorin ja MOSFET:n parhaat ominaisuudet. Näin on saatu ohjattava komponentti, jonka tarvitsema ohjausteho on pieni, kytkentänopeus suuri (n. 20 kHz) ja joka soveltuu satojen kilowattien tehoisiin suuntaajalaitteisiin. Komponentti eroaa tyristorista siinä, että sen virran kulku kollektorilta (C) emitterille (E) voidaan katkaista halutulla hetkellä muuttamalla ohjausjännite hilan (G) ja emitterin välillä nollassa tai negatiiviseksi (kuva 2.13). IGBT on tyristoria huomattavasti nopeampi komponentti, mutta häviää tälle kuitenkin tarkasteltaessa kytkettäviä maksimitehoja. IGBT:t ovatkin nykyisin syrjäyttäneet keskitehoisissa vaihtosuuntaajissa muut puolijohdekomponentit lähes kokonaan. /2/

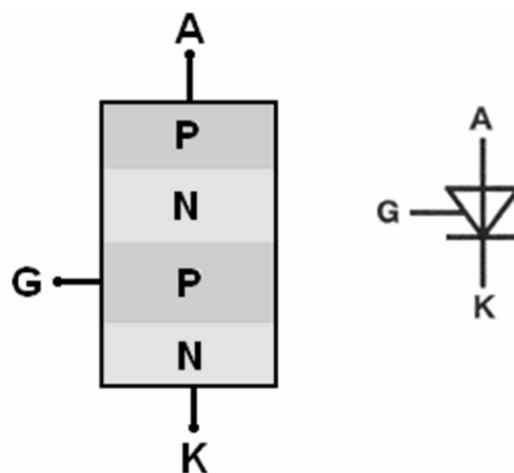


Kuva 2.13 IGBT:n piirrosmerkki.

IGBT:n ominaisuuksia ovat pieni ohjausenergian tarve, pienet päästöhäviöt sekä suurehkot kytkentähäviöt.

Perinteisesti tehoelektroniikassa on käytetty transistorien asemesta tehotyristoreita. Tyristori on puolijohde, joka muistuttaa hieman diodia. Toisin kuin diodi, tyristori johtaa vasta, kun sen hilalle tulee riittävän suuri virtapulssi katodiin nähden. Hilan kautta tehtyä tyristorin sytyttämistä sanotaan liipaisemiseksi. Tyristori lakkaa johtamasta, kun sen läpi kulkeva virta putoaa lähelle nollaa tai sen yli oleva jännite muuttuu estosuuntaiseksi. Tyristorin rakenne ja piirrosmerkki on esitetty kuvassa 2.14.

/2/



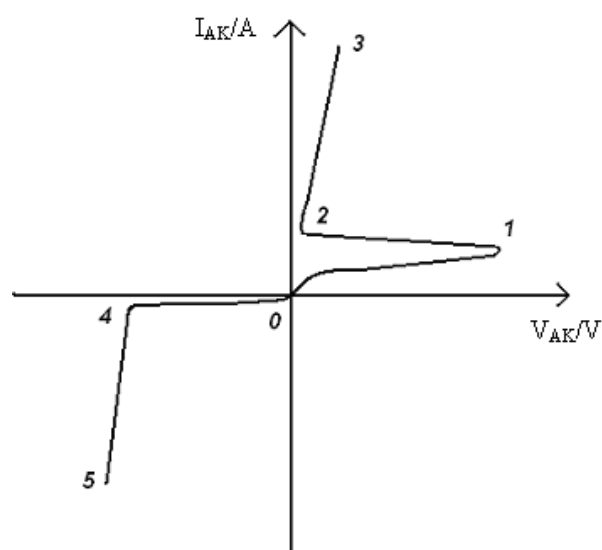
Kuva 2.14 Tyristorinrakenne ja piirrosmerkki./2/

Tyristori voi syttyä eli mennä johtavaksi seuraavista syistä:

1. Anodin ja katodin välinen jännite ylittää P- ja N-rajapintojen välisen läpilyönti arvon U_{BO} .
2. Anodin ja katodin välinen jännite nousee liian nopeasti (dU / dt). Tämä johtuu siitä, että puolijohderajapintojen välillä on kapasitanssia, josta tulee tällöin liipaisuun tarvittava pulssi.
3. Hilan kautta kulkee riittävän suuri tasavirta.
4. Hila saa hetkellisen virtapulssin.

Tapa 4 on tyristorin toivottu liipaisutapa.

Tyristoria ohjataan hilalle tuotavalla, hilalta katodille kulkevalla virtapulssilla. Mikäli anodin ja katodin välinen jännite on positiivinen, ja hilalle tuodaan sytytyspulssi, niin tyristori syttyy, eli sen läpi alkaa kulkea virtaa anodilta katodille. Virran tulee nousta vähintään arvoon I_L (Latching Current, lukkiutumisvirta). Tällöin tyristori jää johtavaksi. Jos johtavan tyristorin virta pienenee alle pitovirran I_H (Holding Current), tyristori lopettaa johtamisen. Tyristorilla on kolme toimintatilaa: estosuuntainen estotila, myötäsuuntainen estotila ja myötäsuuntainen johtotila. Tyristorin toimintaa havainnollistaa kuvan 2.15 ominaiskäyrä. /2/



Kuva 2.15 Tyristorin ominaiskäyrä.

Kuvassa 2.15 välillä 0-1 tyristori on myötäestotilassa. Kohdassa 1 tyristori sytytetään hilavirralla I_G ja välillä 1-2 tyristori siirtyy päästötilaan. Päästötilassa 2-3 tyristorin yli jää pieni jännite, joka riippuu virran suuruudesta. Välillä 0-4 tyristori on estotilassa ja kohdassa 4 estosuuntainen jännite aiheuttaa läpilyönnin, jolloin tyristori toimii estosuuntaisella läpilyöntialueella. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että komponentti tuhoutuu.

TRIAC on kaksisuuntainen tyristori. Siinä on kaksi vastakkaisiin suuntiin rinnan kytkettyä tyristoria, joiden hilat on kytketty yhteen. Kun TRIAC:n hilalle tuodaan virtapulssi, jonka napaisuus on sama kuin triacin navoilla olevan jännitteen napaisuus, triac menee johtavaan tilaan. Napojen välisen jännitteen laskiessa riittävän alas tai vaihtaessa napaisuutta palaa triac johtamattomaan tilaan. /2/

GTO (Gate Turn Off) on hilalta sammutettava tyristori, joka asetetaan johtavaksi positiivisella virtapulssilla ja voidaan sammuttaa eli asettaa johtamattomaan tilaan negatiivisella virtapulssilla. GTO-tyristori vaatii lähes aina RC-suojan, varsinkin, jos kuormassa on induktanssia. Suurilla tehoilla GTO:n liipaisupiiri on melko monimutkainen, mutta komponentin valmistajan sovellusohjeissa on usein esimerkkikytkentöjä mitoitusohjeineen. /2/

IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) :ssä on samaan piiriin integroitu GCT (Gate Commutated Thyristor) ja sen ohjauspiiri. Tästä syystä IGCT vaatii vähemmän komponentteja kuin tavallinen keskijänniteohjain. Se on aikaisempia ratkaisuja luotettavampi, kompaktimpi ja vähemmän jäähtytystä vaativa. IGCT vastaa kytkentäominaisuuksiltaan IGBT- piiriä ja johtamisominaisuuksiltaan tyristoria. Se mahdollistaa jopa 1000 Hz toimintataajuuden täydellä virta-arvolla. /1/

MOS (Metal Oxide Semicontactor) -tyristori on FET:n ja tyristorin kombinaatio. Se on jänniteohjattu komponentti, joten sen ohjaustehon tarve on merkittävästi pienempi kuin GTR- ja GTO-tekniikassa. MOS-tyristori korvaa tulevaisuudessa suurijännitteiset GTO-tyristorit ja sen toimintataajuus nousee merkittävästi ylemmäksi kuin GTO:n. /1/

Bipolaarinen tehotransistorimoduuli koostuu useista (8 - 12 kpl) rinnankytketyistä kolmeasteisista Darlington-transistoreista (npn-transistori) ja nolladiodeista, kahdesta speed up –diodista (diodi hilan ja emitterin välillä) ja puolijohdevastuksista. Pienemmillä tehoilla yksi moduuli voi muodostaa invertterin yhden haaran. GTR-moduulin virrankatkaisu tapahtuu kytkemällä sen kannan ja emitterin välille negatiivinen jännite (-7 V) ja kollektorivirta katkeaa varauspoistoajan jälkeen. Myös GTR-moduulin jännitekestoisuus ja virrankatkaisukyky on rajoitettu, mikä täytyy ottaa huomioon invertterin komponenttien mitoituksessa ja suojauksessa. GTR-moduuli sytytetään positiivisella kantavirralla ja pidetään johtavana riittävän suurella kantavirralla (transistori on kyllästetty). GTR-moduulin johtotilan jatkuva kantaohjaus on välttämätön toisin kuin esimerkiksi GTO-tyristorilla. Toimintataajuus riippuu merkittävästi häviöistä, mutta GTR-moduulin virrankatkaisukyky ei ole niin jyrkästi rajattu kuin GTO-tyristorin, minkä takia GTR-invertterit kestävät paremmin oikosulussa ilman läpilyöntiä kuin GTO-invertterit. /1/

2.3 Komponenttien suojaus

Suojauksen tarkoituksena on estää tehopuolijohteen tuhoutuminen sekä normaalin toiminnan että vikatilanteiden aikana.

Normaalitoiminnassa komponentti tulee suojata seuraavilta ilmiöiltä:

- Ylijännite
 - Korkeita jännitteitä esiintyy aina induktanssia sisältävissä piireissä. Nopea virrankatkaisu saa aikaan virran muutosnopeuteen verrannollisen jännitteen, joka useimmiten ilman suojausta riittäisi tuhoamaan komponentin.
 - Korkeita jännitteitä esiintyy myös ilmastollisista syistä ja syöttöverkossa tapahtuvien jänniteheilahteluiden yhteydessä kytkettäessä ja irrotettaessa kuormia verkosta.
- du/dt -rasitus
 - Myös suuret jännitteen nousunopeudet aiheutuvat useimmiten induktansseista.
 - Komponenteilla on rajallinen sähkökentän muutoksen sietokyky.

- Tyristorit syttyvät itsestään, jos jännitteen nousunopeus on liian suuri.
- EMC-määräyksiä toteuttaminen vaatii myös jännitteen nousunopeuksien hillitsemistä.
- Heijastusilmiöt pitkissä kaapeleissa aiheuttavat ongelmia. Niitä esiintyy varsinkin pitkillä syöttöjohdoilla varustetuilla taajuusmuuttajilla.
- di/dt-rasitus
 - Suojausta tarvitaan rajoittamaan kytkentähäviöitä kytkentätilanteissa.

Vikatilanteissa komponentit tulee suojata seuraavia ilmiöitä vastaan:

- Ylivirta, jonka aiheuttajana voivat olla ylikuorma, oikosulku, komponenttivika tai ohjauselektronikan vika.
 - Ylikuormalta voidaan suojata elektronisilla piireillä.
 - Oikosulku- ja komponenttivikoja vastaan tarvitaan sulakesuojaus.
 - Puolijohteista tyristorit on helppo suojata nopeilla sulakkeilla.
 - GTO-tyristorien oikosulkukestoisuus on tavallisia tyristoreita heikompi, joten niiden sulakesuojaus on vaikeampaa.
 - Transistoreiden oikosulkukestoisuus on heikko, jolloin sulakkeet eivät ehdi transistoria suojata, niinpä sulakkeet ovatkin vain suojaamassa muuta kytkentää pahemmilta tuhoilta.
- Ylilämpö:
 - Ylilämpenemistä voi esiintyä jäähdytyksen vioituttua (pöly, puhallinvika yms.)
 - Jäähdytys on väärin mitoitettu.
 - Ylikuormitustilanteessa tulee toimia ylikuormitussuojauksen, ei lämpösuojauksen.

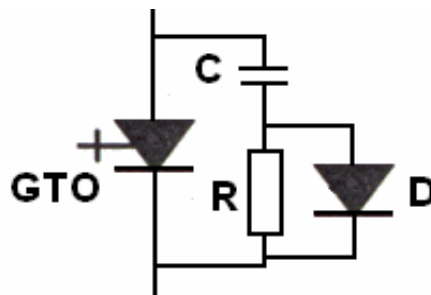
Suojauksen I^2t -arvo on oikosulkuvirran neliön aikaintegraali. Teho kasvaa virran neliössä ja energia suorassa suhteessa tehoon ja aikaan. Suojana käytettävällä suojalaitteella (= sulakkeella) tulee olla pienempi I^2t -arvo kuin suojattavalla komponentilla, koska suojauslakkeen on toimittava ennen komponentin tuhoutumista.

Sulaketta käytetään oikosulkusuojana diodi- ja tyristoripiireissä; Transistorin tai GTO:n suojaukseen sulakkeesta ei ole. Sulakkeen tarkoituksena onkin estää vaurion

laajeneminen. Suojana käytettävällä suojalaitteella (= sulakkeella) tulee olla pienempi P_t -arvo, kuin suojattavalla komponentilla. Sulakkeella on oltava riittävä katkaisukyky. Liian pienen katkaisukyvyyn omaava sulake räjähtää valokaaren aiheuttaman paineen vaikutuksesta. Suuren katkaisukyvyyn sulakkeet on yleensä täytetty kvartsihiekillä, joka absorboi valokaaren energiaa. /2/

RC-suoja (Diodi, BJT, MOSFET, tyristori) koostuu vastuksesta ja kondensaattorista. RC-sarjaankytkentä kytketään komponentin yli. RC-suoja alentaa komponentin katkaisutilanteessa jännitteen muutosnopeutta ja pienentää samalla ylijännitepiikkiä. Suojaa käytetään yleisesti diodien, transistoreiden (BJT ja FET) ja tyristorien yhteydessä. /2/

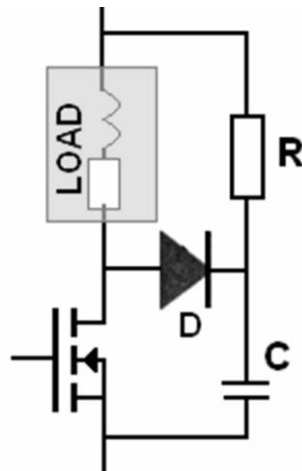
Varsinkin GTO-tyristorille tulee toteuttaa katkaisutilanteessa virralle kulkutie. Tämä onnistuu kuvassa 2.16 olevan polaroidun RC-suojan avulla. Suojapiirin hajainduktanssit on pidettävä mahdollisimman pieninä. /2/



Kuva 2.16 Polaroitu RC-suoja. /2/

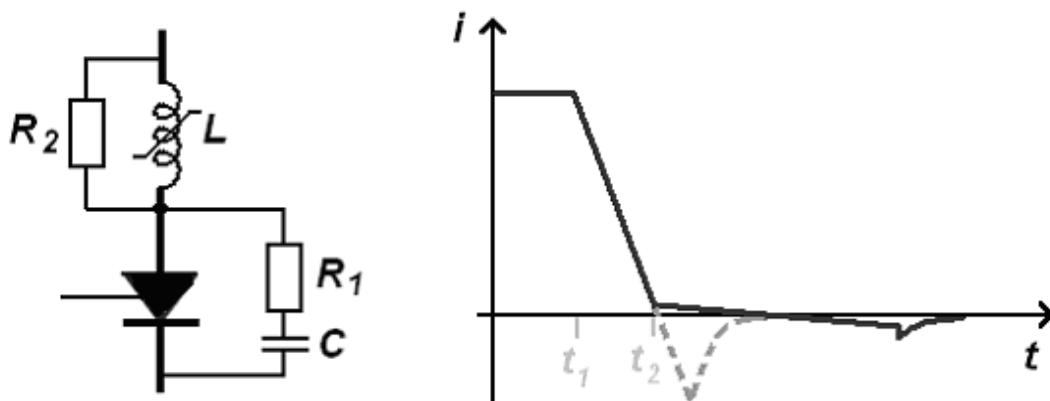
Polaroidun RC-suojan toiminta on seuraava. Tyristorin avautuessa (= mennessä johtamattomaan tilaan), kytkeytyy kondensaattori (C) tyristorin rinnalle, koska diodi (D) on myötäsunnassa. Kondensaattorin varaus purkautuu vastuksen R kautta tyristorin ollessa johtavana. /2/

Ylijännitesuoja (kuvassa 2.17) leikkaa tehokkaasti ylijännitepiikit. Kytkennän muodostavat R, C ja D. Kytkentä ei anna suojaa du/dt :lle, muttei myöskään aiheuta tehohäviötä kuten aiemmin esitellyt kytkennät. Itse asiassa kytkentä parantaa hyötysuhdetta palauttamalla osan induktanssin energiasta lähteeseen. /2/



Kuva 2.17 Ylijännitesuoja./2/

Kyllästyvä kuristin (kuvassa 2.18) kyllästyy normaalilla toimintavirralla. Eli normaalitilanteessa kuristin on kyllästynyt ja sen vaikutus piirissä on vähäinen. Kytkentätilanteissa, virran ollessa pienempi, kuristin toimii induktanssina pienentäen näin virran muutosnopeutta. Kyllästyvä kuristin pienentää sekä di/dt että du/dt -arvoa. Kyllästyvän kuristimen avulla voidaan myös takavirran vaikutusta pienentää. /2/

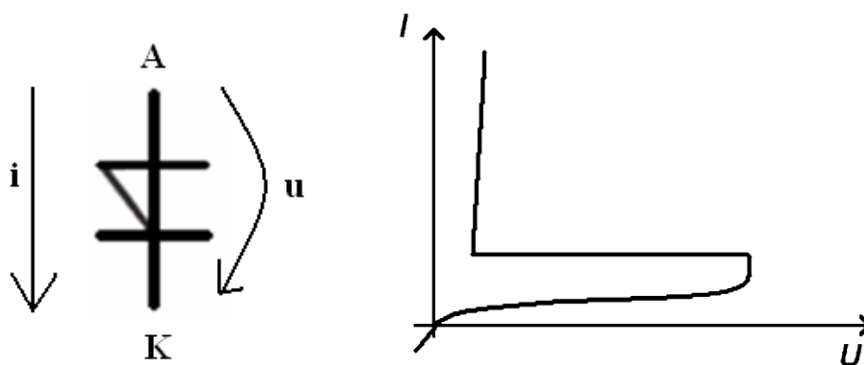


Kuva 2.18 Kyllästyvä kuristin yhdessä RC-suojan kanssa, sekä sen vaikutus (katkoviiva ilman)./2/

Kuvassa 2.18 RC-suojan muodostavat R_1 ja C , R_2 tarvitaan RC-suojan toimintaa varten. Kuvassa aika t_1 on avaushetki ja t_2 on aika, jossa virta on niin pieni, että kuristin ei ole enää kyllästystilassa. Kyllästyviä kuristimia ei saa valmiina komponenttina, joten se on itse tehtävä ferriittirenkaasta ja kuparilangasta. Kuten

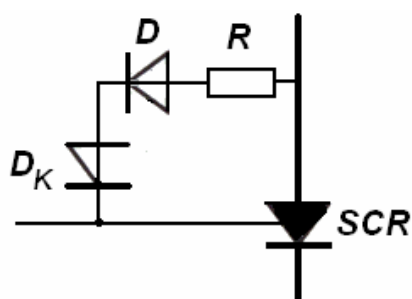
kuvasta voi päätellä, mitoitetaan kuristin kyllästymään jo suhteellisen pienillä virroilla. Kyllästyvän kuristimen mitoittaminen on hankalaa, lisähaastetta tuo tyristorin aikaparametrien voimakas riippuvuus lämpötilasta. /2/

Kippidiodia käytetään tyristorin ylijännitesuojaukseen. Kippidiodi itsessään on pieni tyristori, joka on suunniteltu syyttymään ylijännitteestä. Normaali tyristori tuhoutuu kippisyyttymisen seurauksena. Kippidiodilla on heikko estosuuntaisen jännitteen kesto, lisäksi myös du/dt -arvo on alhainen. Kuvassa 2.19 on esitetty kippidiodin piirrosmerkki ja ominaiskäyrä. /2/



Kuva 2.19 Kippidiodin piirrosmerkki ja ominaiskäyrä. /2/

Kuvan 2.20 kippidiodi on kytketty ohjauspiiriin. Kippidiodi syyttää tyristorin hallitusti ylijännitetapauksessa. Sarjadiodi tarvitaan kippidiodin vaatimattoman estosuuntaisen jännitteen keston vuoksi. Vastus rajoittaa hilavirran oikealle tasolle. /2/



Kuva 2.20 Kippidiodi tyristorin hilapiirissä. /2/

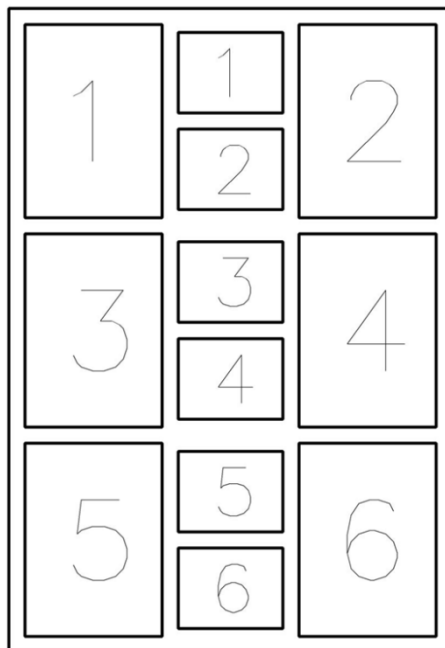
3. VALITUT KOMPONENTIT JA NIIDEN ESILLEPANO

Olenaisena osana työhön kuului tehoelektroniikan komponenttien esillepanon toteutus Savonia-ammattikorkeakoululle hankittuun liikuteltavaan kehikkoon. Komponentit oli saatu lahjoituksena Semikron OY:ltä. Esillepanossa päädyttiin tekemään neljä erilaista esittelytaulua, kooltaan 55 x 100 cm. Komponentit ryhmiteltiin neljään ryhmään, yksi kutakin taulua kohden. Ryhmittelyssä päädyttiin seuraavaan kokoonpanoon: diodit ja diodimoduulit, tyristorit ja tyristorimoduulit, IGBT:t, IGBT-moduulit ja ohjaimet sekä SKiiP-teknologiat. Kehikko asetti rajat sille, kuinka paljon tietoa komponenteista voitaisiin esittää. Tästä syystä tiedot rajattiin seuraaviin:

Komponenteista esiteltävät tiedot:

- jännite ja virtakestoisuudet
- lämpöominaisuudet
- päästökäyrät
- komponentin ohjaussuureet
- kuva kytkennästä
- yleisimmät käyttökohteet.

Edellä olevat tiedot valittiin siksi, että ne ovat olennaisimmat tiedot, joita suunnittelija tarvitsee komponenttien alustavaa valintaa ja mitoitusta varten. Nyt opiskelijat voivat suorittaa harjoitustehtäviä, kuten jäähdytyksen mitoittamisen, tauluissa olevien tietojen perusteella. Liitteessä 1 on esitetty kaikkien komponentin tiedot. Sivujen muotoiluasetukset ovat samat kuin lopullisessa toteutuksessa. Kuvassa 3.1 on esitetty tietojen ja komponenttien sijoittelu esittelytauluille. Asettelyn suunnittelussa painotettiin yksinkertaisuutta ja selvyyttä. Kuvassa 3.1 pienempi ruutu on varattu komponentille ja isompi ruutu sitä vastaaville tiedoille. Liitteessä 3 on esitetty kaksi valokuvaa valmiista esittelytaulusta.



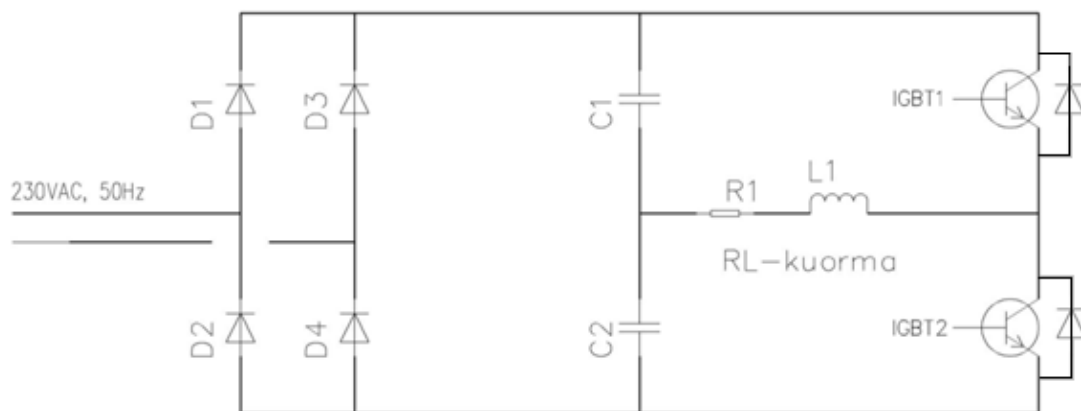
Kuva 3.1 Komponenttien ja niitä vastaavien tietojen sijoittelu esittelytaululla. Isompi ruutu on varattu tiedoille ja kyseistä numeroa vastaava pienempi ruutu komponentille.

4 DEMONSTRAATIOKYTKENTÖJEN VALINTA

Tehoelektroniikan komponenttien toimintaa päätettiin havainnollistaa kahdella esittelykytkennällä. Ensimmäiseksi esittelykytkennäksi valittiin puolisolilakytketty IGBT-vaihtosuuntaaja ja toiseksi verkkokommutoiva 1-vaiheinen tyristorisuuntaaja.

4.1 Puolisilakytketty IGBT-vaihtosuuntaaja

Yksivaiheinen taajuusmuuttaja tuottaa vaihtosähköstä ensin tasasähköä, jonka se muuttaa halutun taajuiseksi ja -jännitteiseksi vaihtosähköksi. Toiminta perustuu tasasuuntaukseen tasasuuntaussillan avulla sekä vaihtosuuntaukseen vaihtosuuntaajalla. Myös muulla tavoin toteutettu tasasähkölähte voi tulla kysymykseen (esim. akusto). Puolisilakytkentä koostuu IGBT-vaihtokytkimestä, ja kuorma kytketään vaihtokytkimen ja DC-lähteen keskipisteen väliin.



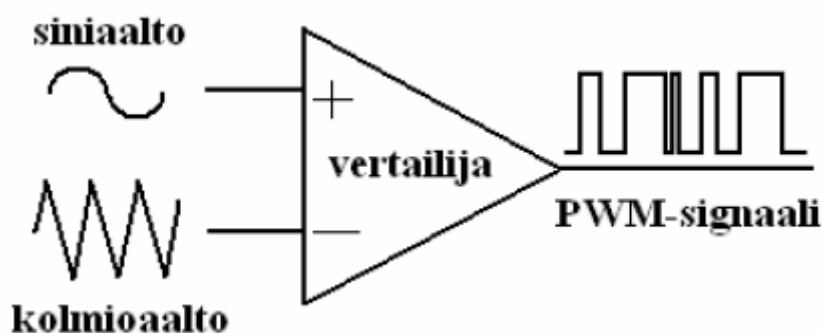
Kuva 4.1 Taajuusmuuttajan tehoasteen periaatekytkentä.

Diodit muodostavat tasasuuntaussillan, jossa D1 ja D4 johtavat verkon jännitteen positiivisen puolijakson ja D3 ja D2 negatiivisen puolijakson. Kuorman saamaa virtaa ohjataan säätämällä venttiilien (kuvassa 4.1 IGBT1 ja 2) johtamisaikoja. Virran kulku transistoreissa voidaan esittää ajattelemalla IGBT-moduulia vaihtokytkimenä. Kun kytkin on käännetty ylös ja virran suunta on kuormaan päin johtaa IGBT1, jos virran suunta on kuormasta moduulille päin johtaa IGBT1:n nolladiodi. Kytkimen ollessa käännettynä alas, ja virran suunnan ollessa kuormaan päin johtaa IGBT2:n nolladiodi.

Virran suunnan ollessa kuormasta moduulille päin johtaa IGBT2. Kommutointi tarkoittaa virran siirtymistä puolijohdehaaralta toiselle venttiilien ohjauksen mukaisesti. Venttiilien sammuttaminen on erityisen tärkeää, koska tällä ohjaustavalla on olemassa ns. kisko-oikosulun vaara. Kisko-oikosulku syntyy, kun molemmat venttiilit johtavat samanaikaisesti. Kisko-oikosulku on ehdottomasti estettävä sammuttamalla johtava venttiili, ennen kuin toinen venttiili sytytetään.

4.1.1 Pulssinleveysmodulointi

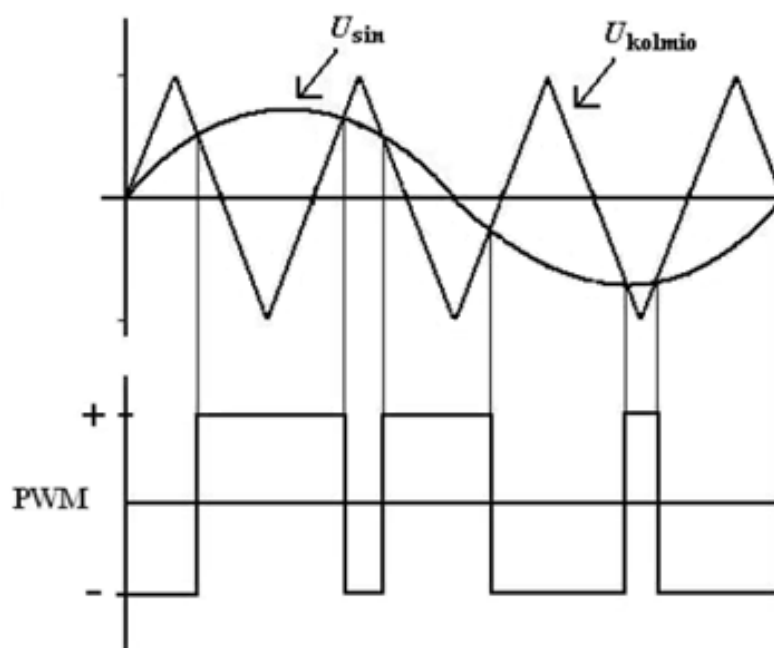
Monissa vaihtosuuntaajasovelluksissa vaaditaan taajuuden ohjauksen lisäksi jännitteen ohjausta. Vaihtojännitteen ohjaus voidaan toteuttaa katkomalla vaihtosähköpiirissä jakson aikana vakioamplitudinen jännite pulsseiksi, joiden tehollinen keskiarvo muodostaa sinimuotoisen jännitteen. Tätä ohjaustapaa nimitetään pulssinleveysmoduloinniksi (Pulse Width Modulation, PWM). PWM-signaali syntyy esimerkiksi, kun kolmioaaltosignaalia verrataan siniaaltosignaaliin. Vertailu suoritetaan vertailijapiirillä, joka on yksinkertaisimmillaan operaatiovahvistin. Vertailijan ei-invertoivaan tuloon (+) syötetään siniaaltoa ja invertoivaan tuloon (-) syötetään kolmioaaltoa. Vertailija vertaa tulevia signaaleja niin, että kun siniaalto on suurempi kuin kolmioaalto, antaa vertailija positiivisen käyttöjännitteensä suuruisen lähtöjännitteen. Negatiivisella puolella siniaallon ollessa pienempi, kuin kolmioaalto antaa vertailija negatiivisen käyttöjännitteensä suuruisen lähtöjännitteen. Kuva 4.2 havainnollistaa PWM-signaalin muodostumista vertailijassa./3/



Kuva 4.2 PWM-signaalin muodostuminen vertailijassa.

Lineaarisella säätöalueella siniaaltosignaalin amplitudi on pienempi tai yhtä suuri kuin kolmioaaltosignaalin amplitudi. Aaltomuotojen kannalta siniaallon amplitudin tulisi olla enintään 90 % kolmioaallon amplitudista. Jos lineaarisella modulaatiolla ei saada tarpeeksi suurta lähtöjännitettä, on turvauduttava ylimodulaatioon. Ylimodulaatiossa tulee sinisignaalin amplitudin olla kolmioaallon amplitudia suurempi.

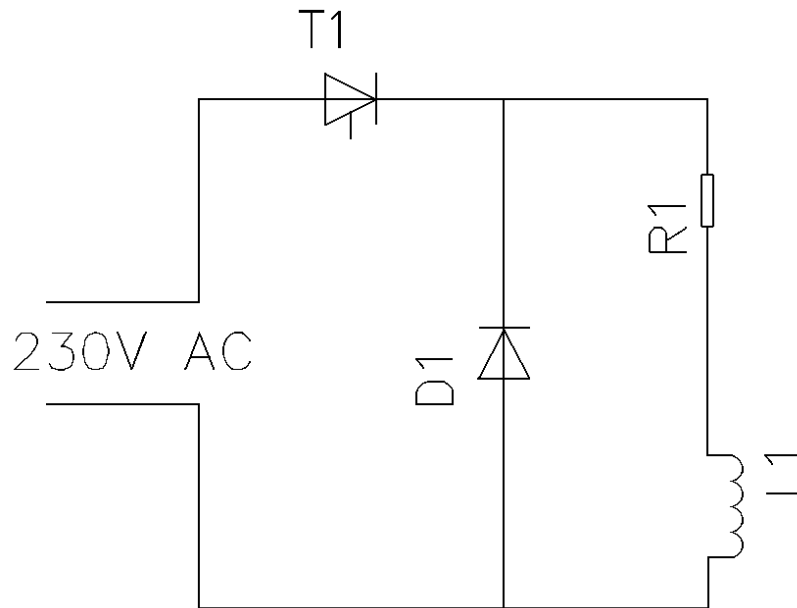
Suurentamalla kolmioaallon taajuutta suurennetaan myös PWM-signaalin kytkentätaajuutta. Jos kytkentätaajuus nousee satoihin kilohertseihin, alkaa ohjattavien kytkinkomponenttien kytkentänopeus rajoittaa toimintaa ja kytkentähäviöt tulla kohtuuttoman suuriksi sekä laitteen maksimikuormitettavuus alenee. Kuvassa 4.3 on esitetty PWM- signaalin muodostuminen sini- ja kolmioaaltosignaaleita vertaamalla.



Kuva 4.3 PWM-signaalin muodostuminen vertailijassa.

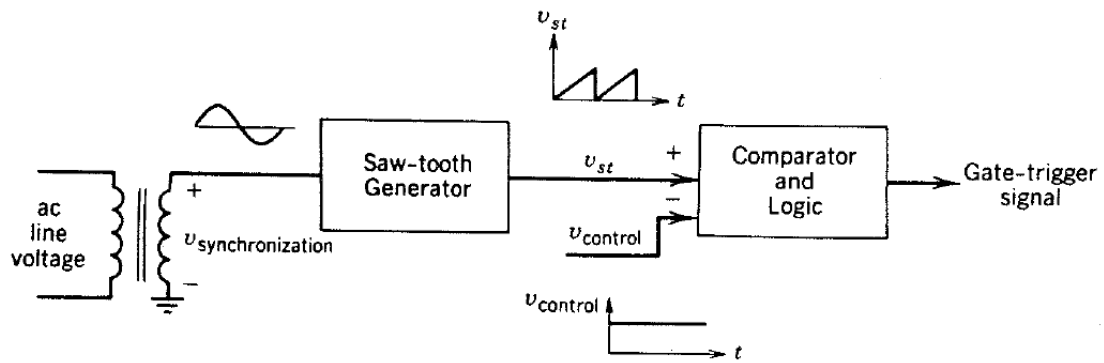
4.2 Tyristorisuuntaaja

Toiseksi demonstraatiolaitteeksi valitun yksivaiheisen tyristorisuuntaajan kytkentä on esitetty kuvassa 4.4. Tyristori liipaistaa vaihtojännitteen positiivisella puolijaksolla, ja (induktiivinen) virta kommutoi nolladiodille D_1 vaihtojännitteen negatiivisessa nollakohdassa. Kuorman jännitettä ja virtaa säädetään tyristorin ohjauskulman säädöllä.



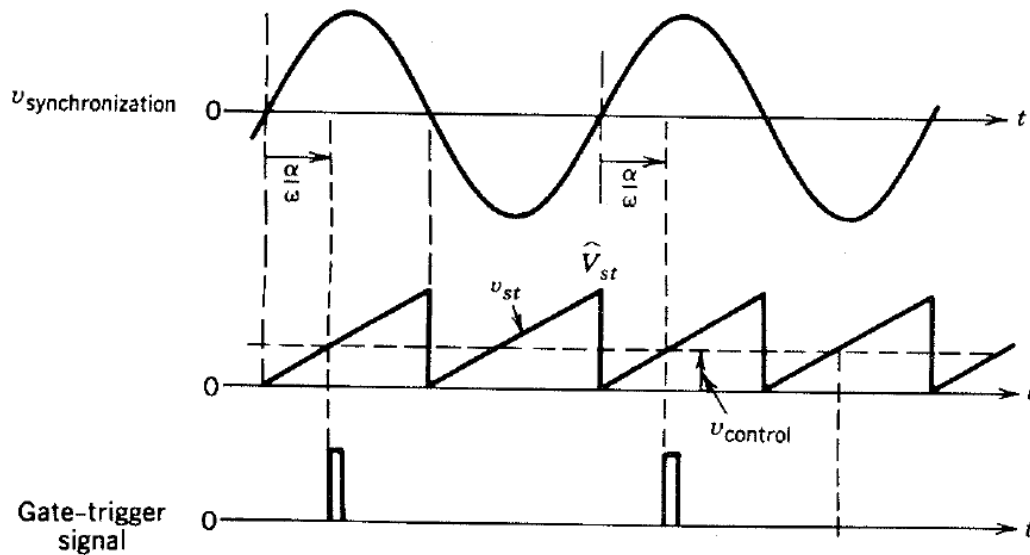
Kuva 4.4 Valittu yksivaiheinen verkkokommutoiva tyristorisuuntaaja.

Tyristorin ohjauksen periaate on esitetty kuvassa 4.5. Verkkojännitteen, joka saadaan tahdistusmuuntajasta, nollakohdasta liipaistaan lineaarinen saha-aalto. Kun se ylittää ohjausjännitteen, saa tyristori liipaisupulssin.



Kuva 4.5 Tyristorisuuntaajan ohjauksen muodostuminen tahdistusmuuntajasta, saha-aalto generaattorista sekä vertailijasta./4/

Kuvassa 4.6 on vielä havainnollistettu ohjaussignaalin muodostumista.



Kuva 4.6 Tahdistetun ohjaussignaalin muodostuminen vertailijassa saha-aallosta ja ohjausjännitteestä./4/

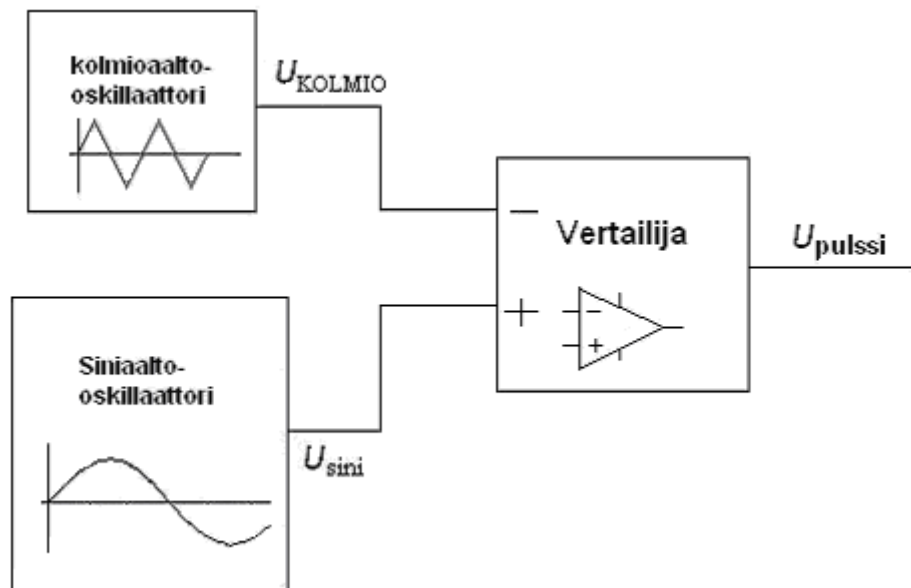
5 IGBT-VAIHTOSUUNTAAJAN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Suuntaajaa suunniteltaessa on otettava huomioon, että se on tarkoitettu opetuskäyttöön. Sen täytyy olla yksinkertainen ja selkeä, ja sen tärkeimpiä osia on päästävä tutkimaan helposti. Sen on myös oltava turvallinen. Laitteen eri ominaisuuksia on päästävä mittaamaan oskilloskoopilla, jotta signaalien muodostumista on helppo seurata ja ymmärtää. Tämän vuoksi mittauspisteitä on oltava riittävästi. Myös kotelointi on otettava huomioon. Kotelon täytyy olla helposti avattava ja suljettava sekä IP-luokitukseltaan sopiva. Kotelon tulee olla tarpeeksi suuri, ettei piirien tarkastelu ole vaikeata. Liitäntöjen tulee myös olla merkittäviä. Ohjauspiirin sinisignaalin amplitudin sekä taajuuden tulee olla säädettävissä. Lisäksi kolmiosignaalin taajuuden tulee olla säädettävissä. Riittävien säätöjen avulla voidaan havainnollistaa mm. kytkentätaajuuden merkitystä ja ylimodulaatiotilannetta.

Vaihtosuuntaajan pääosat ovat tasasuuntaussilta, suuntaaja, venttiilien ohjauselektronikka sekä kantaohjain. Ohjauspiiri muodostuu siniaalto- ja kolmioaalto-oskillaattorista ja vertailijasta. Suuntaaja ja ohjauspiiri on erotettava toisistaan sähköisesti kantaohjaimella. Kantaohjain suorittaa galvaanisen erotuksen, tarvittavat tason siirrot sekä estää läpisyttymisen.

5.1 Ohjauspiirin toteutus

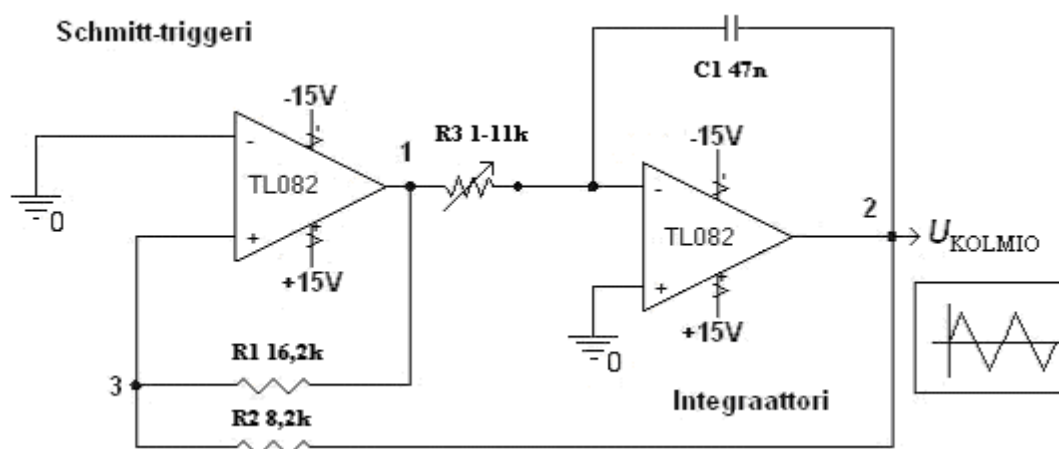
Ohjauspiiri koostuu siniaalto- ja kolmioaalto-oskillaattorista sekä vertailijasta. Ohjauspiirin tarkoitus on tuottaa suuntaajan venttiileille jännitepulsseja siten, että venttiilit toimivat aiemmin esitetyn teorian mukaisesti. Ohjauspiirin yleislohkokaavio on esitetty kuvassa 5.1.



Kuva 5.1 Ohjauspiirin yleislohkokaavio.

Kolmioaalto-oskillaattori

Kolmioaalto-oskillaattorilla tuotetaan kolmioaaltomuotoista jännitettä. Se muodostuu kahdesta toiminnaltaan erilaisesta piiristä: Schmitt-triggeristä ja integraattorista. Schmitt-trigger antaa joko positiivisen tai negatiivisen ulostulojännitteen, ja integraattori integroi sen negatiiviseen tuloonastaan tulevan signaalin. Tuloksena saadaan kolmioaaltosignaalia, jonka suuruuteen ja taajuuteen voidaan vaikuttaa säätämällä kondensaattorin ja vastuksien arvoja. Kuvassa 5.2 on esitetty kolmioaalto-oskillaattorin kytkentä komponenttiarvoineen sekä mittauspisteet 1, 2, ja 3./

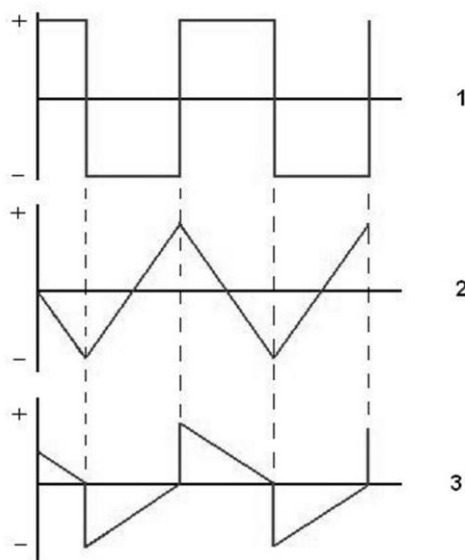


Kuva 5.2 Kolmioaalto-oskillaattorin kytkentä komponentteineen ja mittauspisteineen.

Kuvassa 5.2 vasemmalla on Schmitt-trigger, johon kuuluvat operaatiovahvistimen lisäksi vastukset R_1 ja R_2 . Oikealla on integraattori, johon kuuluvat operaatiovahvistimen lisäksi potentiometri R_3 ja kondensaattori C_1 . Tarkastelemalla kytkentää tarkemmin nähdään, miten jännite muuttuu eri pisteissä. Aloitetaan kuvassa 5.2 vasemmalta, operaatiovahvistimen ei-invertoivasta sisääntulonastasta (3). Kun sen jännite muuttuu negatiiviseksi, vaihtuu ulostulojännite (1) Schmitt-triggerissä negatiiviseksi. Negatiivinen ulostulojännite varaa integraattorin takaisinkytkentäkondensaattoria C_1 , minkä vuoksi integraattorin ulostulojännite (2) ja Schmitt-triggerin positiivisen tulonastan (3) jännite alkavat laskea. Jännite laskee kunnes Schmitt-trigger vaihtaa tilaansa. Tämän jälkeen kytkentä toistaa toimintaansa edellä kuvatulla tavalla. Säättämällä potentiometriä R_3 voidaan säätää kolmioaallon taajuutta ja siten koko PWM-signaalin taajuutta. Kuvan 5.2 komponenttien arvot on laskettu kaavalla 5.1 siten että piiri tuottaa 1 – 10 kHz:n taajuisia kolmioaaltoa./3/

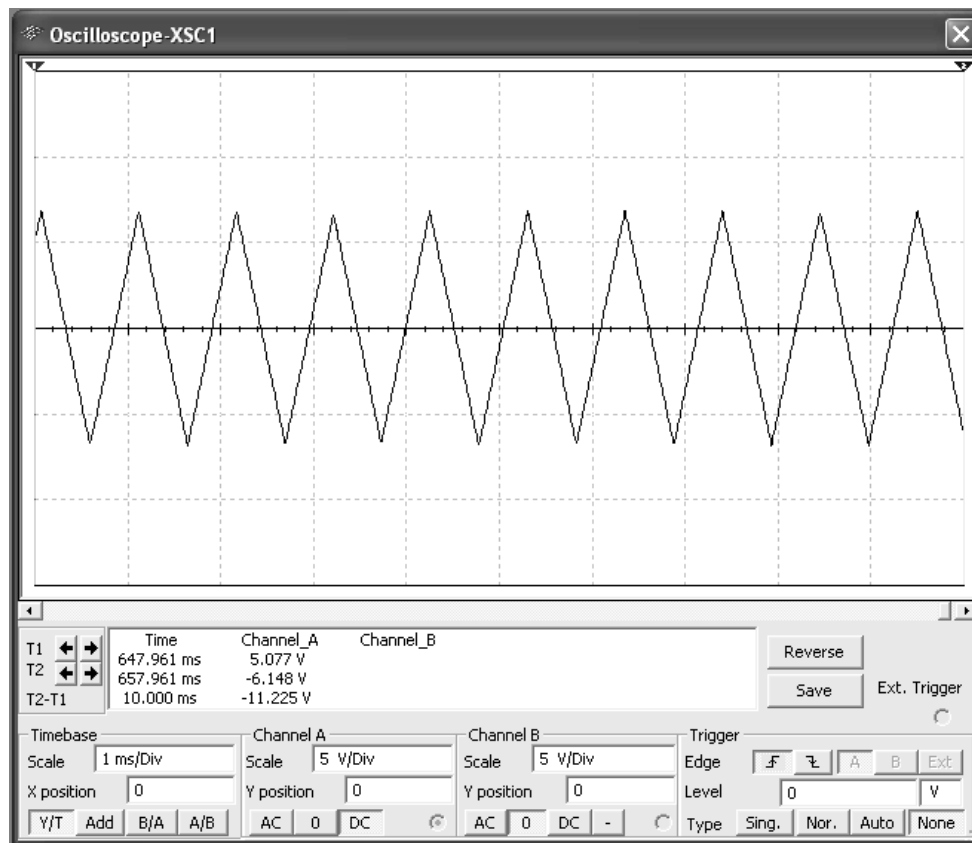
$$f = \frac{1}{4 * C_1 * R_3 * R_2} \quad (5.1)$$

Kuvassa 5.3 on esitetty kolmioaalto-oskillaattorin eri mittauspisteiden jännitteiden muodot.



Kuva 5.3 kolmioaalto-oskillaattorin mittauspisteiden 1, 2 ja 3 jännitemuodot.

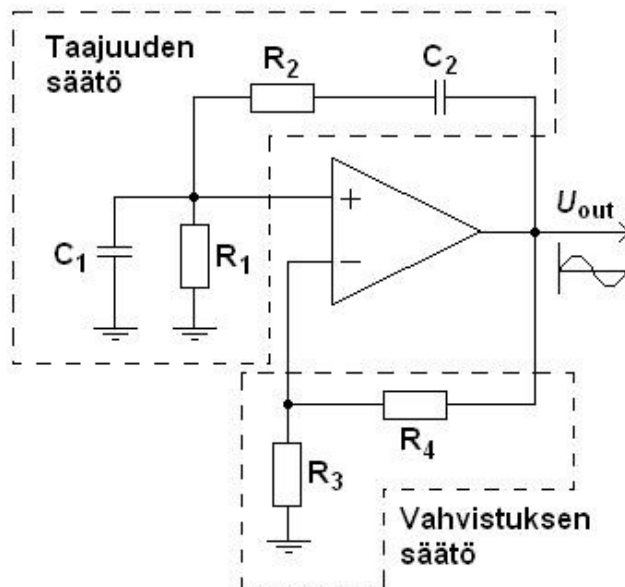
Kuvassa 5.4 on esitetty simuloimalla tuotettu kolmioaalto-oskillaattorin signaali. Kuvaaja on saatu simuloimalla piiriä National Instruments Multisim 10 -ohjelmalla. Kuvan 5.4 käyrät on saatu käyttämällä kuvan 5.2 komponenttiarvoja.



Kuva 5.4 Kolmioaalto-oskillaattorin signaali Multisim-ohjelmalla simuloituna.

Siniaalto-oskillaattori

Siniaalto-oskillaattori muodostetaan Wienin siltaoskillaattorin (kuva 5.5) avulla. Se saadaan värähtelemään tietyillä komponenttiarvoilla ja kondensaattoreille annetun alkujännitteen avulla.



Kuva 5.5 Wienin siltaoskillaattorin periaatteellinen kytkentä.

Wienin siltaoskillaattorin tuottaman jännitteen taajuutta säädetään komponenttien R_1 , R_2 , C_1 ja C_2 avulla (kuva 5.5). Taajuus määräytyy kaavan 5.2 mukaisesti. Esimerkki on laskettu sellaisilla komponenttien arvoilla, että taajuudeksi on saatu 50 Hz.

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot R} = \frac{1}{2\pi \cdot 1\mu F \cdot 3,2k\Omega} \approx 50\text{Hz} \quad (5.2)$$

jossa

$$R = R_1 = R_2$$

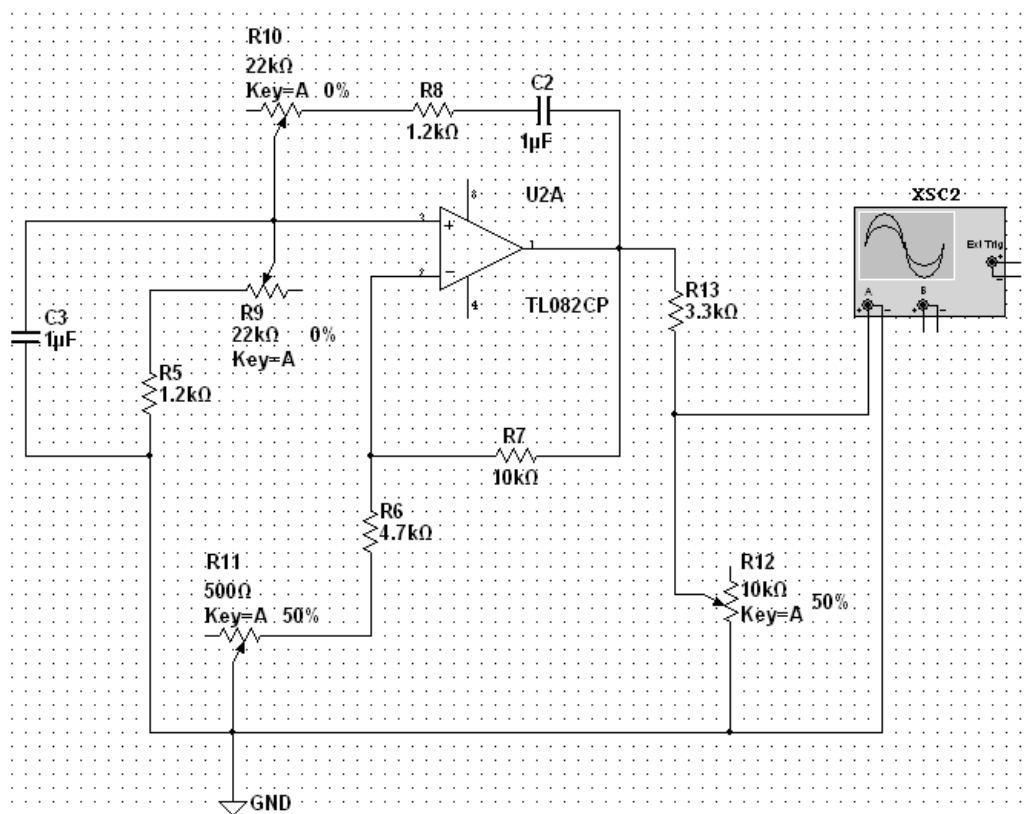
$$C = C_1 = C_2$$

Wienin sillan alempi haara, vahvistuksen säätö (kuva 5.5), määrää ei-invertoivan vahvistimen vahvistuskertoimen. Tämä kerroin täytyy säätää mahdollisimman lähelle arvoa 3, jotta piiri alkaa värähdellä. Myös hieman arvoa 3 suuremmilla

vahvistuskertoimilla piiri saadaan värähtelemään, mutta silloin signaali alkaa saturoitua ja toivottuun tulokseen ei päästä. Komponenttien arvot voidaan laskea kaavasta 5.3./3/

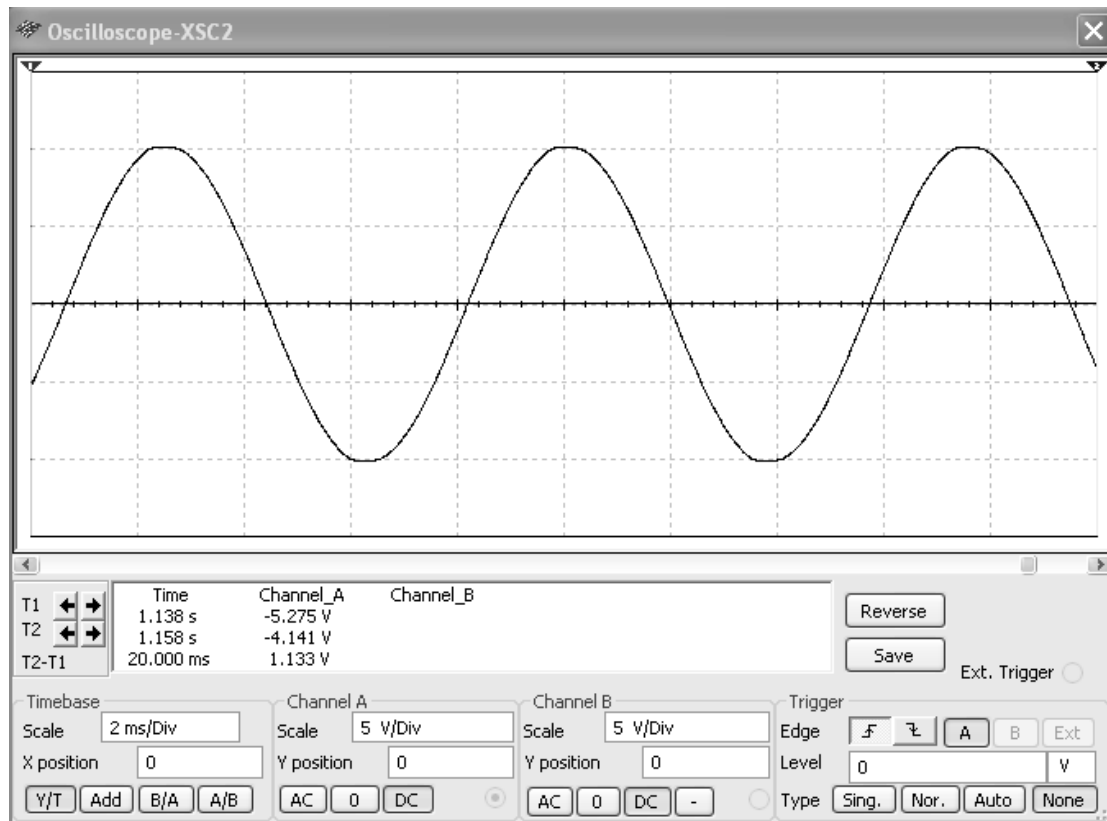
$$\text{Vahvistuskerroin} = \frac{R_4 + R_3}{R_2} \geq 3 \quad (5.3)$$

Kuvassa 5.6 on esitetty siltaoskillaattorin kytkentä ja komponenttien mitoitus. Potentiometrit R9 ja R10 ovat samassa stereopotentiometrissa, jolloin niiden arvot muuttuvat yhdessä ja niiden avulla saadaan toteutettua taajuuden säätö välillä 10 - 130 Hz. Potentiometri R11 on vahvistuskertoimen hienosäätöä varten ja R12 signaalin amplitudin säätöä varten.



Kuva 5.6 Siltaoskillaattorin kytkentä piirrettynä Multisim-ohjelmalla.

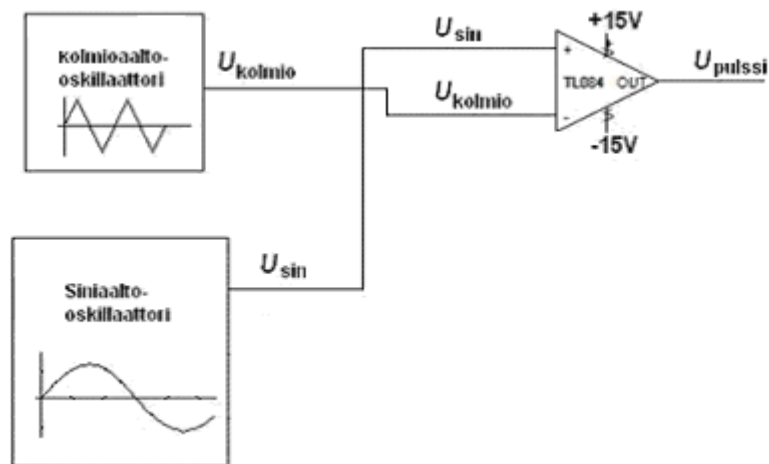
Siniaalto-oskillaattorin ulostulosignaali simuloituna Multisim-ohjelmalla on nähtävissä kuvasta 5.7.



Kuva 5.7 Siniaalto-oskillaattorin signaali simuloituna multisim ohjelmalla.

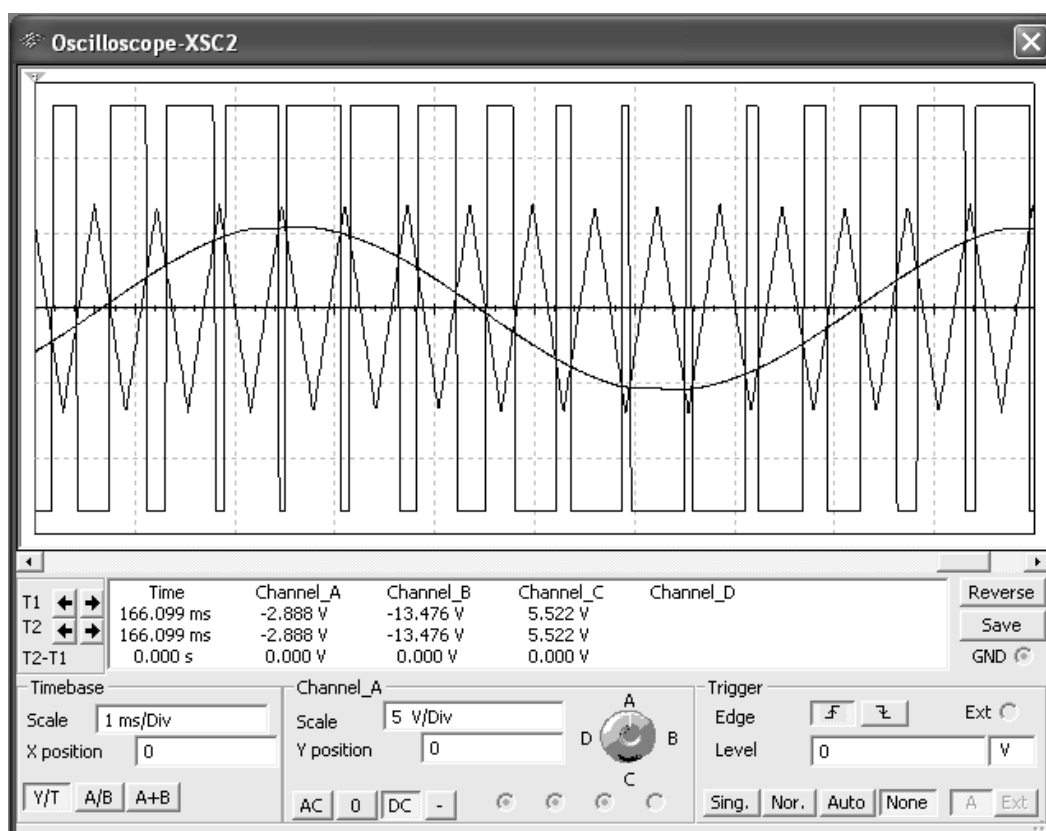
Vertailija

Ohjauspiirin viimeinen osa, vertailija, muuttaa siniaalto- ja kolmioaaltosignaalit PWM-signaaliksi. Vertailijana toimii operaatiovahvistin, jonka ei-invertoivaan (+) tuloon syötetään siniaaltosignaalia ja invertoivaan (-) tuloon kolmioaaltosignaalia. Kun kolmioaalto on suurempi kuin siniaalto, antaa vertailija negatiivisen käyttöjännitteensä suuruisen lähtöjännitteen ja päinvastoin. Kuvassa 5.8 on vertailijan kytkentäkaavio, jossa kolmioaalto- ja siniaalto-oskillaattorit on pelkistetty lohkoiksi ja käyttöjännitteiden syötöt on korvattu vain jännitemerkinnöillä.



Kuva 5.8 Ohjauspiirin vertailijan kytkentäkaavio.

Kuvassa 5.9 on nähtävissä kuinka vertailija muodostaa PWM-pulssit sini- ja kolmioaalloista. Signaalin positiivisen puolen huiput kuvaavat ylemmän venttiilin (kuvassa 4.1 IGBT1) johtoaikaa ja negatiivisen puolen huiput alemman venttiilin(IGBT2) johtoaikaa.

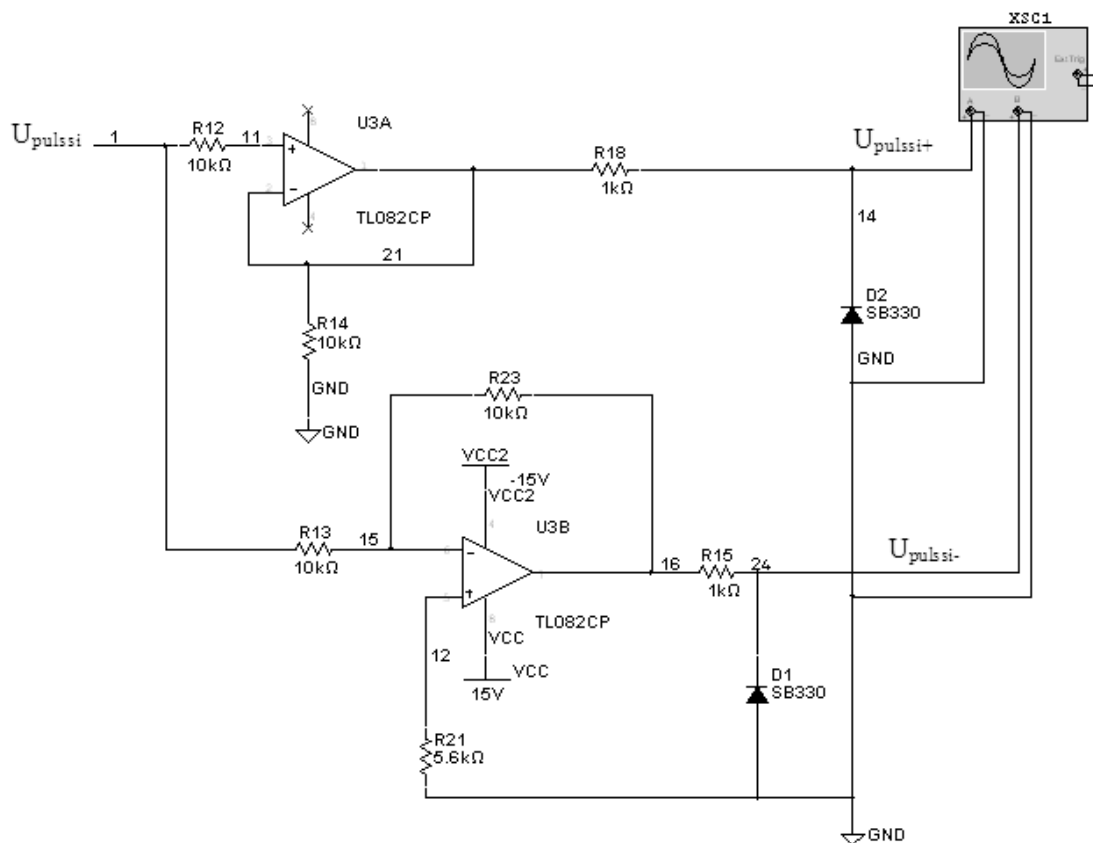


Kuva 5.9 Vertailijan ulostulon muodostuminen sini- ja kolmioaalloista.

PWM-signaalin invertointi ja ohjauspiirin erotus

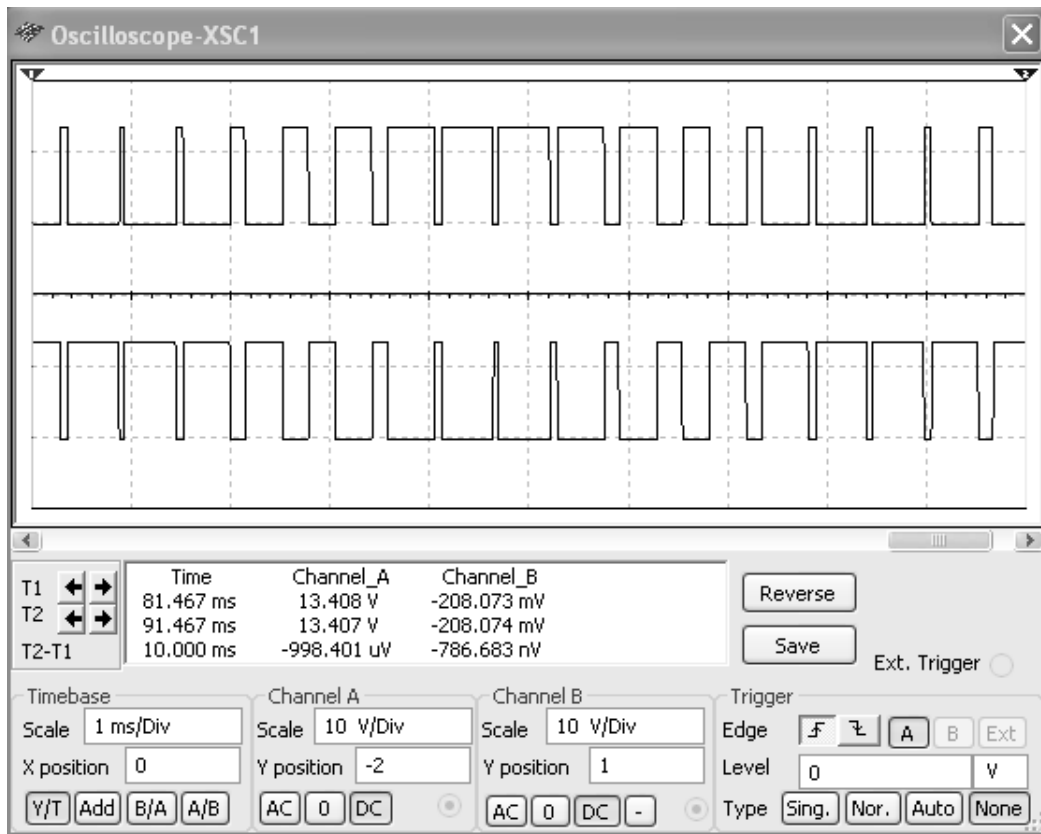
Vertailijalta tuleva PWM-signaali ohjaa vaihtosuuntaajan venttiilejä. Venttiili johtaa saadessaan positiivisen pulssin ja sammuu pulssin laskevalla reunalla. Vertailijan tuottamat pulssit täytyy muokata IGBT ohjaimelle sopiviksi. Ohjaimelle menevien pulssien täytyy olla arvoltaan johtavan tilan ohjaukseen +12V ja ei-johtavan tilan ohjaukseen alle +4,5V. Lisäksi alahaaran ohjausta varten täytyy vertailijalta tuleva pulssijono invertoida. Tämä tapahtuu kuvassa 5.10 olevan kytkennän avulla.

Kytkenässä ylempi operaatiovahvistin on ei-kääntävä, ja sen tarkoitus on vahvistaa ohjaussignaalia. Alempi operaatiovahvistin on invertoiva, joten se muodostaa alahaaran ohjauspulssit, lisäksi se vahvistaa ohjaussignaalia. Diodien tarkoitus on leikata ohjaussignaalien negatiivinen puoli pois, ja näin rajata signaalit +15 ja 0V välille. Kuvassa $U_{\text{pulssi-}}$ ohjaa alahaaran venttiiliä (IGBT2) ja $U_{\text{pulssi+}}$ ohjaa ylähaaran venttiiliä (IGBT1). U_{pulssi} on vertailijalta tuleva signaali.



Kuva 5.10 Ohjaussignaalien vahvistus ja invertointi kytkentä.

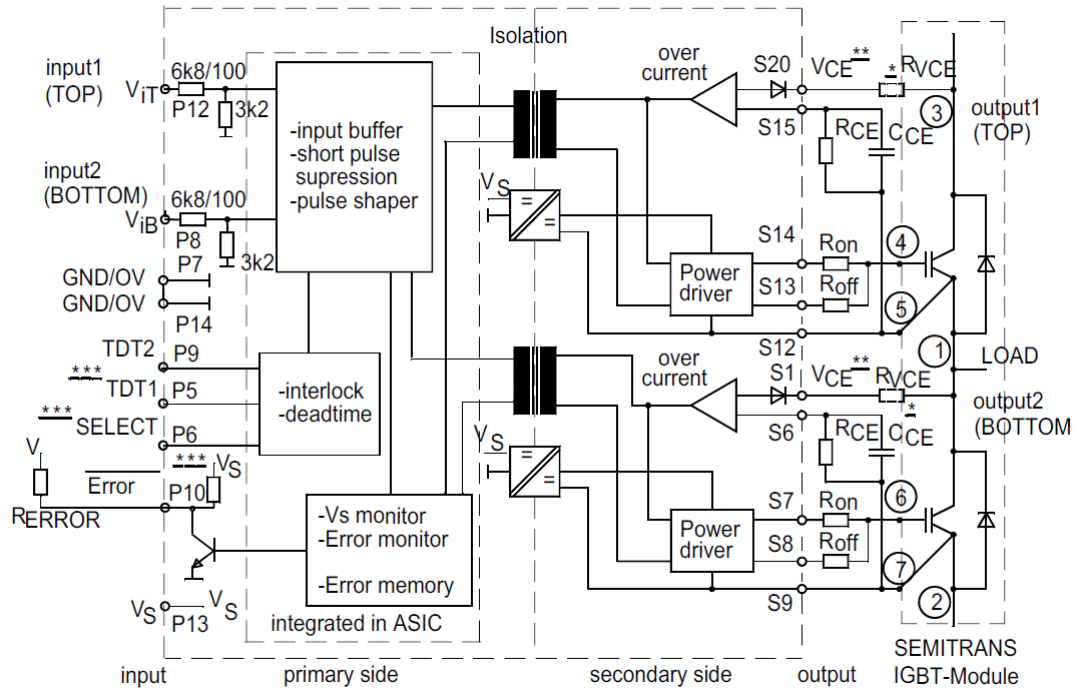
Kuvassa 5.11 on nähtävissä simuloimalla saadut ohjauspulssit. Ylempi signaali on ylemmänhaaran ohjaus ja alempi alemman haaran ohjaus.



Kuva 5.11 Venttiilien ohjaus pulssit simuloituna multisim ohjelmalla.

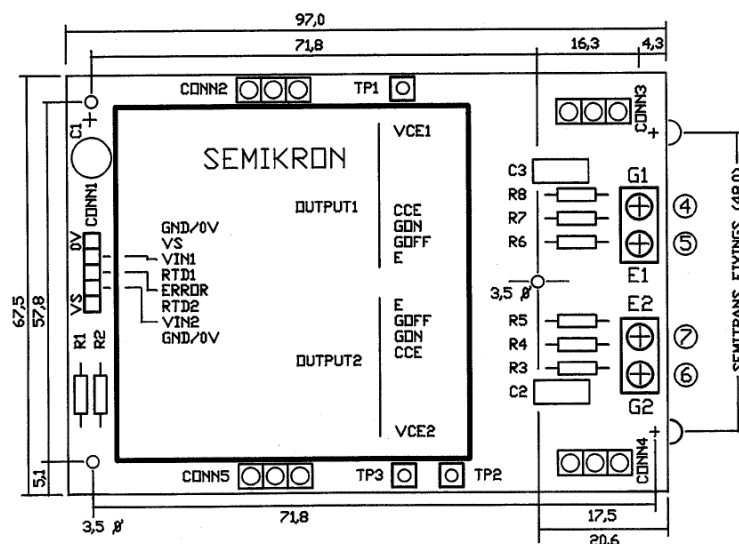
Yleensä on siis tarpeen kytkeä ohjauspiirien ja tehokomponenttien välille erotuspiirejä. Ohjauspiirin ja tehoasteen käyttöjännitteiden erot voivat olla niin suuria, että suorakytkentä on mahdoton. Lisäksi transistorit ovat eri jännite tasoilla, mikä estää niiden suoran ohjauksen.

Erotukseen voidaan käyttää valmiita ohjainpiirejä, joissa erotus on toteutettu valmiiksi. Valmiit ohjainpiirit on suunniteltu tietyille tehotransistorisarjoille, jolloin valinta tapahtuu kytkentään valittujen tehotransistoreiden perusteella. Nämä piirit sisältävät mahdollisuuden säätää kuollutta aikaa, joka on viive samassa haarassa olevien transistoreiden kytkentöjen välillä, tarkoituksena estää kisko-oikosulun syntyminen. Lisäksi piirit sisältävät usein lyhyiden ohjaussignaalien supressoinnin ja vikatilanteiden havaitsemistoimintoja. Tähän sovellukseen valittiin Semikronin SKHI 22 A-ohjainpiiri, jonka lohkokaavio on kuvassa 5.12.



Kuva 5.12 Semikronin ohjainpiirin lohkokkaavio. /6/

Kuvan 5.13 SKHI 22 A-ohjaimella saadaan toteutettua galvaaninen erotus ohjainpiirin ja tehoasteen välille. Ohjaimelle vietään pulssit $U_{\text{pulssi+}}$ ja $U_{\text{pulssi-}}$ kohtiin V_{in1} ja V_{in2} . Kohtaan VS tuodaan +15V käyttöjännite ja GND kohtaan nolla eli maataso.



Kuva 5.13 SKHI 22 A ohjain. /6/

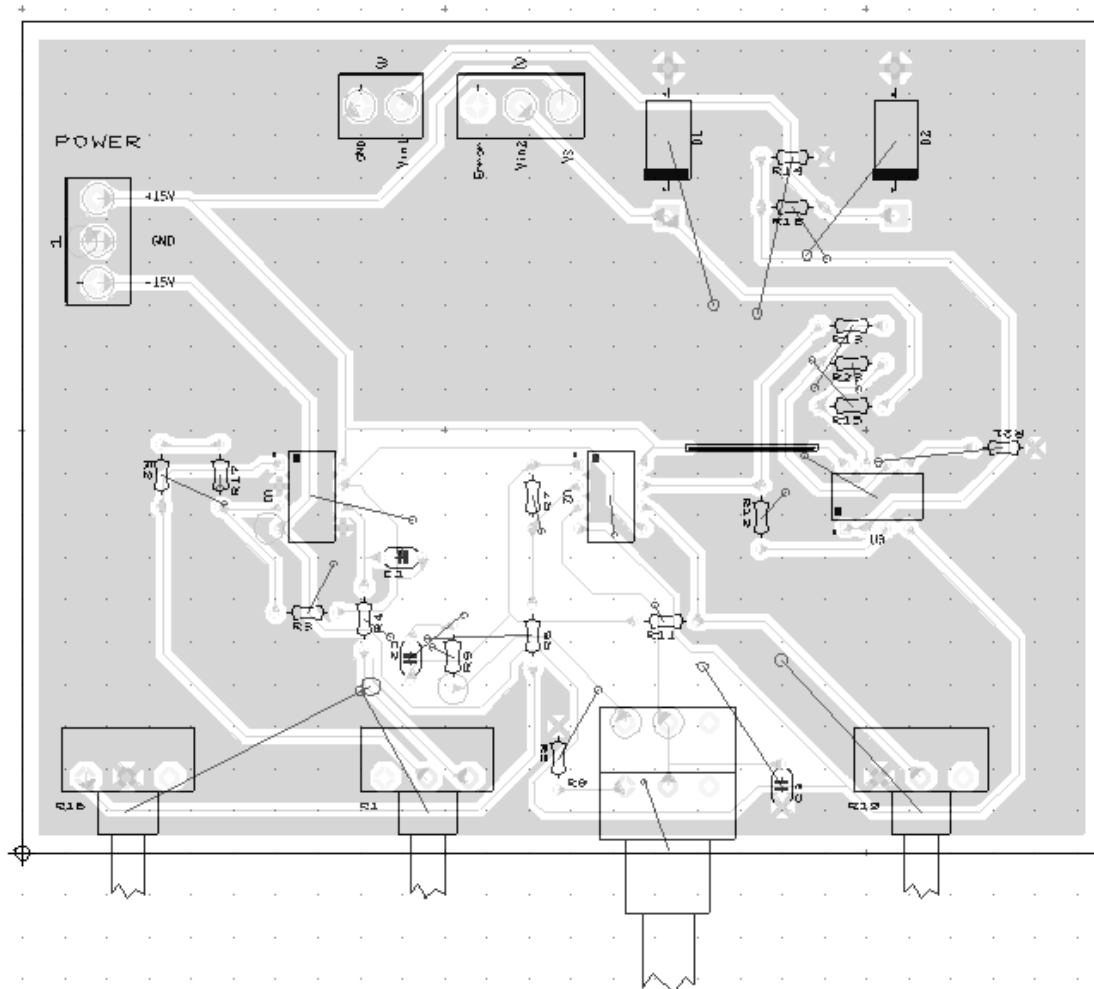
Kuolleeksi ajaksi valittiin 4,3 μ s, tämä tapahtui kytkemällä pinni P9 käyttöjännitteeseen VS. Ohjaimen lähdöt out1 ja out2 mitoitettiin taulukosta 1 saatavilla komponenttiarvoilla. Komponenttien kytkentä ja liitännät IGBT-tehomoduulille löytyvät kuvasta 5.12.

Taulukko 1 Tehoasteen liitännän mitoituksen valinta taulukko

SK-IGBT-Modul	R_{Gon} Ω	R_{Goff} Ω	C_{CE} pF	R_{CE} k Ω	R_{VCE} k Ω
SKM 50GB123D	22	22	330	18	0
SKM 75GB123D	22	22	330	18	0
SKM 100GB123D	15	15	330	18	0
SKM 145GB123D	12	12	330	18	0
SKM 150GB123D	12	12	330	18	0
SKM 200GB123D	10	10	330	18	0
SKM 300GB123D	8,2	8,2	330	18	0
SKM 400GA123D	6,8	6,8	330	18	0
SKM 75GB173D	15	15	470	36	1
SKM 100GB173D	12	12	470	36	1
SKM 150GB173D	10	10	470	36	1
SKM 200GB173D	8,2	8,2	470	36	1

5.2. Piirilevyn suunnittelu ja toteutus

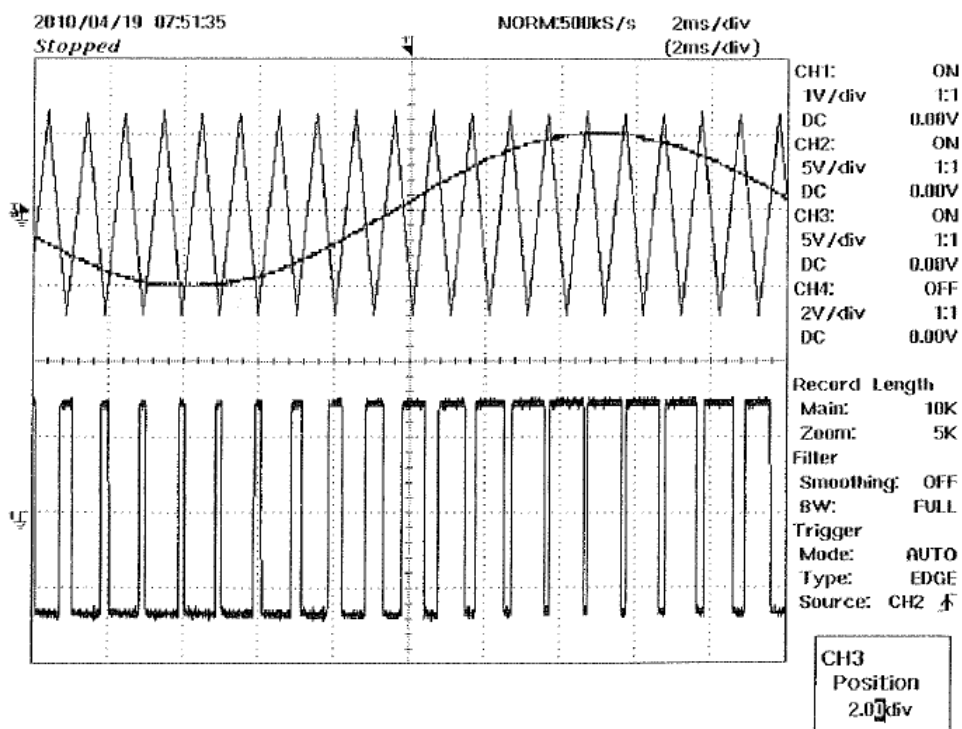
Piirilevyn suunnitteluun on olemassa monia ohjelmistoja. Tässä työssä päädyttiin käyttämään National Instruments Ultiboard 10.0 -ohjelmaa. Ohjelman valintaa helpotti, että multisim-ohjelmasta komponentit pystyi siirtämään suoraan piirilevynsuunnitteluohjelmaan. Kytkeä ei siis tarvinnut suunnitella uudestaan, vaan päästiin suoraan foliopinnan suunnitteluun. Aluksi ohjelman suunnitteluikkunassa näkyy suorakaiteen muotoinen kehikko, joka mallintaa piirilevyn ääri rajoja oikeissa mittasuhteissa. Komponentit siirretään tämän kehikon sisään haluttuun järjestykseen. Sijoittelussa tulee ottaa huomioon, etteivät komponentit tule liian lähelle reunoja tai toisiaan. Toisiinsa yhteydessä olevat vastukset kannattaa sijoittaa lähekkäin. Komponenttien sijoittelussa kannattaa noudattaa myös yleistä siisteyttä ja selkeyttä. Ennen kuin johdinreitit piirretään, asetukset tulee käydä huolellisesti läpi. Asetuksista säädetään mm. johdinreittien leveys, niiden välinen etäisyys toisistaan ja liitoskohtien koko. Kuvassa 5.14 on esitetty Ultiboard-ohjelmalla suunnitellun ohjauspiirin asettelu ja johdinreititys. Kuvassa yhtenäinen harmaa alue on levyn täyttökuparia, joka myös toimii GND-potentiaalitasona.



Kuva 5.14 Ohjauspiirin komponenttien asettelu ja johdin reititys.

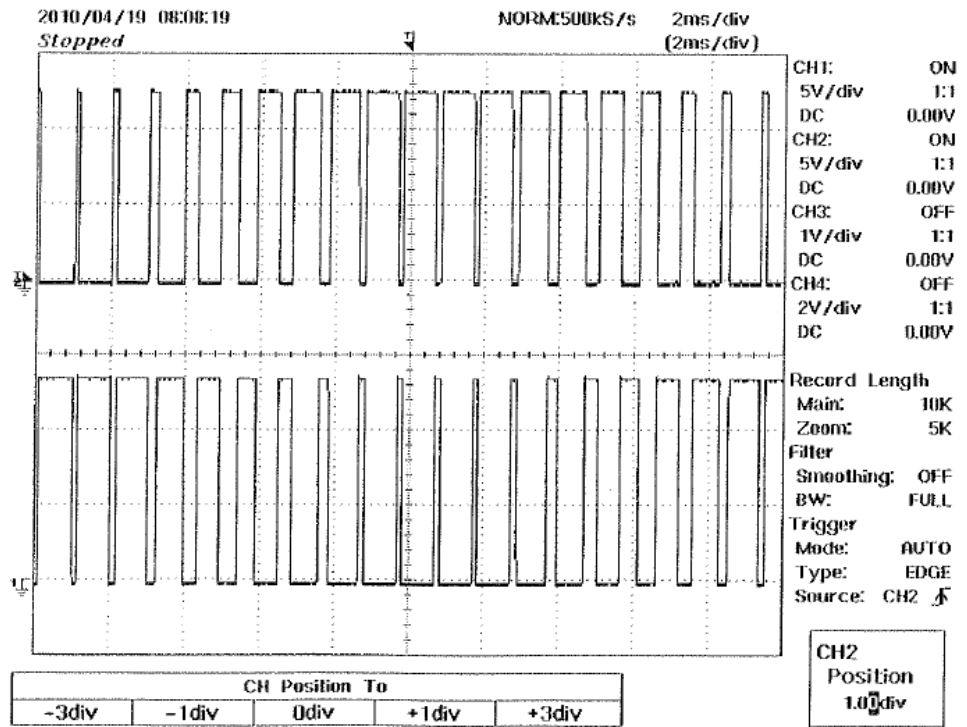
5.3 Mittaustulokset

Mittaukset aloitettiin varmistamalla ohjauksen oikea toiminta. Tämä tapahtui mittaamalla ohjauspiirin antamat signaalit ja vertaamalla niitä simuloimalla saatuihin tuloksiin. Kuvassa 5.15 on nähtävissä PWM-signaalin muodostuminen.

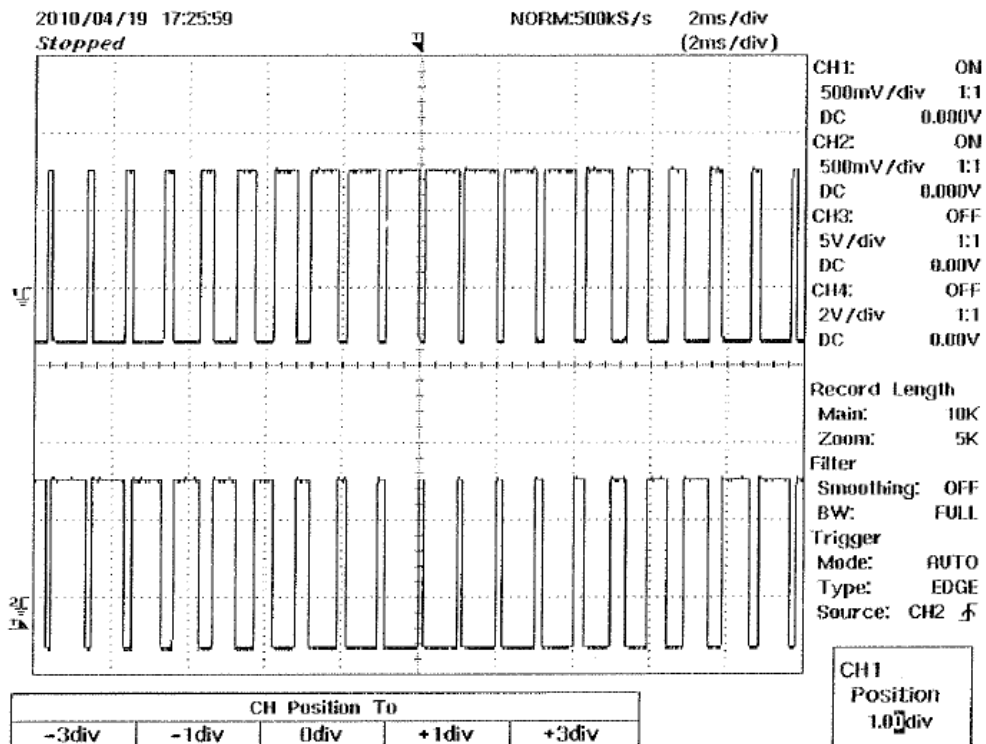


Kuva 5.15 PWM-signaalin muodostuminen ohjauspiirillä.

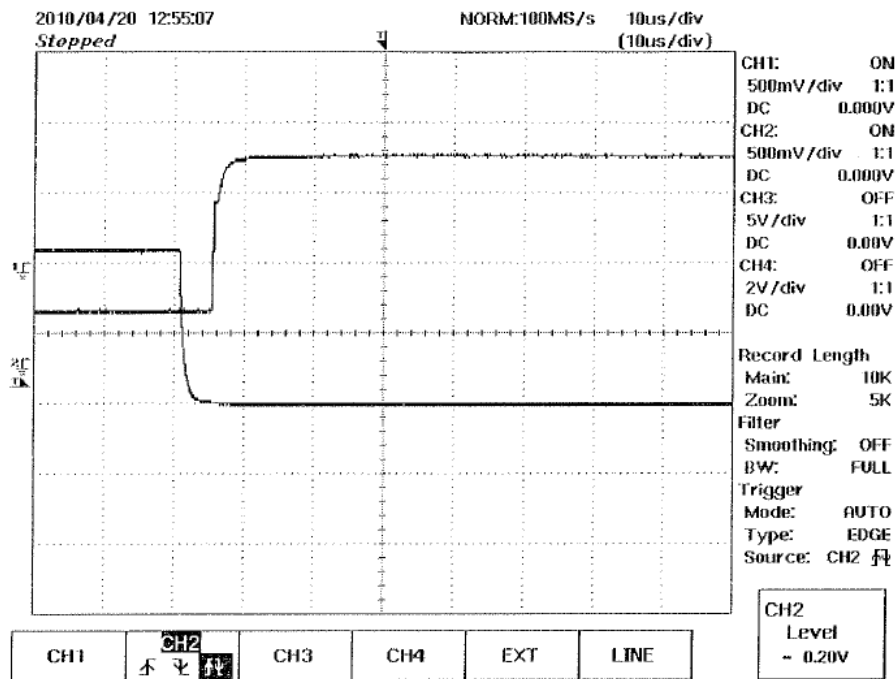
Seuraavaksi mitattiin IGBT-ohjaimen saamat ja siltä IGBT-moduulille lähtevät pulssit (kuvat 5.16 ja 5.17). Lisäksi tarkistettiin kuolleen ajan pituus tarkastelemalla IGBT-moduulille meneviä pulsseja pienellä aikavälillä (kuva 5.18). Oskilloskoopilla otetuista kuvista on nähtävissä, että ohjaukset ja kuolleen ajan säätö toimivat oikein.



Kuva 5.16 IGBT-ohjaimelle menevät ohjauspulssit.



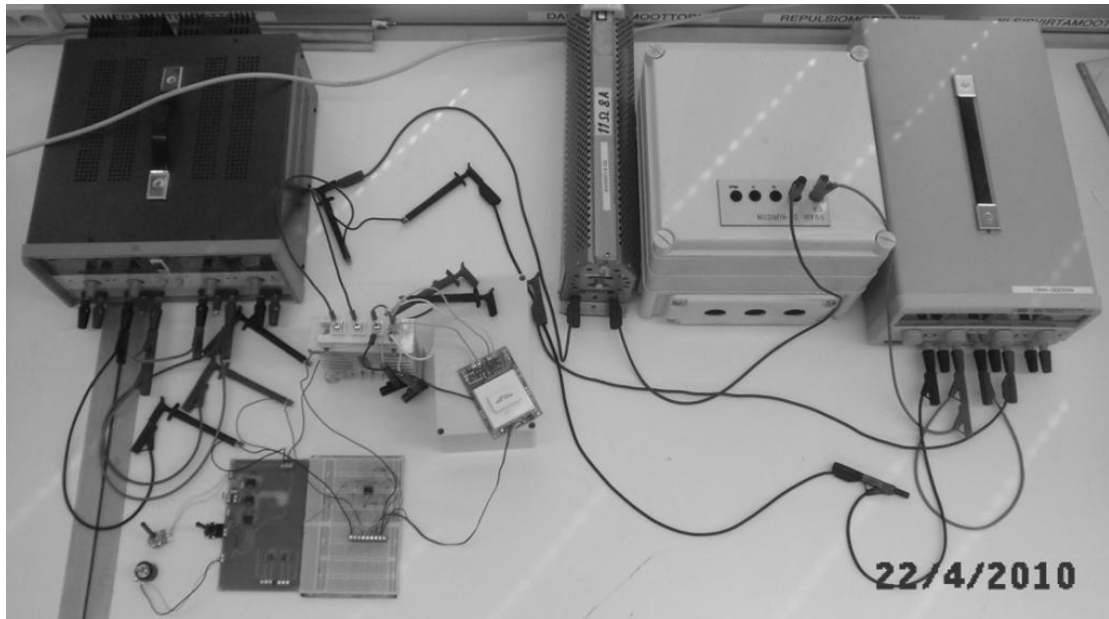
Kuva 5.17 IGBT-moduulille menevät ohjauspulssit.



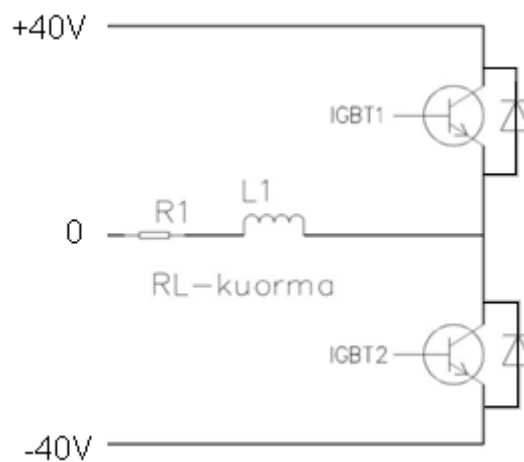
Kuva 5.18 Ohjauspulssien välinen kuollut aika n. 5 μ s.

Tehoasteen todellinen mittauskytkentä ja periaatekytkentä on esitetty kuvissa 5.19 ja 5.20. Kuorma muodostui $11 \Omega/8 \text{ A}$ vastuksesta sekä 25 mH kuristimesta. IGBT-moduulin yli kytkettiin virtalähteen avulla vaikuttamaan $\pm 40 \text{ V}$ jännite. Kytkennästä mitattiin kuorman yli vaikuttava virta ja jännite sekä IGBT-moduulille menevät ohjaussignaalit.

Mittausarja oli seuraavanlainen: Mitattiin modulaatiosuhteilla 10, 50 ja 100 % sekä ylimodulaatiossa. Mittaukset suoritettiin kytkentätaajuudella 870 Hz, 5 kHz sekä 10 kHz. Oskilloskoopilla mittauksia suoritettaessa piti huomioida, että tehoasteen mittauksessa tulee käyttää galvaanisesti erotettuja mittapäitä.

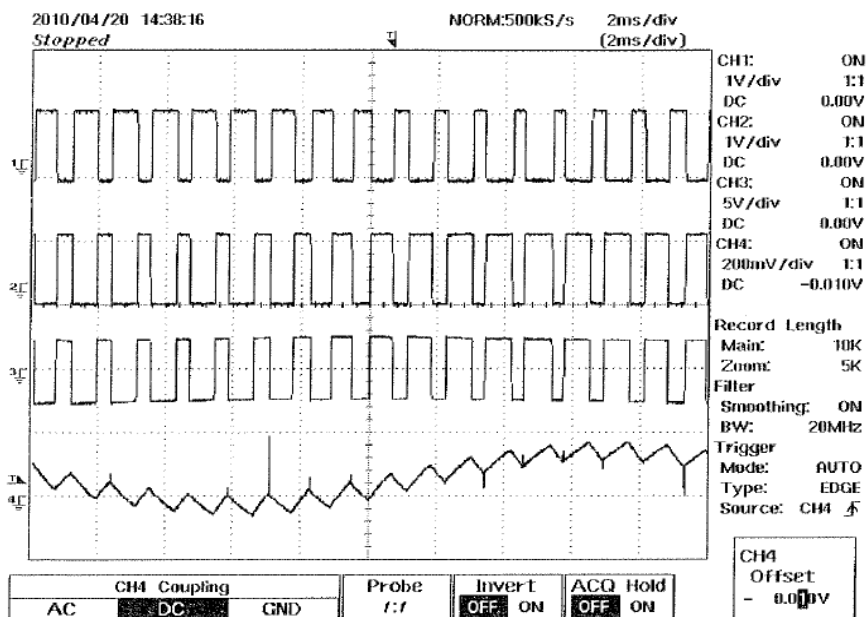


Kuva 5.19 Tehoasteen mittauskytkentä, jossa ylhäältä vasemmalta lukien: ohjauspiirin virtalähde, IGBT-transistori ja IGBT-ohjain, vastus, kuristin ja tehoasteen virtalähde sekä alareunassa ohjauspiiri.

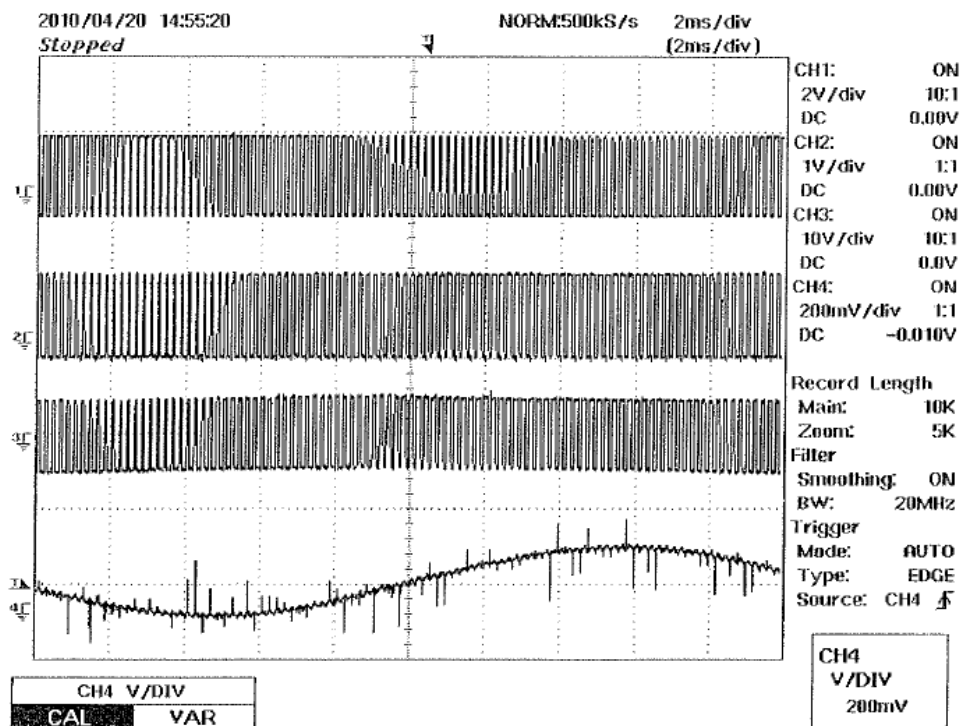


Kuva 5.20 Mittauskytkennän periaatekuva.

Oskilloskoopilla kuvattu mittausarja on nähtävissä kokonaisuudessaan liitteessä 2. Tarkempaan tarkasteluun on valittu kuvia, joissa esiintyy työn kannalta havainnollisia ilmiöitä. Kuvissa 5.21, 5.22 ja 5.23 on nähtävissä, kuinka kytkentätaajuus vaikuttaa virran aaltomuotoon. Kuvissa näkyvät signaalit ovat ylhäältä alkaen IGBT2-ohjaussignaali, IGBT1-ohjaussignaali, kuorman yli vaikuttava jännite sekä kuorman virta.

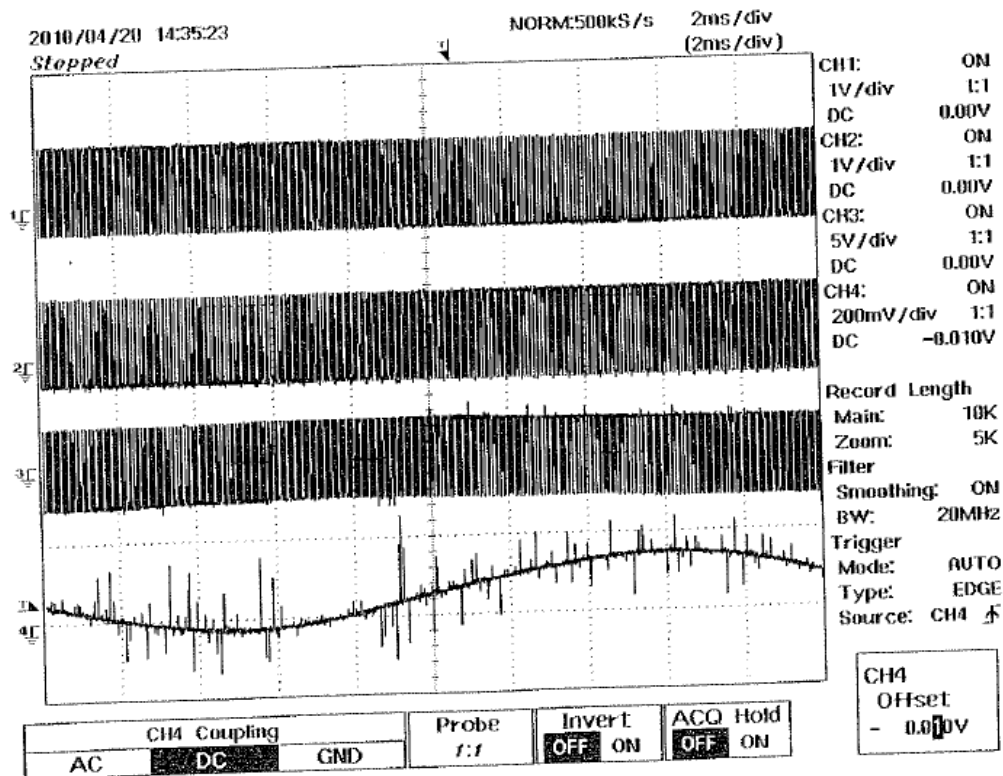


Kuva 5.21 Signaalit ylhäältä alas ovat: kaksi ylintä IGBT:n ohjaussignaali, kuorman jännite sekä virta. KytKentätaajuudella 870 Hz virrassa on havaittavissa selvä sahalaitaisuus, joka noudattaa kytKentätaajuutta. Sahalaitaisuus johtuu piirin RL-aikavakiosta.



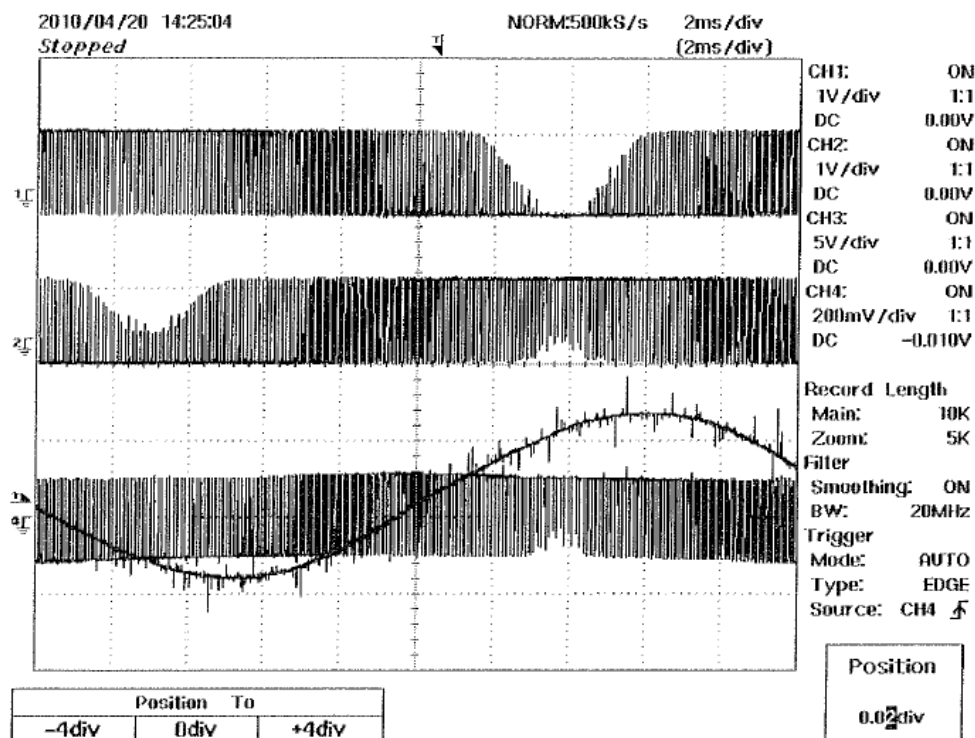
Kuva 5.22 KytKentätaajuudella 5 kHz sahalaitaisuus on selvästi pienentynyt, mutta mittauskytkennästä johtuvia korkeataajuisia häiriöitä (virtasignaalinissa olevat pienet piikit) on alkanut muodostua.

Kuvissa 5.22 ja 5.23 näkyvät häiriöt saattavat häiritä kytkennän lähellä olevia elektronisia laitteita, mistä johtuen vaihtosuuntaajan käyttö täytyy rajoittaa sähkölaboratorioon EMC määräysten mukaisesti.



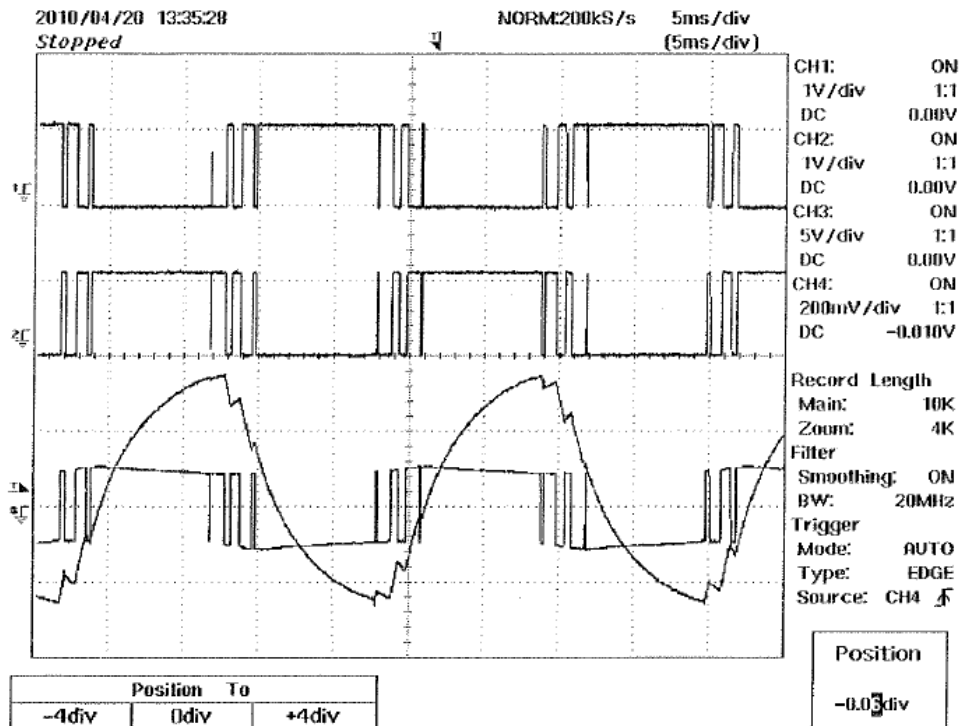
Kuva 5.23 KytKentätaajuudella 10 kHz virta on tasoittunut edelleen.

IGBT-ohjaimen lyhyiden ohjauspulssien supressointi toiminnon vaikutuksen voi havaita kuvasta 5.24. 100 % modulaatiosuhteella ja 10 kHz:n kytKentätaajuudella alkaa muodostua erittäin lyhyitä ohjauspulseja, jotka IGBT-ohjain suodattaa pois. Tämä näkyy koloina ohjauspulssien kuvaajissa.



Kuva 5.24 100 % modulaatiosuhteella ja 10 kHz:n kytkentätaajuudella IGBT-ohjain suodattaa osan ohjauspulseista.

Ylimodulaatiolla tarkoitetaan tilannetta jossa ohjauksessa siniaallon amplitudi on suurempi kuin kolmioaallon. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa transistori johtaa pidemmän aikaa, kuin kytkentätaajuudesta voisi päätellä. Aika määräytyy sen ajan mukaan jonka siniaallon amplitudi on suurempi kuin kolmioaallon amplitudi. Mikäli IGBT-transistorin ohjaus ajetaan ylimodulaatiotilaan, muuttuu virta voimakkaasti ylimodulaation kestoajan aikana. Kuvassa 5.25 ylimodulaatio näkyy ohjaussignaaleissa tasaisina kohtina.



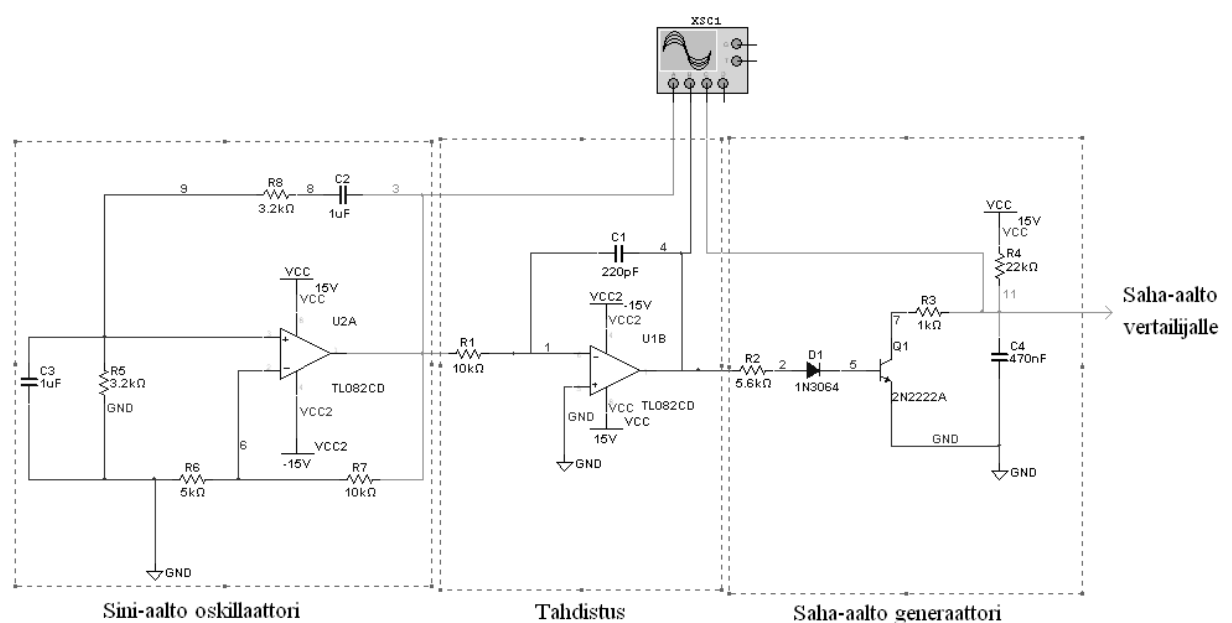
Kuva 5.25 Ohjauksen ylimodulaatio saa kuorman virran heilahtelemaan voimakkaasti.

5.4 Mittaustulosten kommentointi

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta vaihtosuuntaajan toimivan oikein. Saadut tulokset noudattelevat IGBT-transistoreista teoriassa opettuja lainalaisuuksia, sekä simuloimalla saatuja tuloksia. Piirin toiminta on helppo kuvata mittaamalla saatujen signaalien avulla. Lisäksi kuvat ovat selkeitä ja helposti luettavissa, mikä helpottaa piirin toiminnan selvittämistä opiskelijoille. Mittaukset olivat varsin helposti toteutettavissa, joten kytkentää voidaan soveltaa laboratoriotöihin, joissa oppilaat tutkivat ryhmissä tai itsenäisesti laitteen toimintaa. IGBT-vaihtosuuntaajakytkennän voidaan siis todeta täyttävän sille asetetut vaatimukset toiminnan ja opetuksen edistämisen suhteen.

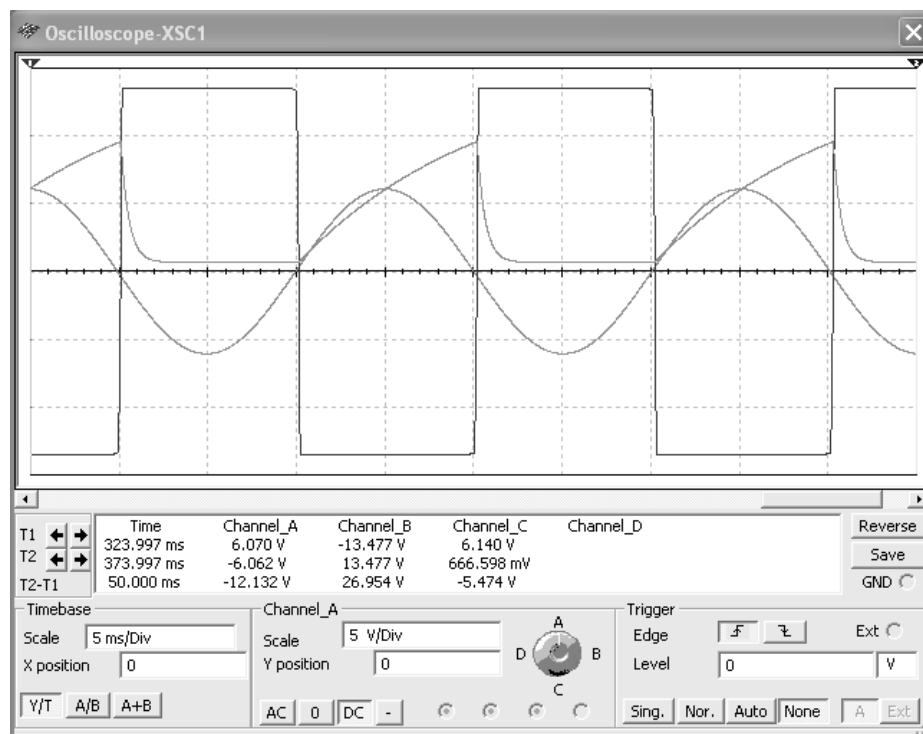
6 TYRISTORISUUNTAAJAN ALUSTAVA SUUNNITTELU

Tyristorisuuntaajan suunnittelussa noudatetaan samoja periaatteita kuin puolisuuntakytketyn IGBT-vaihtosuuntaajan suunnittelussa. Tyristorisuuntaajan ohjaus muodostuu kolmesta osasta, tahdistusmuuntajasta, saha-aalto generaattorista sekä vertailijasta. Ohjauspiiriä simuloidessa tahdistusmuuntaja korvattiin 50 Hz:n taajuudella värähtelevällä Wienin-siltaoskillaattorilla, jonka toiminta on kuvattu vaihtosuuntaajan toteutuksen yhteydessä. Kuvassa 6.1 on Multisim-ohjelmalla piirretty saha-aaltogeneraattori, sekä sen tahdistuskytkentä. Kytkenässä siniaalto-oskillaattorilta tuleva signaali muutetaan tahdistuskytkennällä siniaallon taajuiseksi invertoiduksi kanttiaalloksi. Näin saadulla kanttiaallolla ladataan ja puretaan saha-aalto generaattorissa olevaa kondensaattoria C4. Tahdistukselta tulevan pulssin ollessa negatiivinen transistori Q1 ei johda, jolloin kondensaattoria C4 ladataan vastuksen R4 kautta +15 V käyttöjännitteellä. Pulssin ollessa positiivinen transistori Q1 alkaa johtaa ja kondensaattori purkautuu vastuksen R3 kautta maahan. Kondensaattori C4 ja resistanssi R4 on mitoitettu siten, että niiden RC-aikavakio on sellainen että kondensaattori latautuu 10 V jänniteeseen 10 ms:ssa. Vastus R3 on valittu paljon pienemmäksi kuin R4, jotta kondensaattorin jännite purkautuisi lähes nolnaan transistorin Q1 johtaessa.



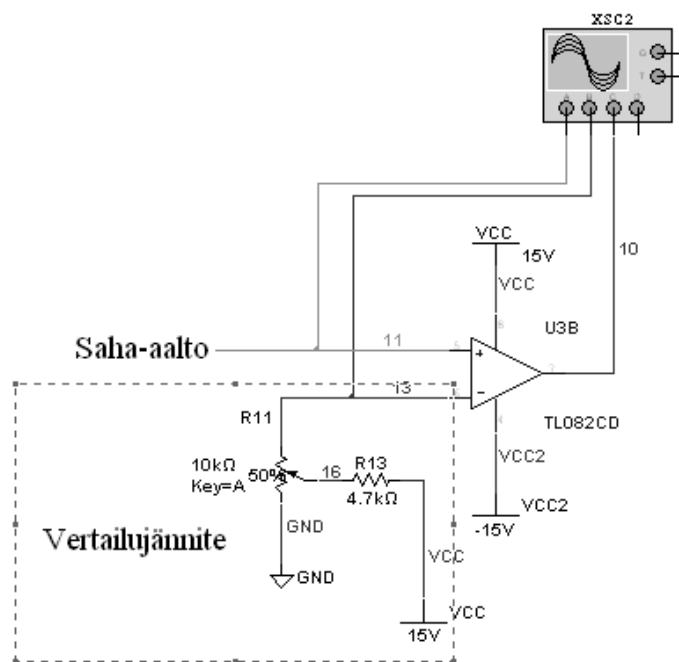
Kuva 6.1 Saha-aalto signaalin tahdistaminen ja tuottaminen.

Simuloimalla saaduista tuloksista nähdään, että kytkentä toimii edellä kuvatulla tavalla. Erityisen tärkeää oikean toiminnan saavuttamiseksi on, että tahdistus syöttävänverkon jännitteeseen on kohdallaan. Kuvassa 6.2 on nähtävissä simuloimalla saadut signaalien muodot.



Kuva 6.2 Simuloimalla saadut signaalit kuvan 6.1 mittapisteistä.

Saha-aaltoa verrataan vertailujännitteeseen vertailijassa, jolloin saadaan tyristorisuntaajan ohjauspulssit. Vertailujännitteen tulee olla säädettävissä saha-aallon alimmasta tasosta lähes saha-aallon huippuarvoon, lähes huippuarvoon siksi, että tyristorille täytyy jättää kommutointivara. Kuvassa 6.3 on esitetty, kuinka säädettävä vertailujännite voidaan toteuttaa potentiometrillä sekä simuloimalla saatujen signaalien mittausta kohdat. Saha-aalto kytketään operaatiovahvistimen positiiviseen napaan, ja vertailujännite negatiiviseen napaan. Näin saadaan vahvistimen ulostulosta positiivinen pulssi saha-aallon ollessa suurempi kuin vertailujännite ja negatiivinen pulssi saha-aallon ollessa pienempi.



Kuva 6.3 Vertailujännitteen muodostaminen ja vertailija

Kuvassa 6.4 on nähtävissä kuinka vertailija muodostaa ohjaussignaalin. Lisäksi kuvasta voi päätellä vertailujännitteen tason laskemisen kasvattavan tyristorin liipaisukulmaa. Saha-aalto ei ole täysin lineaarista, mutta se ei tässä sovelluksessa haittaa, sillä vertailujännitteen säätö tullaan tekemään käsin.



Kuva 6.4 Tyristorisuuntaajan ohjaus signaalin muodostuminen vertailijassa.

7 YHTEENVETO

Tehtävänä oli tehoelektronikan komponenttien esittelyn ja yksivaiheisen PWM-ohjatun vaihtosuuntaajan suunnittelu opetuskäyttöön. Myös tyristorin toimintaa esittelevää kytkentää tutkittiin, mutta ajan puutteen vuoksi kytkentää ei voitu toteuttaa tämän työn puitteissa. Haastavinta työssä oli piirien simulointi ja piirilevy suunnittelu. Myös käytännön toteutuksessa oli omat hankaluutensa; sekä simulointiohjelmistojen epäluotettavuus että tarvittavien ohjelmistojen löytyminen vain sähkölaboratoriosta aiheuttivat ongelmia. Kuitenkin piirit saatiin simuloitua ja toiminta varmistettua vaihtosuuntaajan osalta mittauksilla oikeaksi.

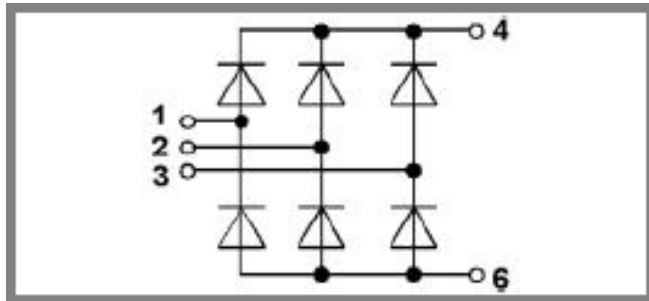
Tämän tutkintotyön tietoja käyttäen voidaan rakentaa yksivaiheinen PWM-ohjattu puolisuuntakytketty IGBT-vaihtosuuntaaja sekä rakentaa tehoelektronikan komponenttien esittely. Tyristorisuuntaajakytkentäkin on toteutettavissa noudattamalla samoja periaatteita, kuin vaihtosuuntaajakytkennän toteutuksessa. Erityisesti piirilevyn suunnittelussa voisi olla parannettavaa komponenttien sijoittelun ja johdinreitityksen suhteen.

Opetussolua voisi jatkossa kehittää siten, että esittelyyn otettaisiin mukaan tämän hetken huippua edustavaa SKiiP-teknologiaa havainnollistavia kytkentöjä. Muutenkin olisi hyvä aika ajoin päivittää komponentti esittelyä uusilla komponenteilla komponenttien kehittyessä ja kotelointitapojen muuttuessa.

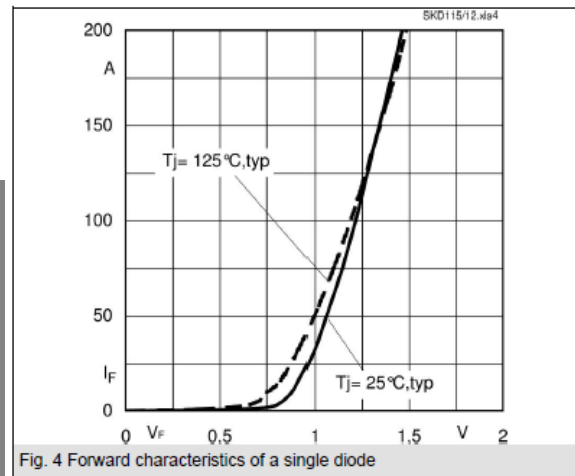
Työ oli mielenkiintoinen ja haastava. Tehoelektronikka on alue, jonka merkitystä sähkötekniikan koulutusohjelmassa ei voi liikaa korostaa. Myös simulointiohjelmistojen osuuden on oltava riittävällä tasolla. Opinnäytetyö laajensi yleistietoa elektroniikasta, tehoelektronikasta ja tehoelektronikan komponenteista huomattavasti.

LÄHTEET

- 1 ABB:n TTT käsikirja 2000-07, Luku 16 tehoelektroniikka, viitattu 17.4.2010:
[http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/160_0007.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/160_0007.pdf)
- 2 Honkanen, Harri, opetusmateriaali, Tehoelektroniikka, verkkodokumentti, pdf, Kajaanin ammattikorkeakoulu, viitattu 9.12.2009:
http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/HonHar/ma/ELE_Tehoelektroniikka_1.pdf
- 3 Kohtala, Matti, Kolmivaiheisen PWM-vaihtosuuntaajan kehittäminen opetuskäyttöön, Tutkintotyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Tampere 2007, 41 sivua.
- 4 Mohan, N., Undeland, T.M. ja Robbins, W.P. Power electronics, Wiley 1995, 2. painos, sivu 125.
- 5 Niiranen, Jouko, Tehoelektroniikan komponentit, Otatiето Oy 2007, 4. painos, sivu 81.
- 6 Semikron oy. Komponenttien datalehdet, viitattu 15.1.2010:
<Http://www.semikron.com>
- 7 Vauhkonen, Vesa, Tehoelektroniikka kurssimateriaali, Savonia-ammattikorkeakoulu, Sähkötekniikan osasto 2010.

SKD115/18: 3-vaihetasasuuntaaja (6-pulssisilta)

KytKentä ja päästökäyrät



$$V_{RMS}, V_{RRM} = 1800V$$

$$I_D = 110A (T_s = 85 \text{ } ^\circ C)$$

$$T_{vj} = -40 \dots 150^\circ C$$

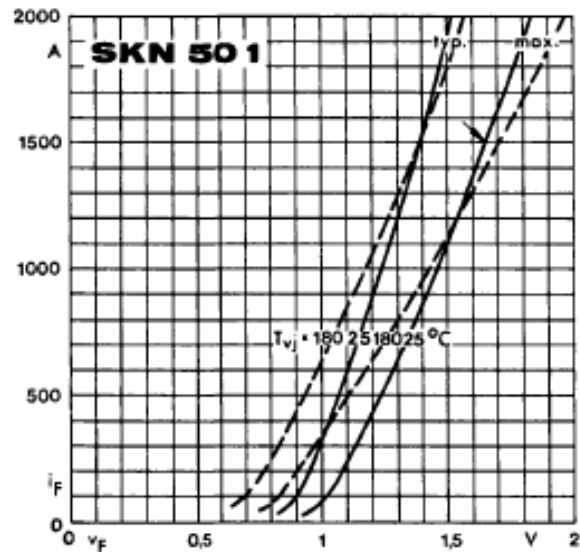
$$R_{thjh} = 1K/W \text{ (per diodi)}$$

Tyypillisiä käyttökohteita:

- Tasasuuntaajana
virtalähteissä
- Tasasuuntaajana
taajuusmuuttajissa
- DC-moottorisovellukset
- Akkulaturisovellukset

SKN 501/04: Tasasuuntausdiodi (verkkotaajuuskäyttö)**Rectifier Diodes**

SKN 450
SKN 501
SKN 870



Diodi ja päästökäyrät

$$V_{RMS}, V_{RRM} = 400V,$$

$$I_{FAV} = 500A (125 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$T_{vj} = -40 \dots 180 \text{ } ^\circ\text{C}$$

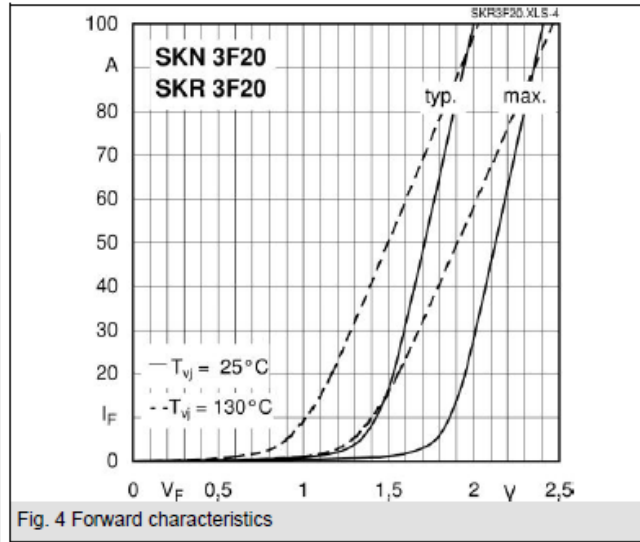
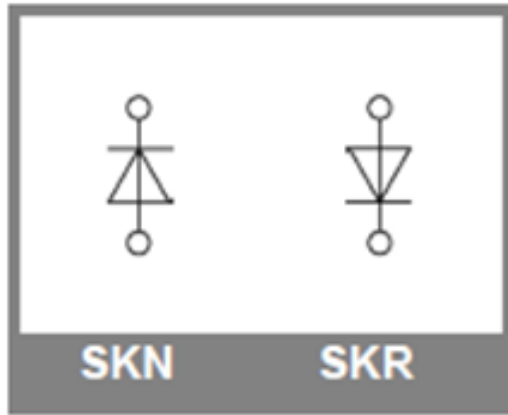
$$R_{thjc} = 0,075/0,15 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{thch} = 0,02/0,04 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

(Kaksipuolinen / yksipuolinen
jäähdytys)

Tyypillisiä käyttökohteita:

- Soveltuu kaikenlaisiin suuritehoisiin tasasuuntaussovelluksiin
- Soveltuu ohjaamattomiin ja puoliksiohjattuihin tasasuuntaajiin

SKR 3F20/10: Nopeasti toipuva tasasuuntausdiodi

Kyt Kentä ja päästökäyrät

$$V_{RMS}, V_{RRM} = 1000V$$

$I_{FRMS} = 41A$ (maksimi jatkuvalle
käytölle)

$$I_{FAV} = 20 A$$

(sin. 180; 5000 Hz; $T_c = 104 \text{ } ^\circ\text{C}$)

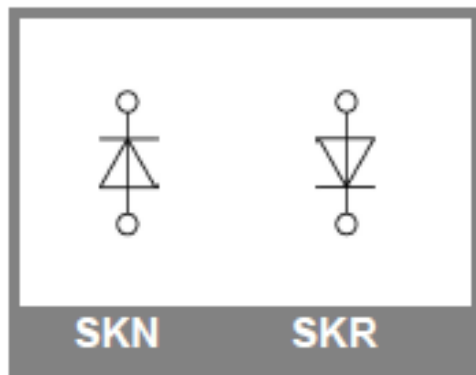
$$T_{vj} = -40 \dots 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_{thjc} = 1,2 \text{ K/W}, R_{thcs} = 0,5 \text{ K/W}$$

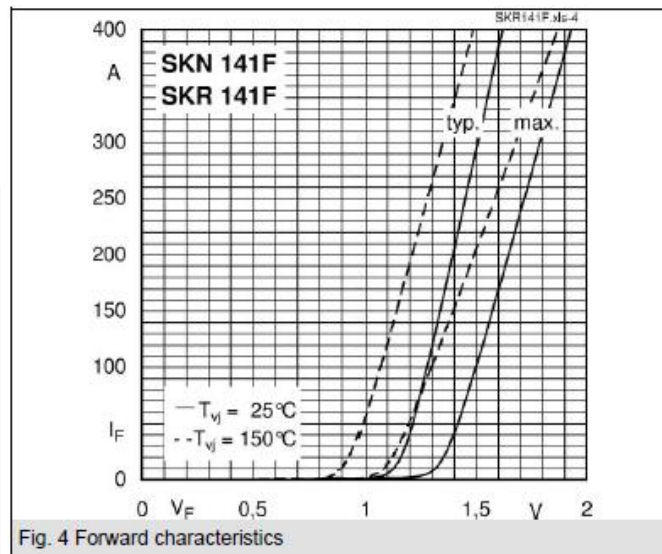
Tyypillisiä käyttökohteita:

- Vastadiodina
tehotransistoreille, GTO-
tyristoreille ja
epäsymmetrisille
tyristoreille
- Teholähdesovellukset,
invertterit ja hakkurit
- Soveltuu vaativiin
ympäristöolosuhteisiin

SKN 141F15: Nopeasti toipuva tasasuuntausdiodi



Kyt Kentä ja päästökäyrät



$$V_{RSM}, V_{RRM} = 1500\text{V}$$

$I_{FRMS} = 260\text{A}$ (maksimi
jatkuvalle käytölle)

$$I_{FAV} = 140\text{ A}$$

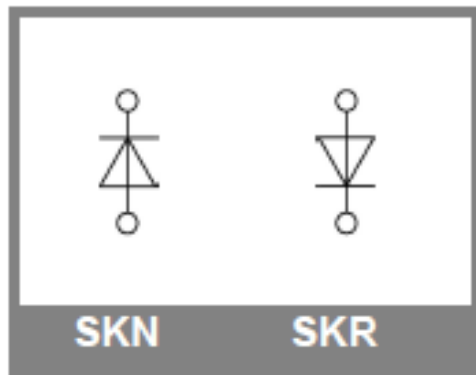
(sin. 180; 1000 Hz; $T_c = 100^\circ\text{C}$)

$$T_{vj} = -40 \dots 150^\circ\text{C}$$

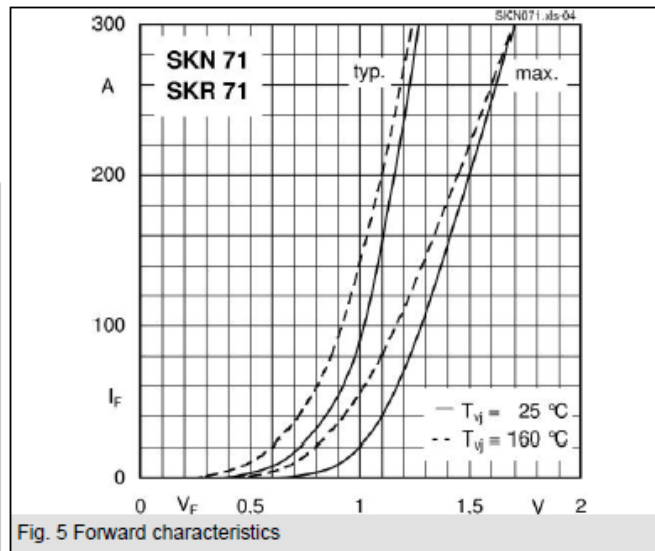
$$R_{thjc} = 0,2\text{ K/W}, R_{thcs} = 0,08\text{ K/W}$$

Tyypillisiä käyttökohteita:

- Vastadiodina GTO-tyristoreille ja epäsymmetrisille tyristoreille
- Invertterit ja hakkurit
- AC-moottoreiden ohjaus
- UPS- laitteet

SKN 71/16: Tasasuuntausdiodi (verkkokäyttö)

KytKentä ja päästökäyrät



$$V_{RSM}, V_{RRM} = 1600V$$

$$I_{FRMS} = 150A \text{ (maksimi}$$

jatkuvalle käytölle)

$$I_{FAV} = 70 A$$

$$\text{(sin. 180; } T_c = 125 \text{ °C)}$$

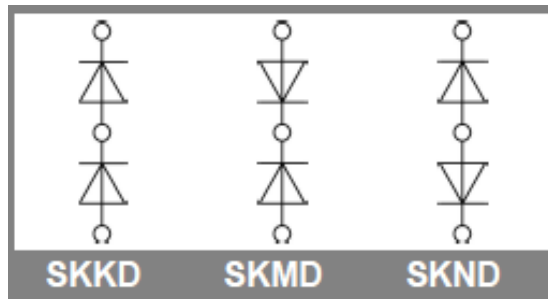
$$T_{vj} = -40 \dots 180 \text{ °C}$$

$$R_{thjc} = 0,55 \text{ K/W, } R_{thcs} = 0,2 \text{ K/W}$$

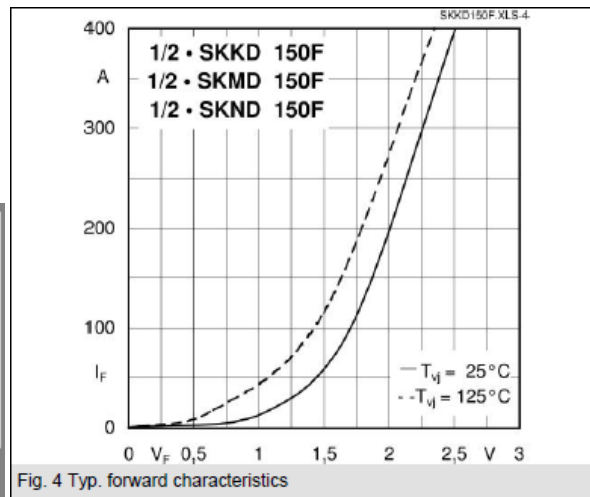
Tyypillisiä käyttökohteita:

- Yleiskäyttöinen tasasuuntausdiodi tasasuuntaussovelluksiin
- Ohjaamattomiin ja puoliksi ohjattuihin tasasuuntaussovelluksiin

SKND 150F12: Nopeasti toipuva diodimoduuli



Kyt Kentä ja päästökäyrät



$$V_{RSM}, V_{RRM} = 1200V$$

$I_{FRMS} = 220A$ (maksimi
jatkuvalle käytölle)

$$I_{FAV} = 150A$$

(sin 180; 50Hz; 54 °C)

$$T_{vj} = -40...180 \text{ °C}$$

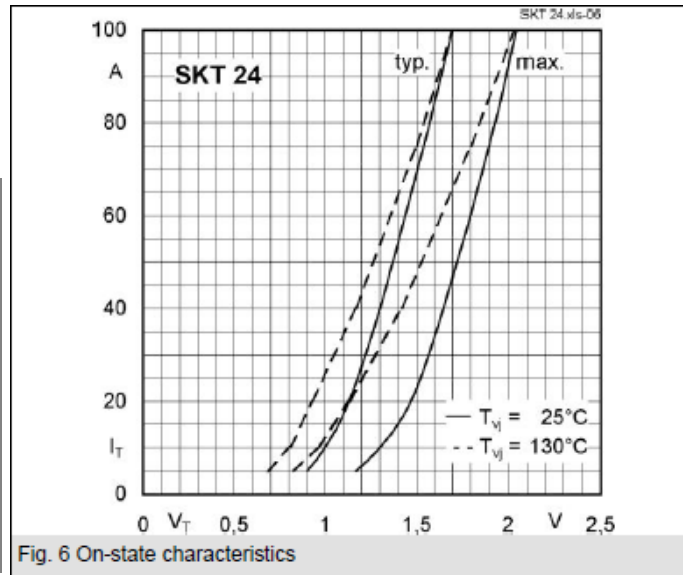
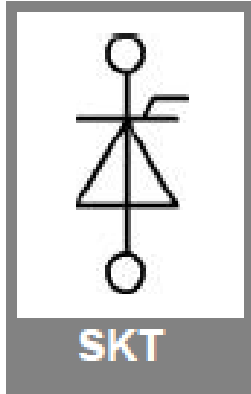
$$R_{thjc} = 0,2/0,1 \text{ K/W}$$

$$R_{thcs} = 0,1/0,05 \text{ K/W}$$

(per diodi / per moduuli)

Tyypillisiä käyttökohteita:

- Itsekommutoivat invertterit
- AC- moottoreiden ohjaus
- Induktiolämmittimet
- UPS- laitteet
- DC- hakkurit
- Hitsauskoneet

SKT 24/08D: Pulttityristori

KytKentä ja päästökäyrät

$$V_{RSM} = 900, V_{RRM}, V_{DRM} = 800V$$

$I_{TRMS} = 50A$ (maksimi jatkuvalle
käytölle)

$$I_{TAV} = 24A \text{ (sin } 180; T_c = 95 \text{ °C)}$$

Liipaisupulssivaatimukset:

$$V_{GT} = 3V, I_{GT} = 100mA \text{ (25 °C)}$$

$$T_{vj} = -40 \dots 130 \text{ °C}$$

$$R_{thjc} = 0,8/0,9/0,95 \text{ K/W}$$

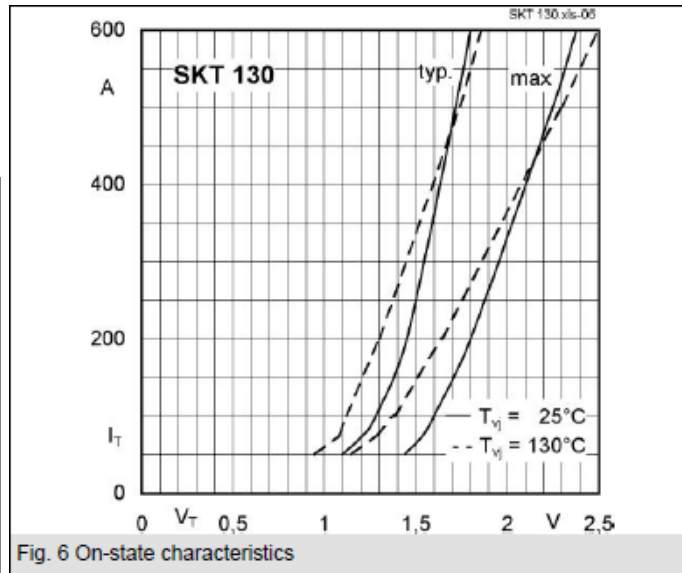
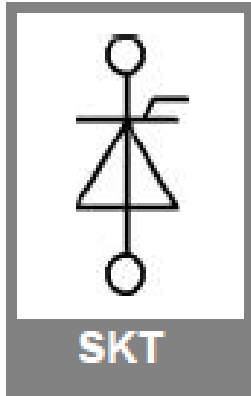
(jatkuva/sinipuoliaalto/120°

kanttiaalto)

$$R_{thcs} = 0,5 \text{ K/W}$$

Tyypillisiä käyttökohteita:

- AC ja DC moottoreiden ohjaussovellukset
- Ohjatut tasasuuntaajat

SKT 130/06: Pulttityristori

KytKentä ja päästökäyrät

$$V_{RSM} = 700, V_{RRM}, V_{DRM} = 600V$$

$I_{TRMS} = 220A$ (maksimi jatkuvalle käytölle)

$$I_{TAV} = 130A \text{ (sin 180; } T_c = 85 \text{ °C)}$$

Liipaisupulssivaatimukset:

$$V_{GT} = 3V, I_{GT} = 200mA \text{ (25 °C)}$$

$$T_{vj} = -40 \dots 130 \text{ °C}$$

$$R_{thjc} = 0,16/0,18/0,2 \text{ K/W}$$

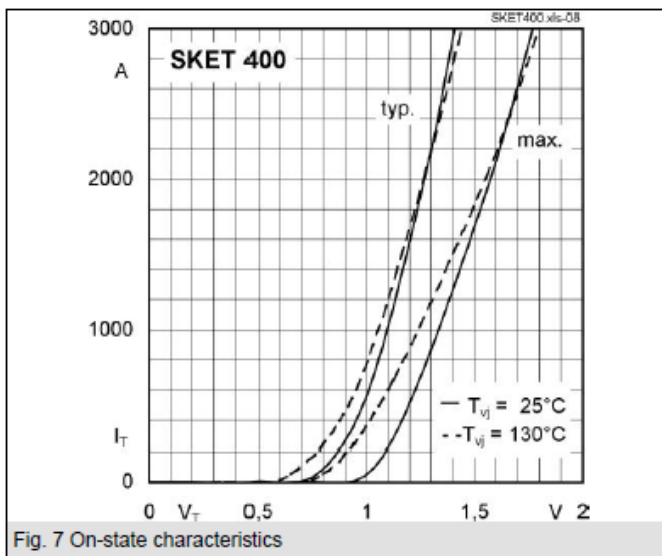
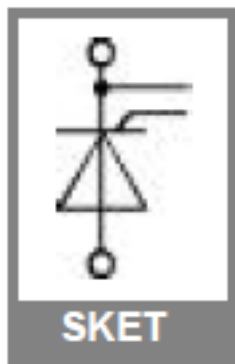
(jatkuva/sinipuoliaalto/120°

kanttiaalto)

$$R_{thcs} = 0,03 \text{ K/W}$$

Tyypillisiä käyttökohteita:

- DC- moottoreiden ohjaussovellukset
- Ohjatut tasasuuntaajat
- AC- ohjaimet (esim. lämpötilan säätö)

SKET 400/12E: Verkkotaajuinen tyristori

KytKentä ja päästökäyrät

$$V_{RSM} = 1300$$

$$V_{RRM}, V_{DRM} = 1200V$$

$I_{TRMS} = 700A$ (maksimi
jatkuvalle käytölle)

$$I_{TAV} = 400A \text{ (sin } 180; T_c = 84^\circ\text{C)}$$

Liipaisu pulssi vähintään:

$$V_{GT} = 3V, I_{GT} = 200mA \text{ (} 25^\circ\text{C)}$$

$$T_{vj} = -40 \dots 130^\circ\text{C}$$

$$R_{thjc} = 0,09/0,095/0,11 \text{ K/W}$$

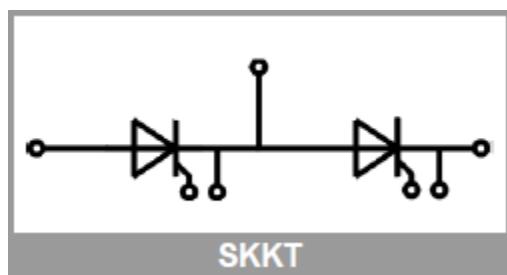
(jatkuva/sinipuoliaalto/120°
kantiaalto)

$$R_{thcs} = 0,02 \text{ K/W}$$

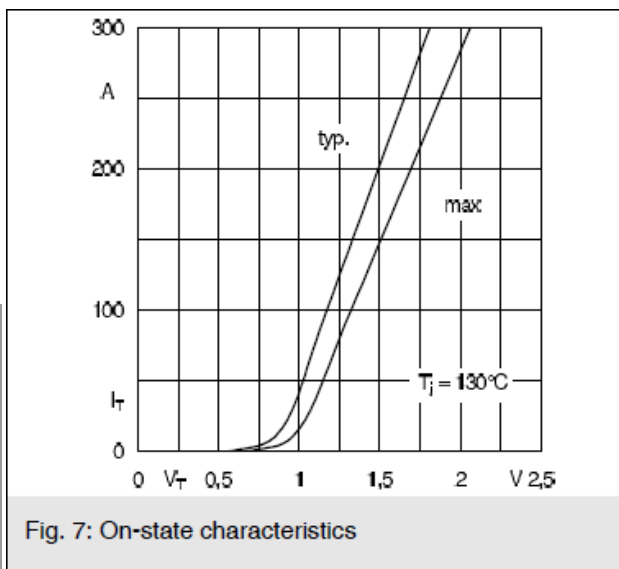
Tyypillisiä käyttökohteita:

- DC- moottoreiden ohjaussovellukset
- Lämpötilan säätösovellukset
- Suuren tarkkuuden valosäätösovellukset (esim. studiot ja teatterit)

SKKT 92/16 E G6: Tyristorimoduuli



KytKentä ja päästökäyrät



$$V_{RSM} = 1700$$

$$V_{RRM}, V_{DRM} = 1600V$$

$$I_{TAV} = 110/84A$$

(sin 180; 85/100 °C)

Liipaisupulssi vaatimukset:

$$V_{GT} = 2,5V, I_{GT} = 100mA (25^{\circ}C)$$

$$T_j = -40 \dots 130 \text{ } ^{\circ}C$$

$$R_{thjc} = 0,2/0,21/0,22 \text{ K/W}$$

(jatkuva/sinipuoliaalto/120°

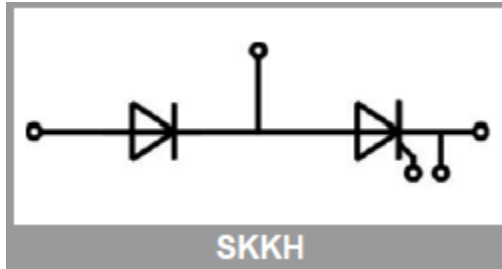
kanttiaalto)

$$R_{thcs} = 0,11 \text{ K/W per moduuli}$$

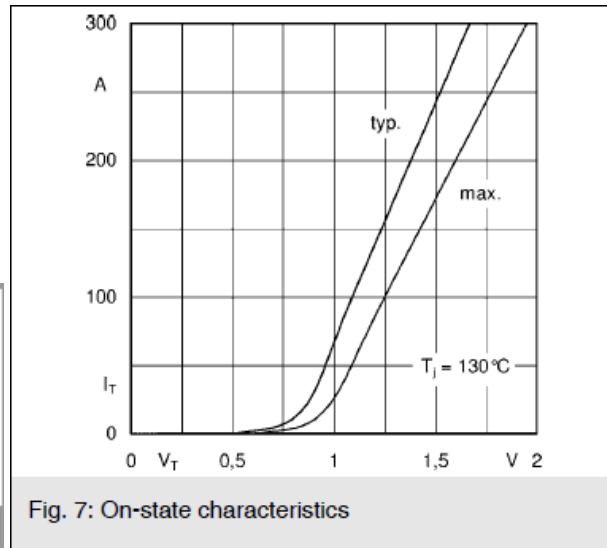
Tyypilliset käyttökohteet:

- DC- moottoreiden ohjaussovellukset
- Lämpötilan säätösovellukset
- Suuren tarkkuuden valosäätösovellukset (esim. studiot ja teatterit)
- AC- moottoreiden pehmökäynnistimet

SKKH 106/12 E G6: Tyristori- diodimuuli



KytKentä ja päästökäyrät



$$V_{RSM} = 1300$$

$$V_{RRM}, V_{DRM} = 1200V$$

$$I_{TAV} = 107/81A$$

(sin 180; 85/100 °C)

Liipaisupulssivaatimukset:

$$V_{GT} = 2,5V, I_{GT} = 100mA (25^{\circ}C)$$

$$T_j = -40...130^{\circ}C$$

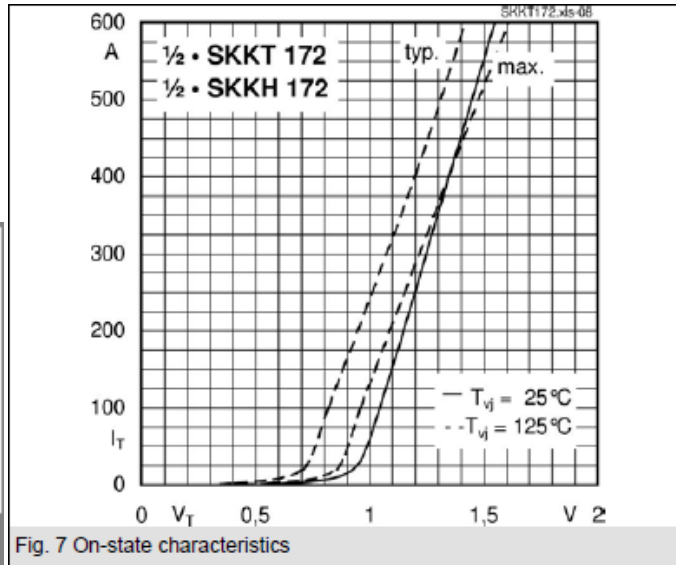
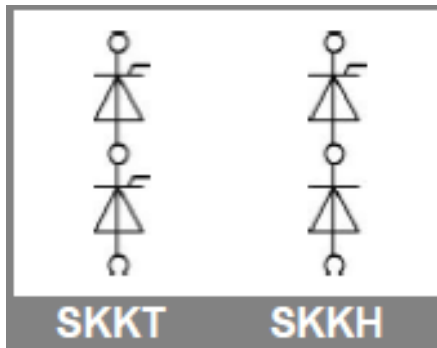
$$R_{thjc} = 0,22/0,23/0,24 K/W$$

(jatkuva/sinipuoliaalto/120°
kanttiaalto)

$$R_{thcs} = 0,11 K/W \text{ per moduuli}$$

Tyypillisiä käyttökohteita:

- DC- moottoreiden ohjaus-
sovellukset
- Lämpötilan
sääntösovellukset
- Suuren tarkkuuden
valosääntösovellukset (esim.
studiot ja teatterit)
- AC- moottoreiden
pehmokäynnistimet

SKKH 172/16E: Tyristori- diodimuuli

KytKentä ja päästökäyrät

$$V_{RSM} = 1700$$

$$V_{RRM}, V_{DRM} = 1600V$$

$I_{TRMS} = 275A$ (maksimi
jatkuvalle käytölle)

$$I_{TAV} = 172A \text{ (sin 180; } 86 \text{ } ^\circ C)$$

Liipaisupulssivaatimukset:

$$V_{GT} = 2V, I_{GT} = 150mA \text{ (} 25 \text{ } ^\circ C)$$

$$T_{vj} = -40 \dots 125 \text{ } ^\circ C$$

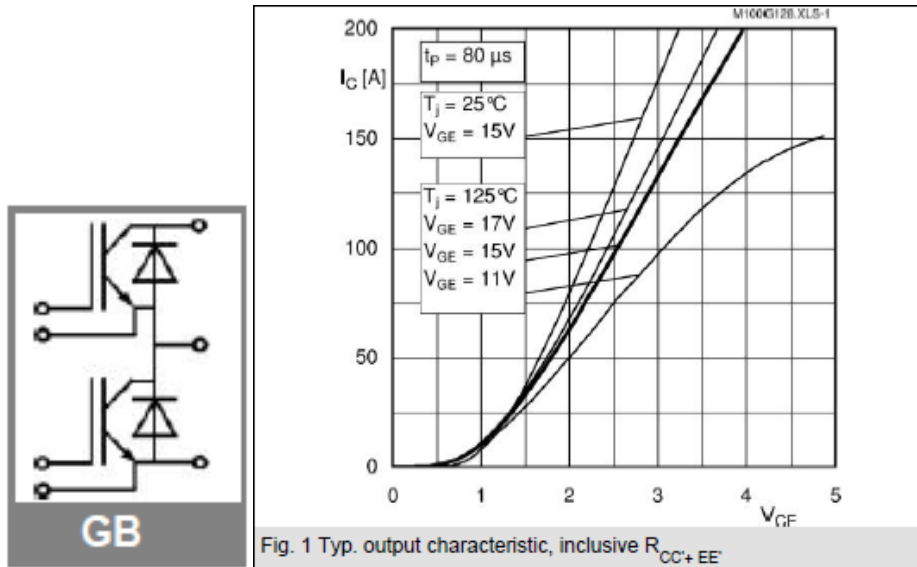
$$R_{thjc} = 0,155/0,164/0,18 \text{ K/W}$$

(jatkuva/sinipuoliaalto/120°
kantiaalto)

$$R_{thcs} = 0,1 \text{ K/W per thyristori}$$

Tyypillisiä käyttökohteita:

- DC- moottoreiden ohjaussovellukset
- AC- moottoreiden pehmokäynnistimet

SKM 100GB 128DN: SPT IGBT moduuli (SPT = Soft-Punch-Trough)

KytKentä ja päästökäyrät

IGBT:

$$V_{CES} = 1200V, V_{GES} = \pm 20V$$

$$I_C = 145A (25 \text{ } ^\circ C)$$

$$I_{CRM} = 290A (25 \text{ } ^\circ C)$$

Ohjausjännite:

$$V_{GE} = 15V \text{ (tyypillinen)}$$

Diodi: (abs. max. arvot)

$$I_F = -I_C = 95A (25 \text{ } ^\circ C)$$

$$I_{FRM} = 290A (25 \text{ } ^\circ C; t_p = 1ms)$$

$$I_{FSM} = 720A (t_p = 10ms; \sin 180;$$

$$T_j = 150 \text{ } ^\circ C)$$

Lämpöominaisuudet:

$$T_{vj} = -40 \dots 150 \text{ } ^\circ C$$

$$R_{thjc} = 0,21; R_{thjc} = 0,5;$$

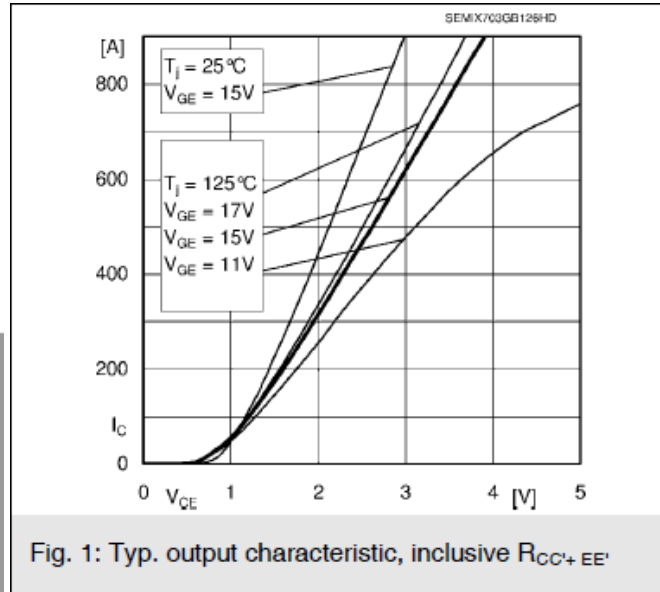
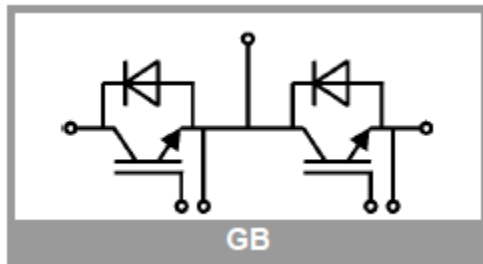
$$R_{thcs} = 0,05 \text{ K/W}$$

(per IGBT/per diodi/moduuli)

Tyypillisiä käyttökohteita:

- AC invertterit
- UPS
- Hitsaussovellukset
kytkentätaajuuteen
 $f_{sw} = 20kHz$ asti

SEMiX703GB126HDs: IGBT moduuli



Kyt Kentä ja päästökäyrät

IGBT:

$$V_{CES} = 1200V, V_{GES} = \pm 20V$$

$$I_C = 642A (25 \text{ } ^\circ C)$$

$$I_{CRM} = 900A (25 \text{ } ^\circ C)$$

Ohjausjännite:

$$V_{GE} = 15V \text{ (tyypillinen)}$$

Diodi:

$$I_F = 561A (25 \text{ } ^\circ C)$$

$$I_{FRM} = 900A$$

$$(t_p = 10ms, \sin 180^\circ, T_j = 25 \text{ } ^\circ C;)$$

$$I_{FSM} = 720A (t_p = 10ms; \sin 180;)$$

$$T_j = 150 \text{ } ^\circ C)$$

Lämpöominaisuudet:

$$T_{vj} = -40 \dots 150 \text{ } ^\circ C$$

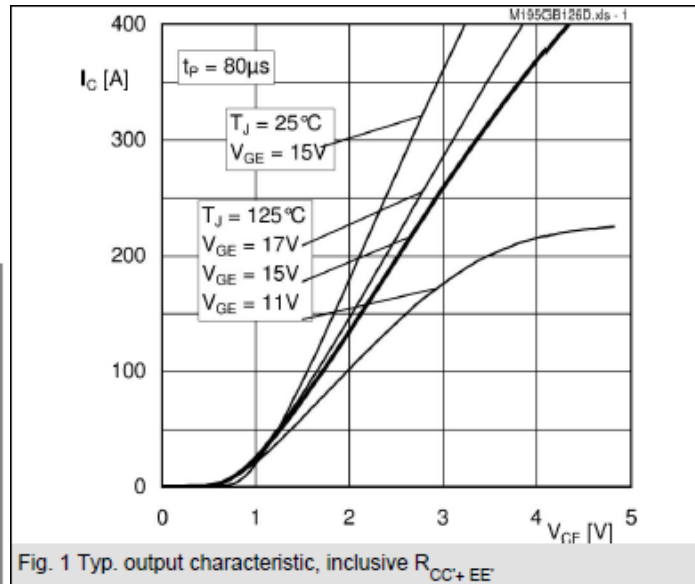
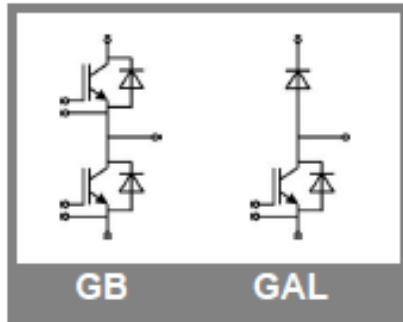
$$R_{thjc} = 0,061; R_{thjc} = 0,11; R_{thcs} = 0,04 \text{ K/W (per IGBT/per diodi/moduuli)}$$

sisältää lämpötilasensorin

Tyypillisiä käyttökohteita:

- AC invertterit
- UPS
- Hitsaussovellukset

SKM195GAL126DN: IGBT moduuli



Kyt Kentä ja päästökäyrät

IGBT:

$$V_{CES} = 1200V, V_{GES} = \pm 20V$$

$$I_C = 220A (25 \text{ } ^\circ C)$$

$$I_{CRM} = 300A (25 \text{ } ^\circ C)$$

Ohjausjännite:

$$V_{GE} = 15V \text{ (tyypillinen)}$$

Diodi:

$$I_F = 170A (25 \text{ } ^\circ C)$$

$$I_{FRM} = 200A$$

$$(t_p = 10ms, \sin 180^\circ, T_j = 25 \text{ } ^\circ C;)$$

$$I_{FSM} = 900A (t_p = 10ms; \sin 180;$$

$$T_j = 150 \text{ } ^\circ C)$$

Lämpöominaisuudet:

$$T_{vj} = -40 \dots 150 \text{ } ^\circ C$$

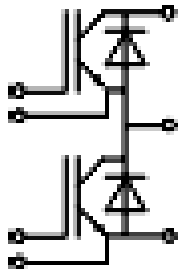
$$R_{thjc} = 0,16; R_{thjc} = 0,32; R_{thcs} =$$

0,05 K/W (per IGBT/per diodi/moduuli)

Tyypillisiä käyttökohteita:

- AC invertterit
- UPS
- Hitsaus sovellukset

SKM 400 GB 062 D: PT-IGBT moduuli (PT = punch-through)



GB

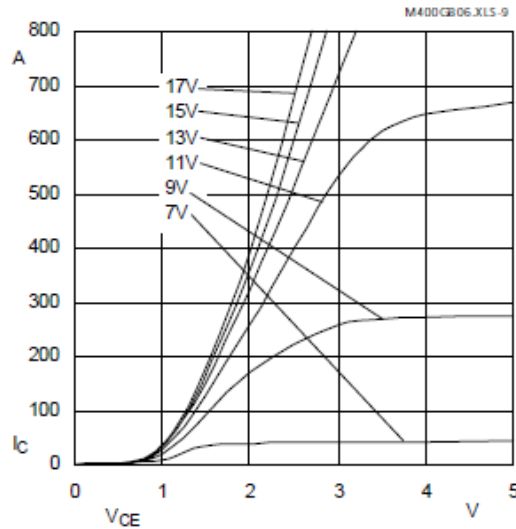


Fig. 9 Typ. output characteristic, $t_p = 250 \mu s$; $25 \text{ }^\circ\text{C}$

KytKentä ja päästökäyrät

IGBT:

$$V_{CES} = 600V, V_{GES} = \pm 20V$$

$$I_C = 475A (25 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$I_{CM} = 950A (25 \text{ }^\circ\text{C})$$

Ohjausjännite:

$$V_{GE} = 15V \text{ (tyypillinen)}$$

Diodi:

$$I_F = 400A (25 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$I_{FM} = 950A (t_p = 1ms,$$

$$T_{case} = 25 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$I_{FSM} = 900A (t_p = 10ms; \sin 180;$$

$$T_j = 150 \text{ }^\circ\text{C})$$

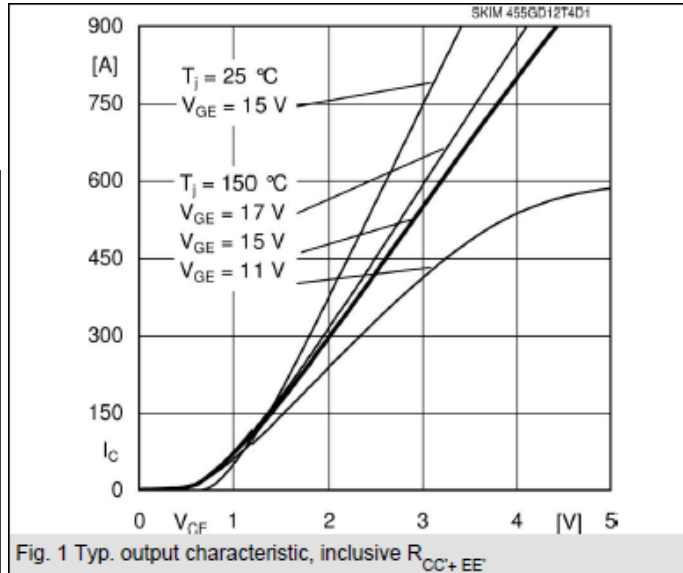
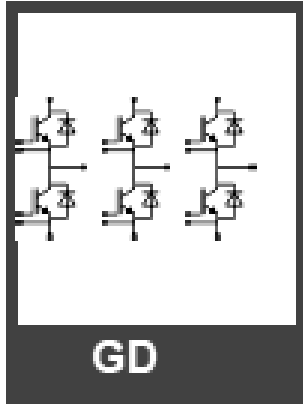
Lämpöominaisuudet:

$$T_{vj} = -40 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{thjc} = 0,09; R_{thjc} = 0,15; R_{thcs} = 0,038 \text{ K/W (per IGBT/per diodi/moduuli)}$$

Tyypillisiä käyttökohteita:

- AC invertterit
- UPS

SKiM455GD12T4D1: Trench IGBT moduuli

KytKentä ja päästökäyrät

IGBT:

$$V_{CES} = 1200V, V_{GES} = \pm 20V$$

$$I_C = 400A (25 \text{ } ^\circ C)$$

$$I_{CRM} = 1350A (25 \text{ } ^\circ C)$$

Ohjausjännite:

$$V_{GE} = 15V \text{ (tyypillinen)}$$

Diodi:

$$I_F = 295A$$

$$(T_j = 150 \text{ } ^\circ C; T_{\text{heatsink}} = 25 \text{ } ^\circ C)$$

$$I_{FRM} = 600A$$

Lämpöominaisuudet:

$$T_{vj} = -40 \dots 150 \text{ } ^\circ C$$

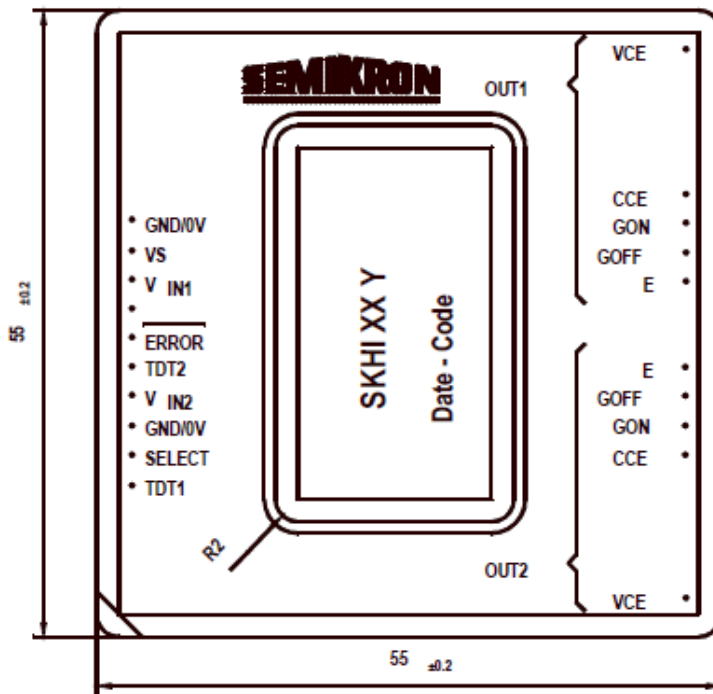
$$R_{thjs} = 0,14; R_{thjs} = 0,19 \text{ K/W}$$

(per IGBT/per diodi)

Tyypillisiä käyttökohteita:

- Vaativat AC invertterit
- UPS

SKHI 22B R: Hybrid Dual IGBT Driver



Abs. max. arvoja

$$V_S = 18 \text{ V (typ. 15 V)}$$

$$V_{iH} = 5+0,3 \text{ V (Input signal volt)}$$

$$I_{out_{PEAK}} = 8 \text{ A}$$

$$I_{out_{AVmax}} = 40 \text{ mA}$$

$$f_{max} = 50 \text{ kHz}$$

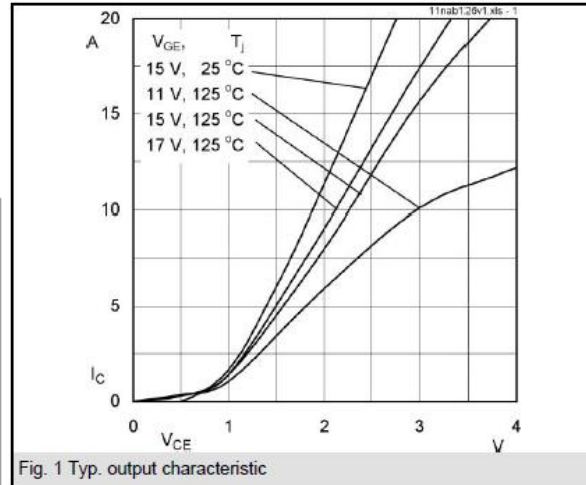
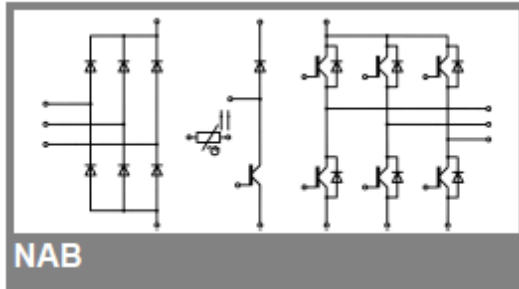
$$V_{CE} = 1200 \text{ V}$$

$$dv/dt = 50 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

$$T_{op} = -40 \dots 85 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tyypillisiä käyttökohteita:

- Ohjaimena IGBT moduuleille siltakytkennöissä

SKiiP 11NAB126V1: 3- v. tasas. + jarruhakkuri + 3-v. vaihtosuuntaaja

Kyt Kentä ja päästökäyrät

IGBT:

$$V_{CES} = 1200\text{V}, V_{GES} = \pm 20\text{V}$$

$$I_C = 16\text{A} (25\text{ }^\circ\text{C})$$

$$I_{CRM} = 16\text{A}$$

Ohjausjännite:

$$V_{GE} = 15\text{V} \text{ (tyypillinen)}$$

DIODI: (vaihtosuuntaaja)

$$I_F = 14\text{A} (T_s = 25\text{ }^\circ\text{C})$$

$$I_{FRM} = 16\text{A}$$

DIODI: (tasasuuntaaja)

$$V_{RRM} = 1600\text{V}$$

$$I_F = 35\text{A} (T_s = 70\text{ }^\circ\text{C})$$

$$I_{FSM} = 220\text{A} (t_p = 10\text{ms}; \sin 180;$$

$$T_j = 25\text{ }^\circ\text{C})$$

Moduuli:

$$I_{RMS} = 20\text{A}$$

Lämpöominaisuudet:

$$T_j = -40 \dots 150\text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{thjs} = 1,5; R_{thjs} = 2,5; R_{thcs} = 1,5$$

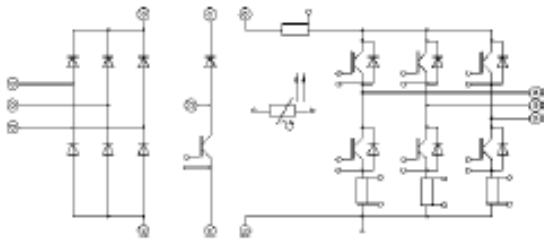
K/W (per IGBT/per

diodi(vaihtos.)/ per diodi(tasas.))

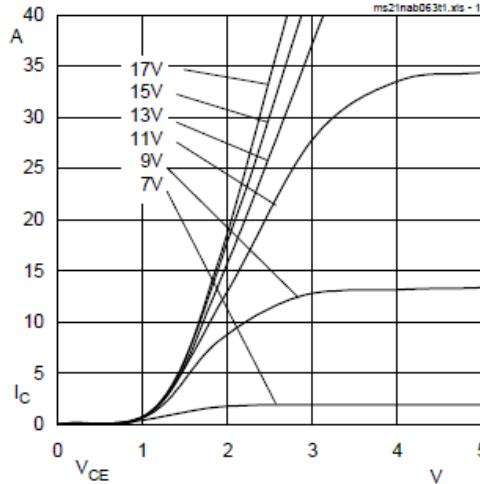
sisältää lämpötilasensorin

Tyypillisiä käyttökohteita:

- Invertterit 8kVA asti
- Tyypillinen moottori-kuorma: 4kW

SKiiP 21NAB063IT1: 3- v. tasas. + jarruhakkuri + 3-v. vaihtosuuntaaja

KytKentä ja päästökäyrät

Fig. 1 Typ. output characteristic, $t_p = 80 \mu\text{s}$; 25°C **Vaihtosuuntaaja:**

$$V_{\text{CES}} = 600\text{V}, V_{\text{GES}} = \pm 20\text{V}$$

$$I_{\text{C}} = 24\text{A} (25^\circ\text{C})$$

$$I_{\text{CM}} = 48\text{A}$$

Ohjauseännite:

$$V_{\text{GE}} = 15\text{V} \text{ (tyypillinen)}$$

Tasasuuntaaja:

$$V_{\text{RRM}} = 800\text{V}$$

$$I_{\text{D}} = 25\text{A} (T_s = 80^\circ\text{C})$$

$$I_{\text{FSM}} = 370\text{A} (t_p = 10\text{ms}; \sin 180;$$

$$T_j = 25^\circ\text{C})$$

Lämpöominaisuudet:

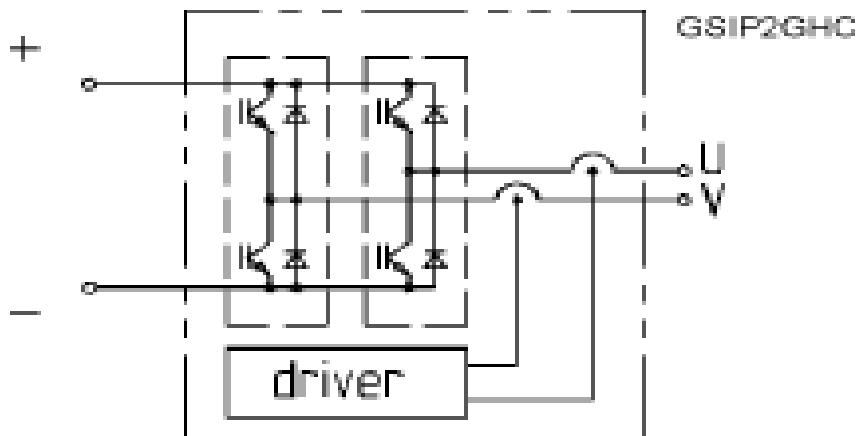
$$T_j = -40 \dots 150^\circ\text{C}$$

$$R_{\text{thjs}} = 1,7; R_{\text{thjs}} = 1,7; R_{\text{thcs}} = 1,7$$

K/W (per IGBT/per

diodi(vaihtos.)/ per diodi(tasas.))

sisältää lämpötilasensorin

SKiiP 132GH120-212CTV: yksivaihesiltamoduuli**IGBT:**

$$V_{CES} = 1200V, V_{CC} = 900V$$

$$V_{GES} = \pm 20V$$

$$I_C = 150A (25\text{ }^\circ\text{C})$$

Ohjausjännite:

$$V_{GE} = 15V \text{ (tyypillinen)}$$

DIODI:

$$I_F = 150A (T_s = 25\text{ }^\circ\text{C})$$

$$I_{FRM} = 16A$$

$$I_{FSM} = 1440A (t_p = 10\text{ms; sin}$$

$$180; T_j = 150\text{ }^\circ\text{C})$$

Lämpöominaisuudet:

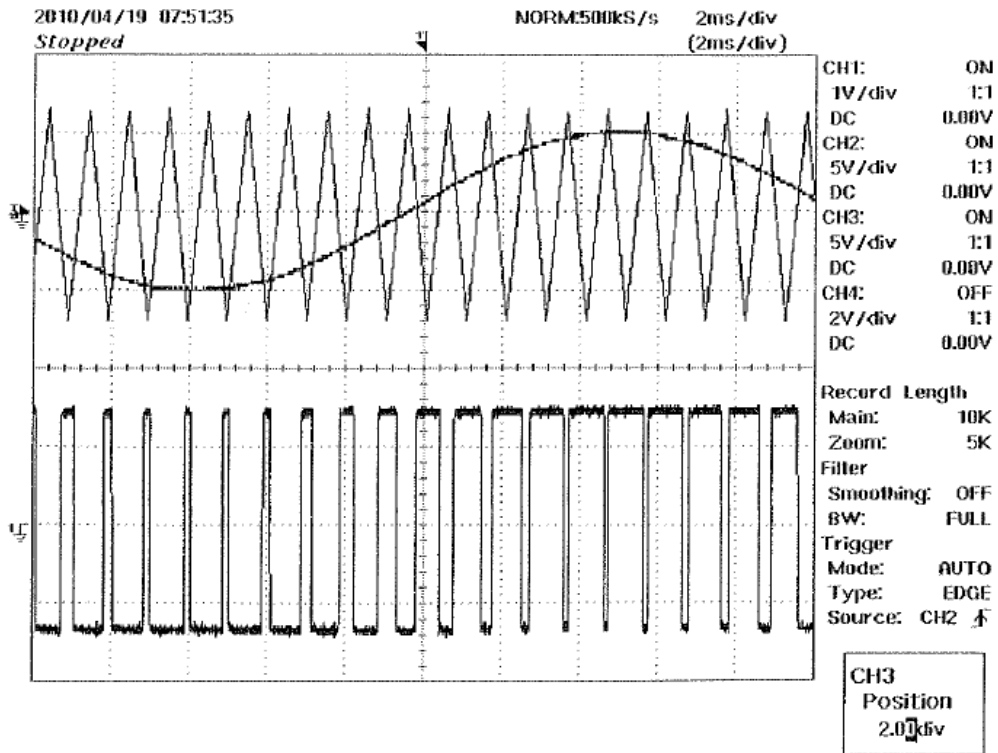
$$T_j = -40 \dots 150\text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{thjs} = 0,18; R_{thjs} = 0,375; R_{thcs} =$$

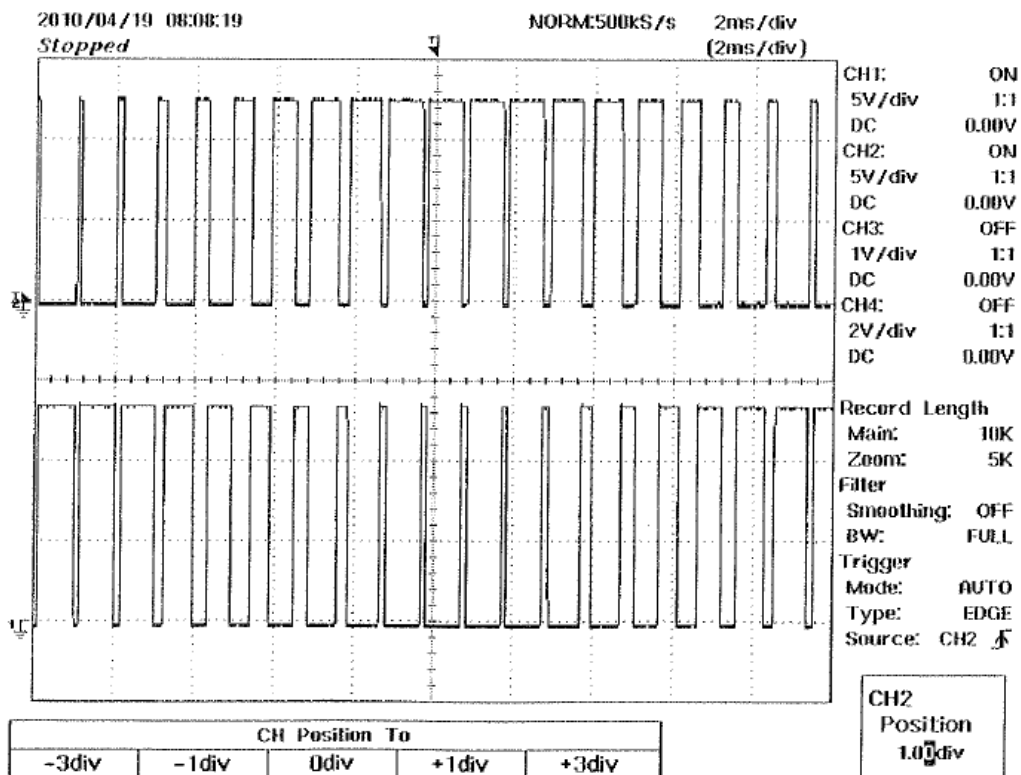
$$0,044\text{ K/W (per IGBT/per}$$

$$\text{diodi/per moduuli)}$$

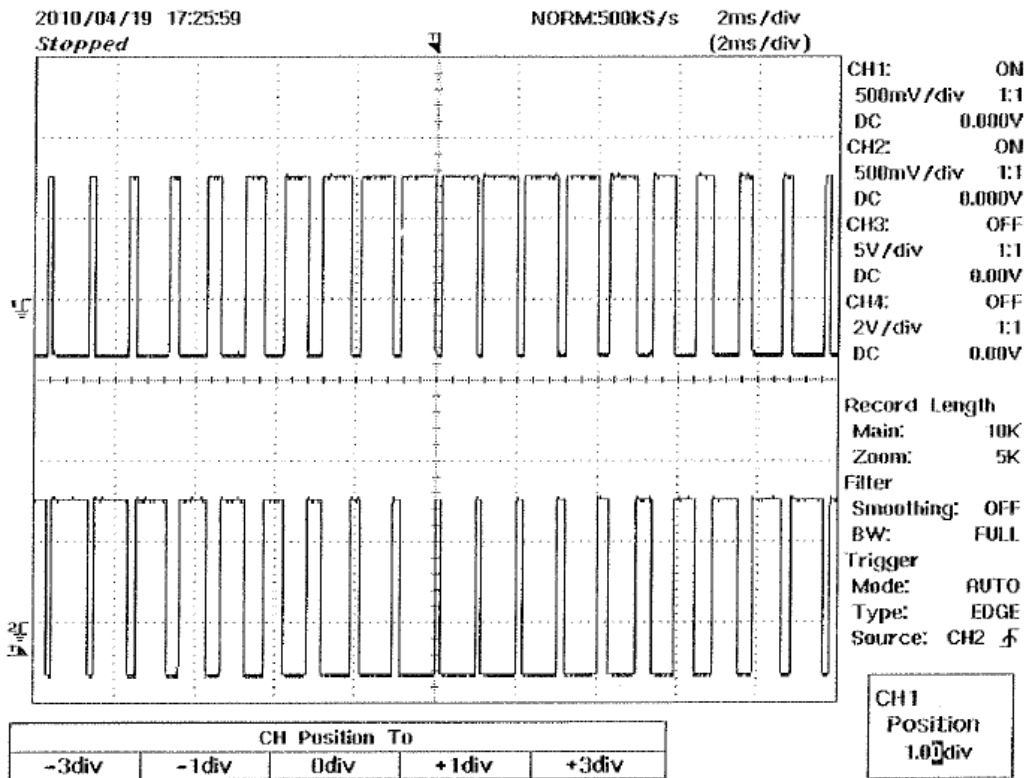
sisältää lämpötilasensorin



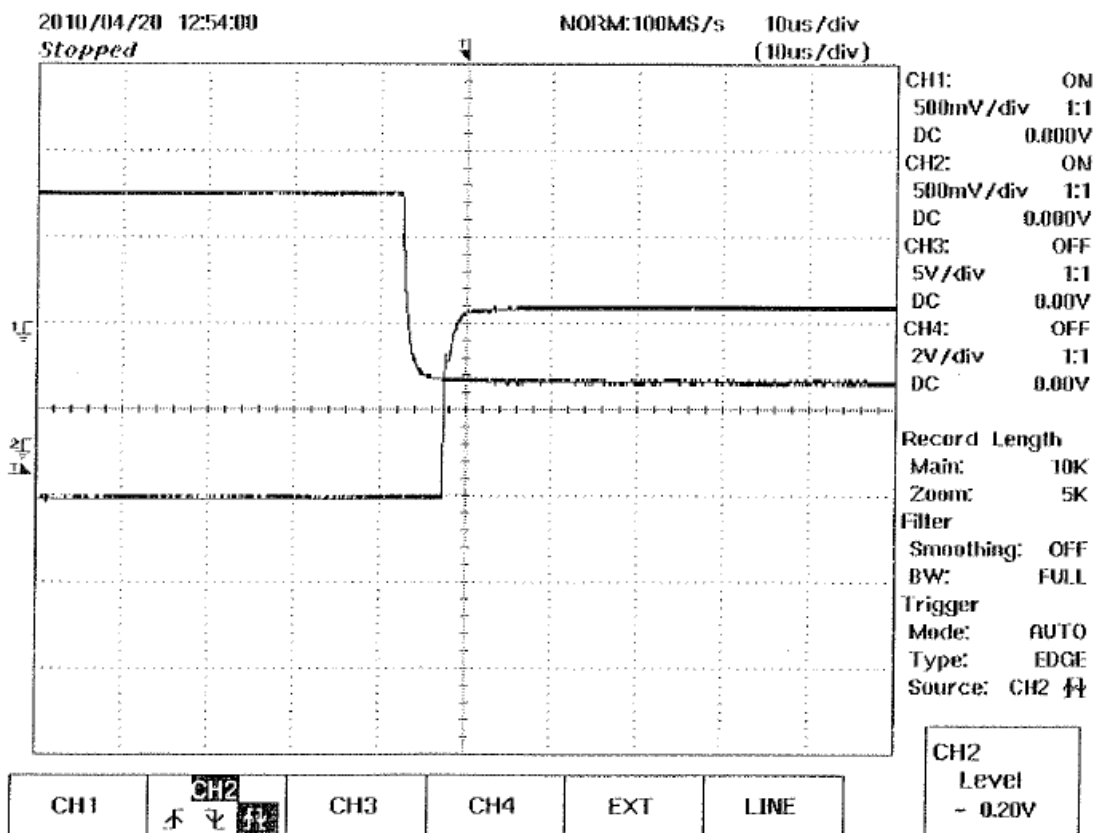
PWM-signaalin muodostuminen vertailijassa



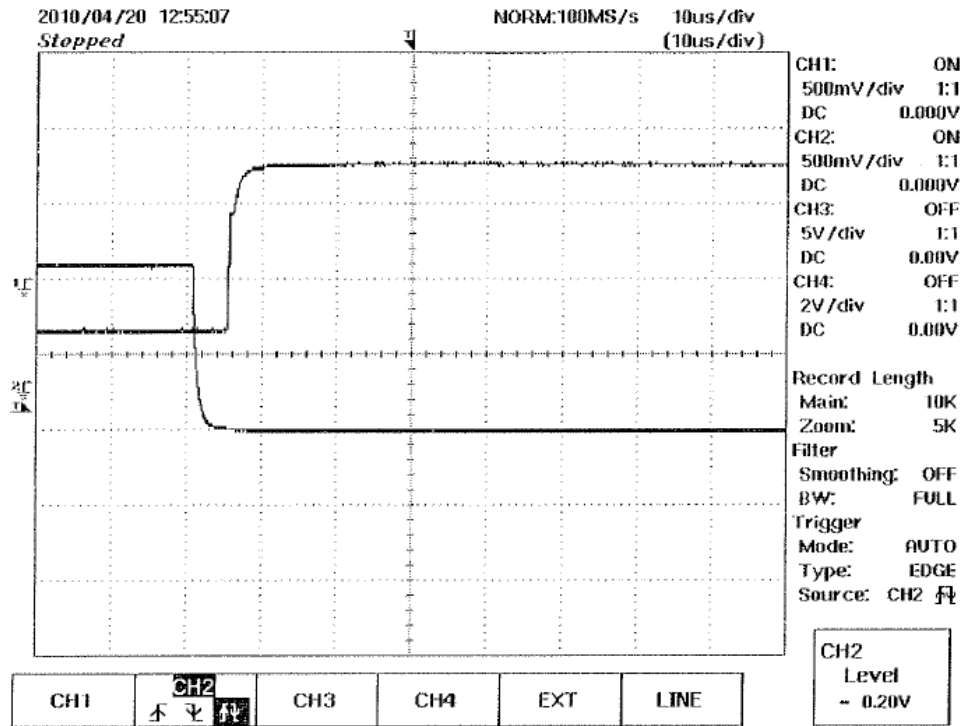
Invertoinnista saatavat ohjauspulssit



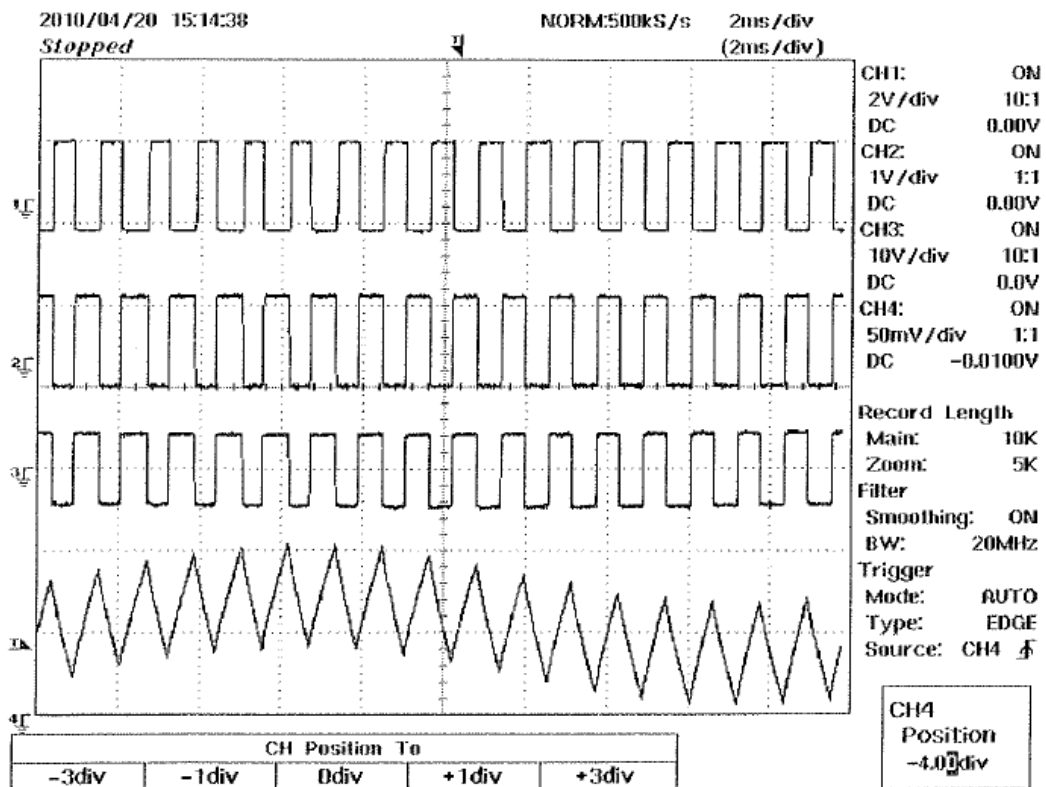
IGBT:n saamat ohjauspulssit



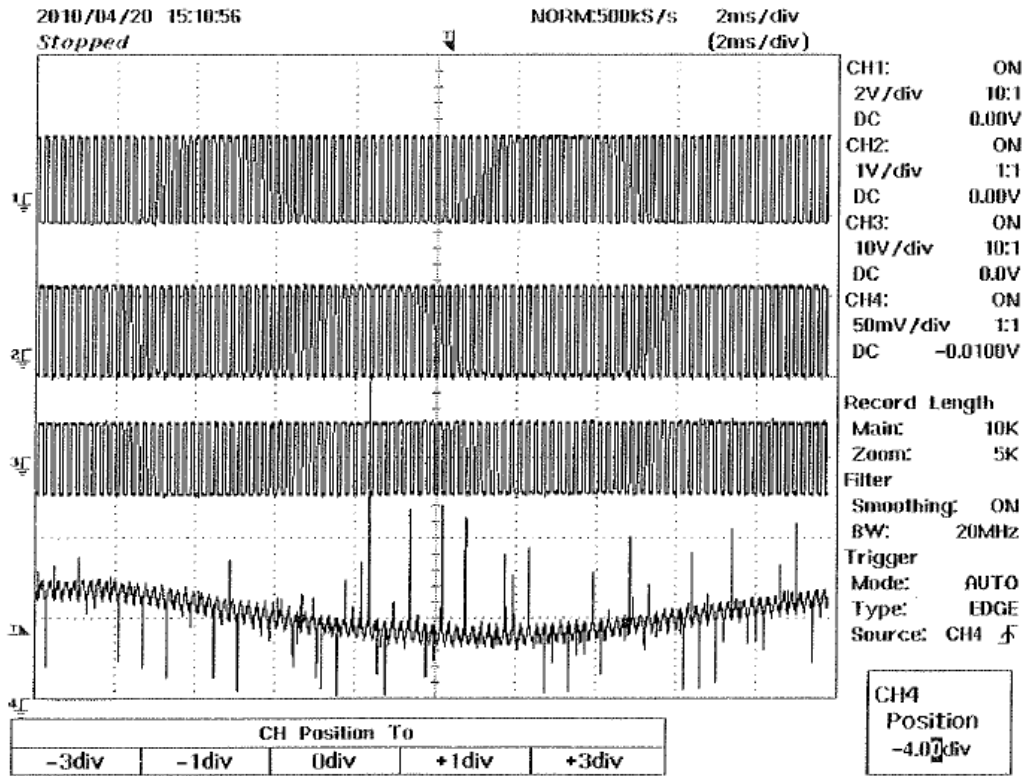
IGBT1:n ja 2 ohjauksen välinen viive



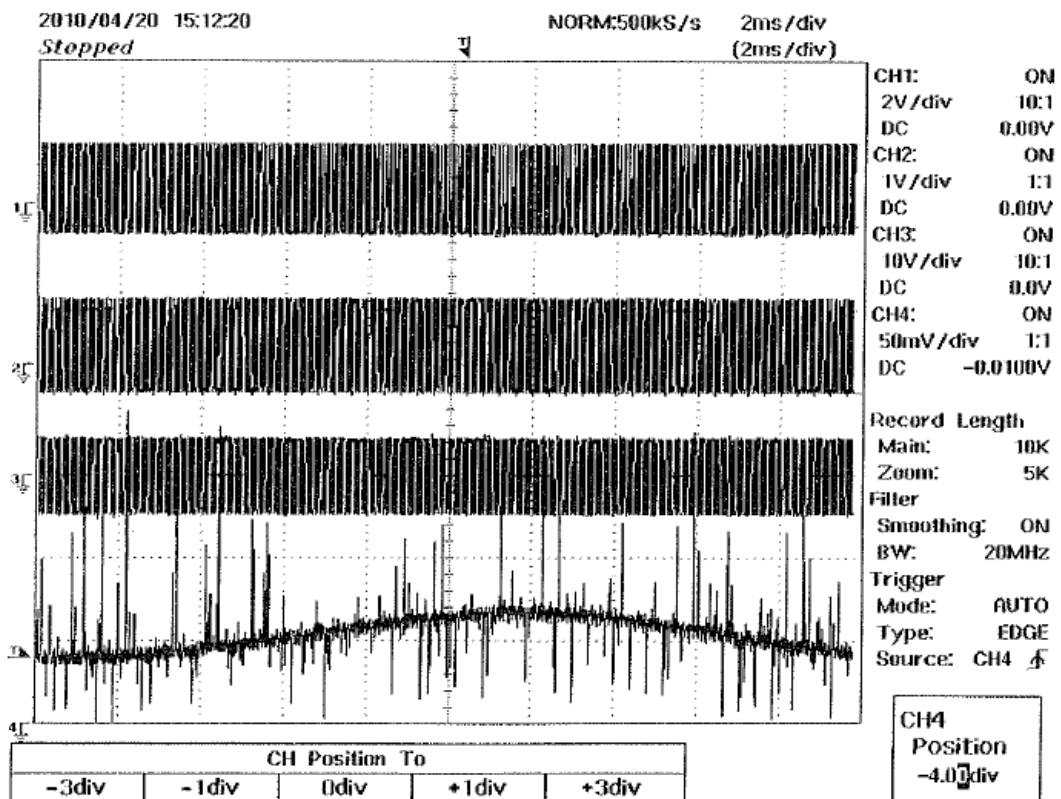
IGBT1:n ja 2 ohjauksen välinen viive



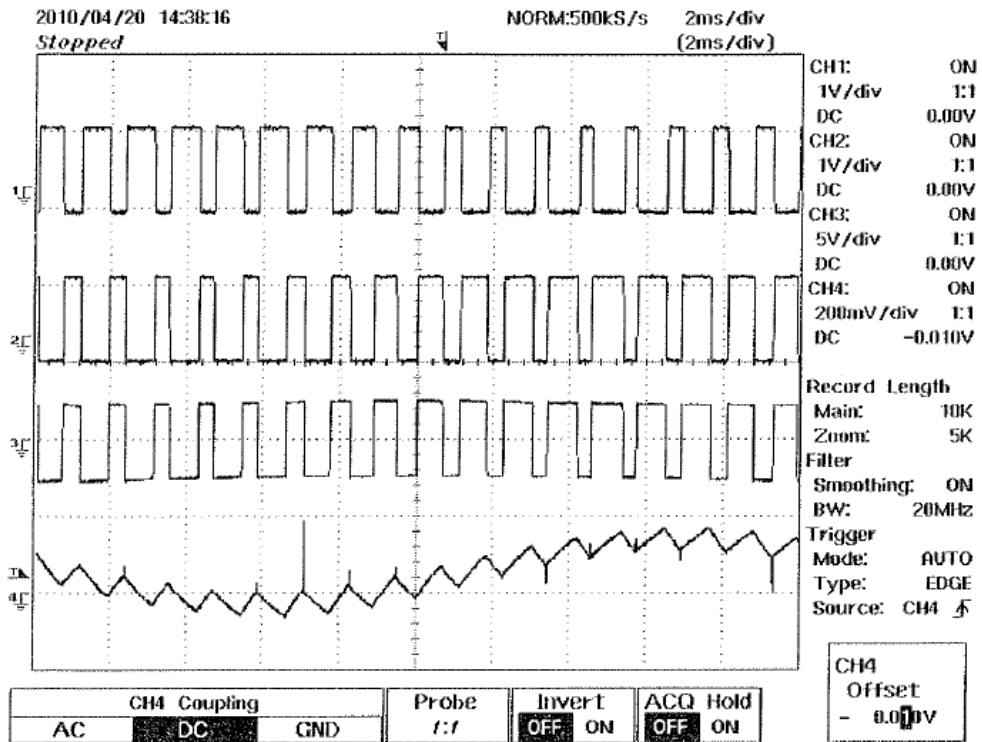
Mittaus 870 Hz taajuudella ja 10 % modulaatiosuhteella



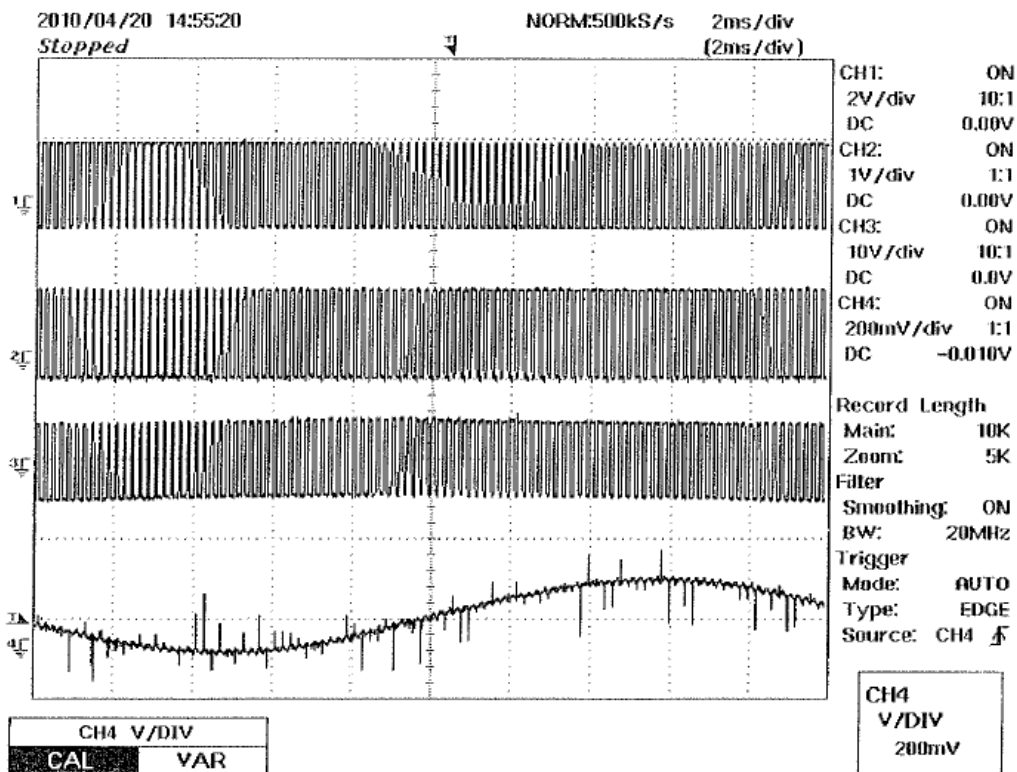
Mittaus 5kHz taajuudella ja 10 % modulaatiosuhteella



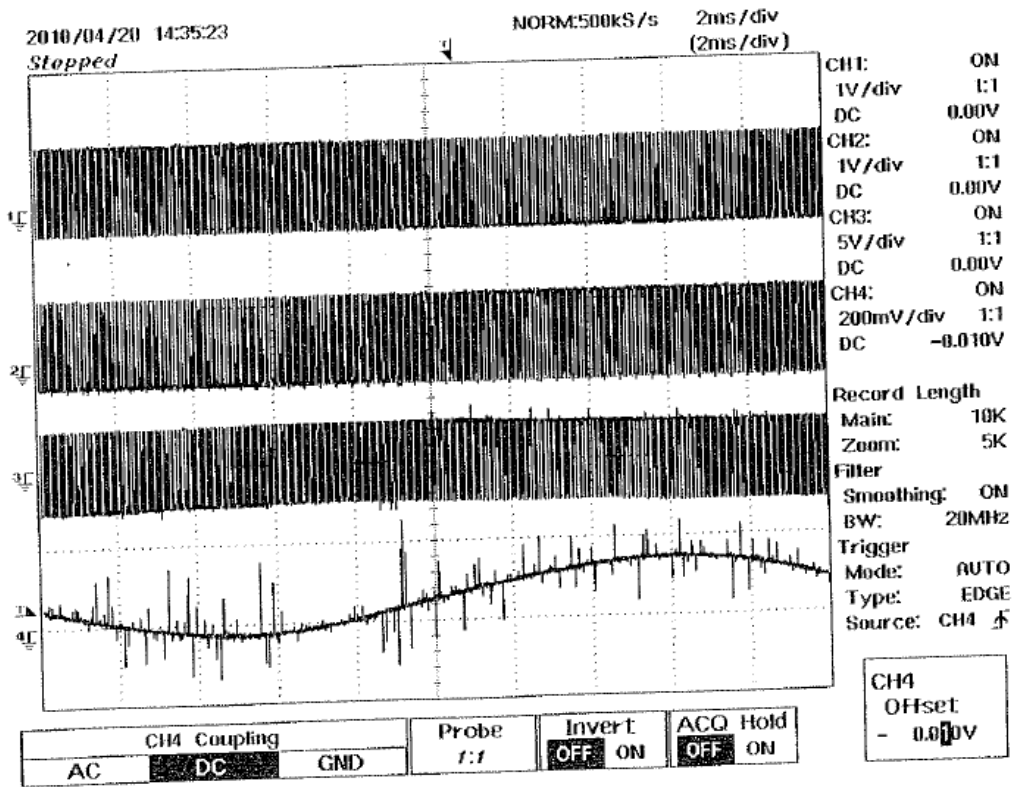
Mittaus 10 kHz taajuudella ja 10 % modulaatiosuhteella



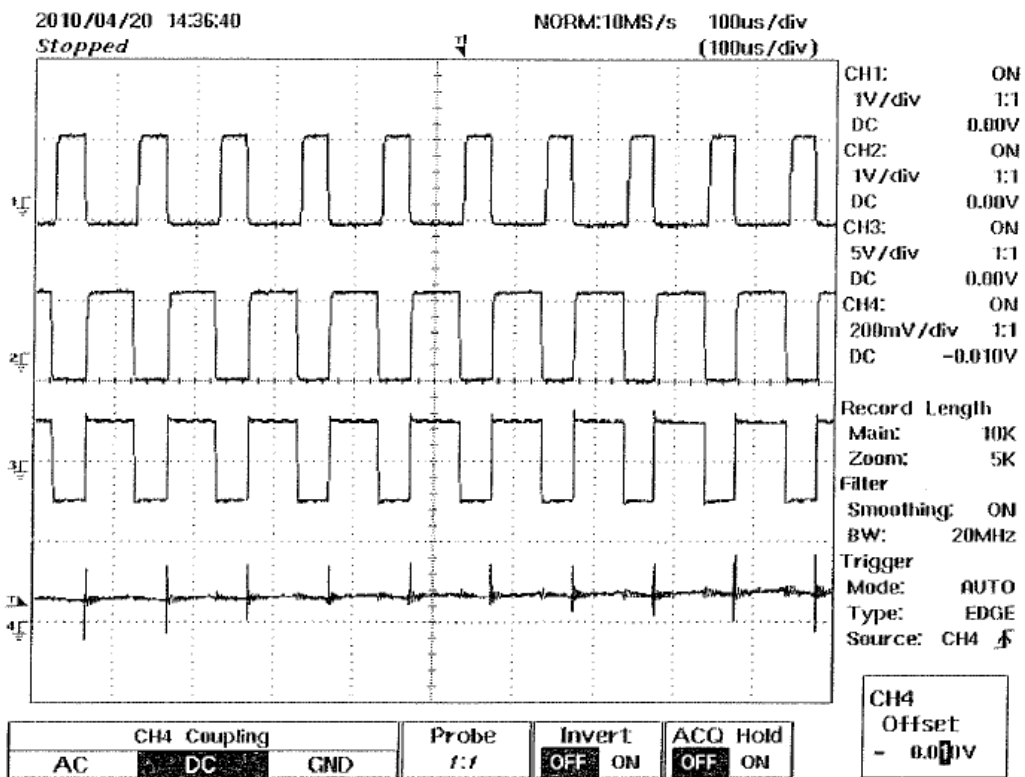
Mittaus 870 Hz taajuudella ja 50 % modulaatiosuhteella



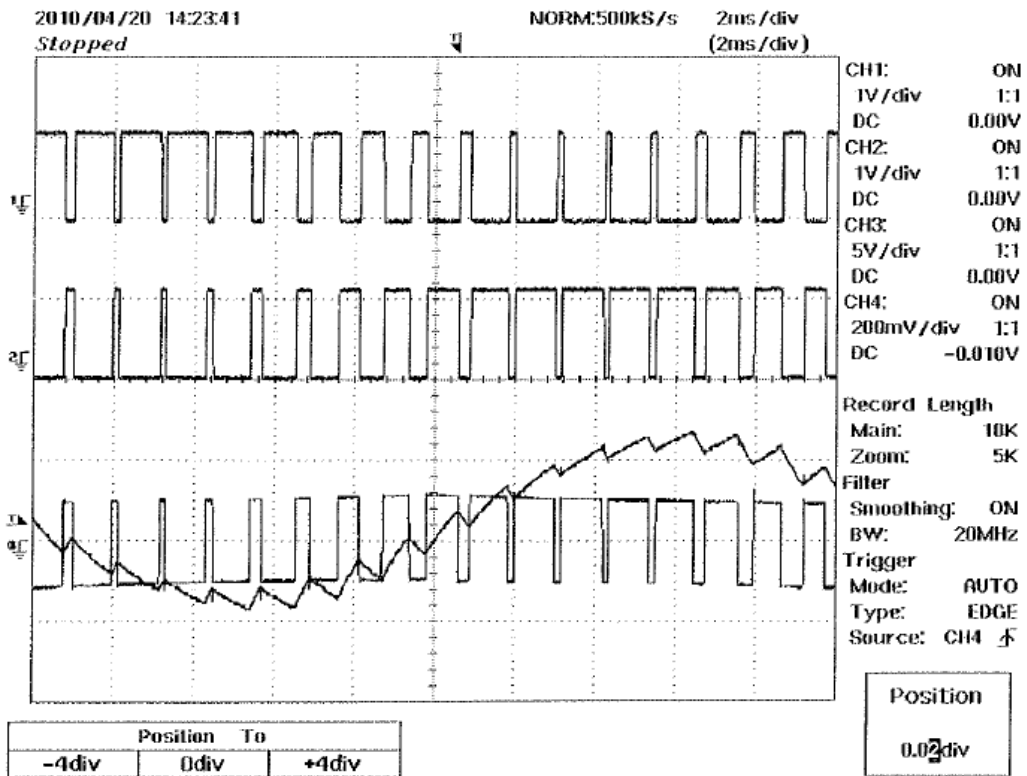
Mittaus 5 kHz taajuudella ja 50 % modulaatiosuhteella



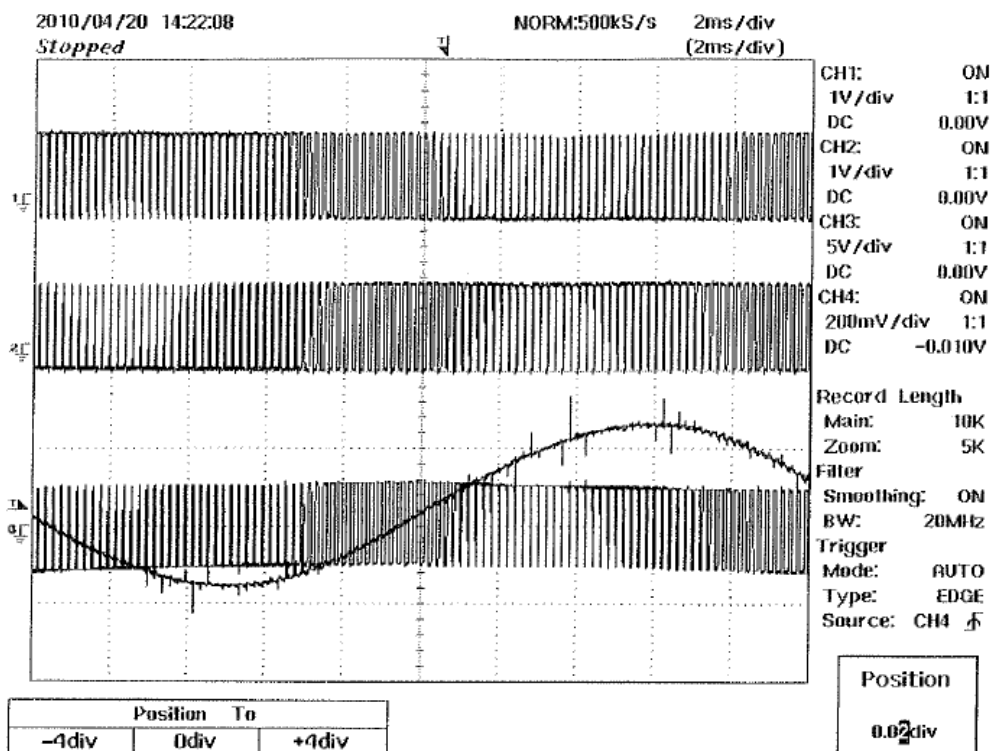
Mittaus 10 kHz taajuudella ja 50 % modulaatiosuhteella



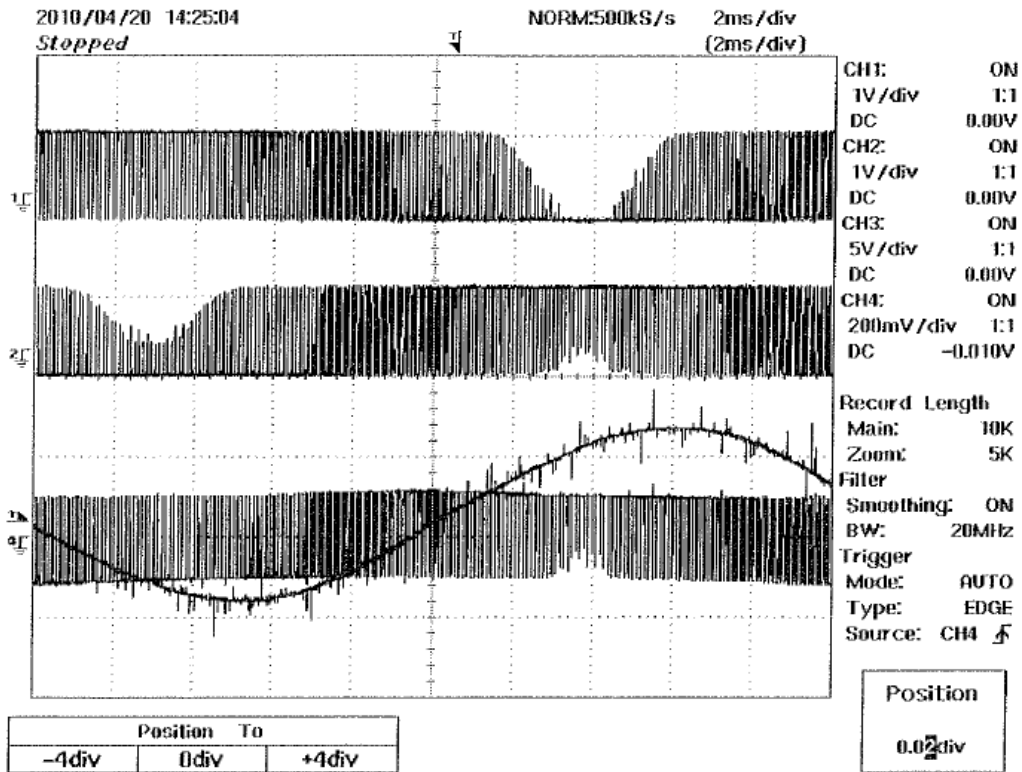
Mittaus 10kHz taajuudella ja 50 % modulaatiosuhteella pienemmällä tarkastelu aika välillä



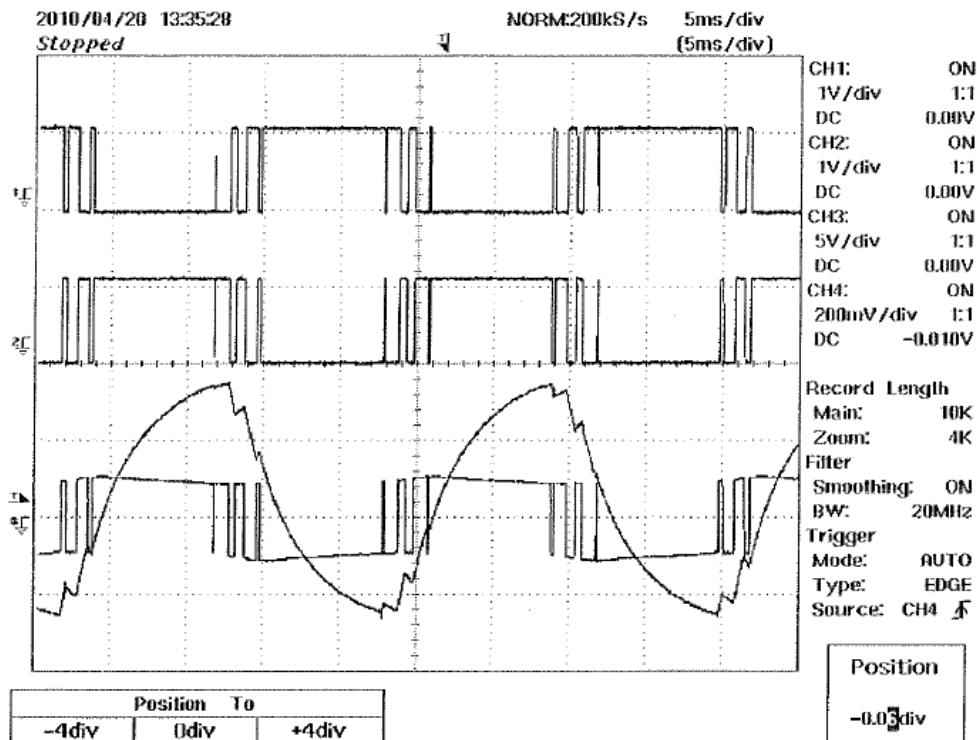
Mittaus 870 Hz taajuudella ja 100 % modulaatiosuhteella



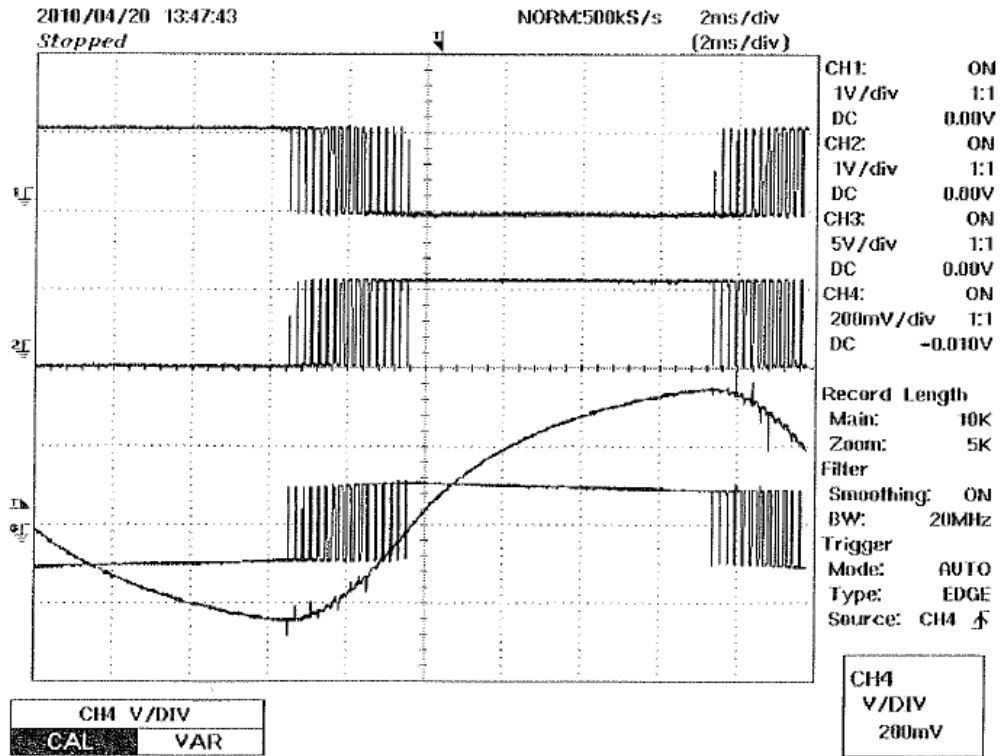
Mittaus 5kHz taajuudella ja 100 % modulaatiosuhteella



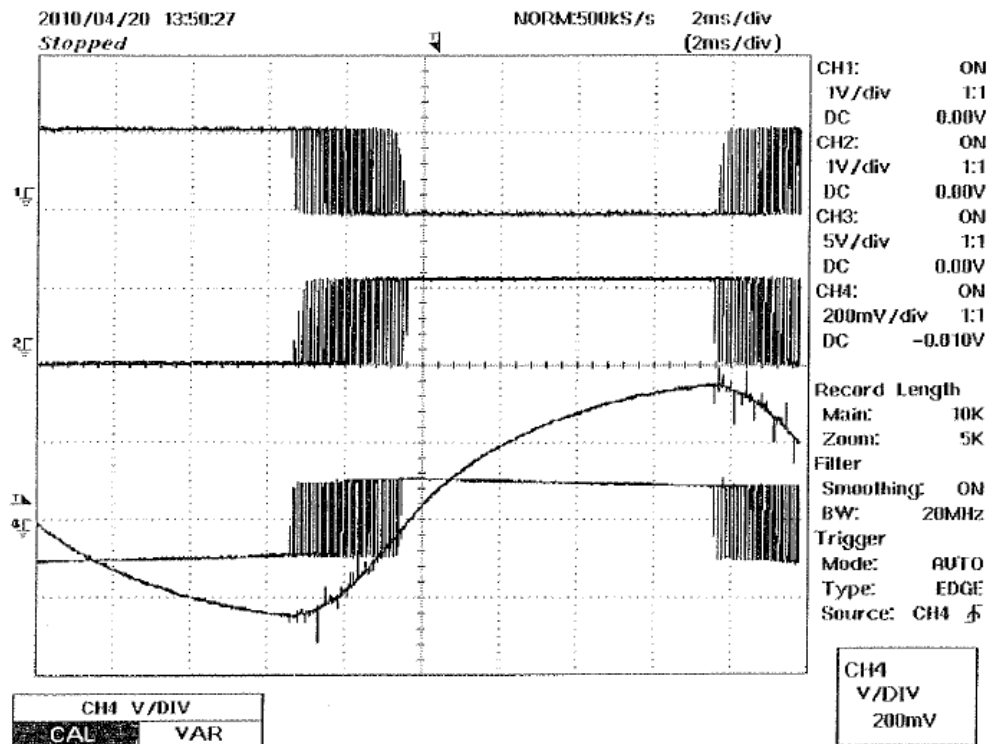
Mittaus 10 kHz taajuudella ja 100 % modulaatiosuhteella



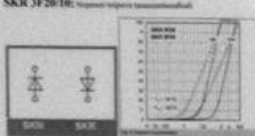

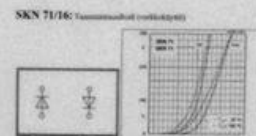
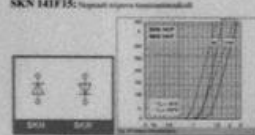
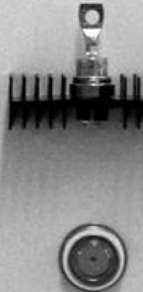
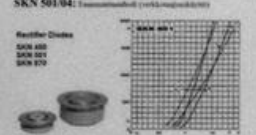
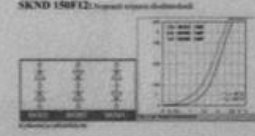
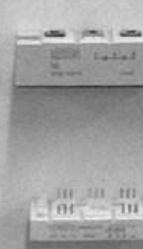
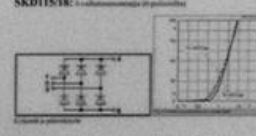
Mittaus 870 Hz taajuudella ylimodulaatiossa



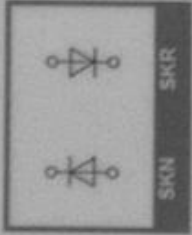
Mittaus 5 kHz taajuudella ylimodulaatiossa



Mittaus 10 kHz taajuudella ylimodulaatiossa

<p>SKR 3F2010: Tapposäädin (suora lämmitysmuunnos)</p>  <p>Yhteisiä ominaisuuksia:</p> <p>Vaaka: $V_{vaaka} = 1000V$ $I_{maks} = 41A$ (maksiminen jatkuva virta) $I_{kesk} = 20A$ (sin. 180, 50/60 Hz, $T_c = -104^{\circ}C$) $T_c = -40...130^{\circ}C$ $R_{th(jc)} = 1,2 K/W$, $R_{th(ja)} = 0,3 K/W$</p> <p>Tyypillisiä käyttöehtoja:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vastuksella - ohjauksella GTO- kytkimellä ja optiomuunnoslaite - Tehollisuusvahvistus - Invertointi ja hakkaus - Sivellin ohjauksella - jysähtämättömyys 		<p>SKN 7116: Tapposäädin (vaihdekytkin)</p>  <p>Yhteisiä ominaisuuksia:</p> <p>Vaaka: $V_{vaaka} = 1600V$ $I_{maks} = 130A$ (maksiminen jatkuva kytkin) $I_{kesk} = 70A$ (sin. 180, $T_c = 125^{\circ}C$) $T_c = -40...180^{\circ}C$ $R_{th(jc)} = 0,55 K/W$, $R_{th(ja)} = 0,2 K/W$</p> <p>Tyypillisiä käyttöehtoja:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vaihdekytkimen - toimintamoodin - toimintamoodin - Ohjauksella ja puoliajoitus - toimintamoodin
<p>SKN 141F15: Tapposäädin (suora lämmitysmuunnos)</p>  <p>Yhteisiä ominaisuuksia:</p> <p>Vaaka: $V_{vaaka} = 1100V$ $I_{maks} = 200A$ (maksiminen jatkuva kytkin) $I_{kesk} = 140A$ (sin. 180, 50/60 Hz, $T_c = 100^{\circ}C$) $T_c = -40...150^{\circ}C$ $R_{th(jc)} = 0,2 K/W$, $R_{th(ja)} = 0,09 K/W$</p> <p>Tyypillisiä käyttöehtoja:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vastuksella GTO- kytkimellä ja optiomuunnoslaite - Invertointi ja hakkaus - AC-muunnoslaite ohjauksella - UPS-laitteen 		<p>SKN 50104: Tapposäädin (vaihdekytkin)</p> <p>Käyttöehtoja: SKN 501 SKN 502 SKN 503</p>  <p>Yhteisiä ominaisuuksia:</p> <p>Vaaka: $V_{vaaka} = 400V$ $I_{maks} = 500A$ (125$^{\circ}C$) $T_c = -40...180^{\circ}C$ $R_{th(jc)} = 0,025 K/W$ $R_{th(ja)} = 0,02 K/W$ (C-käyttöehtojen / jysähtämättömyys)</p> <p>Tyypillisiä käyttöehtoja:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sivellin ohjauksella - Sivellin ohjauksella ja puoliajoitus - toimintamoodin
<p>SKND 150F12: Tapposäädin (suora lämmitysmuunnos)</p>  <p>Yhteisiä ominaisuuksia:</p> <p>Vaaka: $V_{vaaka} = 1200V$ $I_{maks} = 220A$ (maksiminen jatkuva kytkin) $I_{kesk} = 130A$ (sin. 180, 50/60 Hz, $T_c = 100^{\circ}C$) $T_c = -40...180^{\circ}C$ $R_{th(jc)} = 0,2 K/W$, $R_{th(ja)} = 0,09 K/W$ (per moduli)</p> <p>Tyypillisiä käyttöehtoja:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Invertointi - AC-muunnoslaite ohjauksella - Invertointi - UPS-laitteen - DC-laitteen - Ohjauksella 		<p>SKD1151E: AC-ohjauksella ohjattava diodisäädin</p>  <p>Yhteisiä ominaisuuksia:</p> <p>Vaaka: $V_{vaaka} = 1000V$ $I_c = 150A$ ($T_c = 85^{\circ}C$) $T_c = -40...150^{\circ}C$ $R_{th(jc)} = 1K/W$ (per diodi)</p> <p>Tyypillisiä käyttöehtoja:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tapposäädin - Sivellin ohjauksella - Tapposäädin - Ohjauksella - DC-muunnoslaite - Invertointi

SKR 3F20/10: Nopeasti toimiva tasasuuntausdiodi



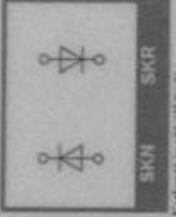
Kytäntä ja palautuskäyttö

$V_{\text{RMS}} = 1000\text{V}$
 $I_{\text{RMS}} = 41\text{A}$ (maksimi jatkuvalla käytölle)
 $I_{\text{AV}} = 20\text{A}$
 (sin. 180; 5000 Hz; $T_c = 104^\circ\text{C}$)
 $T_{vj} = -40 \dots 150^\circ\text{C}$
 $R_{\text{spj}} = 1,2\text{ K/W}$, $R_{\text{thj}} = 0,5\text{ K/W}$

Tyypillisiä käyttökohteita:

- Vastadiodina
- Tehoastajoihin ja tyristoreihin ja epäsymmetrisille tyristoreihin
- Tehoilhdesovellukset, invertterit ja hakkurit
- Soveltuu vaativiin ympäristöolosuhteisiin

SKR 7I/16: Tasasuuntausdiodi (vetokäyttö)



Kytäntä ja palautuskäyttö

$V_{\text{RMS}} = 1600\text{V}$
 $I_{\text{RMS}} = 150\text{A}$ (maksimi jatkuvalla käytölle)
 $I_{\text{AV}} = 70\text{A}$
 (sin. 180; $T_c = 125^\circ\text{C}$)
 $T_{vj} = -40 \dots 180^\circ\text{C}$
 $R_{\text{spj}} = 0,55\text{ K/W}$, $R_{\text{thj}} = 0,2\text{ K/W}$

Tyypillisiä käyttökohteita:

- Yleiskäyttöinen tasasuuntausdiodi
- Ohjaamattomiin ja puoliksi ohjattuihin tasasuuntaussovelluksiin

