



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jim Häggblom

TAAJUUSKORJAUSKERTOIMEN MÄÄRIT-
TELY IGBT-MODUULILLE OPTISEN SENSO-
RIN AVULLA

Tekniikka
2022

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Jim Häggblom
Opinnäytetyön nimi	Taajuuskorjauskertoimen määrittely IGBT-moduulille optisen sensorin avulla
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	43 + 2 liitettä
Ohjaaja	Marko Iskala

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on tutkia IGB-transistorin sirun lämpötilan laskentaan käytetyn taajuuskorjauskertoimen määrittelyä, mittaamalla IGBT:n lämpötila käyttäen optista lämpötilasensoria. Saatujen mittaustuloksien perusteella voidaan laskea taajuuskorjauskerroin ja verrata tuloksia IGBT-valmistajan simulaatio-ohjelman antamiin korjauskerroinlaskelmiin. Opinnäytetyössä käydään läpi, miten korjauskerroin lasketaan ja kuinka lämpötilamittaus optisella sensorilla suoritetaan käytännössä Danfoss Drivesin testauslaboratoriossa.

Opinnäytetyön teoreettisessa osuudessa käsitellään IGBT:n häviölaskentaa, liitoskohdan lämpötilalaskentaa ja lämpötilan mittausta kuituoptiikalla. Mittausosiossa käydään läpi, kuinka lämpötilamittaukset suoritettiin käytännössä kahdelle eri moduulille ja kuinka taajuuskorjauskerroin lasketaan matemaattisesti. Lähtötietoina toimivat IGBT-valmistajien manuaalit, Danfoss Drivesin sisäiset laskentatyökalut ja mitatut lämpötila-arvot.

Taajuuskorjauskertoimien laskeminen eri lähtötaajuuksille mitatun datan perusteella onnistui hyvin. IGBT:t käyttäytyivät samalla tavalla korkeilla lähtötaajuuksilla, mutta taajuutta laskiessa poikkeuksia oli havaittavissa. Tämä ei ollut odotettavissa, vaikka toisessa IGBT:ssa oli hieman kehittyneempää tekniikkaa. Optinen lämpötilamittaus osoittautui erittäin tarkaksi ja luotettavaksi ja sitä voidaan jatkossakin käyttää tapauksissa, missä tarvitaan tarkkaa lämpötiladataa.

ABSTRACT

Author	Jim Häggblom
Title	Low frequency correction factor definition for IGBT-module by optical sensor
Year	2022
Language	Finnish
Pages	43 + 2 appendices
Name of Supervisor	Marko Iskala

The purpose of this thesis is to study how the frequency correction factor can be defined by measuring the temperature of the IGBT chip with an optical sensor. Based on the measured temperatures we can calculate the correction factor and compare the results with the IGBT manufacturers simulated calculations. In this thesis we will go over, how the correction factor is calculated and how the temperatures are measured with the optical sensor in practice.

In the theoretical part of the thesis, we will deal with IGBT loss calculation, junction temperature calculation and measuring temperature with fiber optics. In the measurements part we will deal with how the temperature measuring is done in practice on two different IGBT-modules and how the correction factor is calculated mathematically. The IGBT manufacturer manuals, Danfoss Drives in-house calculation programs and measured temperature data are used as source material for this study.

Calculating frequency correction factors for different output frequencies based on the measured results were performed successfully. Some small discrepancies were observed when comparing the results, but this was not expected since the IGBTs represent different generations. The measuring of temperature by optical sensor proved to be very exact and trustworthy and it could be used in the future on applications in need of precise temperature data.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVALUETTELO

KUVAAJA- JA TAULUKKOLUETTELO

LIITELUETTELO

TERMIT

1	JOHDANTO.....	10
2	VACON OYJ JA DANFOSS DRIVES VAASA.....	11
3	TAAJUUSMUUTTAJA.....	13
4	IGBT	14
	4.1 IGBT:n historia.....	15
	4.2 IGBT:n suojaukset	16
5	IGBT:N HÄVIÖLASKENTA	18
	5.1 Yksinkertaistettu häviölaskentatapa.....	18
	5.2 PWM jännitevaihtosuuntaajankäytön häviölaskentatapa	20
6	LIITOSKOH DAN LÄMPÖTILALASKENTA.....	24
	6.1 Liitoskohdan pysyvän tilan lämpötilalaskenta.....	24
	6.2 Liitoskohdan hetkellinen lämpötilalaskenta	26
7	LÄMPÖTILAMITTAUS KUITUOPTIIKALLA	27
	7.1 OpSens PicoM-mittalaite	28
	7.2 OpSens OTG-M170-anturi.....	29
8	LÄMPÖTILAMITTAUKSET	30
	8.1 Valmistelut	30
	8.2 Mittaukset.....	33
9	TAAJUUSKORJAUSKERTOIMEN LASKELMAT JA TULOKSET	35
10	ANALYYSI	38
11	YHTEENVETO	40
	LÄHTEET	42

KUVALUETTELO

Kuva 1. Taajuusmuuttajan pääpiirikaavio.....	13
Kuva 2. IGBT:n piirrosmerkki ja sijaiskytkentä.....	14
Kuva 3. PT IGBT:n rakenne.....	15
Kuva 4. Virranmittausshuntteja IGBT-sirujen alapuolella kuvan alalaidassa	16
Kuva 5. Sensoreiden sijainti IGBT-moduulin sisällä.	17
Kuva 6. PWM-moduloidun signaaliin rakenne	20
Kuva 7. Liitoskohdan lämpötilan laskutavan periaate visualisoituna.....	25
Kuva 8. Eri lämpötilojen ja lämpöresistanssien mittauskohdat.	25
Kuva 9. OpSens PicoM-mittalaite.	28
Kuva 10. OpSens OTG-M170-lämpötila-anturi.	29
Kuva 11. OTG-M170-anturin mittapään kokoverailu	29
Kuva 12. Testauskokoontapano asennettu testausuuniin ATP2.1.	30
Kuva 13. OpSens OTG-M170-lämpötila-anturi IGBT sirun pinnassa.	31
Kuva 14. Testausaseman yleisnäkymä.....	32
Kuva 15. Mittausohjelmistojen mittausnäytöt mittauksien aikana.	34
Kuva 16. IGBT-piirin lämpötila eri lähtötaajuuksilla ajanjakson funktiona.....	35
Kuva 17. IGBT 1 lämpötilan mittauskäyrä.....	38
Kuva 18. 0,01 Hz lähtötaajuuden lämpötilakäyrä ajan funktiona.	39
Kuva 19. Puristukseen jäänyt anturinjohdo.	40

KUVAAJA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvaaja 1. Taajuuskorjauskertoimet taajuuden funktiona.	37
Taulukko 1. Mittausmatriisi.	33
Taulukko 2. Mitatut arvot IGBT 1.	36
Taulukko 3. Mitatut arvot IGBT 2.	36
Taulukko 4. Taajuuskorjauskerroin IGBT 1.	37
Taulukko 5. Taajuuskorjauskerroin IGBT 2.	37

LIITELUETTELO

LIITE 1. IGBT 1 Mittausdata ja graafit.

LIITE 2. IGBT 2 Mittausdata ja graafit.

LYHENTEET JA TERMIT

F _{corr}	Taajuuskorjauskerroin
IGB-transistori	Insulated Gate Bipolar Transistor, puolijohde
Softmold	Eristävä silikonimassa
DCB	Direct Bond Copper, puolijohdekomponentin pohjamateriaali
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning, lämpö, vesi, ilmastointi
I/O	Input/Output, sisääntulo/ulostulo
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, puolijohde
PT	Punch Through, IGBT:n valmistustapa
P-N-P	Positive-Negative-Positive, puolijohteen rakennemateriaalin seostetapa
Shuntti	Virranmittaukselle määritelty vastus
PTC	Positive Temperature Coefficient, termistori
NTC	Negative Temperature Coefficient, termistori
P _{tot(T)}	Transistorin kokonaishäviöt
P _{cond(T)}	Transistorin johtavassa tilassa syntyvät häviöt
P _{on}	Transistorin päälle kytkennän häviöt
P _{off}	Transistorin poiskytkennän häviöt

$P_{\text{tot(D)}}$	Diodin kokonaishäviöt
$P_{\text{cond(D)}}$	Diodin johtavassa tilassa syntyvät häviöt
P_{rr}	Diodin poiskytkennän häviöt
$P_{\text{tot(M)}}$	IGBT-moduulin kokonaishäviöt
n	Määrä
PWM	Pulssileveysmodulaatio
T_a	Ympäristön lämpötila
T_c	Kotelon lämpötila
T_j	Liitoskohdan lämpötila
T_s	Jäähdytys-elementin lämpötila
R_{th}	Lämpöresistanssi
$R_{\text{th(j-c)}}$	Lämpöresistanssi, liitos - kotelo
$R_{\text{th(c-s)}}$	Lämpöresistanssi, kotelo - jäähdytys-elementti
$R_{\text{th(s-a)}}$	Lämpöresistanssi, jäähdytys-elementti - ympäristölämpötila
GaAs	Galliumarsenidi, puolijohde
°C	Celsiusaste

1 JOHDANTO

Taajuusmuuttajassa on sisäänrakennettu IGB-transistorien yllämpenemissuoja, joka perustuu liitoskohdan lämpötilaan. Yllämpenemissuoja toimii hyvin joka ajo-taajuudella silloin, kun taajuuskorjauskertoimen laskenta on tehty oikein. Taajuus-korjauskertoimella ja IGBT:n liitoskohdan keskiarvolämpötilalla voidaan laskea lii-toskohdan maksimaalista lämpötilaa tietyllä taajuudella. Yllämpenemissuoja ha-lutaan kytkeytyvän päälle, ennen kuin saavutetaan sellainen liitoskohdan lämpö-tila, joka aiheuttaisi IGBT:n siruille vahinkoa.

Tämän opinnäytetyön toimeksiantona oli lisätä ymmärrystä taajuuskorjauskerto-i-mesta ja sen käytöstä. Yrityksellä on muutama tapa, millä taajuuskorjauskertoimia lasketaan ja tämän työn avulla voisi olla mahdollista kehittää yksi tapa lisää. Ny-kysisissä taajuusmuuttajissa on tyypillisesti yllämpenemissuoja, joka perustuu lii-toskohdan huippulämpötilaan.

Opinnäytetyön tavoite on hankkia lisää tietoa taajuuskorjauskertoimesta, lisätä tarkkuutta taajuuskorjauskertoimen laskennassa ja auttaa yllämpösuojauksien kehittämistä tulevaisuudessa. Tässä työssä käytetään optista mittausmenetelmää, jolla mitataan liitoskohdan lämpötila käytön aikana. Samalla saadaan myös lisätie-toa optisen mittausjärjestelmän kyvykkyydestä ja sopivuudesta käyttökohtees-samme.

Työssä keskitytään kahden eri IGBT-valmistajien IGBT-moduuleihin. IGBT-moduu-lit ovat katalogituotteita, mutta tilattu ilman softmoldia DCB:in päällä, mittauksia varten. Toinen IGBT-moduuleista on käytössä nykysukupolven taajuusmuutta-jassa.

2 VACON OYJ JA DANFOSS DRIVES VAASA

Vacon on vuonna 1993 perustettu yritys, joka keskittyi taajuusmuuttajavalmistukseen ja kehitykseen. Yhtiön perusti 13 avainhenkilöä ja ensimmäinen tuote, Vacon CX, saatiin markkinoille vuonna 1995. Samoihin aikoihin alkoi maailmanlaajuiset toiminnot, kun Vacon avasi tytäryhtiöt Ruotsiin ja Saksaan.¹

Vuonna 2000 yhtiö esitteli ensimmäisin NX-sukupolven taajuusmuuttajan ja samana vuonna yhtiö listautui Helsingin pörssiin. Nimi muuttui täten Vacon Oyj:ksi. Tässä vaiheessa yhtiöllä oli jo 300 työntekijää kirjoillaan.¹

Vuonna 2002 yhtiö toi markkinoille NXP Liquid Cooled, eli nestejäähdytteisen taajuusmuuttajan, jolla pystyi tuottamaan jopa 5,3 MW: tehon. Tämä oli yhtiön yksi merkittävimmistä tuotteista, kooltaan ja suojauksiltaan, jolla saavutettiin luotto-toimittajan mainetta meriteollisuudelle ¹

Vuonna 2008 oli taas aika uudelle tuotesukupolvelle ja Vacon 100 julkistettiin. Yksi merkittävimmästä julkaistuista tuotteista oli Vacon 100 HVAC. Tuote oli ensimmäinen taajuusmuuttaja laatuun ja näytti suuntaa Vaconin taajuusmuuttajien kehitykselle, joka oli muuttunut enemmän toimialakohtaiseksi.¹

Vuonna 2014 perheyritys Danfoss osti Vaconin ja yhtiöt yhdistettiin. Vaconin liikevaihto ennen yritystoa vuonna 2014 oli 409,4 MEUR ja ostohinta oli n. 1 miljardi

¹ Vacon Oyj vuosikertomus 2013

euroa. Yhtiötä yhdistämällä Danfoss saavutti entistä vahvemman markkina-ase-
man ja sai samalla luotua pohjoismaisen globaalin toimijan taajuusmuuttajamark-
kinoille.²⁻³

Vuonna 2020 Danfoss Drives ilmoitti toimittavansa ison määrän taajuusmuuttajia
Wärtsilän uuteen Smart Technology Hubiin Vaasan Vaskiluotoon. Taajuusmuutta-
jat edustavat yhtiön uusinta sukupolvea ja niitä toimitettiin yhteensä 192 kpl.⁴

Vuonna 2021 saavutettiin merkkipaalu, kun viiden vuoden pitkä projekti aloitti
neitsytmatkansa. M/S Aurora Botnia, maailman ympäristöystävällisin matkustaja-
lautta, lähti Vaasan satamasta 28.8.2021. Danfoss Drives on toimittanut tähän pro-
jektiin uusimman sukupolven taajuusmuuttajia ja tämän lisäksi muiden toimitta-
jien kautta on toimitettu n. 100 kpl Vacon 100-sukupolven taajuusmuuttajaa.⁵

² Vacon Oyj vuosikertomus 2014

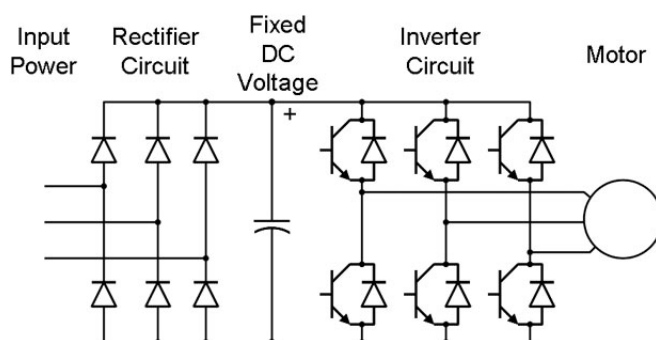
³ Salomäenpää, M. Tanskalainen Danfoss ostaa taajuusmuuttajavalmistaja Vaconin. Yle

⁴ Wärtsilä. 2020. Danfoss toimittaa satoja taajuusmuuttajia Wärtsilän uuteen Smart Technology Hubiin.

⁵ Danfoss. 2021. M/S Aurora Botnia pääsi odotetulle neitsytmatkalleen.

3 TAAJUUSMUUTTAJA

Taajuusmuuttajalla tarkoitetaan yleensä kokonaisvaltaista kuusi- tai kaksitoistapulsista taajuusmuuttajalaitetta. Kokonaisvaltaiseksi taajuusmuuttajalaitteeksi luokitellaan seinälle asennettavat, sähkökaapissa olevat ja IP00-moduulina sähkökaappiin asennettavat laitteet (**Kuva 1.**).



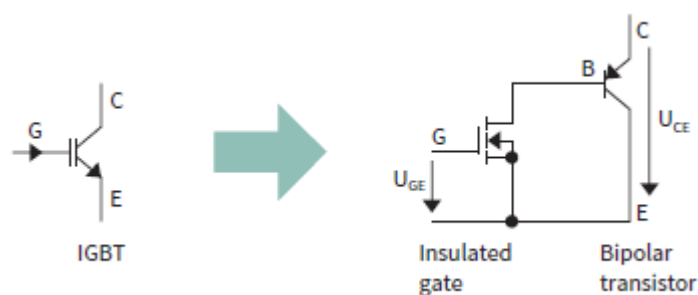
Kuva 1. Taajuusmuuttajan pääpiirikaavio

Vaconin taajuusmuuttaja koostuu mekaanisesti tehoyksiköstä, ohjausyksiköstä ja mahdollisesti yhdestä tai useammasta kuristimesta. Tehoyksikkö sisältää tasa-suuntaussillan, kuristimen, kondensaattorit ja IGBT-vaihtosuuntaajan. Nämä osat tuottavat yhdessä kolmevaiheisen, pulssileveysmoduloidun vaihtosähkön sähkömoottorille. Ohjausyksikkö sisältää mikroprosessorin omalla laiteohjelmistolla ja sovellusohjelmistolla. Mikroprosessori ohjaa sähkömoottoria mittauksien, parametrien, ohjaus I/O:n ja ohjauspaneelin avulla.⁶

⁶ Vacon Engineered Drives-manuaali

4 IGBT

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) on kolmella päätteellä varustettu tehopuolijohde, jolla suoritetaan sähköisiä kytkentöjä nopeasti ja korkealla hyötysuhteella.⁷



Kuva 2. IGBT:n piirrosmerkki ja sijaiskytkentä.⁸

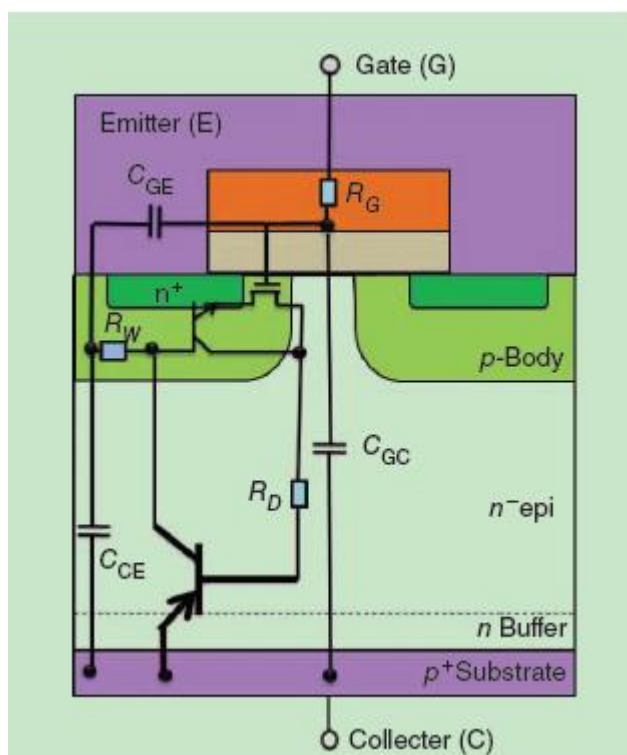
Niin kuin nimi "Insulated Gate Bipolar Transistor" jo paljastaa, IGBT on bipolaarinen transistori eristetyllä hilarakenteella. Hila on periaatteessa MOSFET-piiri ja se on yhdistetty bipolaariseen transistoriin. Sijaiskytkennän perusteella voidaan todeta, että IGBT:ssä yhdistyvät bipolaarisen transistorin ja MOSFETin parhaat puolet. Bipolaarisen transistorin kyky sietää suuria jännitteitä ja kytkemään isoja virtoja, MOSFETin melkein olemattomiin ohjaushäviöihin (**Kuva 2.**).⁸

⁷ IEEE power electronics magazine

⁸ IGBT The GE story

4.1 IGBT:n historia

IGBT:n keksijäksi on nimetty Jayant Baliga. Jayant työskenteli General Electricin tutkimuskeskuksessa. Vuonna 1980 hän esitti esimiehelleen, Tom Brockille IGBT-rakenteen, joka koostu n-kanavan MOSFETistä ja p-n-p-bipolaarisesta transistorista. Brock innostui IGBT:n käyttömahdollisuuksista ja otti yhteyttä GE:n puheenjohtaja Jack Welch. Welch antoi keksinnölle täyden tukensa. Ensimmäinen IGBT valmistettiin vuonna 1981 Kaliforniassa.⁸



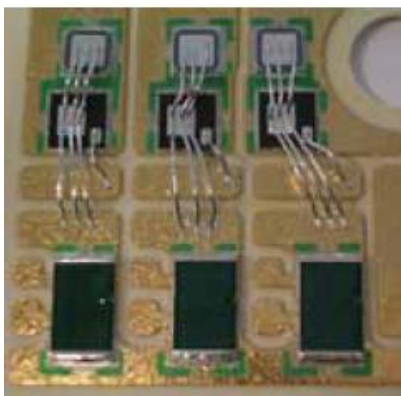
Kuva 3. PT IGBT:n rakenne.⁷

Ensimmäiset IGBT:t, jotka perustuivat PT-tekniikkaan, koostuivat kuvassa näkyvistä komponenteista ja puolijohdekerroksista. Kuvan yläosassa nähdään eristetty hila ja MOSFET-piiri, jolla ohjataan kuvan alaosassa olevaa bipolaarista transistoria. PT-tekniikka tunnistetaan n-bufferista, jolla saavutetaan nopeampia kytkentöjä, mutta estosuuntainen jännitekestoisuus on heikko (**Kuva 3.**).^{7,9}

4.2 IGBT:n suojaukset

IGBT-moduulissa ei sinänsä ole mitään sisäänrakennettua suojausmekanismia, mutta siihen on yleensä integroitu muutamia erilaisia sensoreita, joilla suojaukset voidaan toteuttaa.

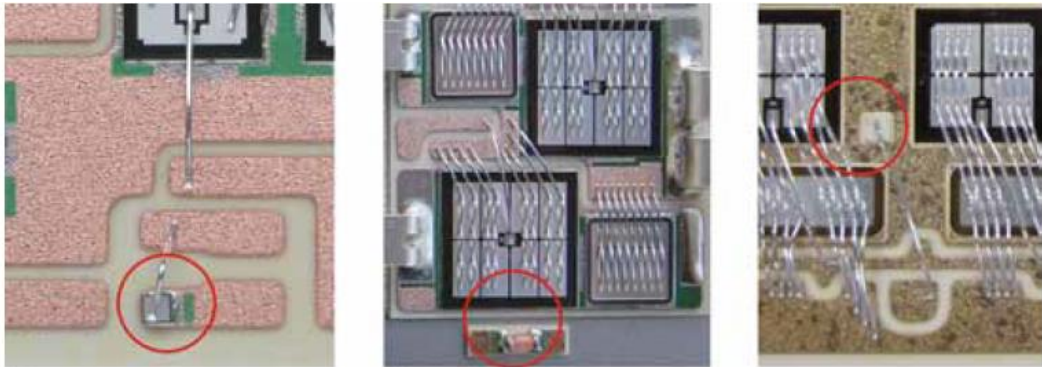
Integroitu virranmittaus voidaan suorittaa joko itse puolijohteella, mittaamalla $V_{CE(sat)}$ tai sitten shunteilla ja ohjainelektronikalla. Virtaa mitataan suojauksia varten, jotka suojaavat IGBT:n ylivirralla, mutta sitä voidaan myös käyttää erilaisiin säätötarkoituksiin.⁹



Kuva 4. Virranmittausshuntteja IGBT-sirujen alapuolella kuvan alalaidassa

⁹ Semikron application manual 2015

Integroitu lämpötilamittaus tehdään PTC- tai NTC-sensorilla, joka yleensä on juotettu samalle piirilevylle kuin IGBT:t. Koska lämpötilamittaus tehdään IGBT:n viirestä, ei IGBT:n oikeaa lämpötilaa saada tietää, vain jäähdytyslementin lämpötila. Lämpötilamittausta voidaan kuitenkin hyödyntää yllilämpösuojauksen laskentaan.⁹



Kuva 5. Sensoreiden sijainti IGBT-moduulin sisällä.⁹

5 IGBT:N HÄVIÖLASKENTA

Tehoelektronikassa IGBT käytetään kytkimenä, joka voidaan ohjata pysyvään tilaan tai sitten hyvin dynaamisesti tilaansa vaihtavana kytkimenä. Jokaisessa olotilassa muodostuu teho- tai energiahäviö, joka tuottaa lämpöä tehoelektronikka-komponentissa ja samalla kasvattaa komponentin kokonaishäviötä. Tämän takia joka käytölle on löydettävä sopiva IGBT ja sille sopiva jäähdytysmenetelmä, jotta valmistajan määrittelemä liitoskohdan maksimaalinen lämpötila ei ylitä käytön aikana.

Kokonaishäviöt voidaan jakaa johtavan tilan, kytkennän ja ohjauksen häviöihin. Johtavan tilan häviöihin kuuluu johto- ja estotilan häviöt. Kytkennän häviöihin kuuluu sytytys-, ja sammutushäviöt. Ohjauksen häviöt ovat niin pieniä, että niitä ei yleensä oteta huomioon.

5.1 Yksinkertaistettu häviölaskentatapa

Yksinkertaistetussa laskentatavassa oletetaan, että toimintajakso, kuorman virta ja liitoskohdan lämpötila eivät muutu laskun aikana, eli ovat pysyvässä tilassa.

IGBT:n kokonaishäviöt lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$P_{tot}(T) = P_{cond(T)} + P_{on} + P_{off} \quad (1)$$

Kaavassa $P_{cond(T)}$ esittää johtavassa tilassa syntyvät häviöt, P_{on} ja P_{off} esittävät kytkentähäviöt. $P_{cond(T)}$ häviöihin vaikuttavat kuorman virta, liitoskohdan lämpötila ja toimintajakso. P_{on} ja P_{off} häviöihin vaikuttavat kuorman virran lisäksi myös kuorman sähköiset ominaisuudet, välipiirin jännite, liitoskohdan lämpötila ja kytkentätaajuus.⁹

Diodin kokonaishäviö lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$P_{tot(D)} = P_{cond(D)} + P_{rr} \quad (2)$$

Kaavassa $P_{cond(D)}$ esittää johtavassa tilassa syntyviä häviöitä ja P_{rr} poiskytkentähäviöitä. $P_{cond(D)}$ häviöihin vaikuttavat kuorman virta, liitoskohdan lämpötila ja toimintajakso. P_{rr} häviöihin vaikuttaa kuorman virta, välipiirin jännite, liitoskohdan lämpötila ja kytkentätaajuus.

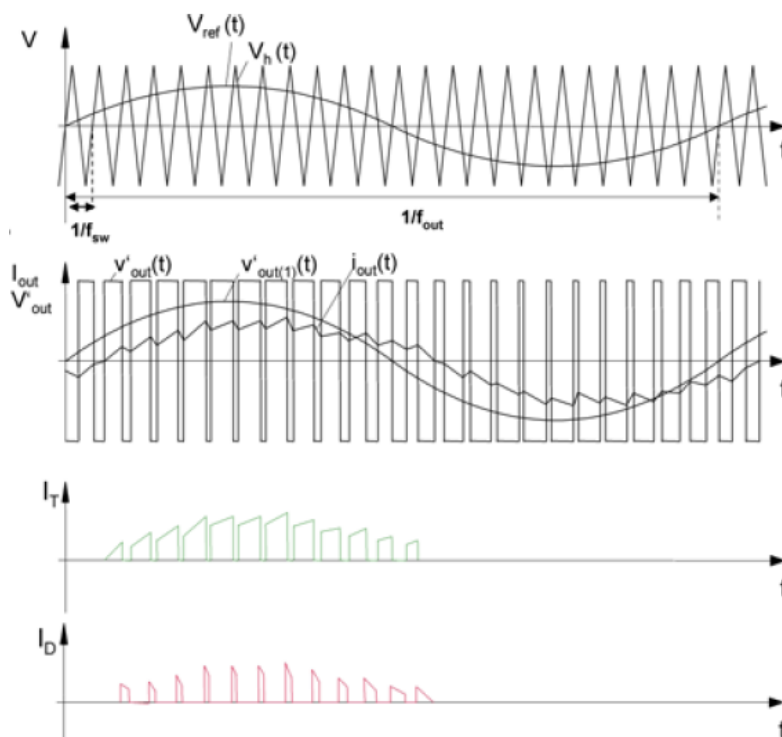
Moduulin kokonaishäviö lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$P_{tot(M)} = n * (P_{tot(T)} + P_{tot(D)}) \quad (3)$$

Kaavassa n esittää kytkimien määrän yhden moduulin sisällä. $P_{tot(T)}$ ja $P_{tot(D)}$ ovat IGBT:n ja diodin kokonaishäviöt.⁹

5.2 PWM jännitevaihtosuuntaajankäytön häviölaskentatapa

Kun siirrymme tarkistamaan PWM-tyyppistä jännitettä, on ymmärrettävä, miten modulaointi toimii. Kuvassa 6 esitetään, miten ohjaus tehdään sini-kolmiovertailijatyypisellä modulaattorilla.



Kuva 6. PWM-moduloidun signaaliin rakenne

Modulaatiokuvaio muodostetaan vertaamalla sinimuotoista referenssijännitettä V_{ref} kolmiomuotoiseen vertailujännitteeseen V_h . Riippuen siitä, onko V_{ref} pienempi tai suurempi kuin V_h , ohjataan IGBT:n ala- tai ylähaara päällä ja suuntaajan lähtöjännite ohjautuu välipiirin puolikkaan jännitteen korkeiseksi jännitepulsseiksi. Sini-muotoinen referenssijännite määrittää taajuuden f_{out} ja kolmiomuotoinen vertailujännite kytkentätaajuuden f_{sw} . Modulaointi-indeksi m kertoo V_{ref} ja V_h suhteesta toisiinsa ja lineaarisessa moduloinnissa m tulisi olla ≤ 1 (**Kuva 6.**)⁹

Tietyn ajanjakson keskimääräiset häviöt koostuvat kolmivaihe PWM-jännitevaihtosuuntaajassa johtavan tilan häviöistä ja kytkennän häviöistä. Tietyn ajanjakson yli voidaan laskea keskimääräiset häviöt käyttäen seuraavia kaavoja.

$$P_{cond(T)} = \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m * \cos(\varphi)}{8} \right) * V_{CE0}(T_j) * \hat{I}_1 + \left(\frac{1}{8} + \frac{m * \cos(\varphi)}{3\pi} \right) * r_{CE}(T_j) * \hat{I}_1^2 \quad (4)$$

Kaavalla (4) saadaan johtavan tilan keskimääräiset häviöt IGBT:n osalta.

$$P_{sw(T)} = f_{sw} * E_{on+off} * \frac{\sqrt{2}}{\pi} * \frac{I_{out}}{I_{ref}} * \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} * \left(1 + TC_{Esw} * (T_j - T_{ref}) \right) \quad (5)$$

Kaavalla (5) saadaan kytkennän keskimääräiset häviöt IGBT:n osalta.

Kaavoissa (4) ja (5) käytetyt parametrit ovat seuraavia:

- \hat{I}_1 Ulostulovirta, RMS
- m Modulointi-indeksi
- $\cos(\varphi)$ Tehokerroin
- $V_{CE0}(T_j)$ Lämpötilariippuva jännite
- $R_{CE}(T_j)$ Lämpötilariippuva resistanssi
- F_{sw} Kytkeätaajuus
- E_{on+off} Kytkeäenergia
- I_{out} Ulostulovirta
- $I_{ref}, V_{ref}, T_{ref}$ Referenssiarvoja datalehdessä
- V_{cc} Välipiirin jännite
- K_v Jänniteriippuvuuden eksponentti, IGBT $\sim 1,35$
- TC_{Esw} Kytkeähäviöiden lämpötilakerroin, IGBT $\sim 0,003$ 1/K
- T_j Liitoskohdan lämpötila

$$P_{cond(D)} = \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{m * \cos(\varphi)}{8} \right) * V_{F0}(T_j) * \hat{I}_1 + \left(\frac{1}{8} - \frac{m * \cos(\varphi)}{3\pi} \right) * r_F(T_j) * \hat{I}_1^2 \quad (6)$$

Kaavalla (6) saadaan johtavan tilan keskimääräiset häviöt diodin osalta.

$$P_{sw(D)} = f_{sw} * E_{rr} * \frac{\sqrt{2}}{\pi} * \left(\frac{I_1}{I_{ref}} \right)^{K_j} * \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} * \left(1 + TC_{Err} * (T_j - T_{ref}) \right) \quad (7)$$

Kaavalla (7) saadaan kytkennän keskimääräiset häviöt diodin osalta.

Kaavoissa (6) ja (7) käytetyt parametrit ovat seuraavia:

- \hat{I}_1 Ulostulovirta, RMS
- m Modulointi-indeksi
- $\cos(\varphi)$ Tehokerroin
- $V_{F0}(T_j)$ Lämpötilariippuva jännite
- $R_F(T_j)$ Lämpötilariippuva resistanssi
- F_{sw} Kyt kentätaajuus
- E_{rr} Kytkennöissä energimäärä
- I_{out} Ulostulovirta
- $I_{ref}, V_{ref}, T_{ref}$ Referenssiarvoja datalehdessä
- V_{cc} Välipiirin jännite
- K_j Virtariippuvuuden eksponentti, diodi $\sim 0,6$
- K_v Jänniteriippuvuuden eksponentti, diodi $\sim 0,6$
- TC_{Esw} Kytkentähäviöiden lämpötilakerroin, diodi $\sim 0,006$ 1/K
- T_j Liitoskohdan lämpötila

Kaavat (4), (5), (6) ja (7) ovat jonkun verran yksinkertaistettuja, mutta helppoja käyttää, koska kaavioissa esiintyvät arvot ovat helposti mitattavissa ja löydettävissä IGBT:n datalehdessä. Kaavojen antamat tulokset ovat suuntaa antavia, mutta silti kelvollisia käyttää keskimääräisten häviöiden laskemiseen. Saadut tulokset summataan ja kerrotaan kytkimien määrällä, joka on kolmivaihe IGBT-moduulissa 6 kpl, tällöin saadaan IGBT-moduulin keskimääräiset kokonaishäviöt P_v .⁹

6 LIITOSKOHDAN LÄMPÖTILALASKENTA

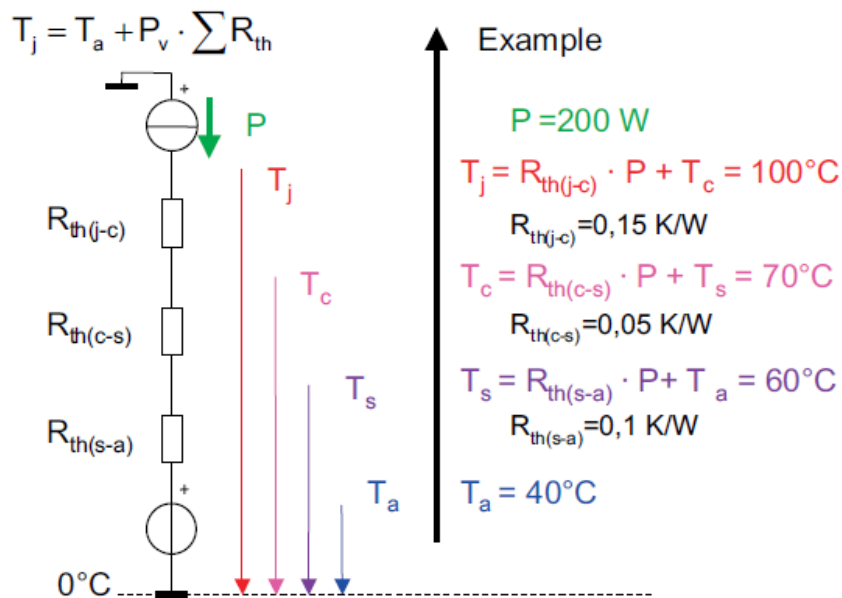
6.1 Liitoskohdan pysyvän tilan lämpötilalaskenta

Liitoskohdan pysyvän tilan lämpötila voidaan laskea, kun tiedetään häviöt. Lämpötilan laskemiseen tarvitaan tunnetun lämpöresistanssin arvo ja kyseisen lämpöresistanssin vertailupisteen lämpötila (**Kuva 8.**).

$R_{th(j-s)}$ saadaan datalehdessä tai laskemalla lämpöresistanssit erikseen $R_{th(j-c)} + R_{th(c-s)}$, kun loppulämpötila on saavutettu. $R_{th(s-a)}$ pitää laskea käytetyn jäähdytyslementin mukaan. Kun $R_{th(j-a)}$ on tiedossa, voidaan käyttää seuraava kaava:

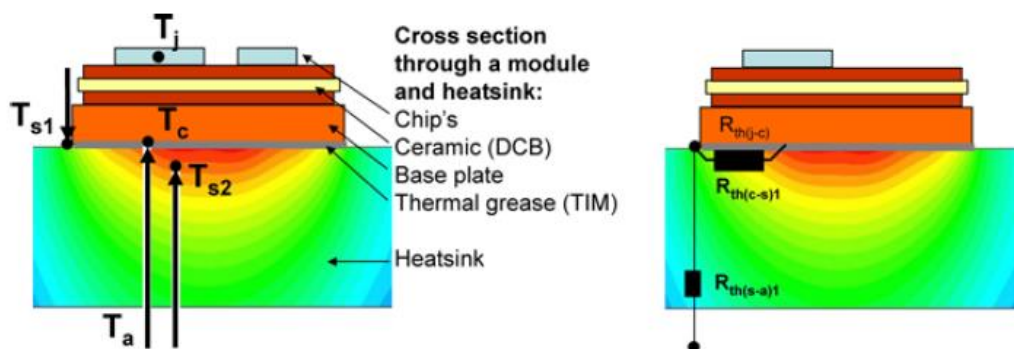
$$T_j = T_a + P_v * \sum R_{th} \quad (8)$$

Kaavassa (8)(8)(8) summataan ympäristön lämpötila arvoon, joka saadaan kertomalla kokonaishäviöt lämpöresistanssien summalla. Lopputulos on liitoskohdan lämpötila. Kaavassa ei ole huomioitu aikavakioita, joten tulos on pysyvän tilan liitoskohdan lämpötila.⁹



Kuva 7. Liitoskohdan lämpötilan laskutavan periaate visualisoituna.⁹

Liitoskohdan lämpötilan laskentaa voidaan myös esittää visuaalisesti. Siinä nähdään myös, missä järjestyksessä eri lämpöresistanssit sijoittuvat lämpömallissa (Kuva 7.).



Kuva 8. Eri lämpötilojen ja lämpöresistanssien mittauskohdat.

IGBT-moduulin ja jäähdytys-elementin lämpötilat ja lämpöresistanssit mitataan eri mittauskohdista. Lämpötilojen mittauskohdat T_j , T_c , T_{s1} , T_{s2} ja T_a näkyvät kuvan vasemmalla puolella ja mistä mittauskohdista lämpöresistanssit $R_{th(j-c)}$, $R_{th(c-s)}$ ja $R_{th(s-a)}$ muodostuvat on esitetty kuvan oikealla puolella (Kuva 8.).⁹

6.2 Liitoskohdan hetkellinen lämpötilalaskenta

Liitoskohdan lämpötila vaihtelee jatkuvasti staattisessa ajopisteessä lähtötaajuuden mukaan. Jos ajopistettä vaihdetaan esimerkiksi virran osalta, niin sillä on vaikutusta liitoskohdan lämpötilaan. Tämän takia käytetään lämpöimpedanssia hetkellisen lämpötilan määrittelyyn lämpöresistanssin sijasta, koska lämpöimpedanssia voidaan määrittää ajan funktiona. Häviöiden ja lämpöresistanssin avulla tiedetään liitoskohdan pysyvän tilan lämpötila, mutta hetkellinen lämpötila lasketaan lähtötaajuuden pulssien perusteella. Tähän käytetään seuraavaa kaava:

$$\Delta T_j = P * \sum_{v=1}^n R_{thv} * \left(1 - \varepsilon^{\frac{-t_1}{\tau_{thv}}}\right) \quad (9)$$

Missä

- ΔT_j Lämpötilamuutos
- P Häviöteho
- R_{th} Lämpöresistanssi
- ε Neperin luku
- t Pulssin pituus
- τ Aikavakio

Kaava hyödyntämällä ja hetkellisiä suureita häviölaskennassa käyttämällä saadaan selville liitoskohdan lämpötila tietyllä ajanhetkellä ja voidaan laskea liitoskohdan keskimääräinen lämpötila jakson aikana. Huippu- ja keskimääräistä lämpötilaa käytetään taajuuskorjauskertoimen laskennassa.⁹

7 LÄMPÖTILAMITTAUS KUITUOPTIIKALLA

Tämän opinnäytetyön mittauksissa käytetään OpSensin valmistamaa mittalaitetta ja lämpötilan mittausanturia.

OpSens on kanadalainen yritys, joka valmistaa mittalaitteita ja kuituoptiikalla toimivia antureita monien alojen käyttöön. Antureilla voidaan mitata lämpötilaa, painetta, venymää ja etäisyyttä.¹⁰

Lämpötilamittaus tehdään GaAs-tekniikalla toimivalla anturilla. Anturi koostuu valokuidusta, jonka mittauspäähän on kiinnitetty galliumarsenidia ja dielektrinen peili. Galliumarsenidin lämpöominaisuudet ovat hyvin tiedostettuja ja mittaamalla lähetysspektriä voidaan määrittellä mitatun pinnan lämpötila.¹¹

¹⁰ Opsens Solutions kotisivu. 2022.

¹¹ Omega Engineering. 2016. Fiber-Optic Temperature Measurement white paper. Yhdysvallat.

7.1 OpSens PicoM-mittalaite

PicoM on yhden kanavan mittalaite, joka tukee kaikki OpSens valmistettuja OTG-M-sarjan antureita. Laite kykenee mittaamaan $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ virhemarginaalilla, kun mitaus suoritetaan $20\text{--}250^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa. Mittalaitteen mittatarkkuus on $0,05^{\circ}\text{C}$ ja mittalaite pystyy ottamaan mittausarvoja talteen 20 ms välein.¹²

Mittalaitetta voidaan käyttää Softsens-ohjelmistolla tai SCPI-kommunikaatioprotokollan avulla. Kommunikaatio mittalaitteen kanssa muodostetaan RS-232-portin kautta.

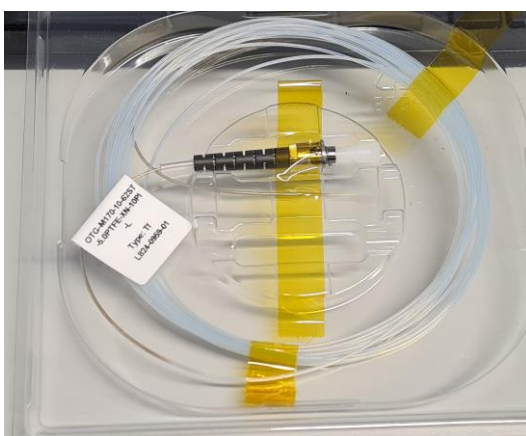


Kuva 9. OpSens PicoM-mittalaite.

¹² OpSens Solutions. 2014. IMP0023 Pico-M Manual rev 2.1. Kanada

7.2 OpSens OTG-M170-anturi

OTG-M170 on GaAs-tekniikalla ja 0,17 mm sensoripäällä toteutettu, ST-liittimellä kytkettävä, lämpötila-anturi. Mittatarkkuus on 0,01°C ja lämpötilavirhemarginaali $\pm 0,8^\circ\text{C}$. Koska anturi on valmistettu valokuidusta, se on täysin suojattu elektromagneettisista ja radiotaajuisista häiriöistä eikä johda sähköä. Anturin nopeus on $\leq 10 \text{ ms}$.¹³



Kuva 10. OpSens OTG-M170-lämpötila-anturi.



Kuva 11. OTG-M170-anturin mittapään kokoverailu

¹³ OpSens Solutions. 2015. IMP0074-OTG-M170-rev-2.3. Kanada

8 LÄMPÖTILAMITTAUKSET

Mittaukset suoritettiin Danfoss Drives, Vaasan toimipisteellä testilaboratoriossa. Ajopiste valittiin laitteen kokoluokan ja opinnäytetyön aiheen mukaan. Ajopiste on varustettu testausuunilla, kahdella eri syöttömahdollisuudella, kahdella eri kuormamahdollisuudella ja säädettävällä termostaatilla.

8.1 Valmistelut

Testauskoonpano asennettiin testausuuniin ATP2.1. Syötöksi valittiin keinoverkko. Valinta tehtiin sen takia, että tulokset haluttiin mahdollisimman luotettaviksi. Testilaboratoriossa tehdään monenlaisia muitakin ajoja, jotka voivat vaikuttaa verkkoon ja verkon taajuuteen hetkellisesti.

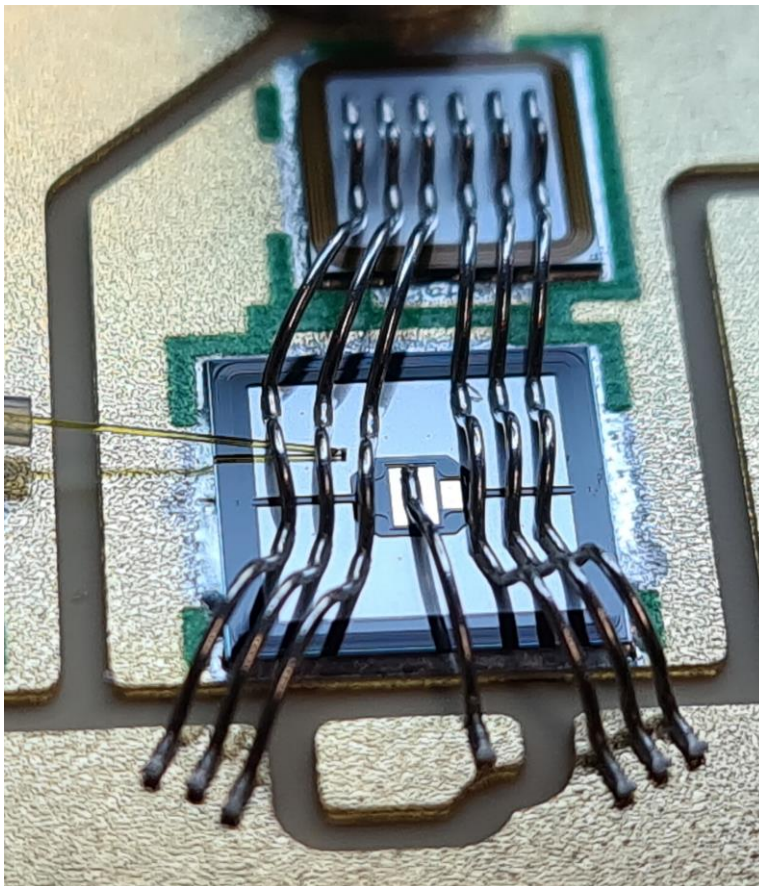


Kuva 12. Testauskoonpano asennettu testausuuniin ATP2.1.

Kuormaksi valittiin taajuusmuuttajan virtaluokalle sopiva moottori ABB K11R 160 L4 HW. Moottorilla pystyy kuormittamaan taajuusmuuttajaa niin, että saavutetaan korkeita IGBT sirun lämpötiloja.

Termostaattisäädöllä voidaan varmistaa, että lämpötila uunin sisällä pysyy tasaisena koko testin aikana, jolloin lämpötilan vaihtelut testausuunin ulkopuolella ei vaikuta tuloksiin.

Testilaitteen IGBT-moduuli on varustettu OpSensin OTG-M170-lämpötila-anturilla, joka on asennettu eniten lämpenevän IGBT sirun pintaan.



Kuva 13. OpSens OTG-M170-lämpötila-anturi IGBT sirun pinnassa.

Lämpötila-anturi on kytketty mittalaitteeseen, joka on kytketty tietokoneeseen. Myös taajuusmuuttaja on kytketty tietokoneeseen ja kuorman ohjauspaneeli on asetettu testausajopenkin työpöydälle.



Kuva 14. Testausaseman yleisnäkymä.

Laitteistoon syötettiin tarvittavat parametrit, kuten kuorma-, mittalaitteisto- ja uunin lämpötilaparametrit.

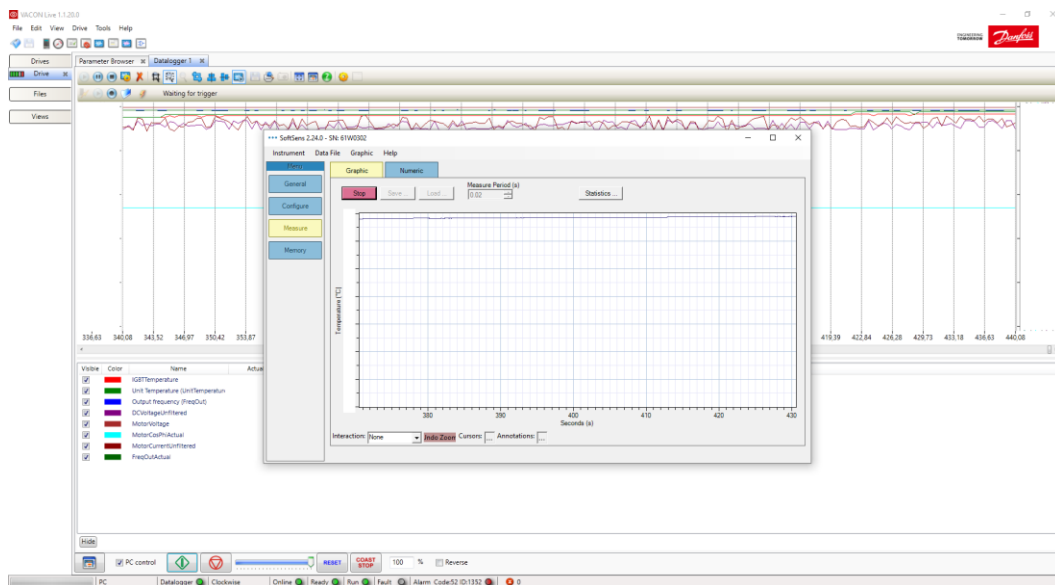
8.2 Mittaukset

Mittauksia tehtiin esitellyillä mittalaitteilla ja mittausmatriisin ohjearvojen perusteella. Työssä käytetty mittausmatriisi perustuu valmistajan ja talon omiin simuloituihin ohjearvoihin ja siinä on määritelty eri lähtötaajuuksia, lähtötaajuuksien vaatimat kytkentätaajuudet ja virrat tietyn IGBT-lämmön saavuttamiseksi. Esitetty mittausmatriisi on jätetty tyhjäksi Danfossin Drivesin pyynnöstä (**Taulukko 1.**).

Taulukko 1. Mittausmatriisi.¹⁴

Fre- qOut (Hz)	Real- Swit- ching- Freq (kHz)	Fre- quenc y actual out (Hz)	Motor voltage (V)	Motor- Current (I)	DCVol- tage (V)	Motor- CosPhiAc tual	Heatsink Tempe- rature (C)	IGB T (Dri ve)
0								
0,01								
0,1								
1								
2								
5								
10								
20								
35								
50								
100								
320								

Taajuusmuuttajaa kuormitettiin moottorin avulla ja mittamatriisin ohjearvojen perusteella siten, että saavutettiin pysyvän tilan lämpötila jäähdytyslementille. Lämpötiladata tallennettiin Vacon Live- ja Softsens-ohjelmalla analysointia varten.



Kuva 15. Mittausohjelmistojen mittausnäytöt mittauksien aikana.

Eri arvojen mittausta suoritettiin Vacon Live ohjelmistolla ja IGBT:n lämpötilamittaus OpSensin SoftSens ohjelmistolla (**Kuva 15.**).

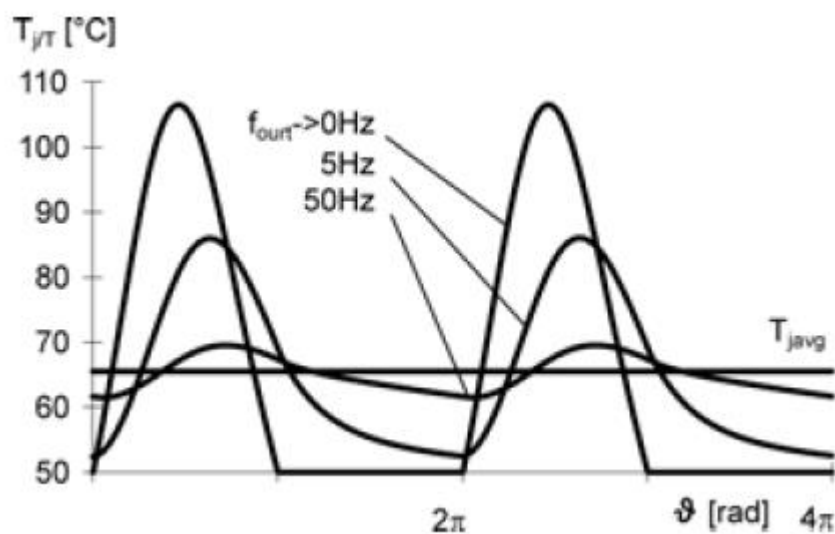
Koska mittaukset suoritettiin kuluttajamarkkinoilla olevalla taajuusmuuttajalla, laitteen yliämpösuojan antamaa laskennallista arvoa voitiin verrata mitattuun liitoslämpöön. Mittauksia suoritettiin muutamilla erilaisilla yläämpörajoilla.

Mittatulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi tehtiin mittaukset samalla taajuusmuuttajalla, vaihtamalla IGBT-moduulit laitteeseen.

9 TAAJUUSKORJAUSKERTOIMEN LASKELMAT JA TULOKSET

Taajuuskorjauskerroin on kerroin, jolla voidaan ennustaa liitoskohdan huippulämpötila tietyllä taajuudella, kun tiedetään keskimääräiset häviöt, jonkun tunnetun lämpöresistanssin arvo ja kyseisen lämpöresistanssin vertailupisteen lämpötila (Kuva 8.).

Tämä on tärkeä tieto ylilämpenemissuojan kannalta, koska matalilla taajuuksilla IGBT-piirit ovat aktiivisia kauemmin aikajakson pituuden takia ja lämpenevät enemmän. Taajuuskorjauskerrointa voidaan laskea esimerkiksi simulaatio-ohjelmalla, joka laskee hetkellisiä tehohäviöitä ja käyttää aikavakioita mitä tässä opinnäytetyössä on esitetty tai sitten mittaamalla IGBT-piirin lämpötila käytön aikana. Tässä opinnäytetyössä keskitytään jälkimmäiseen tapaan.



Kuva 16. IGBT-piirin lämpötila eri lähtötaajuuksilla ajanjakson funktiona.⁹

Taajuuskorjauskerroin lasketaan seuraavalla tavalla:

$$f_{corr} = \frac{\Delta T_{(j-s)max}}{\Delta T_{(j-s)avg}} \quad (10)$$

Missä f_{corr} tarvitsemat parametrit ovat

- $\Delta T_{(j-s) max}$ huippulämpötilamuutos liitoskohta - jäähdytys-elementti
- $\Delta T_{(j-s) avg}$ keskimääräinen lämpötilamuutos liitoskohta - jäähdytys-elementti

Laskuissa käytettiin mitattuja tuloksia ja lopputulokset verrattiin keskenään.

Taulukoissa 2 ja 3 nähdään mitattuja arvoja molemmista IGBT-moduulista.

Taulukko 2. Mitatut arvot IGBT 1.¹⁴

	0,01Hz	0,1 Hz	1 Hz	2 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz	35 Hz	50 Hz
Heatsink Tc	60,1	56,8	60,9	63,1	73	73,9	74,9	75,8	76
IGBT Tj avg	81,31	79,66	89,90	96,40	116,61	120,61	124,00	126,04	127,47
IGBT Tj max	124,68	116,62	105,83	105,67	119,54	121,69	124,5	126,46	128,04

Taulukko 3. Mitatut arvot IGBT 2.¹⁵

	0,01Hz	0,1 Hz	1 Hz	2 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz	35 Hz	50 Hz
Heatsink Tc	58,9	58,3	59,1	62,9	68,9	70	73,9	73,9	73,9
IGBT Tj avg	76,82	75,64	85,73	91,61	109,14	112,31	117,43	119,58	120,06
IGBT Tj max	113,62	109,92	114,31	114,8	123,15	118,45	119,94	120,49	120,47

¹⁴ IGBT 1 mittausdata ja graafit

¹⁵ IGBT 2 mittausdata ja graafit

Käyttäen kaavaa 10 voidaan laskea taajuuskorjauskerroin molemmille IGBT:lle.

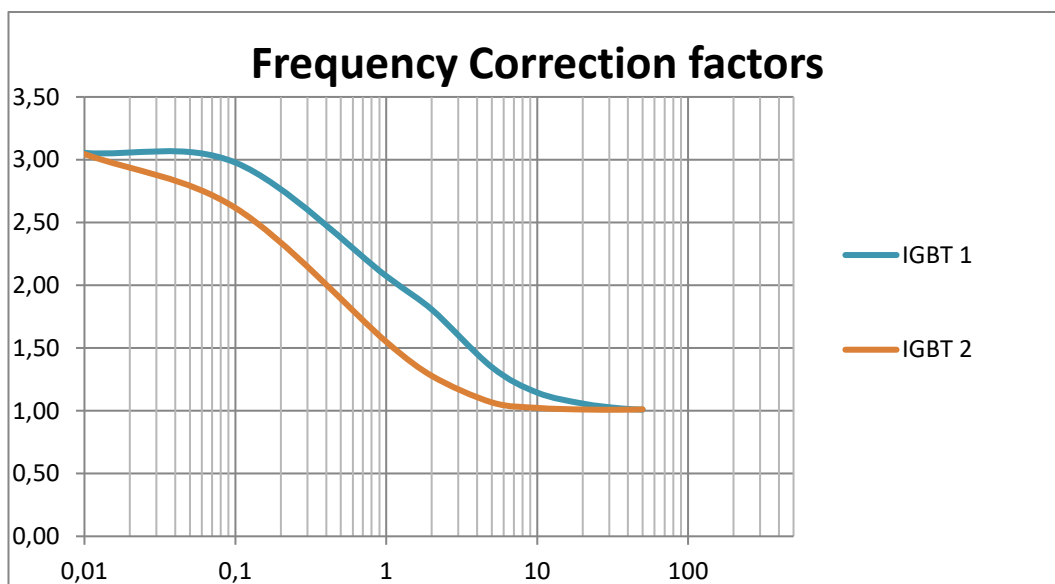
Taulukko 4. Taajuuskorjauskerroin IGBT 1.¹⁴

	0,01Hz	0,1 Hz	1 Hz	2 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz	35 Hz	50 Hz
Fcorr	3,05	2,98	2,07	1,81	1,35	1,15	1,06	1,02	1,01

Taulukko 5. Taajuuskorjauskerroin IGBT 2.¹⁵

	0,01Hz	0,1 Hz	1 Hz	2 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz	35 Hz	50 Hz
Fcorr	3,05	2,62	1,55	1,28	1,07	1,02	1,01	1,01	1,01

Kun taajuuskorjauskertoimet lisätään kuvaajaan voimme verrata IGBT-moduuleita keskenään. Voidaan havaita, että IGBT 1 ja IGBT 2 välillä suurin poikkeus tapahtuu 0,05 ja 2 Hz:n välillä. Silloin IGBT 1 taajuuskorjauskerroin on 13–41 % isompi kuin IGBT 2 taajuuskorjauskerroin (**Kuvaaja 1.**).

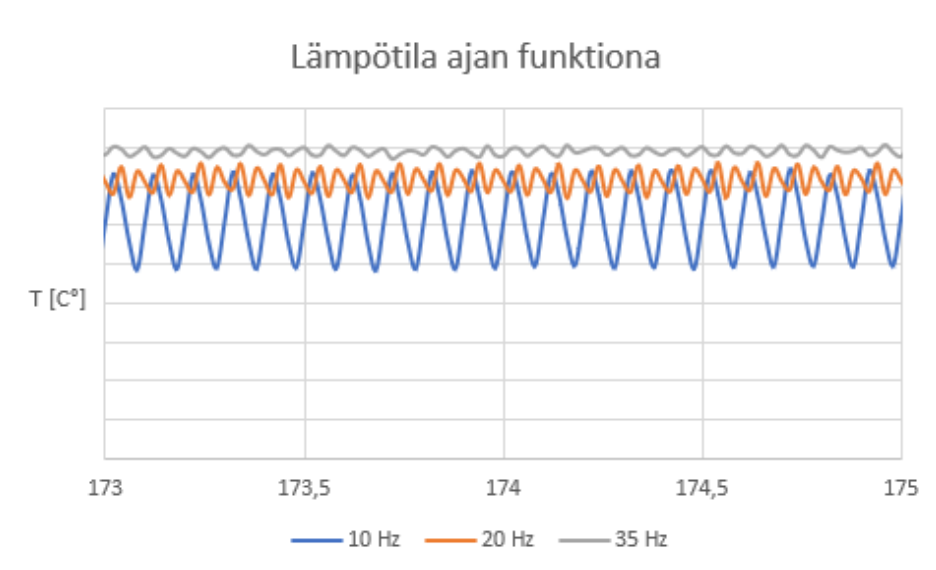


Kuvaaja 1. Taajuuskorjauskertoimet taajuuden funktiona.¹⁴

10 ANALYYSI

Analyysin aikana teimme muutamia mielenkiintoisia havaintoja. Havaintoihin ei löydetty tarpeeksi vakuuttavia vastauksia ja näihin tulisi kohdistaa lisätutkimuksia. Opinnäytetyön ja ajolabran rajallisen aikataulun takia lisätutkimuksia ei voitu suorittaa tässä vaiheessa.

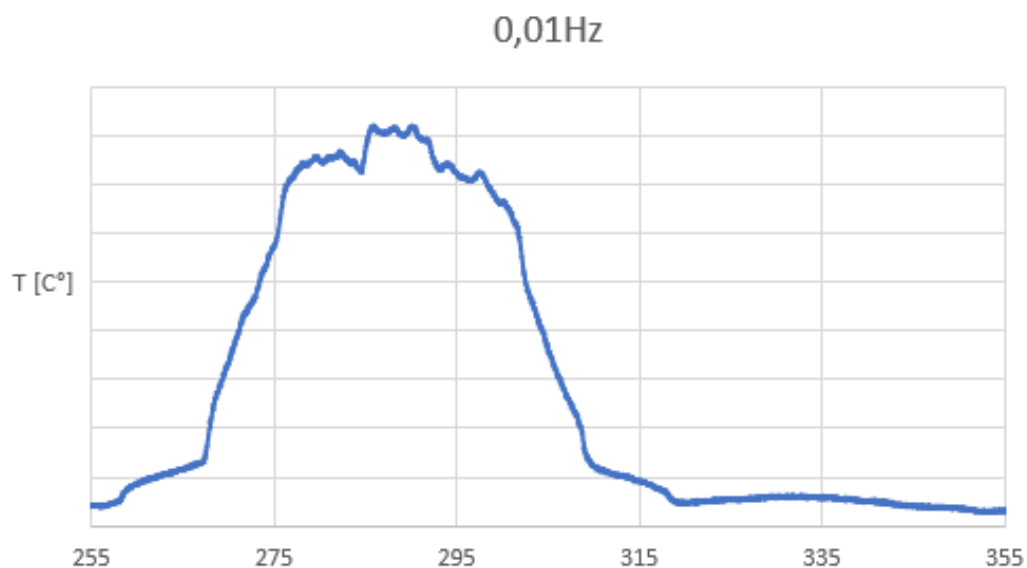
Ensimmäinen havainto oli, että OpSens ei pystynyt tuottamaan sinimuotoista mitauskäyrää, kun taajuusmuuttajan taajuus meni yli 10 Hz. Tämä johtuu luultavasti siitä, että OpSensin näytteenottotaajuus ei ole riittävä, joten ei voida olla varmoja, että mittaustaajuus ja taajuusmuuttajan lähtötaajuus olisivat synkronoituja. Anturin sijainnilla voi myös olla vaikutus, koska IGBT 2:lla sinimuotoista mitauskäyrää saavutettiin vasta 5 Hz:llä (**Kuva 17.**).



Kuva 17. IGBT 1 lämpötilan mitauskäyrä.¹⁴

Toinen havainto oli, että taajuuskorjauskertoimissa oli n. 13–41 % ero IGBT-moduulien välillä. Tämä näkyi myös lämpötilamuutoksissa ajanjakson aikana. Lämpötilaan voi vaikuttaa muun muassa anturin sijainti IGBT-piirin pinnassa, IGBT-piirin paksuus, DBC:n paksuus ja IGBT-moduulin DBC:n layout, eli IGBT-piirien ja diodien etäisyydet toisistaan. Näiden vaikutus tulisi tutkia tarkemmin.

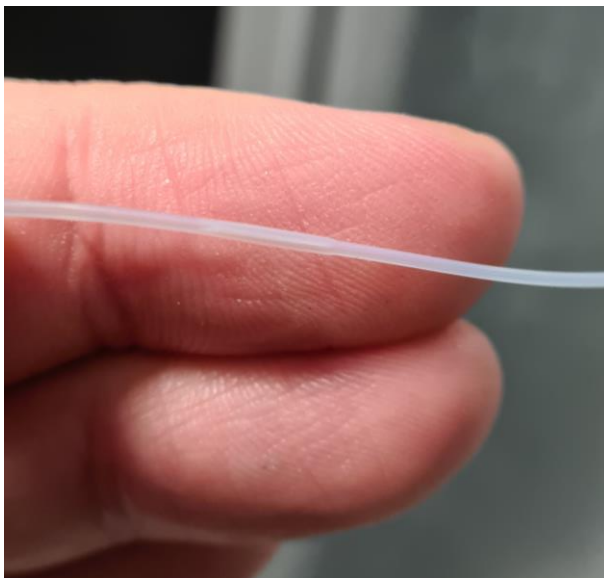
Lopuksi vielä havainto mitatusta lämpötilakäyrästä 0,01 Hz:n taajuudella. Ennen kuin huippuarvo on saavutettu, lämpö tasautuu hetkeksi ja sitten tapahtuu nousu. Tämän jälkeen sama toistuu käänteisessä järjestyksessä, kun huippu on saavutettu ja lämpötila lähtee laskemaan. Koska tämä tapahtui molemmille IGBT:lle, epäily on, että modulointikuvio aiheuttaa tällaiset lämpötilamuutokset, jotka näkyvät kuvasta (**Kuva 18.**).



Kuva 18. 0,01 Hz lähtötaajuuden lämpötilakäyrä ajan funktiona.¹⁴

11 YHTEENVETO

Lämpötilamittaus optisen sensorin avulla osoittautui erittäin tarkaksi. Mittauksien aikana päästiin myös näkemään kuinka herkkiä optiset anturit ovat ulkoisia voimia vastaan. Kuvasta 19 nähdään tapaturmainen puristumiskohta kuvan keskellä. Tämä esti anturia toimimasta.



Kuva 19. Puristukseen jäänyt anturinjohto.

Opinnäytetyön tarkoitus oli parantaa ymmärrystä optisen lämpötilasensorin käytöstä ja kuinka sen tuottamaa dataa voidaan käyttää taajuuskorjauskertoimen laskennassa. Aihe oli ihan uusi asia minulle, vaikka olen ollut taajuusmuuttajien kanssa tekemisissä useita vuosia.

Tässä opinnäytetyössä jouduin perehtymään IGBT:n toiminnallisuuteen monesta eri näkökulmasta. Ennen kuin taajuuskorjauskerroin voidaan laskea, pitää ymmärtää miten lämpenemä syntyy IGBT:ssä ja miten lämpö käyttäytyy eri lähtötaajuuksilla. Myös muiden parametrien vaikutus lämpöön, kuten käytetty kytkentätaajuus ja taajuusmuuttajan rakenne, on hyvä ymmärtää mittausvaiheessa.

Jatkokehityksenä olisi hyvä luoda työohje, joka kuvaisi miten lämpötilamittauksia suoritetaan yleisellä tasolla. IGBT-moduuleja löytyy monenlaisia, mutta sopiva yleisohje voisi kertoa miten mittauksia kannattaa suunnitella, miten mittalaitteet valita ja miten kannattaa määritellä anturoinnit ja testipaikat.

Vaikka aihe oli aivan uusi, näkisin että tavoitteet saavutettiin ja saatiin hankittua paljon hyödyllistä mittaustietoa tulevaisuutta varten. Opinnäytetyössä käytettyjen, eri valmistajien IGBT:ssä havaittiin selkeitä eroja ja tästä johtuen niihin tullaan kohdistamaan lisää tutkimusta.

LÄHTEET

Danfoss. 2021. M/S Aurora Botnia pääsi odotetulle neitsytmatkalleen. Viitattu 18.10.2021.
<https://www.danfoss.com/fi-fi/about-danfoss/news/dds/m-s-aurora-botnia-left-on-the-long-awaited-mayden-voyage/>

IGBT 1 mittausdata ja graafit

IGBT 2 mittausdata ja graafit

Jayant Baliga, B. 2015. IGBT: The GE Story. IEEE Power Electronics Magazine 2,2, 16-23.

Omega Engineering. 2016. Fiber-Optic Temperature Measurement white paper. Yhdysvallat. Viitattu 27.2.2022
https://www.omega.co.uk/technical-learning/pdfs/FiberOpticTempMeasurement_WhitePaper.pdf

OpSens Solutions. (28.2.2022). About us - Who we are.
<https://opsens-solutions.com/about-us/who-we-are/>

OpSens Solutions. 2014. IMP0023 Pico-M Manual rev 2.1. Kanada. Julkaisematon materiaali

OpSens Solutions. 2015. IMP0074-OTG-M170-rev-2.3. Kanada. Viitattu 28.2.2022.
<https://opsens-solutions.com/wp-content/uploads/sites/4/2015/02/IMP0074-OTG-M170-rev-2.3.pdf>

Salomäenpää, M. Tanskalainen Danfoss ostaa taajuusmuuttajavalmistaja Vaconin. Yle. Viitattu 18.10.2021.
<https://yle.fi/uutiset/3-7467468>

Shenai, K. 2015. The Invention and Demonstration of the IGBT. IEEE Power Electronics Magazine 2,2, 12-16.

Vacon Engineered Drives Manual julkaisematon materiaali

Vacon Oyj:n vuosikertomus 2013.

Vacon Oyj:n vuosikertomus 2014.

Wärtsilä. 2020. Danfoss toimittaa satoja taajuusmuuttajia Wärtsilän uuteen Smart Technology Hubiin. Viitattu 18.10.2021.

<https://www.smarttechnologyhub.com/fi/danfoss-toimittaa-satoja-taajuusmuuttajia-wartsilan-uuteen-smart-technology-hubiin/>

Wintrich, A., Nicolai, U., Tursky, W. & Reimann, T. 2015. Application Manual Power Semiconductors. Saksa. Semikron. Viitattu 14.2.2022.

<https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-application-manual-power-semiconductors-english-en-2015.pdf>.

LIITTEET

LIITE 1

Liitetiedosto on poistettu Danfoss Drives pyynnöstä.

LIITE 2

Liitetiedosto on poistettu Danfoss Drives pyynnöstä.