



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Joonas Sjöblom

TUOTEKEHITYSALUSTAN SUUNNITTELU
TAAJUUSMUUTTAJAN TEHOMODUULILLE

Danfoss Drives Oy

Tekniikka
2024

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
Tieto- ja viestintäteknikka

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Joonas Sjöblom
Opinnäytetyön nimi	Tuotekehitysalustan suunnittelu taajuusmuuttajan tehomoduulille Danfoss Drives Oy
Vuosi	2024
Kieli	suomi
Sivumäärä	39 + 2 liitettä
Valvoja	Jukka Matila
Ohjaaja	Sami Karhunen

Tässä opinnäytetyössä kehitetään tuotekehitysalusta tehomoduulien verifiointiin Danfoss Drivesille. Uuden tuotekehitysalustan avulla mahdollistetaan eri valmistajien tehomoduulien sovittaminen kytkentäenergiatesteihin sekä uuden sukupolven Danfoss iC7 -laiterakenteisiin perustuviin taajuusmuuttajiin. Työn tutkimusongelma kiteytyy laadukkaan tuotekehitysalustan suunnitteluun.

Keskeisenä tavoitteena työssä on luoda geneerinen tehomoduulin ohjainkortti, joka sisältää useita eri hilavastuskombinaatioita, säädettävät hilajännitteet sekä signaaligeneraattorirajapinnan tehomoduulien kytkentäenergiatestaukseen. Tutkimus perustuu luotettavien lähteiden lisäksi simulointeihin ja matemaattisiin kaavoihin.

Työssä suunniteltu tuotekehitysalusta mahdollistaa mittadatan keräyksen ja vertailun eri tuotekehitysyksiköistä ja näin ollen vähentää myös mahdollisen päällekkäisen työmäärän syntyä yksiköiden välillä. Tuotekehitysalustan avulla mahdollistetaan tuotekehitysvaiheen nopeutus pääpiirikomponenttien valinnassa.

Avainsanat Tehoelektronikka, taajuusmuuttajat, elektroniset piirit, puolijohdet

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Tieto- ja viestintäteknikka

ABSTRACT

Author	Joonas Sjöblom
Title	Design of the product development platform for frequency converter power modules Danfoss Drives Oy
Year	2024
Language	Finnish
Pages	39 + 2 Appendices
Name of Supervisor	Jukka Matila
Instructor	Sami Karhunen

In this thesis a product development platform for Danfoss Drives is developed. The new product development platform will enable the adaptation of power modules from different manufacturers for switching energy tests as well as for inverters, based on the new generation of Danfoss iC7-hardware. The research problem of this thesis crystallizes in the design of a high-quality product development platform.

The main objective of the thesis is to create a generic controller board that includes several different gate resistor combinations, adjustable gate voltages and a signal generator interface for switching energy testing of power modules. In addition to reliable sources, the research is based on simulations and mathematical formulas.

The product development platform designed in this thesis enables the collection and comparison of measurement data from different product development units and reduces the potential duplication of work between units. The product development platform will allow to speed up the product development phase in the selection of the main circuit components.

Keywords	Power electronics, frequency converters, electronics circuits, semi-conductors
----------	--

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	9
1.1	Tutkimusongelma ja -kysymykset.....	10
1.2	Danfoss Drivesin keskeiset vaatimukset.....	11
2	TAAJUUSMUUTTAJA.....	12
2.1	Rakenne ja toiminta.....	12
2.2	Tehomoduulit.....	14
2.3	Ohjaus.....	17
3	OHJAINYKSIKÖ.....	20
3.1	Komentopiirikortti.....	20
3.2	Mittapiirikortti.....	21
3.3	Ohjainpiirikortti.....	21
4	GENEERINEN OHJAINKORTTI.....	23
4.1	Säädettävät hilajänniteteholähteet.....	24
4.1.1	Hilajännitteen raja-arvot.....	24
4.1.2	Lähtökondensaattorien mitoitus.....	25
4.2	Valikoitavat hilavastuskombinaatiot.....	28
4.3	Signaaligeneraattorirajapinta.....	29
4.4	Layout.....	31
5	SIMULOINTI.....	34
6	YHTEENVETO.....	37
	LÄHTEET.....	38
	LIITTEET.....	40

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Välipiirillisen taajuusmuuttajan kommunikaatio.....	12
Kuvio 2. Yksinkertainen kolmivaiheisen taajuusmuuttajan kytkentä.....	13
Kuvio 3. IGBT-tehomoduuleita ja läpileikkaus [4, luku 6.3].....	15
Kuvio 4. IGBT-tehomoduulin kytkentäkaavio [5, s.2].	16
Kuvio 5. IGBT-tehomoduulin virtapiikki ja takaisinkytkentäjännite [6, s.37].	17
Kuvio 6. Sinusoidaalinen aaltomuoto [7, s. 26].	18
Kuvio 7. PWM-pulssin vaikutus sinusoidaaliseen aaltomuotoon [8, s.223].....	19
Kuvio 8. Yksinkertaistettu Danfoss iC7 -taajuusmuuttajan ohjainyksikkö.	20
Kuvio 9. Geneerinen ohjainkortti esitettynä lohkokaaviotasolla.	23
Kuvio 10. Hilajänniteteholähteen piirikaavio.	24
Kuvio 11. Keraamisen kondensaattorin käyttökapasitanssin aleneminen nimellis- jännitteeseen nähden [12, s.11].	26
Kuvio 12. Hilavastuksen vaikutus kytkentänopeuteen [13, luku 2.3.2]	28
Kuvio 13. Hilavastuskombinaation piirikaavio.....	29
Kuvio 14. Hetkellinen aaltomuoto IGBT:n toisessa kytkeytymisessä [14, luku 2].30	
Kuvio 15. Signaaligeneraattorirajapinnan piirikaavio.....	31
Kuvio 16. Geneerisen ohjainkortin yläpuolen layout suunnittelu.....	32
Kuvio 17. Geneerisen ohjainkortin alapuolen layout suunnittelu.....	33
Kuvio 18. Positiivisen säädettävän hilajänniteteholähteen raja-arvot.....	34
Kuvio 19. Hilajänniteteholähteen jännitteenalenema kytkeytymisessä	35
Kuvio 20. Simulaatiotulos hilavastuksen vaikutuksesta päälle kytkeytyessä.....	36
Taulukko 1. Suositellut pintavuotoetäisyydet.....	33

LIITELUETTELO

LIITE 1 Valittavien hilavastuskombinaatioiden arvot 0.3Ω - 1Ω välillä.

LIITE 2 Valittavien hilavastuskombinaatioiden arvot 1Ω - 40Ω välillä.

SYMBOLIT

ΔI_{OUT}	Virran vaihteluväli [A]
ΔV_{OUT}	Jännitteen vaihteluväli [V]
ω	Kulmataajuus [rad/s]
ω_s	Kulmanopeus [rad/s]
C	Kapasitanssi [F]
f	Taajuus [Hz]
f_{sw}	KytKentätaajuus [Hz]
I	Virta [A]
I_{CE}	Virta kollektorista emitteriin [A]
I_{MAX}	Maksimivirta [A]
M	Vääntömomentti [Nm]
P_s	Ilmaväliteho [W]
Q_{TOTAL}	Kokonaisvaraus [C]
R	Resistanssi [ohm]
R_{GATE}	Hilavastus [ohm]
U_{CE}	Jännite kollektorista emitteriin [V]
V	Jännite [V]
V_{DROP}	Jännitehäviö [V]
V_{GATE}	Hilajännite [V]
V_{REF}	Referenssijännite [V]
V_{GE}	Jännite hilasta emitterille

LYHENTEET

AC	Alternating Current, Vaihtovirta
DC	Direct Current, Tasavirta
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, Eristetty Portti Bipolaari-transistori
NTC	Negative Temperature Coefficient, Negatiivinen lämpötilakerroin
PWM	Pulse Width Modulation, Pulssinleveysmodulaatio
RMS	Root Mean Square, Tehollisarvo
SiC	Silicon Carbide, Piikarbidi
STO	Safe Torque Off, Turvallinen vääntömomentin katkaisu

1 JOHDANTO

Uusiutuva energia, energiatehokkuus sekä hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ovat avainasemassa yrityksen kestävään kehitykseen. Tehokkaalla energian käytöllä saavutetaan tällä ”vihreän energian” aikakaudella huomattavia kilpailuetuja ja taloudellista hyötyä.

Teollisuuden energiakulutuksessa merkittävässä asemassa ovat sähkömoottorit. Kyseisiä moottoreita käytetään monissa eri teollisuuden sovelluksissa, kuten kuljettimissa, pumpuissa sekä yleistyvissä teollisuusrobotiikassa. Sähkömoottorien ohjauksessa merkittävässä asemassa ovat taajuusmuuttajat, joiden avulla saadaan optimoitua moottorien pyörimisnopeus ja väntömomentti. Perinteisiin ratkaisuihin verrattuna taajuusmuuttajan käytöllä voidaan saavuttaa merkittävät energiasäästöt.

Yhtenä keskeisenä tekijänä taajuusmuuttajissa ovat tehoduulit sekä niiden ohjaus. Taajuusmuuttajan pääpiirin ideaalin tehoduulin valinnassa on otettava huomioon useita teknisiä ja taloudellisia аспекteja. Taajuusmuuttajan tuotekehitysaikana testataan useiden eri valmistajien tehoduuleita, joiden perusteella uuteen taajuusmuuttajaan pyritään löytämään optimaalisin tehoduulivaihtoehto. SiC-tehoduulit ovat laajentaneet markkinoilla olevien optioiden määrää. Tehoduulien testauksessa jokainen malli vaatii toimiakseen erikseen optimoidun ohjainkortin. Testaus toteutetaan yleensä muokkaamalla erikseen jokaiselle tehoduulille saatavilla olevaa ohjainkorttia.

Tässä opinnäytetyössä kehitetään tuotekehitysalusta taajuusmuuttajan tehoduulien testaukseen Danfoss Drivesille. Tuotekehitysalusta on tehoduulien generinen ohjainkortti, jonka avulla eri valmistajien tehoduulit ovat helposti sovitettavissa kytkentäenergiatesteihin sekä uuden sukupolven Danfoss iC7 -laiterakenteisiin perustuviin taajuusmuuttajiin. Tehoduulin tuotekehitysalustaan tullaan tässä työssä viittaamaan generisenä ohjainkorttina. Generinen ohjainkortti on Danfossille tärkeä edellytys pääpiirinkomponenttien valinnan nopeuttamisessa

tuotekehitysvaiheessa. Geneerinen ohjainkortti mahdollistaa vertailukelpoisen mittadatan keräyksen pääpiirikomponenteista eri tuotekehitysyksiköiden välillä, mikä vähentää merkittävästi päällekkäistä työmäärää yksiköiden välillä.

Keskeisenä tavoitteena työssä on luoda tehomodulien tuotekehitysalusta, joka sisältää useita eri hilavastuskombinaatioita, säädettävät hilajännitteet sekä signaaligeneraattorirajapinnan tehomodulien kytkentäenergiatestaukseen. Kyseiset toiminnallisuudet on suunniteltava käyttäjälähtöisesti, jotta tuotekehitysalusta olisi mahdollisimman toimiva ratkaisu osana taajuusmuuttajan tuotekehitystä. Mekaanisesti geneerisen ohjainkortin on mahdollista iC7-taajuusmuuttajan laiterakenteiden ohjainkortille mitoitettuun tilaan, joka asettaa piirikortille tiukat rajat.

Geneerisen ohjainkortin pohjana on hyödynnetty olemassa olevaa iC7-taajuusmuuttajan ohjainkorttia. Työssä ratkaistaan hilavastuskombinaatiot, säädettävät hilajänniteteholähteet sekä signaaligeneraattorirajapinnan toteutus. Hilajännite ja hilavastusvaatimukset kerätään Danfossin pääpiirisuunnittelijoilta. Työhön sisältyy tämän lisäksi häiriösietoisen tuotteen piirilevy-suunnittelu, jonka on mahdollista mekaanisesti ennalta määritettyihin mittoihin iC7-laiterakenteissa.

Geneerisen ohjainkortin moduulirajapinnaksi valitaan LinPak tehomodulikitelo. Muita tehomodulityyppejä varten luodaan sovitinkortti, joka on rajattu työn ulkopuolelle. Danfoss iC7 -laiterakenteisiin perustuvien ohjainkorttien täydellistä toiminnallisuuden kuvausta ei ole sisälletty osaksi työtä. Ohjainkortin perustoiminnallisuus tullaan esittämään lohkokaaaviotasolla.

1.1 Tutkimusongelma ja -kysymykset

Työssä tutkitaan ongelmaa, miten suunnitella geneerisestä ohjainkortista käyttäjälähtöinen tuotekehitysalusta. Tehomoduleita verifioidessa ohjainkortilta vaaditaan useita eritasoisia hilajännitteitä ja lukuisia eriarvoisia hilavastuksia. Li-

säksi ohjainkorttiin on sisällytettävä signaaligeneraattorirajapinta erilaisten verifi-
kaatiotestien mahdollistamiseksi. Työssä perehdytään myös stabiiliin säädettävän
hilajänniteteholähteen suunnitteluun sekä mahdollisimman kattavan hilavastus-
kombinaatioiden mitoittamiseen.

1.2 Danfoss Drivesin keskeiset vaatimukset

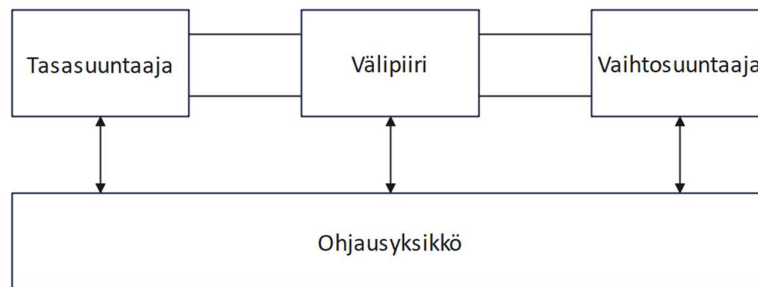
Geneerisen ohjainkortin suunnittelun vaatimuksiin sisältyy piirikortin piirikaavion
ja layoutin suunnittelu, johon kuuluu myös komponenttien mitoitus ja valinta. Oh-
jainkorttikohtaisina vaatimuksina esiintyy iC7 -tuoteperheen ohjainyksikön yh-
teensopivuus, SiC- ja IGBT-tehoduulien yhteensopivuus, rajapinta moduulisovi-
tinkortille ja tehoduulin lämpötilamittaus. Lisäksi vaatimuksiin kuuluu proto-
tyypin tilaus ja testaus sekä tarvittavien dokumenttien luonti.

Työn kannalta merkittäviä vaatimuksia ovat tuplapulssitestauksessa tarvittava sig-
naaligeneraattorirajapinta, säädettävät hilajänniteteholähteet sekä kattavat hila-
vastuskombinaatiot. Näihin vaatimuksiin perehdytään tarkemmin luvussa 4.

2 TAAJUUSMUUTTAJA

Taajuusmuuntaja on tärkeä osatekijä erityisesti sähkömoottoreiden energiatehokkuuden ja suorituskyvyn parantamisessa. Taajuusmuuttajan avulla saadaan muunnettua syöttöverkon jännite ja taajuus optimaaliselle tasolle päätelaitetta varten. Syöttöverkon jännitteen ja taajuuden tarkka säätö edistää päätelaitteen energiatehokkuutta.

Taajuusmuuttajat voidaan jakaa suoriin sekä välipiirillisiin taajuusmuuttajiin. Tässä työssä käsitellään erityisesti välipiirillistä taajuusmuuttajaa, jonka rakenne voidaan jakaa kuvion 1 osoittamaan tasasuuntaajan, välipiiriin sekä vaihtosuuntaajaan. Lisäksi rakenteeseen kuuluu ohjausyksikkö, jota käsitellään yksityiskohtaisesti työn myöhemmässä vaiheessa.

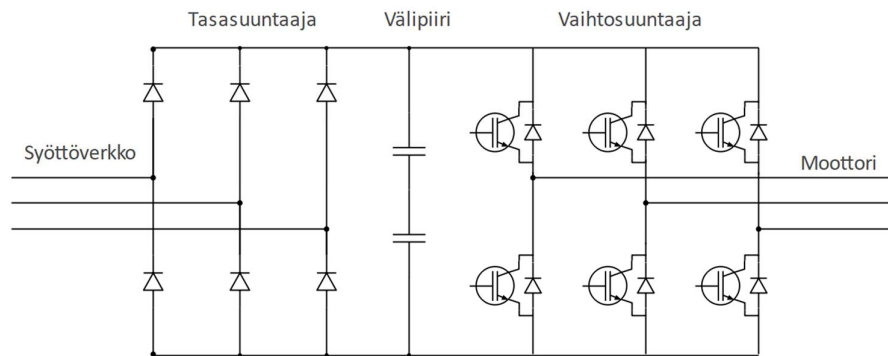


Kuvio 1. Välipiirillisen taajuusmuuttajan kommunikaatio.

2.1 Rakenne ja toiminta

Välipiirillisessä taajuusmuuttajassa tasasuuntaajan pääasiallinen tehtävä on muuntaa syöttöverkon AC-vaihtovirta DC-tasavirtaan. Kuviossa 2 esiintyy kolmi-vaiheinen dioditasasuuntaaja. Diodit ovat puolijohdekomponentteja, jotka estävät virran kulkeutumista vastakkaiseen suuntaan. Jokainen vaihe on kytketty omaan diodisillan haaraan, mikä tarkoittaa sitä, että jokainen vaihe on aina eri tiloissa.

Tällöin vaihtovirrasta saadaan leikattua sen negatiivinen osa pois ja jäljelle jää pulsoiva tasavirta.



Kuvio 2. Yksinkertainen kolmivaiheisen taajuusmuuttajan kytkentä.

Kuviossa 2 esiintyvän tasasuuntaajan kytkentää kutsutaan ohjaamattomaksi kolmipulssidiodisillaksi, jonka tasajännite V_d seuraa suurinta vaihejännitettä. Seuraavalla kaavalla voidaan laskea tasajännitteen arvo suhteessa vaihtojännitteen tehollisarvoon. [1, luku 7.]

$$V_{di} = \frac{1}{3} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \hat{v}_{RMS} \cos x \, dx = \frac{3\hat{v}_s}{2\pi} \times 2 \times \sin \frac{\pi}{3} = 1,17 \times V_{RMS} \quad (1)$$

Pulsoiva tasavirta suodatetaan DC-tasavirraksi välipiirissä. Osa sähköverkosta siirtyvästä energiasta varastoituu välipiirin kondensaattoreihin, mikä mahdollistaa taajuusmuuttajan nopeat lähtötehon muutokset käyttötehon muuttuessa lyhyellä aikavälillä. Kondensaattorit siis purkavat tällöin energiaa, joka tasoittaa sähköverkon kuormitusta. Välipiirissä on usein myös vastuksia ja suodattimia, kuten induktoreita ja keloja. Kyseisillä suodattimilla saadaan pienennettyä sähköverkkoon kytkeytyviä häiriöitä.

Välipiirissä suodatettu DC-tasavirta siirtyy vaihtosuuntaajaan, jossa se muunnetaan takaisin AC-vaihtovirraksi halutulla taajuudella ja jännitteellä. Sähköverkon parametrien modulaatiota käydään tarkemmin läpi luvussa 2.3.

Kolmivaiheisella taajuusmuuttajalla vaiheet ajoitetaan tyypillisesti 120 asteen kulmaan toisiinsa nähden. Tämä vaihe-ero luo moottorin roottorille pyörivän magneettikentän, joka aiheuttaa moottorin akselin pyörimisen. Moottorin pyörivää liikettä voidaan kuvata esimerkiksi sen pyörimistaajuuden tai vääntömomentin avulla. Kaavassa 2 muodostetaan lauseke moottorin vääntömomentille ilmavälitehon ja magneettikentän kulmanopeuden avulla.

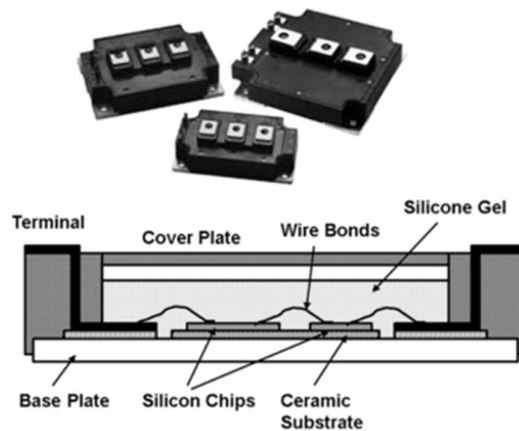
$$M = \frac{P_s}{\omega_s} \quad (2)$$

2.2 Tehomoduulit

Taajuusmuuttajassa yhtenä pääpiirin keskeisenä tekijänä esiintyy tehomoduulit. Tällä hetkellä yleisemmin käytössä olevat tehomoduulit ovat IGBT-moduuleja, joiden avulla saavutetaan vähävirtainen tarkka ohjaus sekä korkea virtakapasiteetti. Kuviossa 2 IGBT-tehomoduulit on sijoitettu vaihtosuuntaajaan ja niiden avulla tasavirta muunnetaan takaisin vaihtovirraksi.

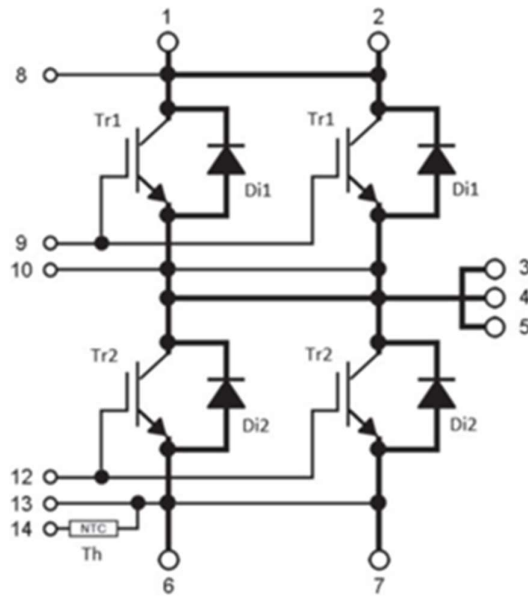
IGBT-tehomoduulia ohjataan toimittamalla sen hilalle ohjausjännitettä. Ohjausjännitteen ylittäessä kynnsjännitteen tehomoduuli alkaa johtamaan ja sallii virtapiirissä olevan virran virtaamisen. Näin ollen se toimii virran kytkimenä. Tehomoduuleissa käytetään negatiivisen polariteetin omaavaa hilajännitettä hilan poiskytkennässä häiriökestoisuuden vuoksi. Tällä varmistetaan, ettei hilan kynnsjännite ylitä väärään aikaan, jolloin sen johtaminen aiheuttaisi tuhoisan oikosulun. Negatiivinen hilajännite nopeuttaa myös virrankatkaisussa kuluvaa aikaa, joka johtaa tehohäviöiden alenemiseen. [2, luku 1.4.]

Tehomoduulien ohjaamisessa ohjaustapa voidaan jakaa kovaan ja pehmeään kytkentään. Ohjaustavoilla tarkoitetaan IGBT:n kytkentätilojen aikana muuttuvan jännitteen ja virran suhdetta. Kovakytkenässä jännitteen U_{CE} ja virran I_{CE} nopea kytkentä aiheuttaa häiriöpiikkejä ja tehohäviöitä. Pehmeässä kytkennässä minimoidaan kyseiset häiriöt suodatusten, kuten LC-resonanssipiirin avulla, mikä mahdollistaa jännitteen ja virran aaltomuotojen risteävyyden minimoimisen. [3, s.5–6.] Kuviossa 3 on havainnollistavia IGBT-tehomoduuleita ja läpileikkaus tyypillisestä IGBT-tehomoduulista.



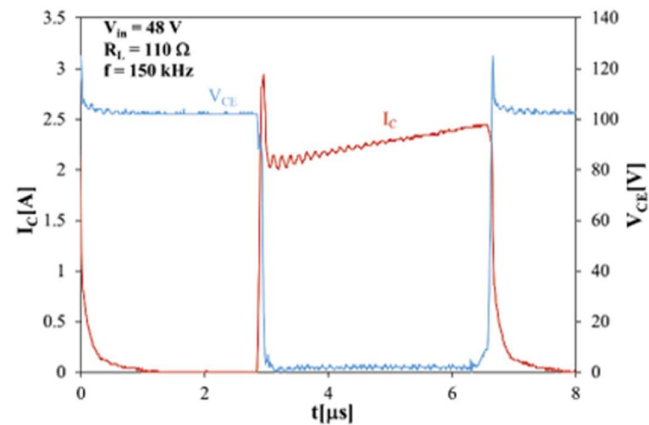
Kuvio 3. IGBT-tehomoduuleita ja läpileikkaus [4, luku 6.3].

IGBT-tehomoduuleissa on usein useampia transistoreja kytkettynä rinnan, jotta suuren sähkövirran kuormitus jakautuu useammalle transistorille. Tämä mahdollistaa samalla suurempien virtojen käsittelyn ja parantaa tehomoduulin vasteaikaa. Kuviossa 4 on IGBT-tehomoduulin kytkentäkaavio, jossa on kytketty rinnan transistoreja.



Kuvio 4. IGBT-tehoduulin kytkentäkaavio [5, s.2].

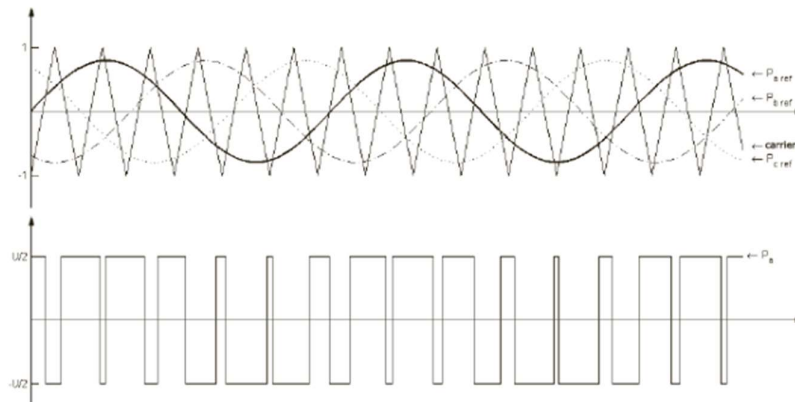
Transistorien lisäksi IGBT-tehoduulit sisältävät myös diodeja, joiden avulla mahdollistetaan induktiivisesta kuormasta vapautuvan energian kulku transistorin ollessa johtamattomassa tilassa. Virran kulkiessa moottorin läpi syntyy energiaa varastoiva magneettikenttä. Tehoduulin kytketyksessä moottorin virran äkillinen katkaisu romahduttaa kyseisen energiaa varastoituneen magneettikentän. Magneettikentän romahdus aiheuttaa suuria virtapiikkejä ja indusoi jännitteen käämeissä. Indusoitunut jännite aiheuttaa suuren jännitepiikin, jota kutsutaan takaisinkytkentäjännitteeksi. Kuviossa 5 esiintyviä virtapiikkejä ja takaisinkytkentäjännitettä hallitaan diodin avulla. Se tarjoaa reitin induktiivisen kuorman energian muutoksille. Diodi suodattaa induktiivisesta kuormasta johtuvat virta- ja jännitepiikit ja mahdollistaa ideaalisen kulmikkaan kanttiaallon. Osa vapautuvasta energiasta kulkeutuu syöttökondensaattoreille, jotka mahdollistavat nopeat lähtötehon muutokset käyttötehon muuttuessa lyhyellä aikavälillä.



Kuvio 5. IGBT-tehoduulin virtapiikki ja takaisinkytkentäjännite [6, s.37].

2.3 Ohjaus

Taajuusmuuttajan tehoduulien ohjaus tapahtuu PWM- tekniikalla, jossa muutetaan tarkasti pulssin päälläoloaikaa suhteessa pulssin kokonaisaikaan. Taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajasta uloslähtevä sinimuotoinen vaihtovirta saadaan luotua käyttäen hyväksi korkeataajuuksista kantaaltoa. Kantaalto on päällekkäin sinusoidaalisen referenssiaaltomuodon kanssa kuviossa 6. PWM-signaalit ovat kantaallon ja sinusoidaalisen referenssiaallon leikkauspisteiden summa. [4, luku 10.3.]

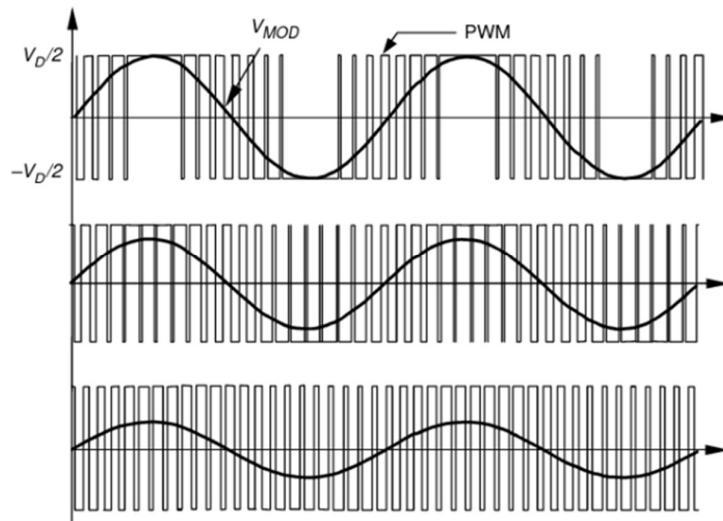


Kuvio 6. Sinusoidaalinen aaltomuoto [7, s. 26].

Kokonaisessa jaksossa PWM-signaali käy tilassa 1 ja 0. Ajanjaksoa, jossa PWM-signaali on tilassa 1, kutsutaan merkitysleveydeksi. Kaavalla 3 saadaan selvitettyä PWM-signaalin merkitysleveys, joka ilmaistaan usein prosentteina suhteessa PWM-signaalin kokonaiseen jaksoon.

$$\text{Merkitysleveys}(\%) = \frac{T_{\text{Aktiivinen}}}{T_{\text{jaksoaika}}} \times 100\% \quad (3)$$

Pulssin merkitysleveydellä saadaan määritettyä ajanjakso, jossa tehomodulin hila on johtavassa tilassa. Merkitysleveyden hallinta mahdollistaa tarkan säädön sähköverkon parametreissa, mikä on näkyvissä kuviossa 7.



Kuvio 7. PWM-pulssin vaikutus sinusoidaaliseen aaltomuotoon [8, s.223].

Vaihtosuuntaajasta uloslähtevän sinusoidaalisen aaltomuodon taajuus on riippuvainen PWM-signaalin jaksonajasta. Jos taajuutta kasvatetaan, sen jaksonaika lyhenee. Taajuus voidaan laskea seuraavalla kaavalla jaksoajan ollessa tiedossa.

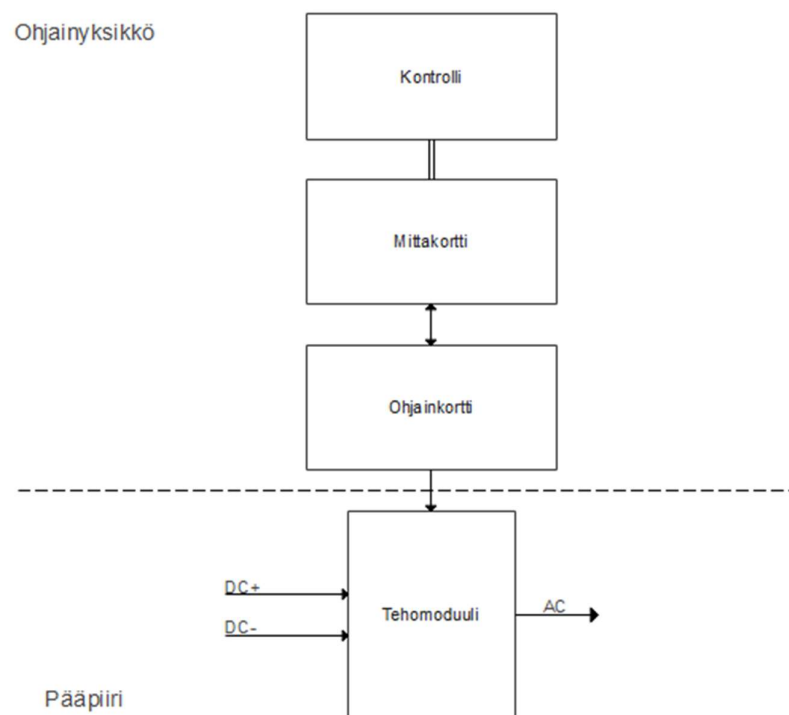
$$f = \frac{1}{T_{\text{jaksoaika}}} \quad (4)$$

Taajuusmuuttajan uloslähtevän taajuuden säädössä moduloidaan siis ohjaujännitettä, joka vastaa tehomodulin hilan johtavuudesta. Tehomoduliin ohjaujännitteen säätö tapahtuu PWM-tekniikalla, jossa säädetään pulssin tilaa "1" suhteessa pulssin tilaan "0". Uloslähtevän verkon amplitudi kasvaa PWM-pulssin aktiivista aikaa kasvattamalla. Huippuarvon ollessa tiedossa voidaan laskea vaihtovirran tehollisarvo kaavan 5 avulla. Vaihtovirran tehollisarvolla kuvataan amplitudia tehonäkökulmasta. [9, s.6.]

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_0^T (V_{pk} \cos \omega t)^2 \times dt}{T}} = \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

3 OHJAINYKSIKKÖ

Uuden sukupolven Danfoss iC7 -laiterakenteisiin perustuvien taajuusmuuttajien ohjainyksikkö jaetaan tässä työssä karkeasti kolmeen osaan mahdollisimman selkeän kokonaiskuvan luomiseksi. Taajuusmuuttajan ohjainyksikkö muodostuu kolmesta erilaisesta piirikortista, joita ovat kontrolli, mittakortti sekä ohjainkortti. Tässä opinnäytetyössä kehitettävä geneerinen ohjainkortti sijoittuu kuviossa 8 esiintyvän ohjainkortin paikalle.



Kuvio 8. Yksinkertaistettu Danfoss iC7 -taajuusmuuttajan ohjainyksikkö.

3.1 Komentopiirikortti

Danfoss iC7 -laiterakenteisiin perustuvissa taajuusmuuttajissa kontrollin eli komentopiirikortin yksi merkittävimmistä tehtävistä on vastata kommunikaatiosta

eri piirikorttien ja loppukäyttäjän välillä. Komentopiirikortti tukee useita eri tiedonsiirtoprotokollia, kuten Rs485 ja I2C. Näiden tiedonsiirtoprotokollien avulla mahdollistetaan esimerkiksi mittadatan kulkeutuminen piirikorttien välillä.

Komentopiirikortti sisältää myös STO-toiminnon, jonka avulla varmistetaan moottorin nopea pysäytys turvallisesti. Tyypillisesti STO-toiminto pysäyttää moottorin tuottaman vääntömomentin hyvin lyhyen ajanjakson aikana. STO- signaali aktivoituu esimerkiksi moottorin ylikuormituksen yhteydessä ja pyrkii estämään laitteen vaurioitumisen.

3.2 Mittapiirikortti

Mittakortti on ohjainyksikön tärkeä osa, sillä sen avulla kerätään mittadataa niin taajuusmuuttajan kuin sähkömoottorin toiminnasta. Yksi mittakortin merkittävimmistä tehtävistä on kerätä mittadataa kolmivaiheisesta vaihejärjestelmästä eli kolmivaihesähkömoottoreista. Kolmivaiheisessa taajuusmuuttajassa mittakortti mittaa erikseen kolme erillistä virtavaihetta u, v ja w.

Virtavaiheiden säädöllä mahdollistetaan moottorin vääntömomentin ja nopeuden optimointi. Mittakortin vaihemittauksien data kulkeutuu ohjainkortille vaihepalautteena, jonka perusteella tehomodulien ohjausta säädetään optimaaliselle tasolle.

3.3 Ohjainpiirikortti

Danfoss iC7 -laiterakenteissa on erilaisia jäähdytysmenetelmiä ja useita teholuokkia. Tästä syystä iC7 -tuoteperheestä löytyy monia erilaisia tehomoduleita, jotka vaativat niille erikseen optimoidut ohjainkortit. Ohjainkorteilla on myös yhteisiä vaatimuksia, kuten kommunikaatorajapinta mittakortille. Ohjainkortti vastaanottaa dataa kontrollilta sekä mittakortilta ja näiden perusteella säätää tehomodulien kytkentänopeutta.

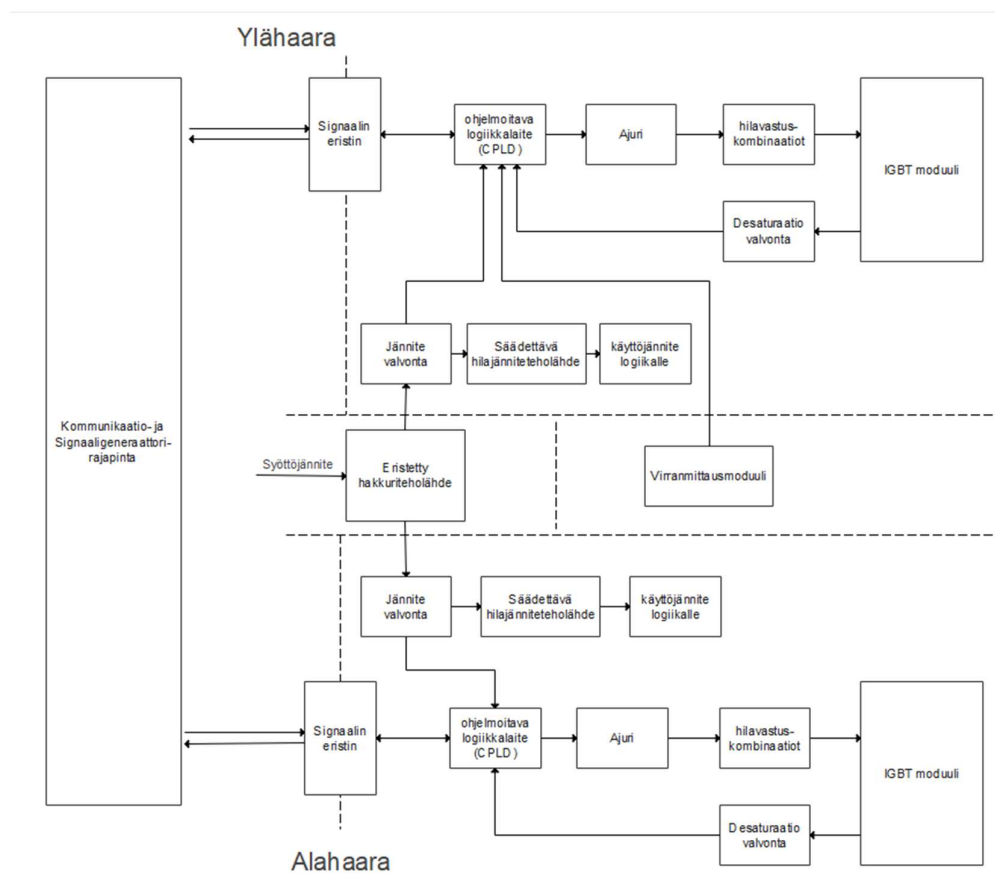
Ohjainkortin logiikkalaitteen vastaanottaessa mittadataa ohjainkortilla muodostetaan PWM-tekniikalla ohjauskäskyä vastaava pulssi. Signaalin avulla ohjataan tehomodulia, joka määrittää ajanjakson, jolloin moduulin hila on avattava tai suljettava. Mitä pidempään tehomoduli on johtavassa tilassa, sitä suuremmaksi lähtöjännitteen tehon amplitudi kasvaa.

Ohjainkortti sisältää myös mittaus- ja suojapiirejä, kuten jännitteen valvonnan ja desaturaation valvonnan. Jännitteen valvonnalla seurataan säädettävän hilajänniteteholähteen syöttöjännitettä. Valvonnalla seurataan mahdollista ylijännitettä ja alijännitettä. Yli- tai alijännitteen ilmetessä piiri lähettää signaalin logiikkalaitteelle, joka laukaisee vikatilaa. Komparaattorit ovat yleisiä tässä käytössä, sillä kyseinen piiri vertaa kahden eri jännitteen tasoja toisiinsa. Ylijännitteen vikatila ilmenee tällöin komparaattorin referenssijännitteen ylittyessä.

Desaturaatio valvonnan avulla varmistetaan tehomodulin turvallinen toiminta. Desaturaatiolla tarkoitetaan tilaa, jossa tehomodulin V_{GE} jännite nousee liian korkeaksi, jolloin tehomodulin transistori ei pysty ohjaamaan tarvittavaa virtaa tehokkaasti. Desaturaatiosuojapiirin lähettäessä signaalin logiikkalaitteelle tehomoduli sammutetaan mahdollisen vaurioitumisen estämiseksi.

4 GENEERINEN OHJAINKORTTI

Danfoss Drivesin vaatimukset generiselle ohjainkortille tehomodulien verifiointiin on lueteltu työn alussa ja ne ovat näkyvissä generisen ohjainkortin lohkokaaviossa kuviossa 9. Tämän työn kannalta merkittävimmät vaatimukset ovat säädettävät hilateholähteet, valittavat hilavastuskombinaatiot sekä signaaligeneraattorirajapinta. Seuraavissa luvuissa perehdytään tarkemmin keskeisiin vaatimuksiin.

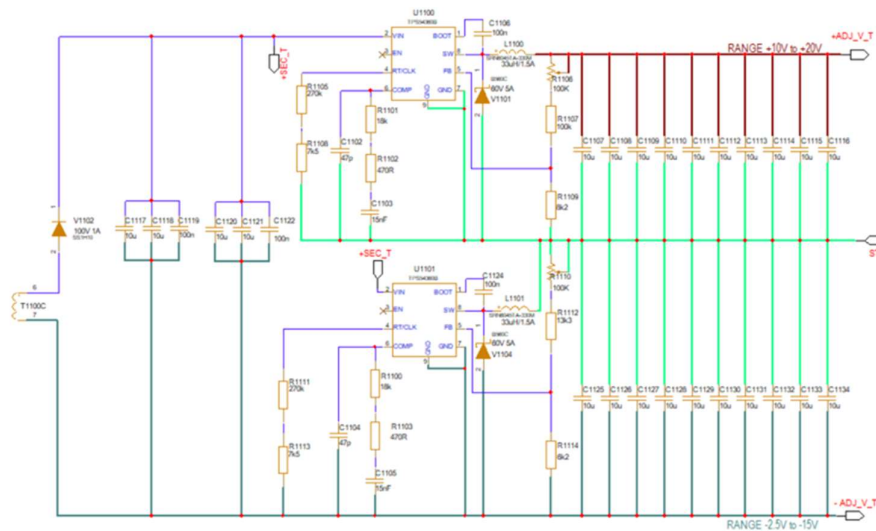


Kuvio 9. Generinen ohjainkortti esitettynä lohkokaaviotasolla.

4.1 Säädettävät hilajänniteteholähteet

Toisena tutkimuskysymyksenä on kuinka saada stabiilit säädettävät hilajänniteteholähteet. Yksi ratkaisutapa on luoda hakkuriteholähde, jonka muuntajan avulla galvaanisesti isoloidaan ylä- ja alahaara toisistaan. Muuntajan toisiopuolella eli tässä tapauksessa ylä- tai alahaarassa, on erikseen kaksi DC-DC-muunninta, joilla luodaan säädettävyyttä jännitteelle. Positiiviselle ja negatiiviselle jännitteelle on mitoitettu omat muuntimet.

Kuviossa 10 on säädettävän hilajännitteen piirikaavio, joka on identtinen ylä- ja alahaaran puolella. Seuraavissa kappaleissa käsitellään tps54360B-muuntimen ulostulojännitteen parametreja, jotka ovat merkittävässä asemassa opinnäytteen tutkimusongelmassa.



Kuvio 10. Hilajänniteteholähteen piirikaavio.

4.1.1 Hilajännitteen raja-arvot

Tps54360B on DC-DC-muunnin, joka vastaa hilajännitteestä. Nimellisjännitteen mitoittaminen on mahdollista seuraavalla kaavalla, kun muuntajan referenssijännite sekä vastusten arvot ovat tiedossa:

$$V_{OUT} = V_{REF} \times \left(\frac{R1}{R2}\right) + 1 \quad (6)$$

Referenssijännite on TPS54360B-muuntajalla 0,8V ja se on ilmoitettu datalehdessä [10, s.13]. Vastusten arvot on mitoitettu niin, että ulostulo vastaa ennalta määritettyjä vaatimuksia. Säädettyvyys on saavutettu käyttämällä trimmeriä sarjassa yllä olevan kaavan vastuksen R1 kanssa. Käyttäen kaavaa 7 positiivisen puolen alaraja +10V mitoitetaan seuraavasti:

$$0.8V \times \left(\frac{100\,000\Omega}{8\,200\Omega}\right) + 1 = 10,5V \quad (7)$$

Tällöin trimmeri on säädetty vähimmäisarvoonsa, jolloin merkittävässä asemassa on 100kΩ vastus. Kun positiivinen jännite on säädetty +20V on trimmerin arvo maksimissaan, jolloin R1 kasvaa 200kΩ suuruiseksi. Positiivisen jännitteen yläraja +20V on mitoitettu seuraavasti.

$$0.8V \times \left(\frac{200\,000\Omega}{8\,200\Omega}\right) + 1 = 20,3V \quad (8)$$

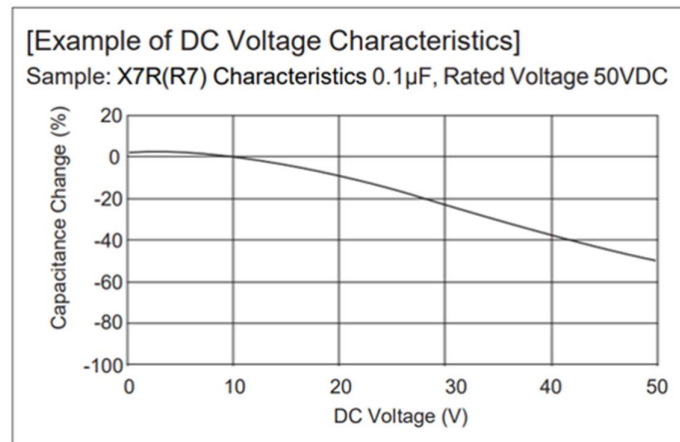
Kuviossa 10 esiintyvässä hilajännitepiirikaaviossa positiivisen ja negatiivisen jännitteen referenssipisteenä toimii "ST". Negatiivinen jännite saadaan aikaiseksi vaihtamalla TPS54360B muuntimen referenssipistettä, jolloin muuntimen positiivisen jännitteen polariteetti kääntyy negatiiviseksi [11, luku 12]. Negatiivisen puolen jännite raja-arvot -2.5V ja -15V on mitoitettu samalla kaavalla kuin positiivisen jännitteen.

4.1.2 Lähtökondensaattorien mitoitus

Lähtökondensaattorit vaikuttavat merkittävästi DC-DC-muuntimen lähtöjännitteen vakauten erityisesti, kun kyseessä on tehomodulin ohjauspiiri. Lähtökondensaattorin keskeisenä tehtävä on suodattaa lähtöjännitteen kohinaa ja pitää jännite mahdollisimman stabiilina kuormamuutoksien aikana. Mitoituksessa on käytetty seuraavaa kaavaa, joka antaa tarvittavien lähtökondensaattorien vähimmäisarvon DC-DC-muuntimen toiminnalle.

$$C_{OUT} > \frac{2 \times \Delta I_{OUT}}{f_{SW} \times \Delta V_{OUT}} \quad (9)$$

Kaavan 9 antama lähtökondensaattorin minimi nimellisarvo on kriittinen DC-DC-muuntimen toiminnalle eikä minimiarvoa tule alittaa stabiilin toiminnan kannalta. Kondensaattorin mitoittamisessa, kuten monissa muissa kriittisissä komponenteissa on huomioitava myös nimellijännitteen aleneminen (derating). Kuviossa 11 esiintyy keraamisen lähtökondensaattorin käyttökapasitanssin aleneminen nimellijännitteeseen nähden.



Kuvio 11. Keraamisen kondensaattorin käyttökapasitanssin aleneminen nimellijännitteeseen nähden [12, s.11].

Generisen ohjainkortin säädettävien hilajännitteiden suurin mahdollinen potentiaaliero on 35V, joten 50V maksimi nimellijännitteen omaavan kondensaattorin käyttökapasitanssi valmistajan mukaan on noin 35 % nimellisarvoa pienempi. Kaavan 10 avulla saadaan laskettua arvio käyttökapasitanssin arvoalenema prosenttiyksiköissä:

$$Derating = \frac{Käyttöjännite}{Nimellijännite} \times 100\% \quad (10)$$

Käyttökapasitanssin lisäksi laadukkaan ohjainkortin suunnittelussa on hyvä huomioida tehomodulin päälle ja pois kytkemisestä aiheutuva hetkellinen jännitteen aleneminen. Kyseistä jännitteen alenemista saadaan säädettyä syöttökondensaattoreiden avulla. Hilajänniteteholähteen lähtökondensaattorit ovat osa tehomodulin syöttökondensaattoreita. Kaavan 11 avulla saadaan arvioitua tarvittava kapasitanssi ennalta määrättyllä jännitteen alenemalla tehomodulin kytkeytymissä:

$$C = \frac{Q_{Total}}{V_{Drop}} \quad (11)$$

Geneerisen ohjainkortissa on tämän lisäksi huomioitava säädettävät hilajänniteteholähteet, joiden potentiaaliero on säädettävissä. Syöttökondensaattorien arvon aleneman sekä kokonaislatauksen ollessa tiedossa voidaan kaavan 12 tavoin laskea jännitealenema geneerisessä ohjainkortissa, kun hilajännitteiden potentiaaliero on 20V, joka on tyypillinen IGBT-tehomodulin V_{GE} arvo. Huomioitavaa on kondensaattorien arvoaleneman muutos potentiaalieron muuttuessa.

$$V_{Drop} = \frac{9,34\mu C}{55,18\mu F} = 0,17V \quad (12)$$

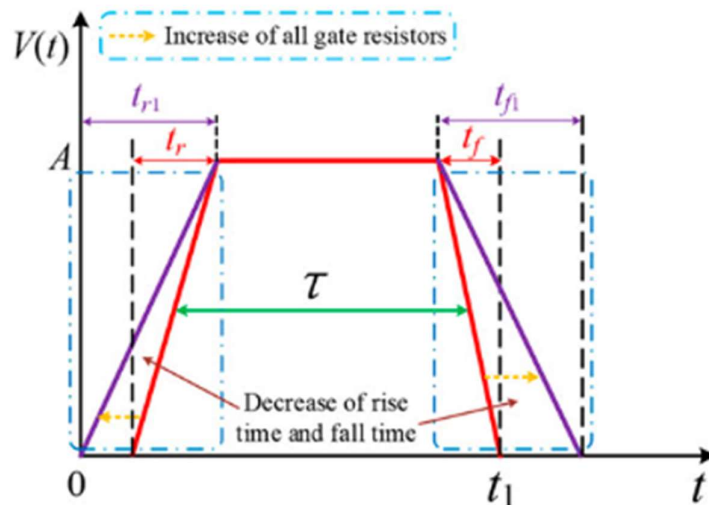
Ohjainkortin suuri yhteiskapasitanssi parantaa kondensaattorin suorituskykyä tietyissä olosuhteissa, kuten korkeissa lämpötiloissa ja suurien kuormamuutoksien aikana. Useiden kondensaattorien suuri kapasitanssi lisää myös ohjainkortin stabiilisuutta sekä pitkäikäisyyttä, sillä sen altistuminen äärimmäisille rasituksille on vähäistä. Kondensaattorien mitoittamisessa on oltava kuitenkin huolellinen, sillä liian suuren kokonaiskapasitanssin ylityöittäminen voi johtaa esimerkiksi hitauteen ja piirin epävakauteen.

4.2 Valikoitavat hilavastuskombinaatiot

Geneerisessä ohjainkortissa on valikoitavia hilavastuksia tehomodulien verifikaatiotestien vuoksi. Hilavastuksilla saavutetaan kytkentänopeuden hallinta ja minimoidaan kytkentäsiirtymisen aikana ilmenevät värähtelyhäiriöt. Seuraavan kaavan avulla mitoitetaan hilavastus.

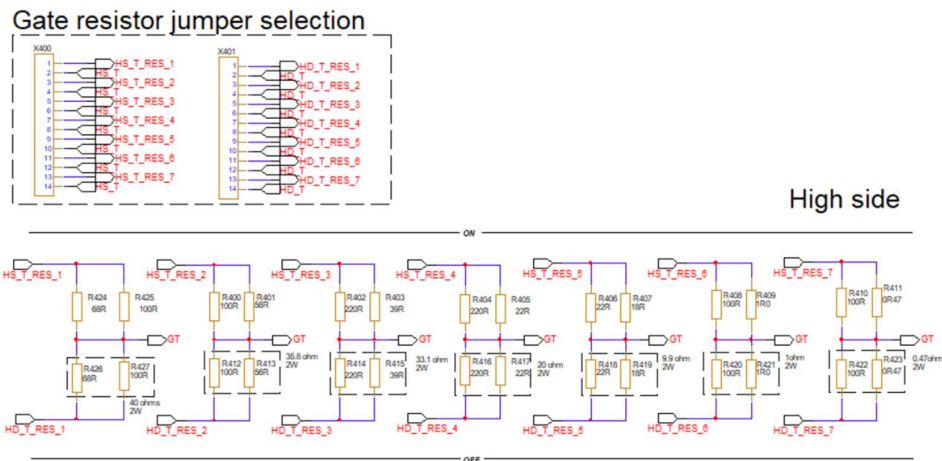
$$R_{Gate} = V_{Gate}/I_{Max} \quad (13)$$

Laskukaava on validi, mutta hilavastuksen simulointi ja testaus on välttämätöntä, jotta tehomodulin toiminta on optimaalisella tasolla. Kuviossa 12 on näkyvissä hilavastuksen vaikutus kytkentänopeuteen.



Kuvio 12. Hilavastuksen vaikutus kytkentänopeuteen [13, luku 2.3.2]

Geneeriseen ohjainkorttiin on asetettu seitsemän eri hilavastuslohkoa rinnakkain kytkettynä. Hilavastuslohkot mahdollistavat hyppykytkimien avulla $2^7 = 128$ vaihtoehtoa teoriassa. Tällä saavutetaan mahdollisimman kattavat hilavastuskombinaatiot pitäen mielessä kordin tiukka fyysinen mitoitus. Hilavastuskombinaation piirikaavio on kuviossa 13.



Kuvio 13. Hilavastuskombinaation piirikaavio.

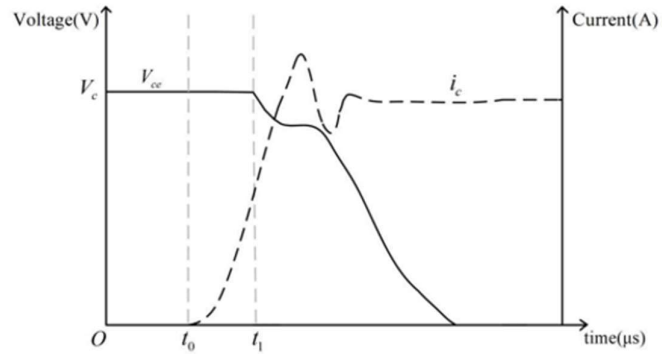
Kattavien hilavastuskombinaatioiden vuoksi arvoista on luotu Excel tiedosto, jonka pohjalta on luotu liitteet 1 ja 2. Liite 1 havainnollistaa mahdolliset hilavastusarvot 0,3 Ω - 1 Ω välillä ja liite 2 valittavat hilavastusarvot 1 Ω - 40 Ω välillä. Hilavastuskombinaatiot ovat valittavissa hyppyytkimien avulla käyttäjävälisyyden vuoksi.

4.3 Signaaligeneraattorirajapinta

Signaaligeneraattorirajapinta on luotu mahdollistamaan esimerkiksi tuplapulssitestaus tehomodulien verifiointissa. Tuplapulssitestauksen avulla tutkitaan tehomodulin dynaamista suorituskykyä, joka on yksi indikaattori tehomodulien verifiointissa. Testauksessa syötetään kaksi peräkkäistä pulssia lyhyellä aikavälillä tehomodulin hilaan, jonka nopea kytkeytyminen aiheuttaa nopeita virranmuutoksia. Kyseiset nopeat virranmuutokset aiheuttavat hajainduktanssia.

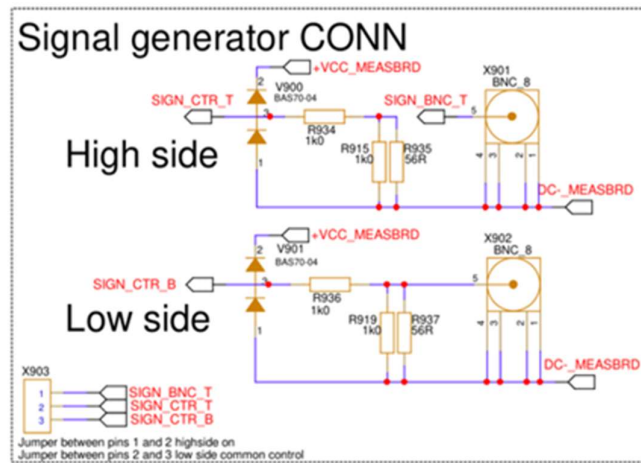
Hajainduktanssilla tarkoitetaan piirissä esiintyvää suunnittelematonta induktanssia. Useimmiten hajainduktanssi voi ilmetä kytkentöjen välisistä magneettisista kentistä. Hajainduktanssi voi aiheuttaa esimerkiksi tehomoduuleissa suunnittele-

mattomia virtapiikkejä. Kuviossa 14 on näkyvissä perinteinen tuplapulssitestauksessa esiintyvä aaltomuoto, jossa t_0 viittaa IGBT:n päälle kytkentään ja V_c kondensaattorin lataukseen.



Kuvio 14. Hetkellinen aaltomuoto IGBT:n toisessa kytketyksessä [14, luku 2].

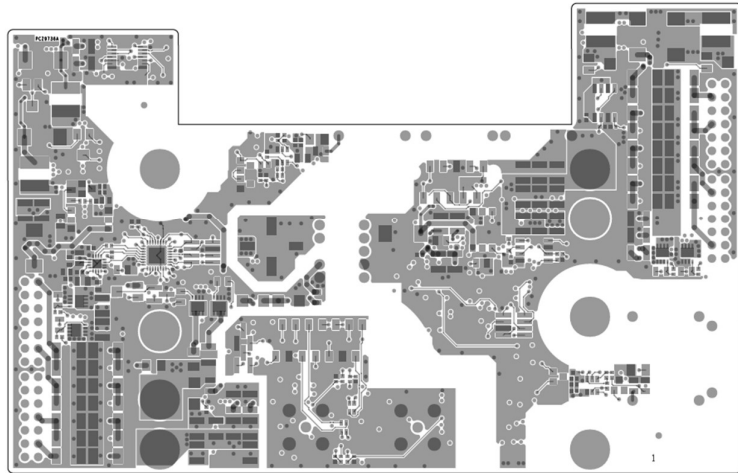
Hajainduktanssin tutkimisen mahdollistava signaaligeneraattorirajapinta on sijoitettu galvaanisesti isoloidulle kommunikaatiotasolle [15, luku 1]. Ohjaussignaali kulkeutuu signaali isolaattorin kautta ohjelmoitavalle logiikkalaitteelle, joka välittää pulssin ajuripiiriin kautta tehomodulille. Signaaligeneraattorirajapinnassa on myös valittavissa erilaisia ohjaustapoja, kuinka signaalia syötetään tehomodulille. Signaaligeneraattorirajapinnan piirikaavio on näkyvissä kuviossa 15.



Kuvio 15. Signaaligeneraattorirajapinnan piirikaavio.

4.4 Layout

Generisen ohjainkortin layout-suunnittelu on haasteellinen, sillä suunnittelussa on otettava huomioon iC7-laiterakenteessa oleva tiukasti mitoitettu tila leveys ja korkeus suhteessa sekä itse piirikortin pintavuoto eristevälit. Generisessä ohjainkortissa on yli 500 komponenttia, jotka on sijoitettu piirikortin molemmin puolin. Suorituskyvyn lisäämiseksi piirikortilla on 10 kerrosta, mikä mahdollistaa esimerkiksi laadukkaan tehonsiirron. Kuviossa 16 esiintyy ohjainkortin yläpuolen layout.



Kuvio 16. Geneerisen ohjainkortin yläpuolen layout suunnittelu.

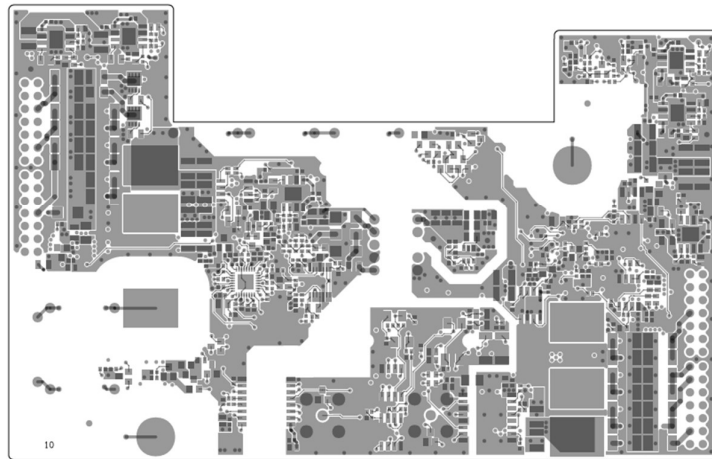
Ohjainkortin ylä- ja alahaara on isoitu toisistaan noudattaen Danfoss Drivesin ja IPC-standardien vaatimia ilma- ja pintavuotoetäisyyksiä. Kapeimmissa kohdissa kortilla on käytetty ryömintöjä riittävän etäisyyden takaamiseksi. [16, luku 15.3.]

Geneerisen ohjainkortin eristevälit estävät mahdollisen ilmakosteuden ja pölyn muodostavan sillan muodostumisen sekä mahdollisen irrallisen juotoksen kulkeutumisen nastojen välille estääkseen mahdollisen oikosulun aiheutumisen. Pintavuotoetäisyydet vaihtelevat riippuen jännitetasoista ja ilmasto olosuhteista. Taulukossa 1 on eristevälejä standardien ja suositusten mukaan.

Taulukko 1. Suositellut pintavuotoetäisyydet.

Working Voltage (V_{RMS} or DC)	Pollution Degree 2 (Distance in mm)	Pollution Degree 3 (Distance in mm)
<50	1.2	1.9
100	1.4	2.2
125	1.5	2.4
150	1.6	2.5
200	2	2.5
250	2.5	4
300	3.2	5
400	4	6.3
600	5.3	10
800	8	12.5
1000	10	16

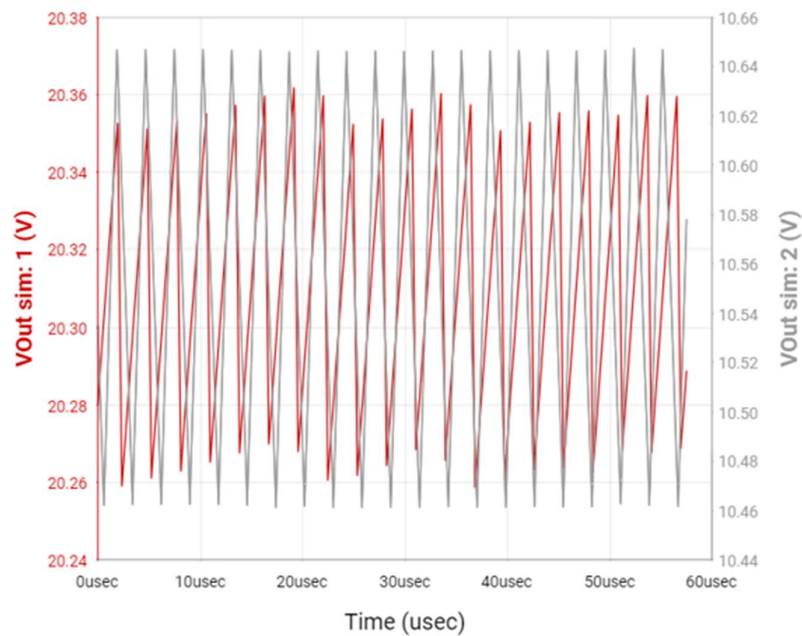
Kaksipuolisen ohjainkortin komponenttien sijoituspinta-alaa pienensivät eristysvälien lisäksi läpiporatut läpiviennit, joiden päälle ei ole suositeltavaa sijoittaa komponentteja. Kuviossa 17 on geneerisen ohjainkortin alapuoli.

**Kuvio 17.** Geneerisen ohjainkortin alapuolen layout suunnittelu.

5 SIMULOINTI

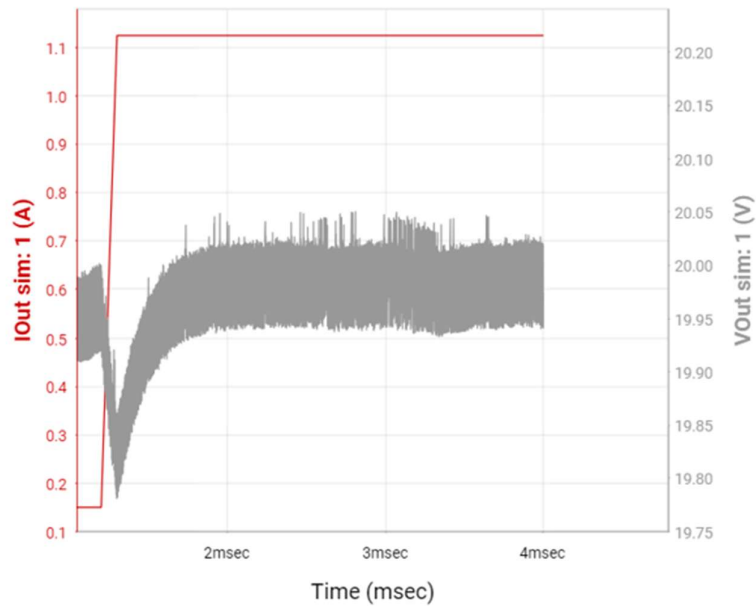
Tiukan aikataulun sekä ruuhkaantuneen piirilevyvalmistajan vuoksi tähän opinnäytetyöhön ei ole sisällytetty teoriaa tukevaa ja työn oikeellisuutta todentavia käytännön mittauksia. Kyseiset mittaukset tullaan suorittamaan tämän työn ulkopuolella. Mittauksien puutteellisuutta on korvattu teoriaa tukevilla simuloinneilla.

Luvussa 4.1.1 käsiteltävät säädettävän hilajännitetehtolähteen ollessa vakaassa tilassa syöttöjännitteen raja-arvot on simuloitu kuviossa 18. Simulaation tulokset ovat valideja raja-arvojen suunnittelussa tehtyjen laskutoimitusten perusteella. Kuviossa 18 vasemmalla puolella on kuvattu maksimaalisen hilajännitteen arvo, kun taas oikealla on minimiarvoon säädetty hilajännitteen suuruus.



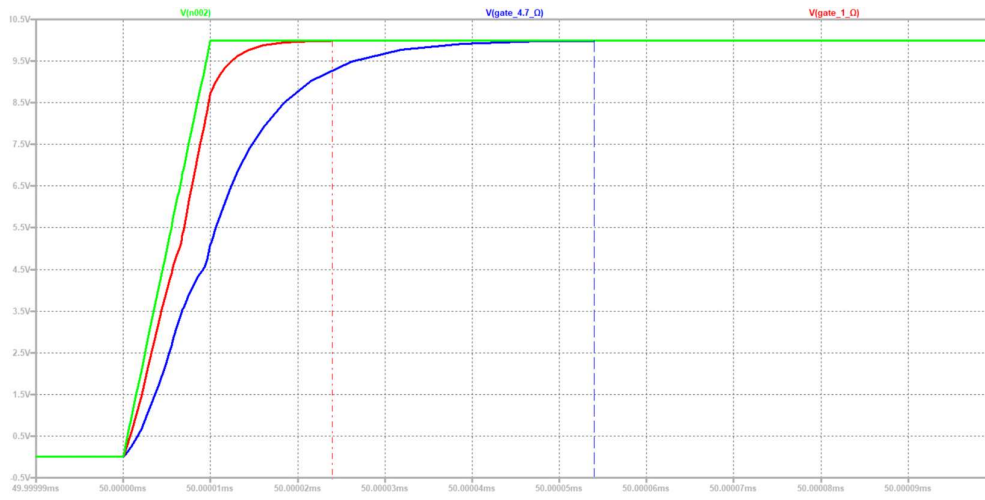
Kuvio 18. Positiivisen säädettävän hilajännitetehtolähteen raja-arvot.

Kuviossa 19 on simuloitu hilajännitetehtolähteen stabiilisuutta tehoduulin päälle kyteytyessä, kun kuorma on 1A:n suuruinen. Säädettävän hilajännitteen ollessa 20V tehoduulin aiheuttama jännitteen alenema on simulaatiossa noin 0,2V, mikä on linjassa luvussa 4.1.2 lasketun teorian kanssa.



Kuvio 19. Hilajännitetehtolähteen jännitteenalenema kytketyymisessä

Hilavastuksen vaikutusta kytkentänopeudelle on simuloitu kuviossa 20. Simulaatiossa 1ohm suuruinen hilavastus aiheuttaa noin 24ns viiveen, kun taas 4.7ohm hilavastuksella viive kasvaa noin 54ns suuruiseksi. Simulaation kytkentänopeuden aleneminen täydentää luvussa 4.2 käytyä teoriaa.



Kuvio 20. Simulaatiotulos hilavastuksen vaikutuksesta päälle kytkeytyessä.

6 YHTEENVETO

Työ oli rajattu hyvin tiukasti vain tiettyjen tuotekehitysalustan toiminnallisuuden läpikäyntiin. Tällä pyrittiin luomaan selkeä kuva siitä, mitkä toiminnallisuudet mahdollistavat työssä kehitettävän geneerisen ohjainkortin soveltuvuuden useille eri tehomodulleille.

Tässä työssä Danfoss Drivesin kaikki ennalta määrätyt toiminnallisuudet tuotekehitysalustalle täyttyivät. Niistä merkittävimpinä olivat tämän työn kannalta, säädettävät hilajänniteteholähteet, valittavat hilavastuskombinaatiot sekä signaaligeneraattorirajapinta. Työn haasteellisuutta lisäsi merkittävästi layoutin suunnittelu iC7-tuoteperheessä mitoitettuun ohjainkortin tilaan, sillä komponenttien määrä kasvoi huomattavasti geneerisen ohjainkortin toiminnallisuuden mahdollistamiseksi.

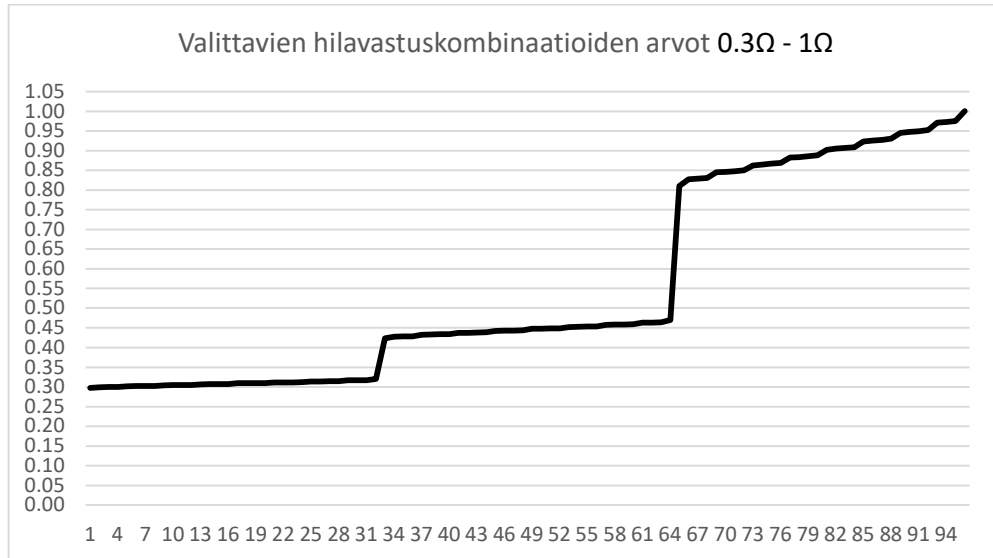
Tuotekehitysalustan käyttö on suunniteltu käyttäjälähtöisesti esimerkiksi hilavastuskombinaatioiden valinnassa. Kattavat hilavastuskombinaatiot ja helppokäyttöinen hilavastuksien valinta hyppykytkimien avulla vähentävät loppukäyttäjän työmäärää tehomodulien verifiointissa.

Työssä suunniteltu geneerinen ohjainkortti tarjoaa Danfoss Drivesille uudenlaisen tuotekehitysalustan, joka mahdollistaa lukuisien tehomodulien testauksen samalla tehomoduliohjainkortilla. Tuotekehitysalusta mahdollistaa mittadatan keräyksen ja vertailun eri tuotekehitysyksiköistä ja näin ollen vähentää myös mahdollisen päällekkäisen työmäärän syntyä eri yksiköiden välillä.

LÄHTEET

- [1] Rashid, Muhammad H., ja Muhammad Harunur Rashid. Power Electronics Handbook. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [2] Yazdani, Amirnaser, ja Reza Iravani. Voltage-Sourced Converters in Power Systems. 2010.
- [3] Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, "Resonant Circuits and Soft Switching (LLC Resonant Converter and Resonant Inverter)," Verkkojulkaisu, 2019, Saatavilla: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=68571>.
- [4] Baliga, B. Jayant. The IGBT Device. William Andrew Publishing, 2015.
- [5] Mitsubishi electric, IGBT Module, CM800DW-34T, 2022. Datalehti, Saatavilla: https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/powerdevices/datasheets/igbt/t_series/cm800dw-34t_e.pdf.
- [6] Manuel Arias Pérez de Azpeitia, Design and Control of Power Converters 2020. 2021. DOI: 10.3390/books978-3-0365-0703-3.
- [7] Monmasson ja Eric Monmasson. Power Electronic Converters: PWM Strategies and Current Control Techniques. London: Wiley-ISTE, 2011.
- [8] Rashid, Muhammad H., et al. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications. 2006.
- [9] Patel, Mukund R. Introduction to Electrical Power and Power Electronics. 2012. DOI: 10.1201/b13980.
- [10] Texas Instruments, TPS54360B 60-V Input, 3.5-A, Step-Down DC/DC Converter with Eco-Mode, 2018. Datalehti, Saatavilla: <https://www.ti.com/lit/ds/sym-link/tps54360b.pdf?ts=1712661417686>.
- [11] Harrison, Linden T. Current Sources and Voltage References. Burlington: Newnes, 2005.

- [12] Murata, Chip Monolithic Ceramic Capacitor for General GRM32ER71H106KA12. Datalehti, Saatavilla: <https://search.murata.co.jp/Ceramy/image/img/A01X/G101/ENG/GRM32ER71H106KA12-04A.pdf>.
- [13] Zhu, Yong, Zishun Peng, Yuxing Dai, Zhenxing Zhao, Zeng Liu, ja Zijie Zheng. "Study on the CM EMI Generation Characteristics of the Si/SiC Hybrid Switch at Different Switching Patterns and Gate Resistors." *Frontiers in Electronics (Online)* 2 (2022). DOI: 10.3389/felec.2021.789902.
- [14] Xia, Yan-Kun, ja Xin-Yang Li. "Calculation and Experiment of Stray Inductance of PCB Double-Pulse Test Circuit Based on Three-Dimensional Simulation." *IEEE Access* 10 (2022): 58769-58776. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3179662.
- [15] Costard, François, François Costa, Eric Laboure, Cyrille Gautier, Eric Labouré, Bertrand Revol, ja Fran Ois Costa. *Electromagnetic Compatibility in Power Electronics*. Wiley-ISTE, 2014.
- [16] Winder, Steve. Chapter 15 - Safety Issues. 2017. DOI: 10.1016/B978-0-08-100925-3.00015-X.

LIITTEET**LIITE 1****LIITE 2**