

Mikko Edel

Lämmönsiirtomateriaalien sopivuus taajuusmuuttajasovelluksissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikka

Insinöörityö

30.04.2014

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Mikko Edel Lämmönsiirtomateriaalien sopivuus taajuusmuuttajasovelluksissa 36 sivua 30.4.2013
Tutkinto	Ammattikorkeakoulututkinto
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja(t)	Diplomi-insinööri, Ilmari Varjonen Lehtori, Kai Virta
<p>Tässä insinööriyössä on pyritty tekemään sekä yhteenveto ABB Drives Oy:llä meneillään olevista testeistä että tunnistamaan lämmönsiirtomateriaaleihin vaikuttavia muuttujia. Tutkimus on laadittu Product Engineering -osastolle, ABB Drives Oy:n Low Power AC -tulosityksikölle.</p> <p>Aluksi tutkimus perehtyy taajuusmuuttajan sekä IGBT-moduulin toimintaperiaatteeseen. Seuraavaksi syvennyttään IGBT-moduulin rakenteeseen sekä kuvaillaan lämmön eri siirtymistapoja. Tämän jälkeen työssä keskitytään kertomaan lyhyesti eri muuttujista, jotka tulisi huomioida lämmönsiirtomateriaalia valittaessa. Lopuksi esitellään erilaisia testaustapoja ja tuloksia, sekä niihin vaikuttaneita tekijöitä.</p> <p>Lopputyön havainnot osoittivat alan tutkimuksen olevan riittämätöntä lämmönsiirtomateriaalien fysikaalisten toimintojen ymmärtämiseksi. Lämmönsiirtomateriaalien sekä ympäristön muuttujien vaikutusten tuntemus on tärkeää IGBT-moduulien lämmönhallinnassa, kun lämmönsiirtomateriaaleja halutaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti taajuusmuuttajasovelluksissa.</p> <p>Insinööriyön lopputuloksena syntyi tutkielma, joka auttaa ymmärtämään lämmönsiirtomateriaalien ominaisuuksia sekä niihin vaikuttavia muuttujia.</p>	
Avainsanat	taajuusmuuttaja, IGBT-moduuli, muuttujat, lämpötila, lämmönsiirtomateriaali,

Author(s) Title Number of Pages Date	Mikko Edel The properties of thermal conductivity materials in frequency converter applications 36 pages 30 April 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Engineering
Specialisation option	
Instructor(s)	Ilmari Varjonen, MSc Kai Virta, Senior Lecturer
<p>This paper aims both at outlining all of the on-going testing done at ABB Drives incorporated as well as identifying the variables affecting thermal conductivity (TC) materials. The research was done for the Product Engineering department of ABB Low Power AC Drives profit center.</p> <p>First, the study takes a more in-depth look at two major issues, comprising the principles of the frequency converter, IGBT module functions and structure, as well as describing the different ways of thermal transfer; in addition, the paper gives a brief account on different variables that require consideration regarding the choices in TC materials. To conclude, this thesis presents various testing methods and results, as well as factors affecting them.</p> <p>The observations support the notion that the research in the field is insufficient for proper understanding of the physical reactions of TC materials. If the aim is to maximize the efficiency of TC materials in frequency converter applications, knowledge on both TC material and the environment variable impact is key in IGBT module thermal management.</p> <p>What this thesis provides is a framework to further the data on TC material properties, including the variables affecting these materials.</p>	
Keywords	Drive, frequency converter, IGBT module, variables, temperature, thermal conductivity materials

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Taajuusmuuttaja	2
2.1	IGBT	3
2.1.1	IGBT-alkion toiminta	3
2.1.2	IGBT-alkion rakenne	5
3	Lämmön eri siirtymismuodot	6
3.1	Lämmön johtuminen	6
3.2	Lämmön konvektio	8
3.3	Lämmön säteily	8
3.4	Lämmön siirtyminen IGBT-moduulissa	9
4	Lämmönsiirtomateriaalin valintaan vaikuttavat muuttujat	10
4.1	IGBT:n muuttujat	10
4.1.1	Pohjalevyn paksuus ja materiaali	11
4.1.2	Pohjalevyn kuperuus	12
4.1.3	IGBT:n kiinnityskohdat ja kiinnitysmomentti	13
4.1.4	Puolijohteiden sijoittelu IGBT:llä	15
4.2	Lämmönsiirtomateriaalin muuttujat	16
4.2.1	Lämmönsiirtomateriaalin kyky johtaa lämpöä	17
4.2.2	Lämmönsiirtomateriaalin paksuus ja asennus	19
4.2.3	Lämmönsiirtomateriaalien ominaisuuksien muutoksia	21
4.3	Jäähdytyselementin muuttujat	23
5	Tutkimustavat, tulokset ja päätelmät	24
5.1	Lämmönsiirtomateriaalien valinta	25
5.2	Prime Pack	26
5.3	Lämmönsiirtomateriaalien kestopäätös	31
6	Johtopäätökset	33
7	Yhteenveto	36

Symbolit, käsitteet ja lyhenteet

Symbolit ja käsitteet

k Lämmönjohtokyky, lämmönjohtokerroin

θ Lämpöimpedanssi

A Pinta-ala

T Lämpötila

H Lämpövirta

Lyhenteet

ABB Asea Brown Boveri

IGBT Eristehilabipolaaritransistori (Insulated Gate Bipolar Transistor)

TIM Lämmönsiirtomateriaali (Thermal Interface Material)

DC Tasavirta

AC Vaihtovirta

MOS Metal Oxide Semiconductor

BLT Lämmönsiirtoaineen paksuus (Blond-Line Thickness)

NTC Negatiivinen lämpötilakerroin (Negative Temperature Coefficient)

rpm Kierrosta minuutissa (*Revolutions Per Minute*)

T_J *Laitteen laskennallinen maksimi lämpötila (Temp Junction)*

1 Johdanto

Taajuusmuuttajien luotettavuuden vaatimukset ovat kasvaneet merkittävästi markkinoiden kasvaessa ja asiakkaiden tullessa määrätietoisemmiksi. Sovellukset, joissa taajuusmuuttajan tehokomponentit altistuvat suurille ja nopeille lämpötilan muutoksille, antavat haasteensa taajuusmuuttajan luotettavuuden hallintaan. Hyvällä ja varmatoimisella lämmönhallinnalla voidaan minimoida rasitteet, joita suuret lämpötilan vaihtelut tuottavat tehokomponenteille ja näin pidentää taajuusmuuttajien elinkaarta.

Tämä opinnäytetyö käsittelee lämmönsiirtomateriaalien sopivuutta eri taajuusmuuttajasovelluksissa. Kuten useiden tehoelektroniikka komponenttien myös taajuusmuuttajan tehokomponenttien lämmönhallinnassa on hyödynnetty lämmönsiirtomateriaaleja lämmönsiirron parantamiseksi. Taajuusmuuttajan lämmönsiirtomateriaaleja valittaessa on tärkeää huomioida erilaiset muuttujat jotta, pystytään valitsemaan toimivin materiaali kullekin tapaukselle.

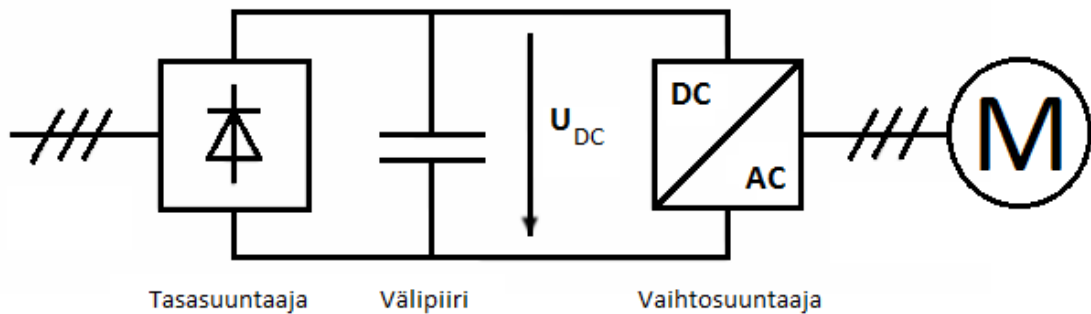
Työn tavoitteena on löytää ja kartoittaa muuttujat, jotka olisi tärkeää huomioida taajuusmuuttajan lämmönsiirtomateriaaleja valittaessa. Työssä keskitytään paljolti IGBT-moduulin lämmönsiirtoon ja sen ympäristön muuttujiin, koska taajuusmuuttajan lämmönhallinnan kannalta kriittisin osa yleensä on IGBT. Työ ei pyri ratkaisemaan ongelmia, vaan auttamaan niiden huomioon ottamisessa ja ymmärtämisessä sekä mahdollisesti antamaan suosituksia lämmönsiirtomateriaalien valinnassa.

Opinnäytetyön toisessa luvussa perehdytään taajuusmuuttajan toimintaan, sekä IGBT-moduulin toimintaan ja rakenteeseen. Kolmannessa luvussa kerrotaan lyhyesti lämmön eri siirtymismuodoista. Neljäs luku keskittyy muuttujiin ja ominaisuuksiin, jotka vaikuttavat lämmönsiirtomateriaalin valintaan. Viides luku käsittelee lämmönsiirtomateriaalien ominaisuuksia ja siinä pyritään tekemään vertailua materiaalien välillä. Kuudennessa luvussa vertaillaan tutkimustuloksia ja pyritään tekemään johtopäätöksiä tuloksista. Lopuksi pyritään tekemään yhteenvetona tuloksista, muuttujista sekä antamaan mahdollisia kehitysideoita jatkotutkimuksille.

2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on keskeinen laite nykypäivän teollisuudessa. Niiden avulla on mahdollista ohjata sähkömoottoreiden nopeutta portaattomasti sekä vähentää energian kulutusta ja täten saada taloudellista hyötyä.

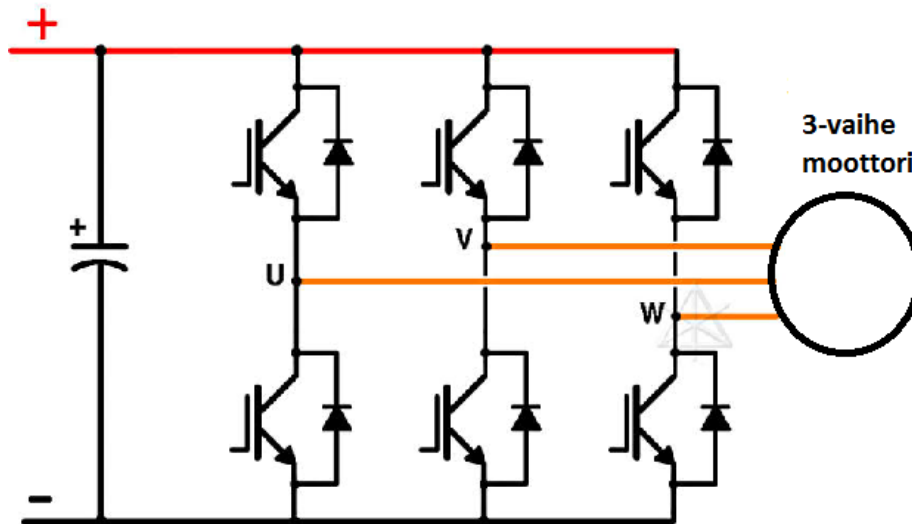
Taajuusmuuttaja on tehoelektroniikkalaite, jolla sähköverkosta saatava vakiotaajuinen jännite voidaan muuttaa portaattomasti halutun taajuiseksi ja suuruiseksi jännitteeksi ja syöttää moottorille. Nykyisin yleisimmin käytetään kolmivaiheista jännitevälipiirillistä taajuusmuuttajaa. Tässä taajuusmuuttaja tyypissä verkon vaihtojännite ensin tasasuunnataan ja tasataan välipiirille kondensaattoreihin. Tämän jälkeen kondensaattoreista saatava tasajännite muutetaan vaihtojännitteeksi vaihtosuuntaajan avulla. Kuvassa 1 taajuusmuuttajan lohkokaavio



Kuva 1. Taajuusmuuttajan lohkokaavio.

Taajuusmuuttajalla voidaan säätää moottorin vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta portaattomasti ja erittäin tarkasti. Siksi taajuusmuuttajalla pystytään saamaan huomattavia hyötyjä prosessin suorituskykyyn.

Tällä hetkellä yleisimmin taajuusmuuttajissa vaihtosuuntaus toteutetaan kolmivaiheisesti siltakytkennällä. Transistorien ohjaus tapahtuu niin, että jokaiselle moottorin vaiheelle syötetään jännite, joka on taajuudeltaan ja amplitudiltaan halutun suuruinen. Transistorien rinnalle kytketyillä diodeilla mahdollistetaan vastakkaissuunnatun virran kulku. Kuvassa 2 on nähtävissä kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja.



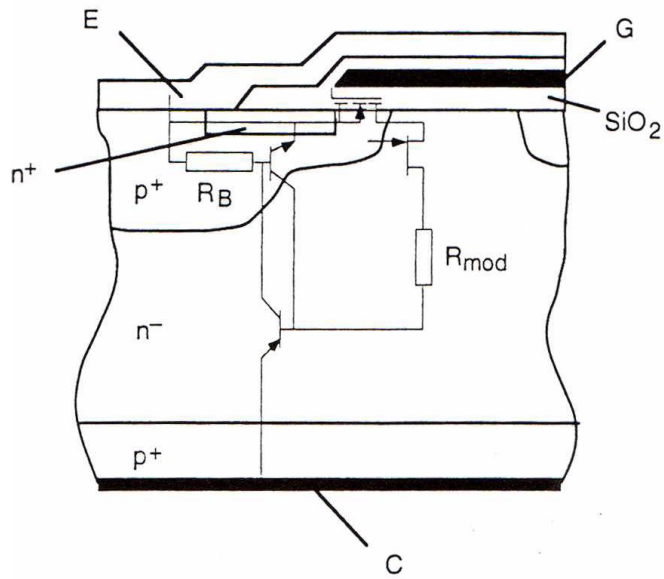
Kuva 2. Kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja.

2.1 IGBT

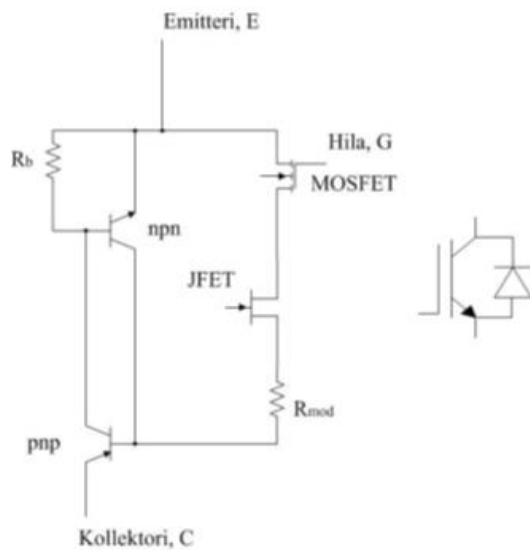
IGBT eli Insulated Gate Bipolar Transistor on taajuusmuuttajan vaihtosuuntauksessa yleisimmin käytettävä komponentti. IGBT:n suosio perustuu sen helppoon ohjattavuuteen, siedettävään jännitehäviöön sekä toimintakykyyn korkeilla kytkentätaajuuksilla. Vaihtosuuntaus voidaan toteuttaa joko yhdellä tai useammalla IGBT-moduulilla. Yhdellä moduulilla voidaan huolehtia joko yhden vaiheen vaihtosuuntauksesta tai voidaan hallita vaihtojännitteen tuottamista kullekin lähtövaiheelle. [1,3]

2.1.1 IGBT-alkion toiminta

Kuvassa kolme on esitetty IGBT-alkion poikkileikkaus. IGBT-alkio koostuu pnp-transistorista, jonka kantaa ohjataan hilan (G) MOS-transistorilla. Kun IGBT:n hilan (G) ja emitterin (E) välinen jännite ylittää kynnyksjännitteen, emitterimetallonnin alla oleva estosuuntainen pn-rajapinta katoaa p-alueen muuttuessa n-alueeksi. Tällöin IGBT:n MOS-transistori siirtyy johtavaan tilaan ja alkaa syöttämään ohjausvirtaa pnp-transistorin kannalle. Siten myös pnp-transistori siirtyy johtavaan tilaan, minkä seurauksena virta pääsee kulkemaan kollektorilta (C) emitterille (E). [1,3]



Kuva 3. IGBT-moduulin poikkileikkaus.[1]

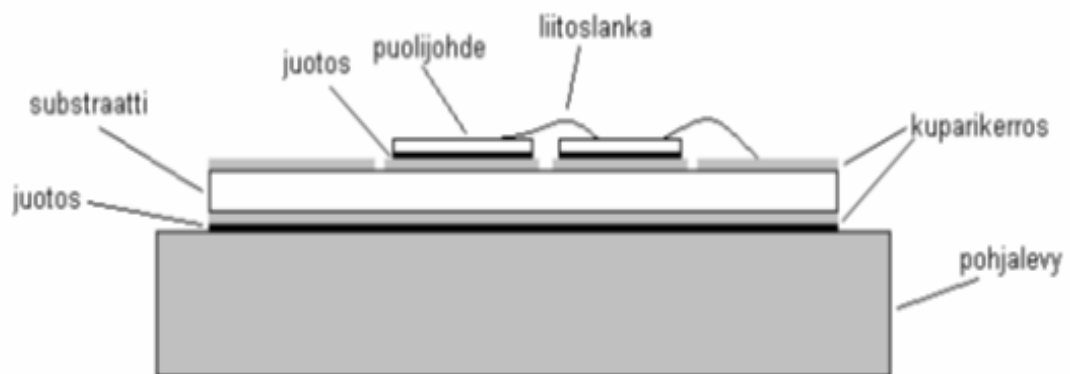


Kuva 4. IGBT-moduulin sijaiskytkentä ja piirrosmerkki.

Käytännössä jokainen IGBT-tehpuolijohdepala koostuu useasta sarjaan ja rinnan kytketystä kuvan kolme mukaisesta IGBT-alkiosta. Myös alkioiden määrän kasvaessa, yksittäisen alkion koko pienenee, jolloin myös komponentin päästöjännite pienenee. Alkioiden lisääminen suurentaa myös tehpuolijohteen virrankestävyyttä. [3,4]

2.1.2 IGBT-alkion rakenne

Taajuusmuuttajien IGBT-moduuleissa käytetään yleisesti kuvan viisi kaltaisia kerrosrakenteisia kokonaisuuksia. Moduulissa puolijohdepalat on juotettu keraamiselle substraatille, joka on päällystetty kuparikerroksella ylä- että alapinnalta. Substraatin yläpinnalle kuparikerrokseen on muotoiltu puolijohteen virtapiirin edellyttämä kuviointi. Alapinta on juotettu kuparipinnasta kiinni moduulin pohjalevyyn, joka pääsääntöisesti on kuparia. Pohjalevyn tarkoitus on edesauttaa moduulin jäähtymistä, johtamalla lämpöä pois jäähdytyslementtiin. Lisäksi pohjalevyn tarkoitus on suojata substraattia mekaanisilta vaurioilta. Sähköiset liitokset puolijohdeiden sekä puolijohteen ja kuparikerroksen välillä on toteutettu 0,3-0,5 mm paksuilla alumiinisilla liitoslangoilla. [3]



Kuva 5. IGBT-moduulin kerrosrakenne.

Edellä kuvatun moduulirakenteen lisäksi käytetään myös rakennetta, jossa ei ole varsinaista pohjalevyä, vaan substraatin alapinta muodostaa moduulin pohjan. Pohjalevytön ratkaisu voi tulla kyseeseen pienitehoisissa moduuleissa, joiden jäähdytystarve on pieni. Matalan tehon vuoksi häviöt ovat pienempiä ja komponentit kuumenevat vähemmän, tällöin ei ole välttämätöntä käyttää erillistä pohjalevyä. Pohjalevyn puuttuminen altistaa substraatin rasitukselle jolloin mekaaninen tuki saadaan aikaiseksi puristamalla IGBT:n kotelorakenne tiukasti kiinni substraattiin. [2,5]

On kehitetty myös pohjalevyttömiä ja liitoslangattomia IGBT-moduuleita. Tällaisissa IGBT-moduuleissa liitoslankojen aikaansaamat sähköiset ja termiset kytkennät on korvattu puristamalla tehopuolijohdeet mekaanisesti rakenteisiin kiinni. Näin ollen IGBT-moduulin luotettavuutta voidaan parantaa verrattuna perinteisiin ratkaisuihin,

esimerkiksi liitoslankojen poistamisella mahdolliset vikaantumismekanismit vähenevät. Liitoslangattomassa rakenteessa on myös mahdollista jäähdyttää moduulia molemmilta puolilta, mikä ehkäisee ylikuumenemista tehopuolijohteissa. Täten on myös mahdollista lisätä moduulien tehoa. [6,7]

3 Lämmön eri siirtymismuodot

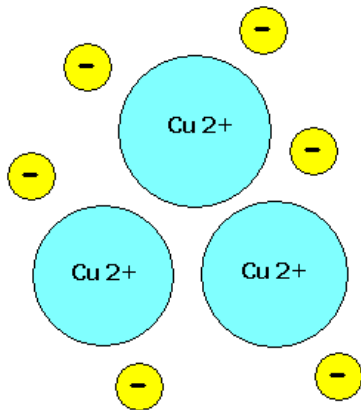
Taajuusmuuttajan IGBT-moduulien lämpeneminen on ensisijaisesti seurausta tehopuolijohteiden tehohäviöistä. Taajuusmuuttajan elinkaaren kannalta onkin erittäin tärkeää saada lämpö siirrettyä pois tai moduuli voi rikkoontua lämpövirrasta. Jotta IGBT:n lämpötilan sekä lämpötilan vaihtelun aiheuttamat ongelmat voitaisiin ratkaista tai minimoida on tiedettävä kuinka lämpö siirtyy IGBT-moduulissa. [8]

Lämmön siirtyminen tarkoittaa lämpöenergian siirtymistä korkeammasta potentiaalista matalampaan eli kuumasta kylmään. Thermodynamiikan mukaan lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektioitumalla. [7]

3.1 Lämmön johtuminen

Lämmön johtumisessa lämpö siirtyy aineessa. Johtumisessa kuumat atomit törmäilevät alhaisemman lämpötilan omaavien atomien kanssa ja luovuttavat näille osan kineettisestä energiastaan eli lämmöstään. Useat metallit käyttävät lämmönjohtamiseen hieman erilaista tapaa, jossa metalliatomin elektronit irrottautuvat ja liikkuvat kidehilalla ja siirtävät energiaa kuumilta alueilta kylmille. Siksi monet metallit ovat hyviä lämpöjohteita. IGBT-moduulin lämmönsiirto tapahtuu lämmönjohtumisella jäähdytysselementtiin. [4]

Kuvassa 6 kuvataan metallien hyvää kykyä johtaa lämpöä. Ilmiö perustuu vapaisiin elektroneihin, jotka pääsevät liikkumaan nopeasti ja näin siirtävät lämpöenergiaa tehokkaasti kuumasta kylmään. [4]



Kuva 6. Vapaat elektronit kupariatomilla. [10]

Eristeissä vapaita elektroneja ei ole ja siksi lämpöenergian johtuminen tapahtuu atomien värähtelyllä tasapainoasemansa ympärillä ja värähtelyn välittyessä atomilta toiselle. Värähdysliikkeen energia eli värähtelytaajuus on verrannollinen lämpötilaan. [10]

Kuvassa 7 on kuvattu lämpövirtaus eli H , joka on suoraan verrannollinen johtavan kerroksen lämmönjohtavuuskertoimeen k sekä pinta-alaan A ja kerroksen ympärillä vallitsevaan lämpötilaeroon ($\Delta T = T_H - T_C$). Kokeellisesti on pystytty osoittamaan lämpövirran olevan suoraan verrannollinen lämpötilaeroon ja poikkipinta-alaan $T_H - T_C$ ja kääntäen verrannollinen sauvan pituuteen L . Kun vielä tiedetään että lämpövirtaan vaikuttaa myös suoraan verrannollisesti vakio k aineen lämmönjohtavuus, saadaan lämmönjohtumisen mukainen lämpövirta mallinnettua yhtälöstä (1). [4,7]

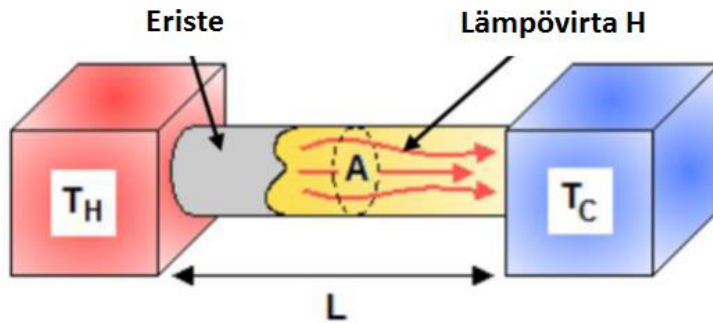
$$H = \frac{dQ}{dt} = k * A * \frac{T_h - T_c}{L}$$

Yhtälö voidaan esittää myös muodossa

$$H = \frac{dQ}{dt} = A * \frac{T_h - T_c}{\Theta}$$

Tässä Θ on lämpöimpedanssi. Lämpöimpedanssilla tarkoitetaan materiaalin kykyä vastustaa lämmön johtumista suhteessa pinta-alaan A . Materiaalit joiden

lämmönjohtavuuskerroin k on suuri, ovat hyviä lämmönjohteita. Vastaavasti pienen kertoimen omaavat materiaalit ovat huonoja johteita tai eristeitä. [4]



Kuva 7. Lämpövirta eristetyssä yhdenmukaisessa sauvassa. Kuva mukautettu lähteestä. [8]

3.2 Lämmön konvektio

Lämmön konvektiossa lämpö siirtyy fluidin massaliikkeellä. Fluidina voi toimia joko neste tai kaasu. Yleisimmin fluidina käytetään ympäröivän tilan ilmaa. Tätä tapahtumaa voidaan parantaa joko pumpuilla tai puhaltimilla, silloin kyseessä on pakotettu konvektio. Taajuusmuuttajissa käytetään pakotettua konvektiota. Pienemmän teholuokan laitteissa konvektiota parannetaan puhaltimilla, jotka siirtävät ilmaa jäähdytyslementtien läpi. Kuvassa seitsemän on havainnollistettu konvektion toiminta. Kuvassa oikealta jäähdytyslementin rimojen läpi työntyy viileää ilmaa, joka lämpenee kulkiessaan jäähdytysrimojen läpi. Ilman tullessa jäähdytyslementin läpi on ilma lämmennyt eli siihen on siirtynyt lämpöenergiaa konvektion avulla. Suuremmissa teholuokissa voi tulla kyseeseen myös nestejäähdytys, joka on paljon tehokkaampi tapa siirtää lämpöä. [4]

3.3 Lämmön säteily

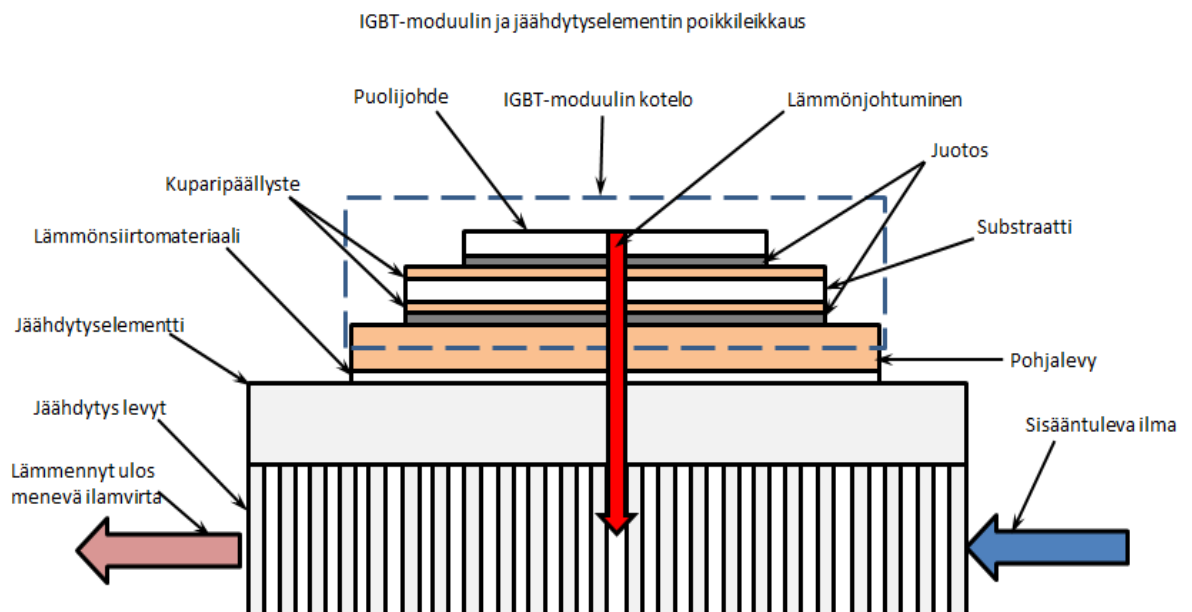
Säteily on lämmön siirtymistä elektromagneettisina aaltolina. Hyvä esimerkki tästä on näkyvä valo. Lämmön säteilyyn vaikuttaa kolme parametria kappaleen ja ympäristön lämpötilaero, pinnan rakenne ja kappaleen näkyvyys ympäristölle. [4,10]

Säteilyn osuus taajuusmuuttajan lämmönsiirrossa on vähäistä jos asiaa tarkastellaan tehoelektroniikka komponenttien tasolla. Säteilyn osuus jäähdytyksestä on suuri, jos asiaa tarkastellaan piirikortti- ja laitekotelotasolla. Tähän on syynä piirikortin pieni johtumispinta-ala, tämän takia lämpö ei pääse johtumaan tehokkaasti. Yksi syy tälle ovat korotuspilarit, joilla kortit on eristetty laitteen rungosta. [10]

3.4 Lämmön siirtyminen IGBT-moduulissa

Lämmön siirtyminen on aina kaikkien kolmen edellä mainitun lämmönsiirtymistavan summa. IGBT-moduulissa pääasiallinen osuus lämmönsiirrosta tapahtuu johtumalla. IGBT-moduulin koteloidusta rakenteesta johtuen puolijohteesta konvektoitumalla siirtyvän lämmön osuus on lähes merkityksetön. Näissä olosuhteissa myös säteilyn vaikutusta voidaan pitää vähäisenä. Siksi IGBT-moduulin lämmönsiirto on toteutettu johtamalla lämpö jäähdytyslementtiin.

Jäähdytyslementin läpi puhalletaan tai imetään ilmaa laitteen ympäristöstä, jolloin lämpötila pysyy pakotetun konvektion avulla selvästi alhaisempana kuin moduulin lämpötila. Jäähdytyslementit ovat yleensä alumiinista valmistettuja ja sivusta katsottuna kampamaisia, kuten kuvassa kahdeksan.



Kuva 8. Lämmönjohtuminen IGBT:ltä jäähdytyslementtiin.

Kuvassa 8 on nähtävissä IGBT-moduulin pääasiallinen lämmönsiirtymiskanava. Lämpöä tuottavat osat eli tehopuolijohteet johtavat lämpöä juotoksen läpi substraatin ylempään kuparipintaan, tästä substraattiin ja sen alakuparipintaan. Alemmasta kuparipinnasta lämpö johtuu juotoksen läpi pohjalevyyn ja siitä lämmönsiirtomateriaalin läpi jäähdytyslementtiin ja siitä ilmaan. [7]

4 Lämmönsiirtomateriaalin valintaan vaikuttavat muuttujat

Lämmönsiirtomateriaalien valinnassa on otettava huomioon monia muuttujia ja niiden yhteisvaikutuksia. Materiaalin valintaan vaikuttaa niin komponentin, jäähdytyslementin kuin lämmönsiirtomateriaalin ominaisuudet. Tässä luvussa pyritään kartoittamaan näitä muuttujia, sekä arvioimaan niiden tärkeyttä.

4.1 IGBT:n muuttujat

Lämmönsiirtomateriaalin valintaan vaikuttavat myös IGBT-moduulin ominaisuudet. IGBT-moduuli on yksi tärkeimmistä komponenteista taajuusmuuttajan toiminnassa, sen toiminnasta ja ominaisuuksista tiedetään tieteessä paljon. IGBT-moduuleja on toteutettu erilaisilla rakenteilla ja muilla ominaisuuksilla, jotka on tärkeää ottaa huomioon muuttujien kartoittamisessa ja lämmönsiirtomateriaalien valinnassa.

IGBT:n muuttujia

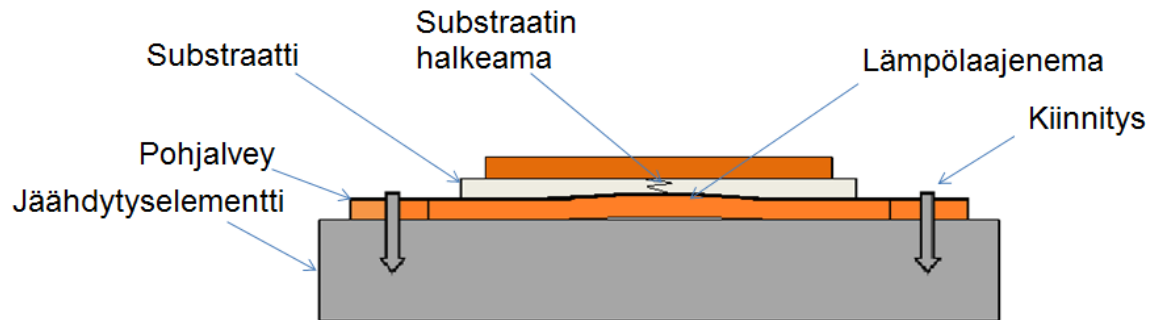
- Pohjalevyn paksuus
- Pohjalevyn materiaali
- Pohjalevyn muutokset eri lämpötiloissa
- Pohjalevyn kuperuus
- Pohjalevyn tasaisuus/pinta
- Pohjalevyn pinta-ala
- Kiinnityskohtien määrä ja välimatka toisiinsa
- Kiinnitysmomentti
- Puolijohteiden sijoittelu IGBT:ssä
- IGBT-moduulien eri lämpötilat
- Pintojen puhtaudet asennuksessa
- Komponenttien valmistaja
- Hinta / laatu

4.1.1 Pohjalevyn paksuus ja materiaali

IGBT:n pohjalevyn materiaali on lähes aina kupari, jonka lämmönjohtokyky on erittäin hyvä. IGBT-moduulien valmistuksen alkuaikoina pohjalevyt olivat huomattavasti paksumpia verrattuna tämän päivän pohjalevyratkaisuihin. Suurin syy pohjalevyn ohentamiseen oli kova hintakilpailu ja paine laskea IGBT-moduulien valmistuskustannuksia.

Osassa nykyisistä IGBT-moduuleista pohjalevyn ohuus on tuonut ongelmia, kuten moduulin sisällä oleva substraatti, joka voi halkeilla pohjalevyn vääntyessä. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on pohdittu pohjalevyn paksuntamista, mutta nykyaikaisissa IGBT-moduuleissa lämpötilat ovat nousseet, mikä kasvattaa pohjalevyn lämpölaajenemista. Mikäli pohjalevyä paksunnetaan liikaa, voi pohjalevyn lämpölaajeneminen rikkoa substraatin. Pohjalevyn ollessa kiinnitettynä

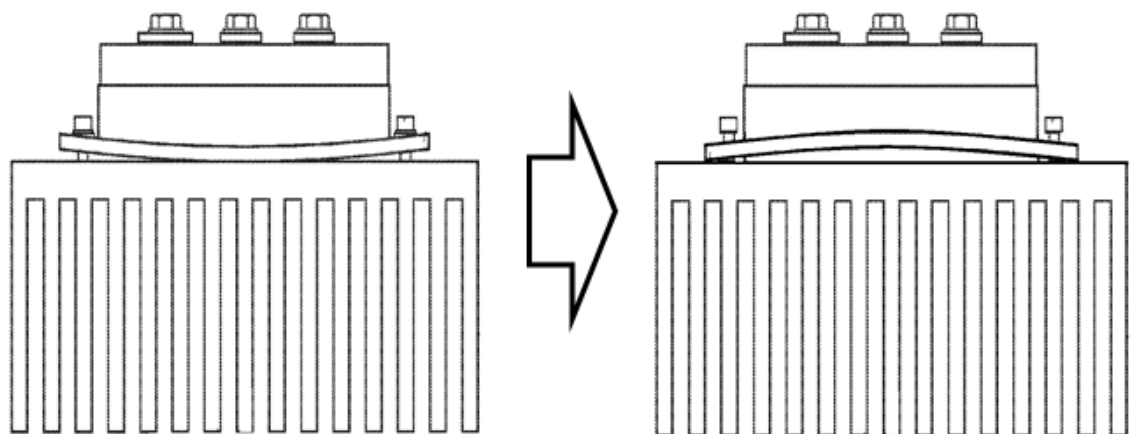
jäähdytyselmenttiin se ei voi lämpölaajeta vapaasti. Tällöin pohjalevyyn voi syntyä sisäisiä jännitteitä, jotka muuttavat kappaleen muotoa. Koska IGBT-moduuli on kiinnitetty pohjalevyn reunoista jäähdytyselmenttiin, pohjalevy ei pääse lämpölaajenemaan sivuille eikä jäähdytyselmenttiin päin. Tällöin se laajenee moduulia kohti jolloin substraatti saattaa haljeta. Tähän ongelmaan uskon että väliaikaisena ratkaisuna pyritään löytämään pohjalevylle optimipaksuus, joka on tukeva, eikä lämpölaajene liikaa. [12,13]



Kuva 9. Havainnekuva lämpölaajenemisesta.

4.1.2 Pohjalevyn kuperuus

Pohjalevyn kuperuutta on muokattu joissakin IGBT-moduuleissa. Pohjalevyn kuperuudella on pyritty parantamaan kontaktia IGBT-moduulin ja jäähdytyselmentin välillä. Idea on ollut saada IGBT-moduulin pohjalevy painautumaan paremmin jäähdytyselmenttiä vasten. Kiinnitettäessä pohjalevyyn syntyy ulkoista jännitettä, joka painaa moduulin pohjaa jäähdytyselmenttiä vasten. [17]



Kuva 10. Pohjalevyn kuperuus ennen ja jälkeen kestotestin. Kuva mukautettu lähteestä. [16]

Tässä on kuitenkin ongelmana se, että jännite katoaa, kun laitetta rasitetaan riittävän kauan ja moduulit lämpenevät. Kuvassa 10 on kuvattuna IGBT-moduuli ennen ja jälkeen kestotestin. Kuvasta voidaan havaita, että pohjalevyn kuperuus on muuttunut, tämä ilmiö johtuu lämpölaajenemisesta joka nostaa pohjalevyä. [17]

4.1.3 IGBT:n kiinnityskohdat ja kiinnitysmomentti

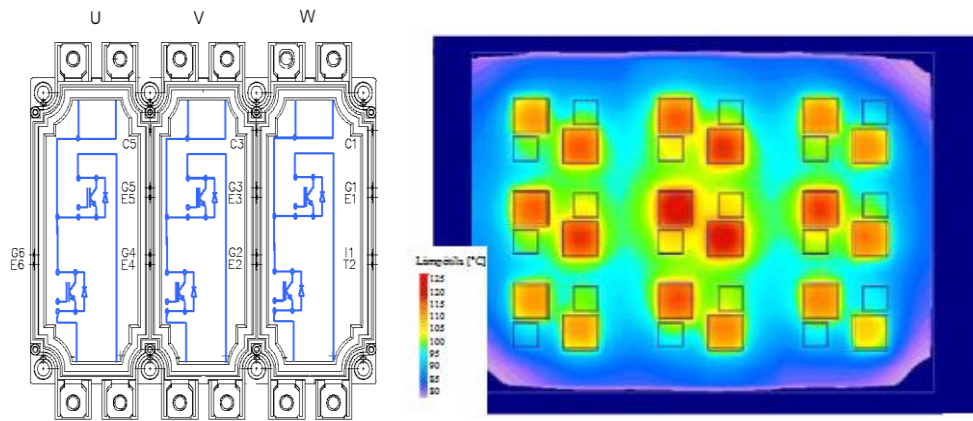
IGBT-moduulin kiinnityskohtien välimatkat toisiinsa nähden ja kiinnitysmomentti vaikuttavat lämmönsiirtomateriaalin valitsemiseen. Liian suuri välimatka kiinnityskohtien välillä heikentää kontaktia tai riippuen lämmönsiirtomateriaalista kontakti voi jäädä heikoksi. Lämmönsiirtorasvat toimivat IGBT-moduuleissa, joissa on harvakseltaan kiinnityskohtia paremmin kuin lämmönsiirtokalvot, tällöin kiinnitysmomentti ei ole niin merkittävässä asemassa. Esimerkiksi lämmönsiirtokalvossa on tällöin otettava huomioon kalvon paksuus sekä kiinnitysmomentti. Mikäli kalvo on ohut ja kiinnitys välimatkat pitkät jää kontakti heikoksi kiinnityskohtien väliseltä alueelta. Kontaktia voidaan jonkin verran parantaa paksuntamalla kalvoa ja suurentamalla kiinnitysmomenttia. Tällöin kalvo painautuu IGBT-moduulin kiinnityskohdista kasaan ja keskikohtaan saadaan parempi kontakti johtuen paksummasta kalvosta. Alla on esitettynä muutamia erilaisen rakenteen omaavia IGBT-moduuleita. [14]



Kuva 11. Kuvassa yhden vaiheen EconoDual IGBT-moduuli.

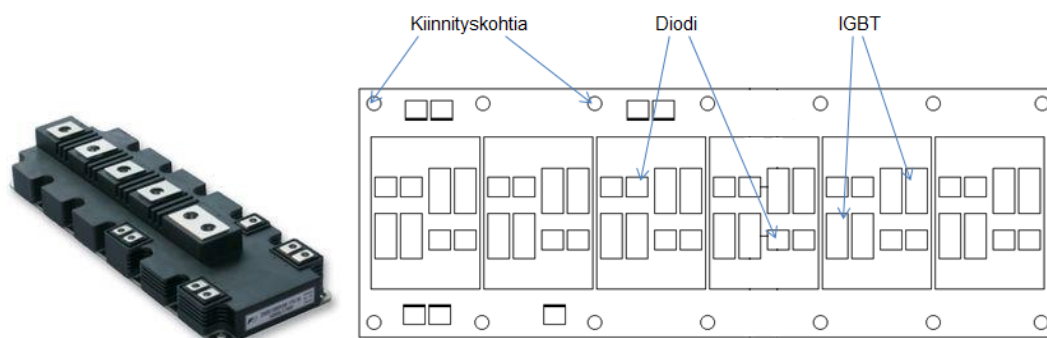
Kuvan yksitoista kaltaisia IGBT-moduuleita käytetään useissa taajuusmuuttajissa. Moduuli on valmistuskustannuksiltaan edullinen ja suhteellisen varmatoiminen. Tämän IGBT-moduulin yksi ongelma on kiinnitys kohdissa, jotka sijaitsevat moduulin päissä. Kiinnitettäessä moduulia sen päät painuvat kiinni jäähdytuselementtiin, mutta keskikohta jää kantamaan, jolloin kontakti jäähdytuselementin ja moduulin välillä jää heikoksi. Tämän kaltaisen rakenteen omaaviin IGBT-moduuleihin lämmönsiirtorasvat

toimivat parhaiten, koska ne pystyvät saamaan kontaktin sekä jäähdytyslementtiin että IGBT-moduuliin. Tasapaksulla lämmönsiirtokalvolla kontakti IGBT-moduulissa jää olemattomaksi. Yksi ratkaisu tähän on lämmönsiirtokalvo joka on keskikohdaltaan paksumpi. Tällöin kontakti paranee IGBT-moduulin pohjalevyn keskikohdassa. Rakenteellisesti moduulia voitaisiin parantaa paksuntamalla 3mm paksua pohjalevyä, mutta tällöin lämpölaajeneminen voisi vahingoittaa substraattia. Toinen vaihtoehto IGBT-moduulin kontaktin parantamiseen on muuttaa rakennetta siten että lisätään kiinnityskohtia moduuliin, jolloin pohjalevy puristuu paremmin jäähdytyslementtiä vasten.



Kuva 12. Kuvassa EconoPACK+ kolmivaiheinen IGBT-moduuli.

EconoPACK+ on IGBT-moduuli jossa yhdelle pohjalevylle on kasattu kolme IGBT:tä, joilla voidaan ohjata taajuusmuuttajan kaikkia kolmea vaihetta. EconoPACK+ moduulin hyvänä ominaisuutena voidaan pitää tuotannon työvaiheiden vähenemistä, kun samassa moduulissa on kolme IGBT:tä tuotannon työvaiheet vähenevät ja laitteen läpimeno aika nopeutuu. Lämmönsiirtomateriaaleille tämä IGBT-moduuli on erittäin haastava johtuen sen suuren pinta-alan omaavasta pohjalevystä sekä vähäisistä kiinnityskohdista. Lämpökameralla otetussa kuvassa voidaan havaita moduulin keskimmäisten puolijohteiden olevan kaikista kuumimpia. Kuten EconoDualissa tässäkin moduulissa ongelmana on keskikohta, joka jää kantamaan kiinnitettäessä ja siksi moduulin keskikohtaan jää runsaasti ilmataskuja.



Kuva 13. Kuvassa PrimePACK IGBT-moduuli ja sen pohjapiirros.

Kuvassa kolmesta on esitettyä PrimePACK IGBT-moduuli, jota käytetään suuremman teholuokan taajuusmuuttajissa. Moduulin pohjakuvasta nähdään että pohjalevyssä on paljon kiinnityskohtia ja niiden välimatka toisiinsa on lyhyt. Tästä johtuen PrimePACK-moduulin kanssa pystytään käyttämään erilaisia lämmönsiirtomateriaaleja niin kalvoja kuin rasvoja. Näiden välillä lämmönsiirto-ominaisuuksissa ei ole suuria eroja. Pohjalevyn paksuus on sama kuin edellä olleissa IGBT-moduuleissa, joten voidaan päätellä kiinnityskohtien määrän ja etäisyyden vaikuttavan paljolti millaisia lämmönsiirtomateriaaleja moduuleissa voidaan käyttää.

4.1.4 Puolijohteiden sijoittelu IGBT:llä

IGBT-moduulissa puolijohteet on pyritty sijoittamaan pohjalevyille niin että lämpö jakaantuisi mahdollisimman tasaisesti. Esimerkiksi kuvassa kolmesta olevassa PrimePACK moduulin pohjapiirroksessa komponentit on aseteltu kahteen riviin siten että joka toinen on diodi ja toinen IGBT. Tällöin lämpö jakaantuu tasaisemmin, kun kuumempina käyvät komponentit ovat erillään toisistaan. Tätä mallia käytetään useissa eri teholuokan IGBT-moduuleissa. Pienemmän teholuokan pohjalevyttömissä moduuleissa sijoittelu vaihtelee.

Puolijohteiden sijoittelulla IGBT-moduulissa pystytään vähentämään lämmön säteilyä ja johtumista muihin komponentteihin. Hyvällä sijoittelulla on siis mahdollista saada puolijohteiden lämpötilaa laskettua. Yhtenä ongelmana kuitenkin IGBT-moduuleissa on puolijohteiden tuottamat pistemäiset kuumat kohdat, kuten kuvassa kaksitoista. Tähän ongelmaan ei vielä ole löydetty ratkaisua millä puolijohteen tuottama lämpö saataisiin jaettua suuremmalle alalle. On otettava huomioon myös sähköiset ominaisuudet, jotka hankaloittavat puolijohteiden sijoittelua IGBT-moduulissa.

4.2 Lämmönsiirtomateriaalin muuttujat

Lämmönsiirtomateriaalien ominaisuuksista tiedetään tällä hetkellä suhteellisen vähän tieteessä. Viime vuosina monet tahot ovat alkaneet tutkimaan ja kehittämään uusia lämmönsiirtomateriaaleja ja siksi uusia innovatiivisia lämmönsiirtomateriaaleja ilmestyy markkinoille tasaiseen tahtiin. Enää ei puhuta lämmönsiirtorasvoista, koska erilaiset kalvot ja metalliseos paperit ovat vallanneet alaa. Siksi muuttujien ja ominaisuuksien määrät ovat kasvaneet.

Lyhenne TIM tulee englannin kielisistä sanoista Thermal Interface Material ja tarkoittaa lämmönsiirtomateriaalia. Lämmönsiirtomateriaaleja käytetään yleensä tehoelektroniikka komponenteissa, jotka altistuvat suurille lämpötilan vaihteluille. Tarkoituksena lämmönsiirtomateriaaleilla on pienentää komponentin ja jäähdytyselementin välistä kontaktivastusta ja lämpöresistanssia sekä täyttää liitoksiin jäävät ilmaontelot mahdollisimman hyvin.

Taajuusmuuttajassa tätä lämmönsiirtoaineteknologiaa käytetään yleisesti IGBT-moduulien ja tasasuuntaussiltojen lämmönsiirron parantamisessa. IGBT-moduulien lämpöominaisuuksia on tutkittu paljon ja sen käyttäytymisestä tiedetään tieteessä, mutta lämmönsiirtomateriaaleja ja niiden ominaisuuksia on tutkittu hyvin vähän. Siksi lämmönsiirtomateriaalien käyttäytymisestä tiedetään vähän ja materiaalia tästä aiheesta on hyvin rajallisesti. [7,10]

Lämpörasvat ovat monesti silikonipohjaisia, jotka on kyllästetty lämpöä johtavilla partikkeleilla kuten pii-, alumiini-, sinkki- tai hopeaoksidoilla. Tehoelektroniikassa pyritään käyttämään muita kun silikonipohjaisia lämmönsiirtomateriaaleja, jotta tuotteet soveltuisivat teollisuuteen, jossa silikonin käyttö on kielletty. Siksi onkin alettu kehittää erilaisia lämmönsiirto kalvoja ja silikonivapaita rasvoja. Lämmönsiirtomateriaalien saatavuus on monipuolistunut ja saatavilla onkin monia eri tyyppisiä ja eri tarkoituksiin soveltuvia tuotteita. [7,10]

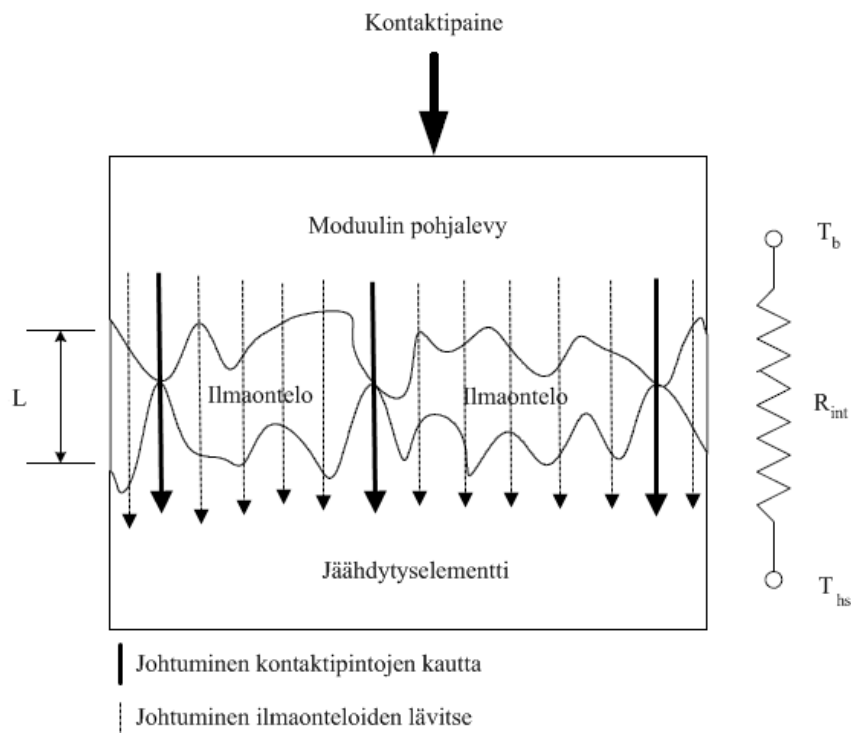
Lämmönsiirtomateriaalin muuttujia:

- Kyky johtaa lämpöä
- Lämmönsiirtomateriaalin oikea paksuus
- Lämmönsiirtomateriaalien asennus muoto/stensiili/kuviointi
- Oikea momentti eri lämmönsiirtomateriaaleille
- Pintojen ja lämmönsiirtomateriaalin väliin jäävä ilma
- Aineen rakenne rasva, faasimuutos rasva vai kalvo/paperi
- Aineen viskositeetti
- Viskositeetin muutokset eri lämpötiloissa
- Rakenteelliset muutokset eri lämpötiloissa
- Partikkelien määrä
- Lämmönsiirto-ominaisuudet eri lämpötiloissa
- Kestävyys suuriin ja nopeisiin lämpötilan muutoksiin
- Lämmönsiirtomateriaalin toimivuus ääriolosuhteissa
- Lämmönsiirtomateriaalin elinkaari
- Lämmönsiirtomateriaalin laatukriteerit, tasalaatuisuus
- Varastointiaika, parasta ennen
- Varastointiolosuhteet

4.2.1 Lämmönsiirtomateriaalin kyky johtaa lämpöä

IGBT-moduuli kiinnitetään pohjalevystä jäähdytyselementtiin. Kun kaksi kiinteää pintaa yhdistetään toisiinsa, on kontaktipinta-ala vain muutamia prosentteja koko alasta. Loppu tästä alasta on ilmataskuja jotka johtavat lämpöä huonosti. Kuvassa yhdeksän on kuvattuna IGBT-moduulin pohjalevyn ja jäähdytyselementin poikkileikkaus, jossa on nähtävissä kiinteiden kappaleiden rajapinta. Kuvassa lämpö siirtyy ylhäältä lämpimältä pohjalevyltä T_b :stä jäähdytyselementtiin T_{hs} . Liitoksen kokonaispaksuutta kuvataan muuttujalla L . Alla olevassa kuvassa poikkileikkaus on kuvaamassa kiinteiden pintojen väliin jäävää rajapintaa ja siihen jääneitä ilmataskuja. Siksi liitoksen lämpöresistanssi

R_{int} koostuu kahdesta lämpöresistanssista. Toinen lämpöresistanssi tulee kohdista joissa kiinteät pinnat todella kohtaavat sekä säteilystä ilmaonteloiden poikki. [7,8]



Kuva 14. Lämmön siirtyminen kiinteiden kappaleiden liitoksessa. [7]

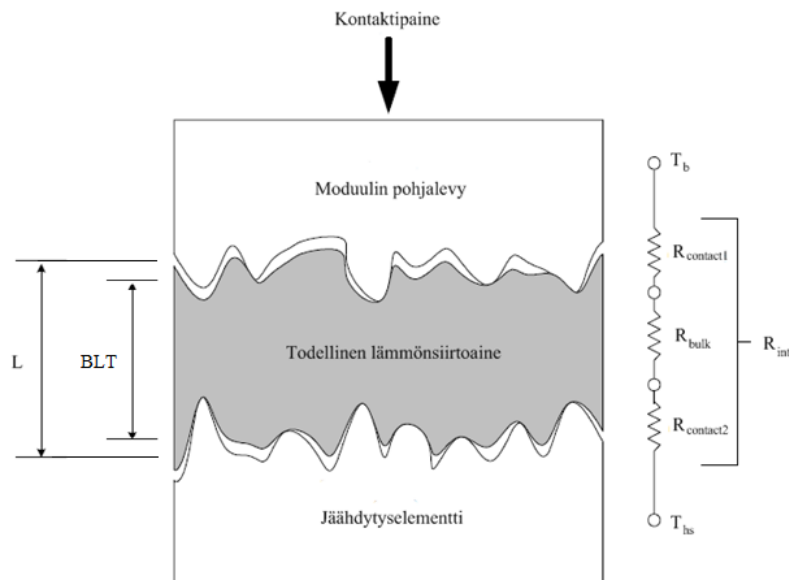
Kuvasta neljätoista voidaan siis päätellä että suurin osa lämmönsiirtymisestä rajapinnassa tapahtuu ilmataskujen läpi. Kun tiedetään että ilma on huono lämmönjohde, varsinkin verrattuna metallin korkeaan lämmönjohtavuuteen, voidaan päätellä ilmataskujen aiheuttavan suuren lämpöresistanssin. Pahimmillaan suuri lämpöresistanssi voi johtaa moduulin rikkoontumiseen.

Taulukko 1. Eri aineiden lämmönjohtavuuksia

Aine	Lämmönjohtavuus W/(K·m)
Kupari	390
Alumiini	236
Rauta	50–80
Ilma	0,024

Siksi lämmönjohtavuutta on paranneltu monilla eri keinoilla kuten kasvattamalla kontaktikohtien pinta-alaa, pienentäen kontaktipintojen karheutta, suurentaen

kontaktipainetta ja täyttämällä ilmaontelot lämmönsiirtomateriaalilla. Ideaalisessa liitoksessa lämmönsiirtomateriaali täyttää liitoksessa olevat ilmataskut täydellisesti, mutta tähän lämmönsiirtomateriaalit eivät täysin pysty ja liitokseen jää pieniä ilmataskuja molemmiin puolin. Tällöin lämmönsiirtomateriaalin paksuus liitoksessa on hieman pienempi kuin liitoksen keskimääräinen kokonaispaksuus L . Lämmönsiirtoaineen paksuutta merkitään muuttajalla BLT. [7]

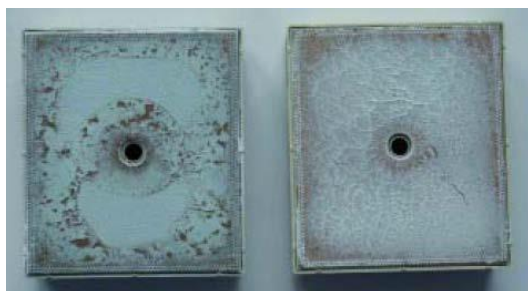


Kuva 15. Moduulin ja jäähdytyslementin välinen rajapinta lämmönsiirtomateriaalilla. [7]

4.2.2 Lämmönsiirtomateriaalin paksuus ja asennus

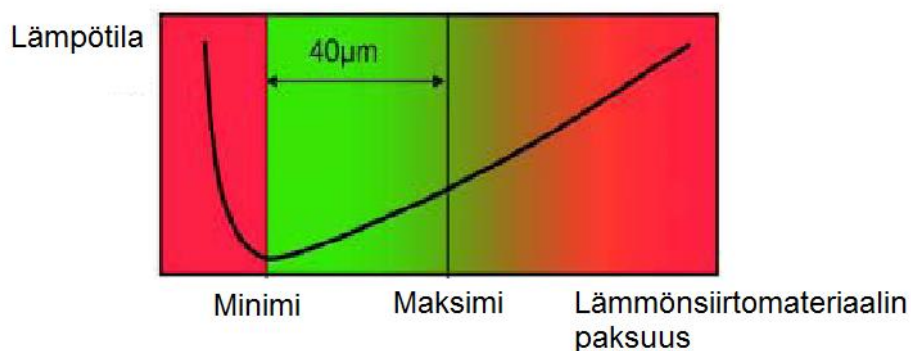
Lämmönsiirtomateriaalin oikeaan asennuspaksuuteen on kiinnitettävä huomiota. Varsinkin nestemäisillä rasvoilla liian vähäinen tai liian suuri määrä rasvaa heikentää lämmön johtumista. Mitä ohuemmaksi BLT saadaan sitä pienempi on myös liitoksen lämpöresistanssi. Tähän kuitenkin vaikuttavat myös asennusmomentti mikä määrää paineen IGBT-moduulin ja jäähdytyslementin välissä. Tärkeää on myös ottaa huomioon aineen viskositeetti. Mikäli aineen viskositeetti on pieni voi se puristua pois liitoksesta kovassa paineessa. Jos aine on liian paksua, vaikuttaa se sen kykyyn täyttää ilmaontelot. Myös liiallinen määrä voi rikkoa IGBT:n mekaanisesti. Pohjalevyttömissä IGBT-moduuleissa liian suuren viskositeetin omaava lämmönsiirtorasva voi rikkoa moduulin rakenteen kiinnitys vaiheessa. Kuvassa kuusitoista vasemmanpuoleisessa IGBT-moduulissa on liian vähän lämpörasvaa, joten moduulin ja jäähdytyslementin väliin on jäänyt ilmataskuja eikä rasva ole levittänyt

tasaisesti. Oikeanpuoleiseen moduuliin on laitettu oikea määrä lämpörasvaa ja kuvasta huomaa että se on levittynyt tasaisesti ja toiminut oikein. [7]



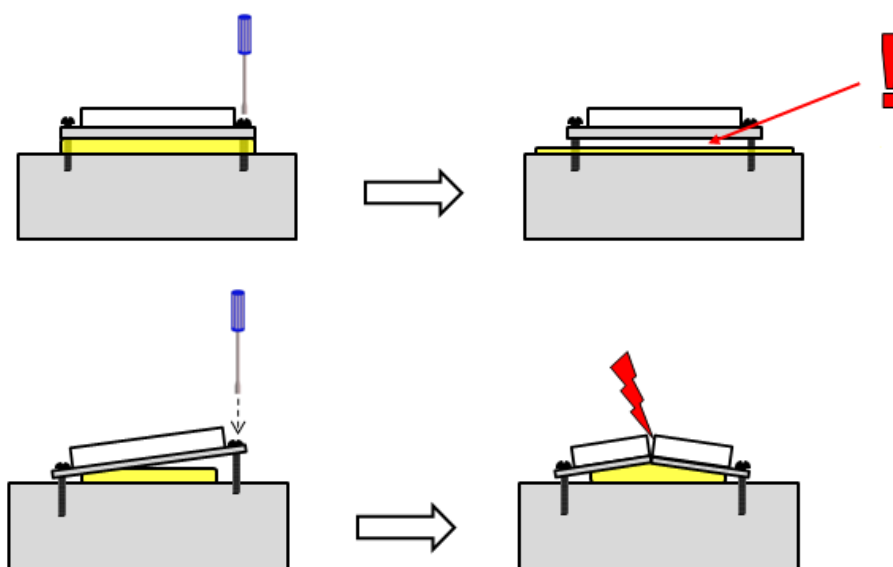
Kuva 16. Vasemmalla moduulissa lämpörasvaa $30\mu\text{m}$ oikealla $50\mu\text{m}$. [15]

Liian ohut kerros lämmönsiirtoainetta ei täytä jäähdytyslementin ja IGBT-moduulin väliin jääviä ilmataskuja. Tällöin lämpö siirtyy metalli-ilma-metalli kontaktilla. Ilmataskut toimivat lähes eristeen tavoin ja lämpö ei pääse siirtymään tehokkaasti pois komponenteilta, jolloin komponentit lämpenevät normaalia enemmän ja niiden vikaantumisen mahdollisuus kasvaa. [10]



Kuva 17. Kuvassa on esitettyä lämmönsiirtomateriaalin oikea toimintapaksuus. [10]

Mikäli lämmönsiirtomateriaalia laitetaan liian paljon voi se valua komponentin alta pois, jolloin väliin jää ilmaa ja kiinnitysmomentti pienenee. Silloin rajapinnan lämmönsiirto heikkenee esim kuva 17. Liiallinen määrä lämmönsiirtorasvaa voi myös IGBT-moduulin kiinnityksessä hajoittaa moduulin aiheuttamalla pohjalevyyn vääntöä. [10]



Kuva 18. Lämmönsiirtomateriaalien väärinkäytökset voivat rikkoa IGBT-moduulin.[10]

Lämmönsiirtokalvoilla tällaisia ongelmia ei ilmene. Kalvo on halutun paksuinen, joten se ei aiheuta vääntöä pohjalevyyn kiinnityksessä ja kiinteästä rakenteesta johtuen se ei valu.

4.2.3 Lämmönsiirtomateriaalien ominaisuuksien muutoksia

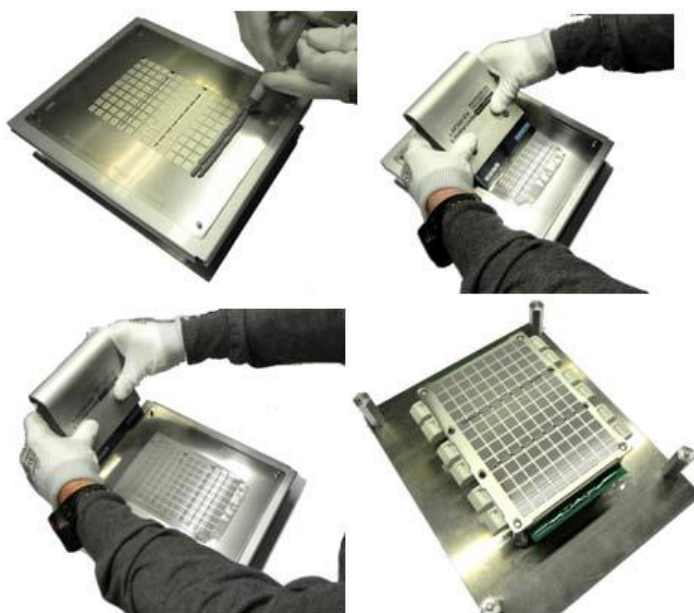
Lämmönsiirtomateriaalien ominaisuudet vaihtelevat lämpötilasta riippuen. Niin rasvoilla kuin metalliseoskalvoilla on omat tavat reagoida korkeisiin lämpötilan muutoksiin. Lämmönsiirtomateriaaleista tiedetään tieteessä vähän, joten väitteet/faktat perustuvat pitkälti olettamuksiin.

Lämmönsiirtorasvoilla muuttujia jotka olisi tärkeää ottaa huomioon, ovat kyky johtaa lämpöä ja viskositeetti. Lämmönsiirtorasvojen viskositeetti muuttuu korkeissa lämpötiloissa, jolloin aine muuttuu juoksevammaksi ja voi näin valua pois puolijohteiden alta. Jatkuvat lämpötilan muutokset voivat heikentää rasvojen kykyä johtaa lämpöä tai lyhentää niiden elinkaarta. Tästä tieteessä ei tiedetä paljoa, mutta joillain rasvoilla tällaista on havaittu tapahtuvan. Lämpörasvan partikkeli määrä vaikuttaa paljon lämmönjohtumiseen. Suuri partikkeli pitoisuus takaa sen että rasvaan tulee lämpöä johtavia partikkelipolkuja, jotka johtavat lämmön tehokkaasti IGBT-moduulista jäähdytyslementtiin. [7]

Joillakin lämmönsiirtorasvoilla tapahtuu kemiallisia reaktioita, esimerkiksi kestopitesteterissä erään rasvan väriytyminen muuttui valkoisesta palaneen mustaksi ja rakenne selvästi kovettui. Testerin lämpösykli ei kuitenkaan ollut korkea, joten kyseessä ei liene palaminen vaan jonkinlainen kemiallinen reaktio.

Lämmönsiirtokalvoilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Parhaina puolina kalvoilla voidaan pitää sitä että kalvo pysyy IGBT-moduulin alla ja tekee aina lämpöä johtavan polun saadessaan kontaktin. Vaikka kalvon ja IGBT-moduulin väliin jää paljon ilmaa, niin johtuen kalvon sahalaita rakenteesta kalvo saa hyvän kontaktin.

Kalvojen asennus on helppoa ja paksuus on aina haluttu. Kalvo asetetaan IGBT-moduulin päälle ja paketti kiinnitetään jäähdytyslementtiin. Tuotannossa tämä nopeuttaa laitteen valmistumisaikaa ja huoltopuolella ei IGBT-moduulien vaihtoon tarvitse käyttää työläitä stensiilejä ja sotkuisia rasvoja. Varastointi kalvoilla on helppoa, koska kalvot eivät kuivu kuten lämpörasvat. Kalvot voidaan valmistaa halutun paksuisiksi, tällöin saadaan taattua tasalaatuinen lämmönsiirto ja voidaan ottaa paremmin huomioon IGBT-moduulin vaatimukset.



Kuva 19. Kuvassa lämmönsiirtorasvan asettaminen IGBT-moduuliin stensiilillä [10]

Yksi heikkous mikä lämmönsiirtokalvoissa on havaittu, ovat korkeat ja nopeat lämpötilan vaihtelut, jotka voivat vaurioittaa kalvoa mekaanisesti. Esimerkiksi ABB:n testeissä vesijäähdytteisellä taajuusmuuttajalla ajetuissa kestopesteissä

lämmönsiirtokalvo rikkoontui pieniksi palasiksi. Syynä tähän todennäköisesti oli korkeat maksimi lämpötilat sekä suuri ja nopea lämmönvaihtelu. Nämä aiheuttivat nopeaa lämpölaajenemista mitä kalvon rakenne ei kestänyt. Tätä ongelmaa ei ole ilmennyt pienemmän teholuokan laitteissa, joissa lämpötilat ja niiden vaihtelut ovat alhaisempia. Toki näissäkin ongelma voi ilmetä ajan kanssa. Ongelmana voidaan pitää lämmönsiirtokalvoista olevan materiaalin ja tietouden vähäisyyttä.

4.3 Jäähdytyslementin muuttujat

Jäähdytyslementti on tärkeä osa lämmön johtumisessa pois IGBT:ltä. Jäähdytyslementin ominaisuudet ovat aivan yhtä tärkeitä tehokkaan lämmönjohtumisen takaamisessa kuin IGBT:n ja lämmönsiirtomateriaalin. Jäähdytyslementin tarkoituksena on lisätä komponentin pinta-alaa, jolloin lämmön johtuminen ympäröivään ilmaan tehostuu. Jäähdytyslementit ovat kehittyneet parempien työstölaitteiden ja valmistustapojen kehittyessä. Alumiinisten jäähdytyslementin rinnalle ovat tulleet nestejäähdytteiset ja sisäisen nestejäähdytyksen omaavat elementit

Jäähdytyslementin muuttujia/ominaisuuksia

- Materiaali
- Kosketuspinnan sileys
- Muotoilu
- Paksuus
- Koko/massa
- Ulkoinen nestejäähdytys
- Jäähdytyslementin sisäinen nestejäähdytys

Jäähdytyslementti on yleensä sivustapäin katsottuna kampamainen osa, jonka sileälle pinnalle jäähdytettävä komponentti kiinnitetään. Jäähdytyslementti on yleensä koottu puristamalla yhteen yksittäisiä alumiinisia lamelliprofiileja. Tästä valmistustavasta johtuen sinkin pinnassa on monesti koloja, vaikka pinta pyritään jyrsimään tasaiseksi. Tästä johtuen kontaktipinta ei ole tasainen.

Jäähdytyselementit valmistetaan lähes aina alumiinista, johtuen sen edullisesta hinnasta ja hyvästä kyvystä johtaa lämpöä. Alumiinin kevyt rakenne helpottaa myös rungon suunnittelussa kun jäähdytyselementti ei ole niin massiivinen ja painava. Kuparia käytetään myös jonkin verran jäähdytyslementeissä, mutta tällöin yleensä elementin kokoluokka on suhteellisen pieni, johtuen kuparin korkeasta hinnasta.

Jäähdytyselementtien muoto on pysynyt vuosia hyvin samantyyppisenä, kuitenkin viimeaikoina työstömenetelmien kehittyessä on alettu kehittämään erilaisia ratkaisuja. Yksi varteenotettava ratkaisu jäähdytyslementin jäähdytystehon parantamiseksi on rakentaa jäähdytyslementin sisälle sisäinen nestekierto, silloin nestekierto toimii lämmön avulla. Tällä menetelmällä on taajuusmuuttajasta saatu kymmenien prosenttien hyötyjä irti. Kun IGBT:n puolijohteet ovat käyneet viileämpinä, on laitteesta voitu ottaa enemmän tehoa irti. Tämä valmistusteknologia on kuitenkin vielä suhteellisen työläs ja kallis, mutta tulevaisuudessa varteenotettava vaihtoehto ulkoiselle nestejäähdytykselle. [21]

Ulkoinen nestejäähdytys on tällä hetkellä tehokkain tapa jäähdyttää tehokomponentteja. Nestejäähdytystä käytetään tällä hetkellä ainoastaan suuremman teholuokan taajuusmuuttajissa. Nestejäähdytys on kuitenkin kallis ja vaatii asennuspaikalta tiettyjä ominaisuuksia.

5 Tutkimustavat, tulokset ja päätelmät

Tässä kappaleessa esitellään ABB:n lämmönsiirtomateriaaleja tutkivia projekteja sekä pyritään analysoimaan saatua tutkimusmateriaalia. Koska Lämmönsiirtomateriaaleista ja niiden ominaisuuksista tiedetään vähän, on asiaa alettu tutkimaan. Tämän hetkiset tutkimukset eivät ole kovin laajoja ja niitä tehdään muiden tutkimusten ja testien niin sanottuna sivutuotteena. Siksi niistä ei voida vetää pitäviä johtopäätöksiä, osaksi syy johtuu myös testien vähäisistä määristä ja toistokerroista. Asian tärkeys on kuitenkin havaittu ja on alettu suunnittelemaan kattavia ja pelkästään lämmönsiirtomateriaaleihin keskittyviä tutkimuksia.

5.1 Lämmönsiirtomateriaalien valinta

Lämmönsiirtomateriaalien kestopäätös on työläästä, se sitoo työresursseja ja vaatii aikaa. Kestotestien valitessa lämmönsiirtomateriaalia on sen täytynyt käydä läpi testejä joissa on voitu todeta se riittävän hyväksi lämmönjohteeksi. ABB Oy:ssä lämmönsiirtomateriaaleja on testattu eri teholuokkien taajuusmuuttajilla joiden IGBT-moduulien pohjalevyyn tai jäähdytysalustan pintaan on laitettu termoelementtilankoja. Tällä tavalla on pystytty mittaamaan tarkasti puolijohteen alhaalla lämpötilaa ja näin voitu havaita onko lämmönsiirtomateriaali riittävän tehokas lämmönjohtaja.

Suurin osa lämmönsiirtomateriaaleista on käynyt läpi testin jossa ne on asennettu ACS-850 taajuusmuuttajaan. Tässä testilaitteessa on muuttajat pyritty pitämään samoina jotta lämpöajoista on saatu mahdollisimman vertailukelpoisia keskenään. Jokaisella rasvalla on ajettu yhdestä kolmeen lämpöajoa, riippuen ensimmäisen ajon tuloksista. Mikäli laitteen lämpötilat ovat nousseet liikaa, on lämpöajo lopetettu kesken. Tällöin lämmönsiirtomateriaalista on raportoitu tuotteen valmistajalle jolloin heillä on ollut mahdollisuus tehdä parannuksia tai ehdotuksia miten materiaalin saisi toimimaan paremmin.

Materiaalit ajetaan kolmella erilaisella lämpöajolla, joilla pyritään kartoittamaan mahdollisimman hyvin lämmönsiirtomateriaalin toiminta erilaisissa pisteissä. Ensimmäisessä ajossa ajetaan laitteen nimellistä virtaa jatkuvalla korkealla nopeudella. Toisessa ajossa ajetaan laitteen nimellistä virtaa jatkuvana hitaammalla nopeudella. Kolmannessa ajossa ajetaan sykliä jossa yksi minuutti raskaalla kuormalla ja neljä minuuttia pienemmällä kuormalla.

Lämpöajojen jälkeen on laite purettu ja IGBT-moduulit irroitettu jotta on voitu tarkastella mitä muutoksia on tapahtunut. Huomiota on kiinnitetty erityisesti IGBT-moduulin kiinnitysmomentin muutoksiin, silmämääräisesti tarkasteltu materiaalin muutoksia ja valumisia. Tämän testin jälkeen tuloksia on vertailtu keskenään ja päätelty mitä lämmönsiirtomateriaaleja kannattaisi lähteä jatko testaamaan.

Tässä testissä muuttajat on pyritty saamaan minimiin, mutta ulkoisia tekijöitä ja muutoksia tapahtuu mikä vaikuttaa hieman tuloksiin.

Muuttujia jotka vaikuttavat tuloksiin:

- Laboratoriotilan kentän häiriöt ja jännitteen vaihtelut
- Laboratoriotilan lämpötila
- Termoelementtilangan kuluminen
- Taajuusmuuttajan/IGBT-moduulien muutokset
- Pohjalevyn käyristyminen.

Testissä tuloksissa ei voida arvioida lämmönsiirtomateriaalien toimintaa pitkällä ajanjaksolla. Lämpöajot jotka taajuusmuuttajalla suoritetaan kestävät useita tunteja, näillä tuloksilla voidaan rajata jatkotestiin laitettavat lämmönsiirtomateriaalit. Näin lyhyessä testissä moni lämmönsiirtorasva ei välttämättä ehdi asettumaan paikoilleen ja näin tulokset eivät ole parhaat mahdolliset vaan suuntaa antavia.

Testissä mitatuista lämpötiloista tärkeimmät ovat IGBT-moduulin pohjalevystä mitatut lämpötilat ja sisään menevän ilman lämpötila. Ulos tulevan ilman lämpötilaa mitataan kanssa mutta sen tulokset vaihtelevat paljon johtuen sähkökentän häiriöistä ja sähkön puhtaudesta. Mikäli häiriöitä on paljon kuumentaa tämän taajuusmuuttajan kuristinta useilla kymmenillä asteilla, mikä vaikuttaa paljon myös ulostulevan ilman lämpötilaan. Kuristimen kuumenemisella ei kuitenkaan ole suurta vaikutusta tässä testissä IGBT-moduulien lämpötilaan, johtuen kuristimen sijoittelusta laitteessa.

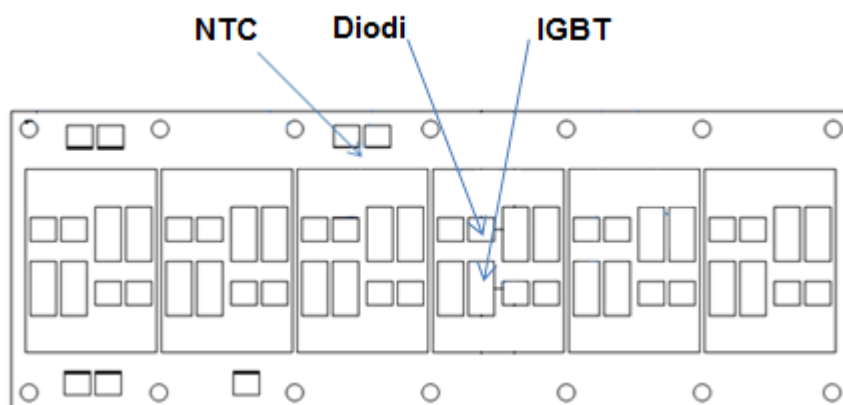
Tuloksista voidaan havaita lämmönsiirtomateriaalien kyvyn johtaa lämpö olevan hyvin samantapainen. Vertailtaessa lämpötiloja IGBT-moduulin lämpökarvoista ja NTC-anturista oli lämmönsiirtomateriaaleista suurin osa muutaman asteen sisällä toisistaan. Tämä tekee erittäin vaikeaksi arvioida materiaalien paremmuutta.

5.2 Prime Pack

ABB:n Fort Smith yksikön tiloissa tehdään ACS880 R10 ja R11 runkojen kestotestausta, jossa sykli ajolla pyritään tutkimaan IGBT-moduulin nopeutettua elinkaaritestausta. Testissä kaksi samaa runkokokoa olevaa taajuusmuuttajaa ajavat

moottoreita toisiaan vastaan syklisesti halutuilla virroilla, siten että toinen laite toimii moottorina ja toinen generaattorina. Testissä sykliä ajetaan 1min 30s raskaalla virralla jolloin IGBT-moduulien lämmöt nousevat ja tämän jälkeen 1min 30s pienellä virralla jolloin lämmöt laskevat. Syklin tarkoituksena on rasittaa IGBT-moduulia ja simuloida nopeutettua elinkaaritestausta. Sykliä määräästä pystytään arvioimaan taajuusmuuttajan elinkaaren kesto. Tässä testissä pystytään myös ohessa testaamaan lämmönsiirtomateriaalien toimivuutta.

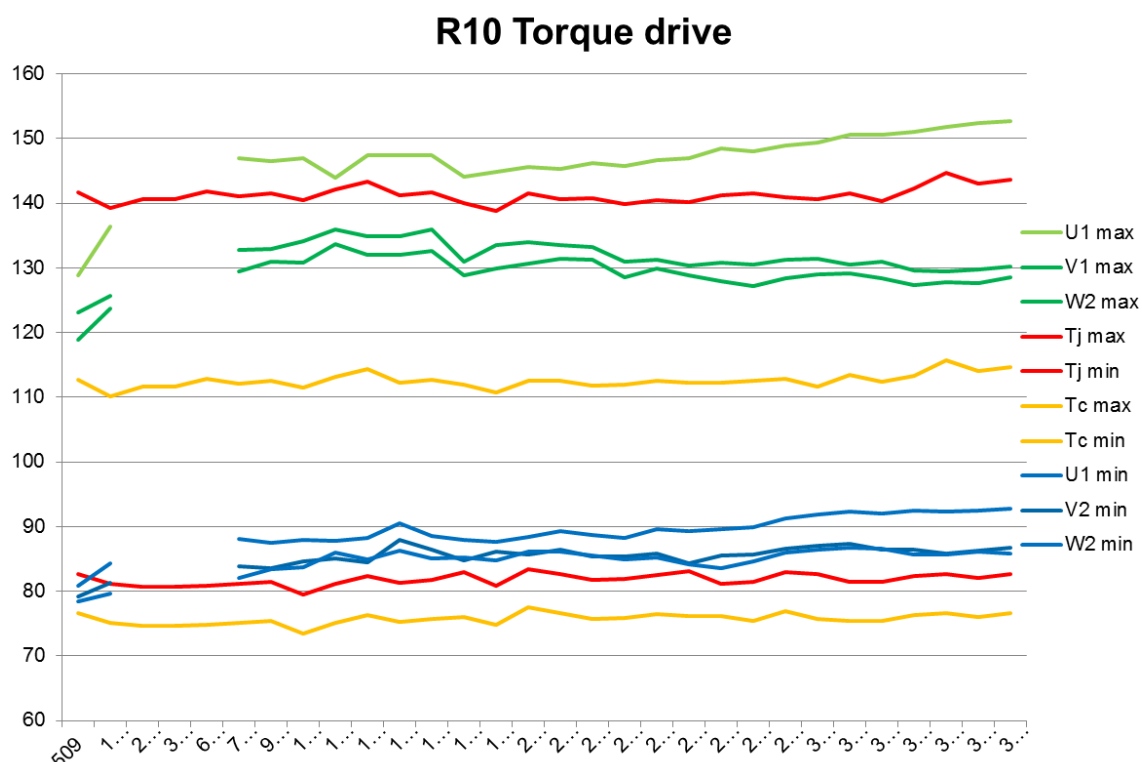
Laitteet ovat tuotannossa rakennettuja laitteita joihin on modifioitu IGBT-moduuleihin kuumimpien puolijohteiden alle pohjalevyyn termoelementtiparit jotka mittaavat lämpöä. IGBT-moduuleissa on oma lämpötilanmittaus jonka perusteella taajuusmuuttajan ohjelma tekee laskelman joka kertoo suunnilleen puolijohteen lämpötilan T_J :n. Tähän ei kuitenkaan aina voida luottaa johtuen lämpöanturin sijainnista ja lämmönsiirtomateriaalien ominaisuuksista. R10 ja R11 taajuusmuuttajat käyttävät PrimePACK IGBT-moduuleita joissa lämpötilanmittauksen pohjalevystä mittaa NTC-anturi. Anturi on kuitenkin sivussa puolijohteista ja haluttaessa tarkka lämpötila on käytettävä termoelementtilankaa, joka porataan pohjalevyn sisään suoraan kuumimpien puolijohteiden alle. Laitteisiin on myös asennettu sisään menevän ilman lämpötilan mittaus. Näin testejä voidaan vertailla, mikäli ympäristön lämpötila muuttuu.



Kuva 20. PrimePACK IGBT-moduuli ja lämpötilan mittaukset pohjalevyllä.

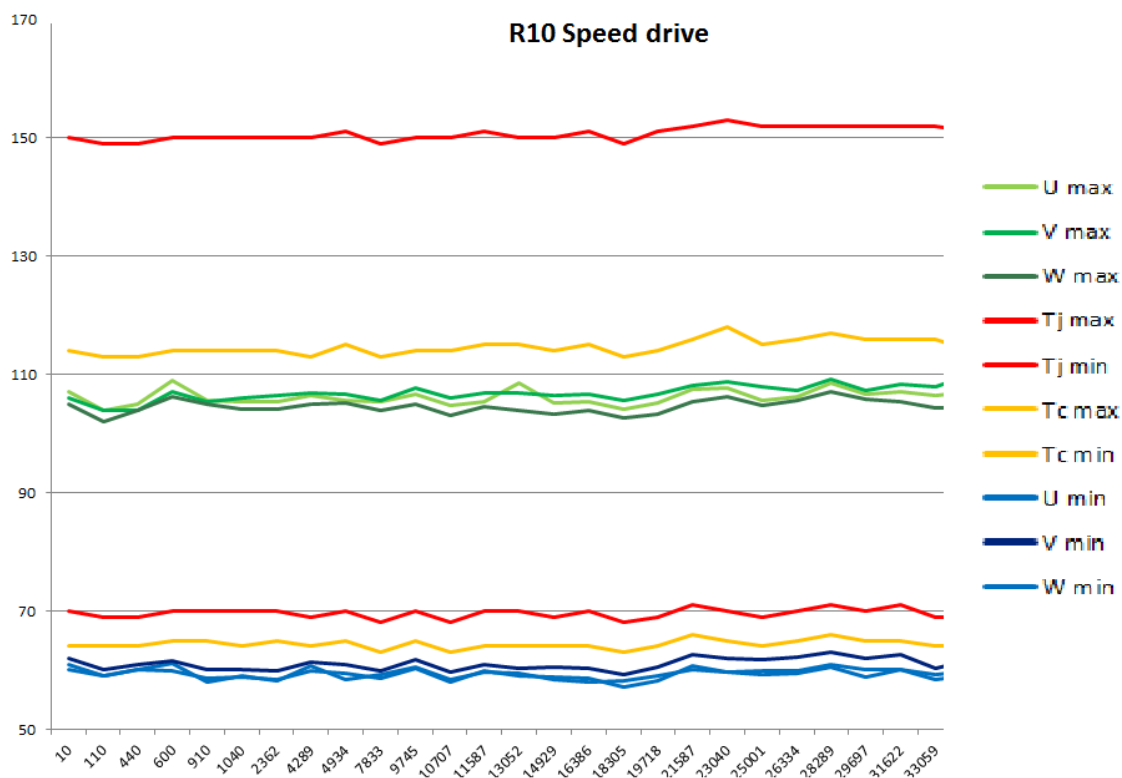
Fort Smith tuloksissa PrimePACK IGBT-moduulin kohdalla huomattiin että puolijohteiden kova lämpötila sai lämmönsiirtomateriaalin siirtymään pois puolijohteiden alta. Tästä johtuen termoelementtipareilla mitatut lämmöt nousivat, IGBT-moduulin oma NTC-anturi ei havainnut tätä jolloin laitteen laskema lämpötila vääristyi. Vaarana tässä tilanteessa olisi ollut laitteen ylikuumentuminen ja lopulta rikkoontuminen. Alla

olevasta kuvasta nähdään eri vaiheiden IGBT-moduulien mitatut maksimi ja minimi lämmöt sekä T_J ja T_C arvot. Trendeistä voidaan tulkita että vaiheissa termoelementtilangoilla mitatut lämpötilat ovat lähteneet nousemaan. Erityisesti U-vaihe on noussut kriittisiin lämpötiloihin ja ohittanut T_J maksimin jonka pitäisi kertoa laitteen sen hetkinen maksimi lämpötila. Syynä tähän oli NTC-anturin sijainti minkä takia se ei pystynyt havaitsemaan puolijohteen alla tapahtunutta muutosta. Testin päätyttyä laite purettiin ja IGBT-moduulit irrotettiin jäähdytysalustasta. Pohjalevyllä olleesta lämmönsiirtorasvasta pystyi havaitsemaan että se oli siirtynyt pois puolijohteiden alta. Tähän syynä oli pistemäinen ja korkea lämpötila puolijohteiden alla joka oli muuttanut aineen viskositeettiä. Tätä ilmiötä tapahtuu myös muilla lämmönsiirtomateriaaleilla, mutta niillä lämpöjen nousu on huomattavasti vähäisempää.



Kuva 21. Kestotestissä olleen momentti ohjatun laitteen mittaustuloksia. [18]

Alla olevassa taulukossa on nähtävissä faasimuutos rasvalla suoritettu kesto testi. Kaaviosta voi nähdä pientä lämpötilojen nousua, tämä on normaali reaktio monille lämmönsiirtorasvoille. Tässä kaaviossa kuitenkin havaittavissa että kaikki trendit nousevat tasaisesti, eli pohjalevyn lämpötilanmittaus toimii oikein. Kyseisellä lämmönsiirtorasvalla ei siis ole ilmennyt valumista pois puolijohteiden alta, mutta pientä heikkenemistä on havaittavissa.



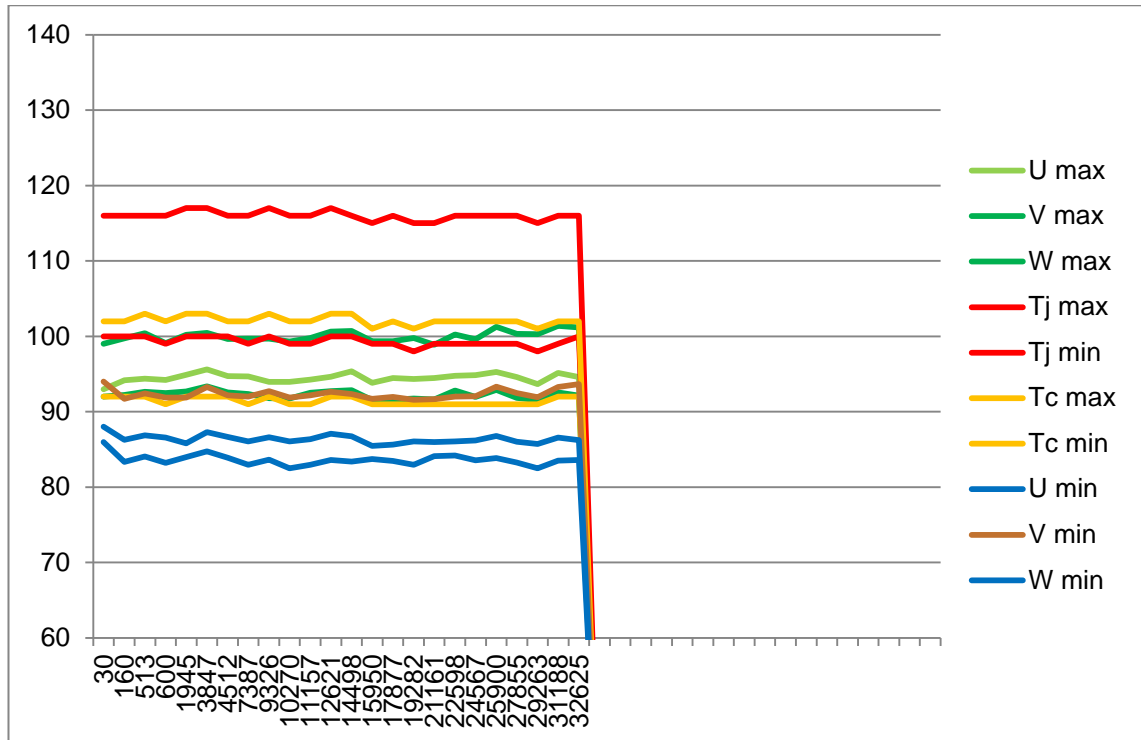
Kuva 22. Kestotestistä saatuja tuloksia Materiaali C lämmönsiirtorasvalla. [18]

Tässä testissä saadaan parhaiten mallinnettua rasitusta mitä lämmönsiirtomateriaali joutuu laitteen elinkaaren aikana kestämaan. Tämän tyyppisissä tutkimuksista saadaan parhaiten esiin kaikki muuttujat ja ominaisuudet. Koska testiin laitettavat laitteet ovat aina uusia ja ympäristön muuttujat pysyvät suhteellisen identtisinä ovat tulokset hyvin vertailukelpoisia. Testissä laite ajaa sille luvattuja maksimi arvoja joten taajuusmuuttaja ja lämmönsiirtomateriaali joutuu kovimmalle rasitukselle mitä asiakas voi laitteella käyttää.

Testissä on todettu varsinkin lämmönsiirtorasvojen heikkenevän, jolloin on havaittu lämpötilojen tasaista hidasta nousua. Lämmönsiirtorasvat alkavat myös siirtyä pois puolijohteiden alta mikä puolestaan myös lisää lämpötilojen nousua. Tähän mennessä testeissä heikkenemistä on tapahtunut kaikilla lämmönsiirtorasvoilla. Voidaan siis päätellä että rasvasta riippumatta heikkenemistä tapahtuu, osa vain menettää kykyään johtaa lämpöä hitaammin.

Kestotestillä ei vielä ole ehditty testaamaan kuin yhtä metalliseoskalvoa. Tässä kuitenkin tulokset näyttävät lupaavilta ja lämpötilojen nousua ei ole havaittavissa. Kuvan 23 käyristä voidaan havaita että lämmöt ovat pysyneet stabiileina, eli materiaalin

ominaisuudet eivät ole heikentyneet. Syynä tähän lienee se ettei kalvo siirry pois puolijohteiden alta. Metalliseoskalvot mahdollisesti myös lämpölaajenevat hieman mikä parantaa kontaktia ja lieventää IGBT-moduulin pohjalevyn vääntymisestä syntyvää lämpötilojen nousua.



Kuva 23. Metalliseoskalvon mittaustuloksia kestopitestistä. [20]

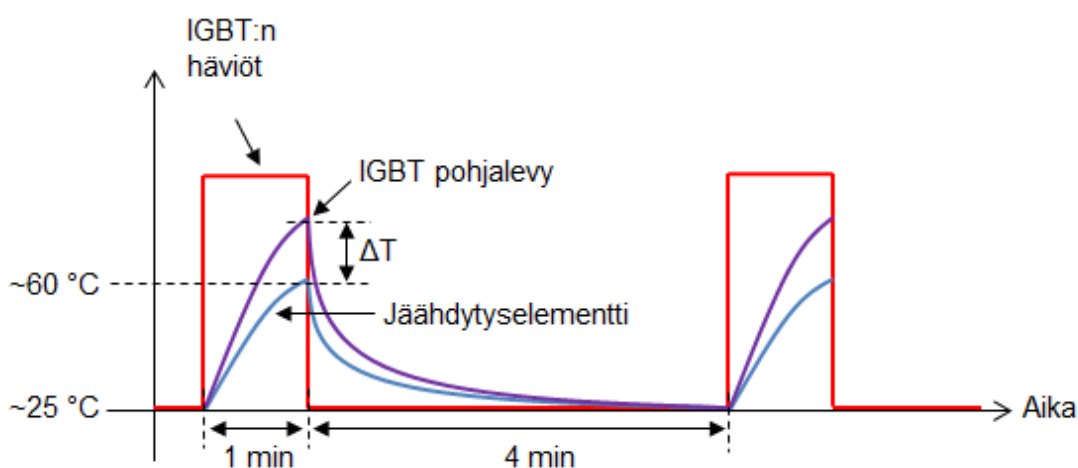
Muuttujia, jotka tulevat testissä hyvin esille

- Lämmönjohtamiskyvyn säilyminen
- Lämmönsiirtomateriaalin oikea paksuus
- Kestävyys suuriin ja nopeisiin lämpötilan muutoksiin
- Lämmönsiirtomateriaalin toimivuus laitteen ääriolosuhteissa
- Lämmönsiirtomateriaalin elinkaari
- Pohjalevyn mahdollinen taipuminen.

5.3 Lämmönsiirtomateriaalien kestotestaus

Lämmönsiirtomateriaalin yksi tärkeimmistä vaateista on että materiaali kykenee johtamaan tehokkaasti lämpöä vielä vuosien jälkeen. Yksi tärkeimmistä tavoista tutkia lämmönsiirtomateriaaleja on siis kestotestin testit joissa materiaalit joutuvat alttiiksi jatkuvalla rasitukselle.

ABB:llä on testilaitteisto joka on kehitetty erityisesti lämmönsiirtomateriaalien pitkäkestoiseen testaamiseen. Laitteeseen pystytään asettamaan samanaikaiseen testaukseen yhdestä viiteen eri lämmönsiirtomateriaalia, joita ajetaan jatkuvalla syklijajolla.

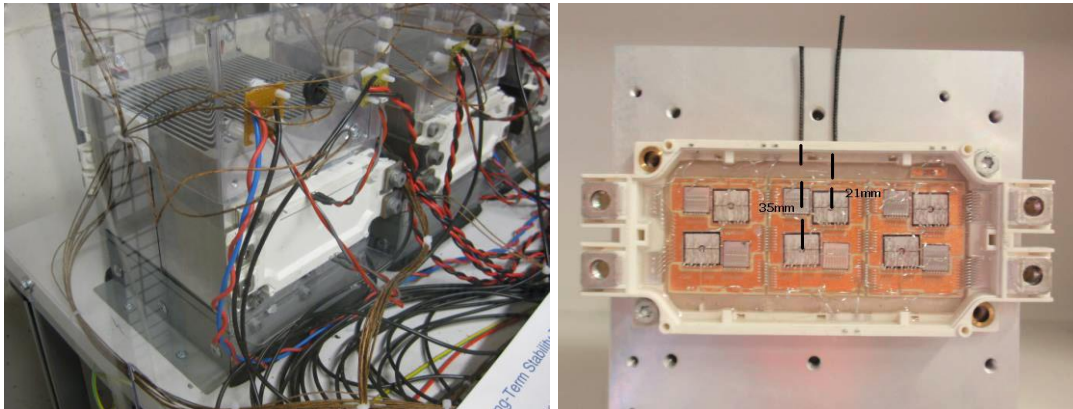


Kuva 24. Lämmönsiirtomateriaalin syklaus ja lämpötila trendit. [19]

Testerissä on viisi puhaltimella varustettua putkimaista testaus pistettä, joissa kussakin on kaksi jäähdytyslementtiä. Testerissä on kymmenen IGBT-moduulia kiinnitettynä yksi kuhunkin jäähdytyslementtiin. Jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia keskenään, ovat IGBT-moduulit valittu tarkalla valintaprosessilla. IGBT-moduuleista on mitattu päästöjännitteet sekä vertailtu moduulien ylä- ja alahaaraa. Mitatuista moduuleista on valittu keskenään identtisimmät testattavaksi testeriin, näin muuttujat on pyritty saamaan minimiin.

Jäähdytyslementtien sisään IGBT-moduulien puolijohteiden kohdille on asennettu termoelementtilankaa, tällä mitataan elementin kuumimpia kohtia. Myös IGBT-moduuleihin on tehty vastaava toimenpide pohjalevyyn. Näin pystytään mittaamaan

tehokkaasti lämmönsiirtomateriaalin toimivuutta, kun nähdään miten lämpö kulkee materiaalin läpi. Myös ilman sisään ja ulostulo lämpötilaa mitataan.



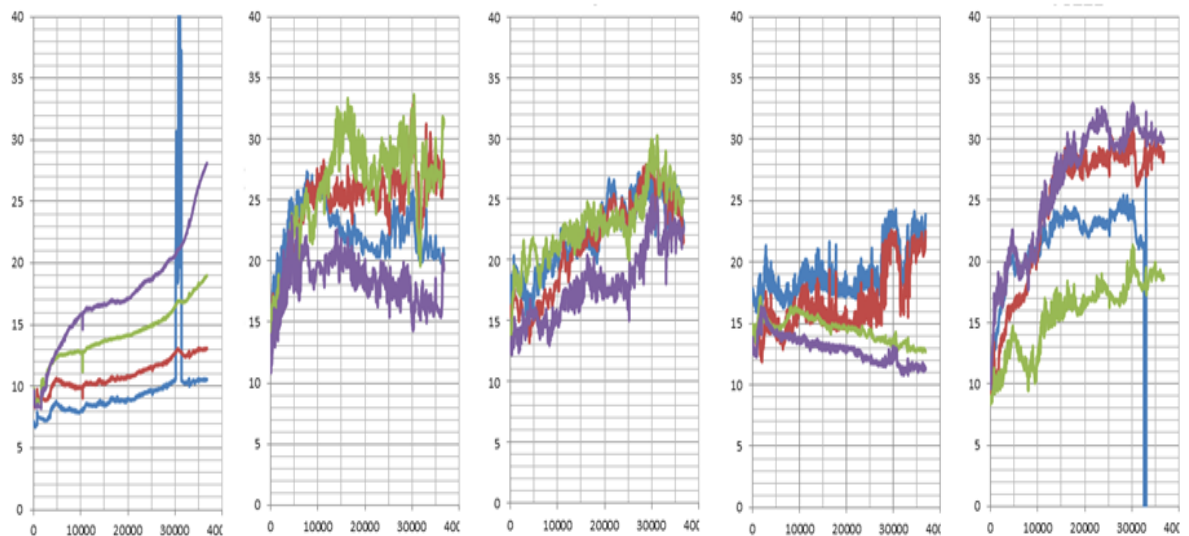
Kuva 25. Testerin rakennetta ja termoelementtien sijainti. [19]

Tässä testissä on keskitytty pelkästään lämmönsiirtomateriaalien testaukseen. Testerin rakenteesta johtuen siihen eivät vaikuta samat muuttujat, joten laite antaa kaikille rasvoille lähes identtiset lähtökohdat testiin. Tietenkään ei voida poissulkea IGBT-moduulien kulumista, mutta lähtökohtaisesti kaikki lähtevät samalta viivalta.

Pidän testerin syklausen lämpötiloja liian matalina, jotta ne simuloisivat riittävän hyvin taajuusmuuttajien lämpötiloja. Toisaalta on otettava huomioon, etteivät asiakkaat ota laitteesta jatkuvasti nimellistä virtaa tai rasita laitetta näin nopeatempoisilla sykliajoilla.

Testissä lämmönsiirtomateriaaleja rasitetaan huomattavasti hillitymmin, silti on selvästi nähtävissä, että rasvat menettävät kykyään johtaa lämpöä. Tämä ilmiö alkaa tulla esiin jo muutaman tuhannen syklin jälkeen.

Kuvasta 26 nähdään viiden eri lämmönsiirtorasvan käyttäytyminen testerissä.



Kuva 26. Nähtävissä viiden eri lämpörasvan testaustuloksia [19]

Osassa trendejä on nähtävissä ristiriitaisuuksia muista testeistä saatujen tulosten kanssa. Tämä kertoo siitä, kuinka vaikeaa lämmönsiirtomateriaalia on arvioida. Pienikin muutos ympäristössä voi vaikuttaa lämmönjohtumiskyvyn heikkenemiseen tai parantumiseen. Myös testerin toiminta eroaa taajuusmuuntajan toiminnasta ja sen muuttujista.

6 Johtopäätökset

Testeissä on selvästi havaittavissa, että ajan myötä lämmönsiirtoaineet menettävät kykyään johtaa lämpöä. Toisaalta osa heikkenemisestä johtuu pohjalevyn ominaisuuksien muuttumisesta. Erilaisten metalliseoskalvojen testitulokset ovat olleet hyvin lupaavia, mutta vähäisten testien pohjalta on vaikea tehdä vielä pitäviä johtopäätöksiä.

Työssä havaittiin, että muuttujia on todella paljon ja ne vaihtelevat ympäristön ja laitteiden rakenteellisten erojen mukaan. Lämmönsiirtomateriaalien kykyä johtaa lämpöä pystytään parantamaan selvästi ottamalla huomioon lämmönsiirtomateriaalin ja pohjalevyn paksuus sekä kiinnityskohtien paikat. Laitteen elinkaaren kannalta on tärkeää tutkia myös materiaalien kestävyyttä

Tämän hetkisinä testeistä saaduilla tuloksilla pystytään tekemään vain oletuksia siitä, mitä lämmönsiirtomateriaaleille tapahtuu taajuusmuuttajassa. Siksi on tärkeää, että aihetta tutkitaan ja testeistä kerätään arvokasta tutkimusmateriaalia. Tärkeää olisi myös tehdä toistoja testeillä, jotta tulokset olisivat luotettavampia.

		Lämmönsäätömaterialit						IGBT-moduulin ja pohjalevyn muutujat								Lämmönsäätömaterialin muutujat								Jäähdytysalustan muutujat									
		Materiaali A	Materiaali B	Materiaali C	Materiaali D	Kalvo A	Kalvo B	Pohjalevyn paksuus	Pohjalevyn taipuminen	IGBT:n muutokset lämpötiloihin	Kiinnityskohtien lyhyt välimatka	Kiinnitysmomentti	Puolihtojen sijoittelu	Valmistaja	Pinnan tasaisuus	Pinta-ala	Kyky johtaa lämpöä	Elintsaari	Paksuus	Momentti	Välillä jäävä ilma	Lämpötilan vaihtelut	Viskositeetti	Rakenteelliset muutokset	Partikkelien määrä	Muoto/stensiilit	Ulkoinen neste/jäähdytys	Sisäinen neste/jäähdytys	Materiaali	Kosketuspinnan sileys	Koko/massa	Muotoilu	
Lämmönsäätömaterialit	Materiaali A							+	-	0	++	++	+	0	+	0	+	-	+	++	-	-	+	0	+	+	+	+	0	+	0	+	
	Materiaali B							+	-	0	++	++	+	0	+	0	+	+	-	++	-	-	0	0	+	+	+	+	0	+	0	+	
	Materiaali C							+	-	0	+	++	+	0	+	0	+	+	-	0	++	-	0	+	0	+	++	+	0	+	0	+	
	Materiaali D							+	-	0	++	++	+	0	+	0	+	+	-	++	-	-	-	0	+	+	-	+	0	+	0	+	
	Kalvo A							+	-	0	+	+	0	0	+	0	+	+	?	++	+	0	+	++	?	0	0	?	+	0	+	0	+
	Kalvo B							+	-	0	+	+	0	0	+	0	+	+	+	+	+	0	-	++	+	0	0	+	+	+	0	+	
IGBT-moduulin ja pohjalevyn muutujat	Pohjalevyn paksuus	+	+	+	+	+	+		+	+	++	+	0	+	+	-	+	+	+	0	0	0	0	0	+	+	+	0	++	+	+		
	Pohjalevyn taipuminen	-	-	-	-	-	-	+	-	++	+	-	0	0	-	-	-	0	0	-	-	-	-	+	0	-	0	0	0	+	+		
	IGBT:n muutokset lämpötiloihin	0	0	0	0	0	0	+	-		+	+	++	-	+	+	++	+	+	+	-	-	0	-	+	0	+	+	+	+	+		
	Kiinnityskohtien lyhyt välimatka	++	++	+	++	+	+	+	++	+		+	-	0	+	+	++	+	0	+	-	0	-	0	0	+	-	-	+	+	+		
	Kiinnitysmomentti	++	++	++	++	+	+	++	+	+	+		0	0	+	0	+	+	+	+	+	-	+	+	0	0	+	+	-	+	0	+	
	Puolihtojden sijoittelu	+	+	+	+	0	0	+	-	++	-	0		0	0	+	+	+	0	0	0	+	0	0	0	+	0	0	0	0	+	0	
	Valmistaja	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Pinnan tasaisuus	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	0	0		+	+	+	+	+	++	+	-	-	0	+	+	+	+	++	+	0	
	Pinta-ala	0	0	0	0	0	0	+	-	+	+	0	+	0	+		0	0	-	0	-	0	0	0	0	+	+	+	0	+	+	0	
Lämmönsäätömaterialin muutujat	Kyky johtaa lämpöä	+	+	+	+	+	+	-	-	++	++	+	+	0	+	0	+	-	+	+	-	-	+	-	++	+	+	+	+	+	+	+	
	Elintsaari	-	-	-	-	?	+	+	-	+	+	+	0	+	0	-	+	+	0	-	-	+	-	+	0	-	-	+	+	0	0	0	
	Paksuus	+	+	0	+	++	+	+	0	+	0	+	0	0	+	-	+	+	++	-	-	+	+	0	+	0	0	0	0	0	0	0	
	Momentti	++	++	++	++	+	+	+	0	+	+	+	0	0	+	0	+	0	++	+	+	-	+	0	0	+	0	0	0	+	0	0	
	Välillä jäävä ilma	-	-	-	-	0	0	0	-	-	-	+	0	0	++	-	-	-	-	+		-	0	0	0	+	0	0	0	+	0	0	
	Lämpötilan vaihtelut	-	-	0	-	+	-	0	-	-	0	-	+	0	+	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	+	-	-	0	0	+	0	
	Viskositeetti	+	0	+	-	++	++	0	-	0	-	+	0	0	-	0	+	+	+	+	0	-	-	+	+	+	+	+	0	+	0	0	
	Rakenteelliset muutokset	0	0	0	0	?	+	0	-	-	0	+	0	0	-	0	-	-	+	0	0	-	-		0	-	-	-	0	0	0	0	
	Partikkelien määrä	+	+	+	+	0	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0	++	+	0	0	0	0	0	+	0		0	0	0	0	+	0	0
	Muoto/stensiilit	+	+	+	+	0	0	+	0	0	+	0	+	0	+	+	+	0	+	+	+	+	+	-	0		0	0	0	+	0	0	0
Jäähdytysalustan muutujat	Ulkoinen neste/jäähdytys	+	+	++	-	?	+	+	-	+	-	+	0	0	+	+	+	-	0	0	0	-	+	-	0	0		+	+	+	+	+	
	Sisäinen neste/jäähdytys	+	+	+	+	+	+	+	0	+	-	+	0	0	+	+	+	-	0	0	0	-	+	-	0	0		+	+	+	+	+	
	Materiaali	0	0	0	0	0	+	0	0	+	+	-	0	0	+	0	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+		0	+	+	
	Kosketuspinnan sileys	+	+	+	+	+	+	++	0	+	+	+	0	0	++	+	+	0	+	+	+	0	+	0	+	+	+	+	0	0	0	0	
	Koko/massa	0	0	0	0	0	0	+	+	+	+	0	+	0	+	+	+	0	0	0	0	+	0	0	0	0	+	+	+	0		+	
	Muotoilu	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	0	0	+	+	

++	Positiivinen vaikutus
+	Vähäinen positiivinen vaikutus
0	Ei vaikutusta tai vaikutus todella vähäinen
-	Vaikutus negatiivinen
	Ei arvioida keskenään
?	Vaikutusta ei tiedetä

Taulukko 2. Arvioita muuttujien vaikutuksista toisiinsa.

7 Yhteenveto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä yhteenveto ABB:n testeistä, sekä pyrkiä tunnistamaan muuttujia, jotka vaikuttavat lämmönsiirtomateriaalin valintaan. Lämmönsiirtomateriaalien muuttujien ja toiminnan tunteminen on tärkeää, jotta laitteille voidaan taata riittävä jäähtyminen ja estää sitä rikkoontumasta lämmöstä aiheutuviin vikamekanismeihin.

Työssä on pyritty tarkastelemaan erityisesti IGBT-moduulin toimintaan vaikuttavia muuttujia. Työn alkupuolella on haluttu perehdyttää lukijaa aiheeseen kertomalla taajuusmuuttajan ja IGBT-moduulin toiminnasta, sekä kerrottu lämmön eri siirtymismuodoista. Työn loppupuolella on keskitytty muuttujiin, jotka vaikuttavat lämmönsiirtomateriaaleihin sekä esitelty tutkimuksista saatuja tuloksia.

Aiheeseen liittyvää kirjallisuutta on vielä suhteellisen vähän ja lämmönsiirtomateriaalien tuntemus on vielä vähäistä. Erityisesti materiaalien suorituskykyyn liittyvissä tutkimuksissa on paljon ristiriitaisia tuloksia ja päätelmiä. Tutkimusten lisääntyessä tieto ja ymmärrys lämmönsiirtomateriaalien toiminnasta tulee lisääntymään. Tulevaisuudessa lämmönsiirtomateriaalien toimintaa voidaan simuloida, kunhan tieto materiaalien käyttäytymisestä ja ominaisuuksista lisääntyy.

Työn perusteella voidaan päätellä, että vaikka lämmönsiirtomateriaaleja pidetään välttämättöminä IGBT-moduulien jäähdytyksessä, ei niistä tiedetä riittävästi. Jatkossa lämmönsiirron parantaminen on aloitettava jo IGBT-moduulin suunnittelussa ja lämmönsiirtomateriaalit on yksilöitävä moduuli kohtaisiksi. Ei ole olemassa yhtä lämmönsiirtomateriaalia, joka antaisi kaikilla alustoilla parhaan lämmönjohtokyvyn, koska ympäristön muuttujat vaihtelevat. Kun aihetta aletaan ymmärtämään paremmin on todennäköistä, että tutkimustyötä voidaan helpottaa erilaisilla simulointiohjelmilla.

Tulevaisuudessa todennäköisesti erilaiset metalliseoskalvot valtaavat alaa, monien hyvien ominaisuuksiensa johdosta. Toinen tulevaisuudessa lisääntyvä suuntaus IGBT-moduulien lämmönjohtamisessa saattaa olla moduulit, jotka on rakennettu pohjalevyille, joka toimii samalla jäähdytyslementtinä.

Lähteet

- 1 Niiranen, J. Tehoelektroniikan komponentit. neljäs painos. Helsinki, Tekijä ja Otatieto, 2007.
- 2 Lounila, M. IGBT, Julkaisematon materiaali, ABB Oy Drives, Helsinki, 2007.
- 3 Mattila, M. Lämpötilan vaihteluiden vaikutukset vaihtosuuntaajan IGBT-moduuliin (Insulated Gate Bipolar Transistor). Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta. Espoo, 2008.
- 4 Young, H.D. ja Freedman, R.A. University Physics. 11. Painos. San Fransisco, Addison Wesley 2004
- 5 H.matsuda, M Hiyoshi, N.Kawamura, Pressure contact assembly technology of high power devices, Power semiconductor Devices and IC's 1997, IEEE Internal Symposium
- 6 Wakeman, F. ja Lockwood, G.ELctromechnical evaluation of a bondless pressure contact IGBT IEE Proceeeding Circuits, Devices & Systems, Verkkolehti, 2001, vol148, nro 2.
- 7 Vulli, A. Lämmönsiirtoaineet IGBT-moduulin lämmönhallinnassa. Kandidaatti, Aalto-yliopisto, Elektroniikan ja sähkötekniikan koulutusohjelma
- 8 Varjonen, I. Thermal Greases and Heat Conduction in Power Electronis. Lämpötekniikan erikoistyö, Teknillinen Korkeakoulu ja ABB Oy, Espoo, 2009.
- 9 Bodo's Power Systems. May 2010. Power Modules, -How to avoid errors when applying thermal paste. ISSN: 1863-5598 s. 36
- 10 Kantola, J. Testerin rakentaminen, Lämmönsiirtorasvan kiihdytetty elinkaaritestaus. Insinöörityö, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Sähkötekniikka. Helsinki, 2011
- 11 Honkonen, Heli Marja. Mustan kappaleen säteily opetuksessa. Pro gradu, Helsingin yliopisto, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta, Fysiikan laitos, 2012

- 12 Blomster, T. Nurmela, T. Fysiikkaa integroidusti metallialan perustutkinnossa, Lämpölaajeneminen havainnollisesti. Kehittämishankeraportti, Jyväskylän Ammattikorkeakoulu, Sähkötekniikka. Jyväskylä, 2007
- 13 Varjonen, I. Keskustelu lämmönsiirtomateriaaleista ja suurimmista ongelmista. Helsinki 22.01.2014
- 14 Silvennoinen, M. Palaveri lämmönsiirtomateriaaleista eri taajuusmuuttaja rungoilla ja IGBT:llä. ABB Oy Drives, Helsinki, 11.02.2014
- 15 Bodo's Power Systems. May 2010. Power Modules, -How to avoid errors when applying thermal paste. ISSN: 1863-5598 s. 36
- 16 Borghoff, G. Nuebel, T. Spanke, R. Woelz, M.
<http://www.google.com/patents/US8148198>, 03.04.2012
- 17 Manninen, J. Keskustelu lämmönsiirtomateriaaleista ja IGBT-moduulien muuttujista. ABB Oy Drives, Helsinki, 26.02.2014
- 18 Mörsky, H. Silvennoinen, M. ABB Baldorin kestopäätteen tuotokset. Julkaisematon materiaali, ABB Oy Drives, Helsinki, 2014
- 19 Varjonen, I. Vulli, A. Thermal Grease Long-Term Test, Julkaisematon materiaali, ABB Oy Drives, Helsinki, 2014
- 20 Mörsky, H. Silvennoinen, M. ABB Forth Smith kestopäätteen tuotokset. Julkaisematon materiaali, ABB Oy Drives, Helsinki, 2014
- 21 Silvennoinen, M. ABB Jäähdytysalustan sisäinen nestejäähdytys. Julkaisematon materiaali, ABB Oy Drives, Helsinki, 2014