

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

ANDREJS STEPANOVŠ

Doktora studiju programmas „Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**MODULĀRAS NEPĀRTRAUKTAS BAROŠANAS SISTĒMAS
AR DAŽĀDIEM ENERĢIJAS AVOTIEM UN UZKRĀJĒJIEM
IZSTRĀDE UN IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing., profesors
I. GALKINS

Rīga 2011

UDK 621.311.6(043.2)
St 354 m

Stepanovs A. Modulāras nepārtrauktas
barošanas sistēmas ar dažādiem enerģijas
avotiem un uzkrājējiem izstrāde un izpēte.
Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU,
2011.-37 lpp.

Iespiests saskaņā ar IEE institūta 2011.gada 04.
aprīļa lēmumu, protokols Nr.54

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu Nacionālās programmas „Atbalsts
doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts
RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.

ISBN 978-9934-10-171-7

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.g. 4.aprīlī plkst. 11.00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 117 auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asoc. profesors, Dr.sc.ing. Leonards Latkovskis
Latvijas Zinātņu Akadēmijas Fizikāli enerģētiskais institūts

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Ivars Raņķis
Rīgas Tehniskā Universitāte

Vadošais pētnieks, Dr.sc.ing. Dmitrijs Vinnikovs
Tallinas Tehnoloģiskā Universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Andrejs Stepanovs(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 4 pielikumus, 190 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 190 lappuses. Literatūras sarakstā ir 68 nosaukumi.

TĒMAS AKTULIATĀTE

Mūsdienās alternatīvie enerģijas avoti kļūst arvien populārāki. Ēku būvniecībā ir daudz piemēru, kad alternatīvie enerģijas avoti ir iekļauti ēku elektriskajos tīklos. Ka arī tirgus piedāvā speciālas nepārtrauktās barošanas sistēmas, kuras neizmanto masīvos, videi nedraudzīgos un neuzticamos svina skābes akumulatorus, bet gan tādus uzkrājējus kā superkondensatorus un spararatus.

Nākotnes “zaļās” nepārtrauktās barošanas sistēmas izmantos gan alternatīvos enerģijas avotus, gan alternatīvos enerģijas uzkrājējus. Lai apvienotu visas tehnoloģijas vienā sistēmā, ir nepieciešamas daudzas pārveidošanas, kuras padara sistēmu diezgan sarežģītu. Lai to vienkāršotu, tiek piedāvāti dažādi unifikācijas paņēmieni.

Šajā disertācijā ir piedāvāti universālie spēka moduļi (USM), ar kuriem vār unificēt un vienkāršot nepārtrauktās barošanas sistēmas montāžu. Šie USM atšķiras no esošajām NBB modeļiem ar savu unikālo multifunkcionalitāti. Izmantojot esošos moduļus, var tikai palielināt sistēmas jaudu vai izmantot moduļus sistēmas uzticamības palielināšanai. USM ļauj pievienot tādus alternatīvos enerģijas avotus un uzkrājējus kā superkondensatorus, spararatus, degvielas elementus, saules bateriju paneļus, vēja ģeneratorus, utt.

Šobrīd tirgus piedāvā daudz un dažādu tipu NBB sistēmas. Dažas no šīm sistēmām nav paplašināmas. Dažas var tikt slēgtas paralēli, lai palielinātu jaudu un uzticamību. Dažas izmanto tādus alternatīvos enerģijas uzkrājējus kā superkondensatorus un spararatus. Visattīstītākās NBB sistēmas pārslēdzas starp darbības režīmiem (dubultās pārveidošanas režīms vai mijiedarbības ar tīklu režīms), lai palielinātu lietderību vai uzlabotu aizsardzību (vairāk, pirmajā nodaļā).

Šīs disertācijas ietvaros pētītā modulārā NBB sistēma apvieno lielāko daļu iepriekš aprakstīto NBB sistēmu īpašību.

Ar to var:

- konstruēt n-fāžu invertorus, n-fāžu aktīvos taisngriežus, DC/DC pārveidotājus;
- konstruēt dažādus NBB topoloģijas, piemēram, dubultās pārveidošanas NBB, NBB ar pārslēgšanos, līdzstrāvas NBB;
- izmantot dažādus enerģijas uzkrājējus, piemēram, superkondensatorus, spararatus;
- izmantot dažādus enerģijas avotus, piemēram, saules bateriju paneļus, vēja ģeneratorus, degvielas elementus;
- konstruēt NBB sistēmas vietām, kurās nav pieejams elektriskais tīkls, bet primāri tiek izmantots alternatīvās enerģijas avots.

Ar USM konstruētos spēka pārveidotājus var vienkārši pārveidot par kādu citu sistēmu.

Alternatīvo enerģijas avotu izmantošana samazina CO₂ emisijas. Alternatīvo uzkrājēju izmantošana var uzlabot sistēmas uzticamību.

DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Darba mērķis ir izveidot nepārtrauktās barošanas bloka sistēmu, kura var izmantot dažādus enerģijas avotus (elektriskais tīkls, dīzeļģenerators, saules bateriju panelis, vēja ģenerators, degvielas elements) un dažādus enerģijas uzkrājējus (akumulatoru baterijas, superkondensatorus, spararatus).

Lai sasniegtu uzstādīto mērķi, tika nolemts neizmantot dažādus pārveidotājus katram enerģijas uzkrājējam vai avotam, bet gan izstrādāt universālu spēka moduli, kurš var tikt izmantots kā nepieciešamais pārveidotājs. Lai to paveiktu, bija nepieciešams:

- izanalizēt ar individuāliem enerģijas avotiem un uzkrājējiem saistītos pārveidotāju tipus un izvēlēties spēka shēmu priekš universālā spēka moduļa;

- izveidot modulāru spēka plati;
- izveidot aizvara vadības shēmas;
- izveidot mērījumu shēmas;
- izveidot efektīvu un modulāru dzesēšanas sistēmu.

PĒTĪJUMA LĪDZEKĻI UN METODES

Universālajam spēka modulim un citiem NBBS elementiem tika izveidoti precīzi Matlab-simulink modeļi. Ar to palīdzību tika atvieglota dažādu spēka shēmu un vadības algoritmu atklāšana. Visas shēmas pirms eksperimentālās testēšanas tika modelētas un tikai pēc veiksmīga rezultāta, tika veikta eksperimentālā testēšana. Modelēšanas rezultāti un eksperimentālie dati tika salīdzināti un analizēti.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

- Ir izstrādāta nepārtrauktās barošanas sistēma, kura var izmantot dažādus enerģijas avotus un uzkrājējus.
- Ir izstrādāts universālais spēka modulis vienkāršai un ātrai dažādu nepārtrauktās barošanas sistēmu montāžai.
- Vairāki USM var tikt apvienoti, ne tikai lai izmantotu dažādus enerģijas avotus un uzkrājējus, bet lai palielinātu NBB jaudu.

DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS

Izstrādātā nepārtrauktās barošanas bloka sistēma var izmantot tādus enerģijas avotus, kā elektrisko tīklu, dīzeļģeneratorus, saules baterijas paneļus, vēja ģeneratorus, degvielas elementus, kā arī uzglabāt enerģiju akumulatoru baterijās, superkondensatoros, spararatos.

Ar to var izveidot dažādas NBBS kombinācijas.

Var uzkonstruēt:

- vienas fāzes vai trīs fāžu klasisko NBBS topoloģiju;
- NBB ar dažādu ieejas un izejas fāžu skaitu kombinācijām;
- NBB vietām, kurās nav pieejams elektriskais tīkls, bet kā primārais enerģijas avots tiek izmantots saules bateriju panelis vai vēja ģenerators.
- NBBS, kura enerģiju uzkrāj superkondensatorā vai spararatā, nevis svina skābes akumulatorā. Superkondensatoram un spararatam ir priekšrocības pār akumulatoriem, ja tiek izmantota NBBS ar dīzeļģeneratoru;
- līdzstrāvas NBBS, kurai ir augstāka lietderība nekā maiņstrāvas NBBS.

Šādas NBBS var palīdzēt samazināt CO₂ emisijas un padarīt NBBS videi draudzīgākus.

USM var tikt izmantots laboratorijās priekš ātras dažādu pārveidotāju izveidošanas, piemēram: invertoriem, aktīvajiem taisngriežiem, ar tīklu saistītiem sprieguma avota invertoriem, pazeminošajiem vai paaugstinošajiem pārveidotājiem, frekvenču pārveidotājiem un pat aktīvajiem filtriem.

Izstrādātā modulārā dzesēšanas sistēma, kura ir lēta un viegli ražojama, var tikt viegli pielāgota citām jaudām un formām, un var tikt izmantota daudzos citos nākotnes projektos, kuros būs nepieciešama šķidrā dzesēšana.

Izstrādātais precīzais Industriālās Elektrotehnikas un Elektronikas institūta saules bateriju paneļa Matlab-simulink modelis var tikt izmantots nākotnes projektos citu sistēmu modelēšanai.

DARBA APROBĀCIJA

1. The 10th International Biennial Baltic Electronics Conference, BEC2006, Estonia, Tallinn, 4.-6. October, 2006
2. Power electronics and energy efficiency 2006, Ukraine, Alushta, 17.-21. September, 2006
3. 4th International Symposium – “Topical Problems of Education in the Field of Electrical and Power Engineering”, Estonia, Kuressare, 15.–20. January, 2007
4. 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Denmark, Aalborg, 2.-5. September 2007.
5. Power electronics and energy efficiency 2007. Ukraine, Alushta, 18.-22. September, 2007.
6. 5th International Symposium – “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering”, Estonia, Kuressare, 14.–19. January, 2008.
7. Power electronics and energy efficiency 2008, Ukraine, Alushta, 17.-21. Septembre, 2008
8. The 11th International Biennial Baltic Electronics Conference, BEC2008, Estonia, Tallinn 6.-8. October, 2008.
9. 50th International Scientific Conference, Latvia, Riga, 11.–13. October, 2009
10. Power electronics and energy efficiency 2009, Ukraine, Alushta, 21.-26. September, 2009.
11. 8th International Symposium – “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering”, Estonia Parnu, January 11-16, 2010
12. The 51st International Scientific Conference „Power And Electrical Engineering”, October 2010, Riga, Latvia.
13. 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC2010), Macedonia, Ohrid, 2010
14. Power electronics and energy efficiency 2010, Ukraine, Alushta, 20.-25. September, 2010.

AUTORA PUBLIKĀCIJAS

1. * Galkin I., Stepanov A., Laugis J. Outlook of usage of supercapacitors in uninterruptible power supplies. The 10th International Biennial Baltic Electronics Conference, 2006, 4.-6. October, Estonia, Tallinn
2. Галкин И., Степанов А., Бисэниекс Л. Перспективы использования суперконденсаторов в источниках бесперебойного питания, Силовая Электроника и Энергоэффективность 2006. 17.-21. September, 2006, Ukraine, Alushta,
3. Stepanov A., Galkin I. Development of supercapacitor based uninterruptible power supply. 4th International Symposium - Topical Problems of Education in the Field of Electrical and Power Engineering, 2007. 15.–20. January, Estonia, Kuressaare.
4. * Stepanov A., Galkin I., Bisenieks L. Implementation of supercapacitors in uninterruptible power supplies. 12th European Conference on Power Electronics and Applications, 2007, 2.-5. September, Denmark, Aalborg.
5. Bisenieks L., Galkins I., Stepanovs A. The use of supercapacitors for widening the scope of application of photovoltaic cells. 48th International Scientific Conference, 2007. 11.-13. October , Latvia, Riga.

6. Stepanov A., Galkin I., Bisenieks L. Pspice simulation of an on-line converter powered by a photovoltaic array. Power electronics and energy efficiency 2007. 18.-22. September, Ukraine, Alushta.
7. Bisenieks L., Galkin I., Stepanov A. Connection of photovoltaic modules to the electricity supply grid or to a local consumer utilizing topology of the on-line converter. The 11th International Conference on Solar Energy in High Latitudes, 2007. 30. May – 1. June, Latvia, Riga
8. Bisenieks L., Stepanov A., Galkin I. Comparison of a traditional diode photovoltaic model and simplified I-V curve based model. 5th International Symposium - Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, 2008. 14.-19. January, Estonia, Kuressaare.
9. Stepanov A., Bisenieks L., Galkin I. Comparison of controllable rectifiers for direct-current supply system. Power electronics and energy efficiency 2008. 17.-21. September, Ukraine, Alushta.
10. * Galkin I., Stepanov A., Bisenieks L. Direct-current supply system with capability of an uninterruptible power supply. The 11th International Biennial Baltic Electronics Conference, 2008. 6.-8. October, Estonia, Tallinn.
11. Sokolovs A., Stepanov A., Galkin I. High frequency sine wave PWM generation – programmable logic, microprocessor and analogue approach. 6th International Symposium -Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, 2009. 12.-17. January, Estonia, Kuressaare.
12. Bisenieks L., Stepanov A., Galkin I. Challenges in elaboration of a modular power converter. 7th International Symposium - Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, 2009. 15.-20. June, Estonia, Narva-Joesu.
13. Stepanov A., Galkin I., Bisenieks L., Sokolovs A., Development of a modular power converter. 50th International Scientific Conference, 2009. 11.-13. October, Latvia, Riga.
14. Stepanovs A., Galkins I., Bisenieks L. Development of Fast and Easy Reconfigurable Modular Power Converter, Power electronics and energy efficiency 2009, 21.-26. September, 2009, Ukraine, Alushta.
15. A. Stepanov, I. Galkin, „Selection of Power Factor Correction for Uninterruptible Power supply System”, 8th International Symposium - Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering 2010, January 11-16, 2010, Estonia, Parnu.
16. Stepanovs A., Bogdans V., Suskis P., Galkins I. Active Rectifier for Uninterruptible Power Supply, The 51st International Scientific Conference „Power And Electrical Engineering,” October 2010, Riga, Latvia.
17. * Suzdalenko A., Stepanovs A., Galkins I. Choice of Power Factor Corrector for Effective Operation of MicroGrid and its Elements, International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, 15.-18. June, 2010, Poland, Lagow.
18. * Stepanov A., Galkin I., Gook A. Development of versatile modular power converter for educational and research needs, 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC 2010), 6.-8. September 2010, Ohrid, Republic of Macedonia.
19. * Galkin I., Stepanov A., Suskis P. Selection of power factor corrector for modular uninterruptible power supply system, 14th International Power Electronics and Motion Control Conference 2010, 6.-8. September 2010, Macedonia, Ohrid.
20. Stepanov A., Galkin I., Selection of inverter topology for uninterruptible power supply system, Power electronics and energy efficiency 2010, 20.-25. September, 2010, Ukraine, Alushta.

* - publikācijām ir iekļautas internacionālajā IEEE datu bāzē.

Doktora disertācijas saturs

ANOTĀCIJA

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

PATEICĪBAS

IEVADS

1. PĒTĪJUMS PAR TĪKLA PROBLĒMAM UN METODES TO RISINĀŠANAI
2. UNIVERSĀLĀ SPĒKA MODUĻA IZSTRĀDE
3. UNIVERSĀLĀ SPĒKA MODUĻA, VADĪBAS KODOLA UN NBBS ELEMENTU
MATLAB-SIMULINK MODEĻU IZSTRĀDE
4. UNIVERSĀLĀ SPĒKA MODUĻA PIELIELTOŠANA NBBS KONSTRUĒŠANĀ
5. UNIVERSĀLĀ SPĒKA MODUĻA IZMAKSAS

SECINĀJUMI

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

PIELIKUMI

Ievads

Mūsdienu pasaulē, elektroenerģija ir nepieciešama visur. Bez tās nevar darboties ražošana, slimnīcas, bankas utt. Modernais elektriskais aprīkojums dāvā daudz priekšrocības, taču, lai šis aprīkojums spētu pareizi funkcionēt, ir nepieciešama kvalitatīva enerģija. Labs piemērs ir dators, kurš dod mums bezgalīgas iespējas: atvieglo daudzus darbus, palīdz mācībās, ļauj sazināties ar pasauli, piedāvā izklaidi utt. Diemžēl daudzi cilvēki ir iepazinuši nepatīkamo gadījumu, kad dēļ elektrotīkla kļūmes, tiek zaudēts daudzu stundu darbs. Labākais veids, kā izvairīties no ar tīklu saistītām problēmām, ir pieslēgt slodzi caur nepārtrauktās barošanas bloku (NBB). Ir pieejami dažādu topoloģiju NBB, kuri dod dažādu līmeņu aizsardzību un pasargā no dažādām tīkla kļūmēm. Katrai topoloģijai ir trūkumi un priekšrocības. Lai saprastu, kāda aizsardzība ir nepieciešama konkrētai slodzei, ir nepieciešamas saprast vienkāršākās tīkla kļūmes un to radītās briesmas.

Runājot vispārīgā, neeksistē lēts un universāls risinājums visu veidu slodzēm (iekārtām). Katra veida NBB ir piemērots atbilstošām slodzēm un tīkla kļūmēm. Maiņstrāvas dzinēji labāk darbojas ar tīru sinusu, bet to pārsvarā nodrošina dubultās pārveidošanas un reizēm ar tīklu saistītā topoloģijas NBB. Lielākā daļa iekārtu, kurām ir impulsveida barošanas bloki (IBB), var tikt barotas ar jebkādas formas spriegumu: meandrs, pakāpienveida taisnstūris (kvazi-sinuss), sinuss un līdzspriegums. Šo iemeslu dēļ, augstas lietderības un uzticamības sasniegšanai, ir nepieciešami NBB ar dažādām topoloģijām.

Vēl viena aktuāla īpašība ir videi draudzīgas iekārtas, ar kurām tiek izmantoti alternatīvās enerģijas avoti kā vēja ģeneratori un saules bateriju paneļi, kuri samazina CO₂ emisijas. Mūsdienu tirgū var atrast dažādus risinājumus saules un vēja enerģijas iegūšanai. Diemžēl šīs sistēmas nevar vienkārši integrēt NBB sistēmās. Tikai daži ražotāji piedāvā pietiekami elastīgus risinājumus, kuri ļauj konstruēt dažādas sistēmas lai izmantotu iegūto enerģiju dažādos veidos. Tādas sistēmas ļauj konstruēt barošanas sistēmas, kuras:

- var darboties ar tīklu nesaistītā veidā;
- var rekuperēt iegūto enerģiju uz tīklu;
- sistēma var darboties kā rezerves sistēma.

Lai realizētu šādas sistēmas, ražotāji piedāvā dažādus invertorus katrai sistēmai:

- invertors ar tīklu saistītai sistēmai;
- invertors ar tīklu nesaistītai sistēmai;
- invertors rezerves barošanas sistēmai.

Invertori, kuri paredzēti rezerves barošanas sistēmām, ir aprīkoti ar papildus ieejām un izejām, lai varētu darboties ar dīzeļģeneratoriem. Gadījumā, kad tīklā ir notikusi kļūme un saules bateriju panelis nespēj nodrošināt nepieciešamo jaudu, tiek palaists DG vai arī tiek izmantota akumulatoros uzkrātā enerģija. Ar laiku, šāda sistēma kļūs aizvien populārāka. Lielākā daļa mūsdienu sistēmu ir veidotas, lai izmantotu svina skābes akumulatorus enerģijas rezerves veidošanai.

Kā tiks apskatīts nākamajās nodaļās, tādi alternatīvie uzkrājēji, kā superkondensatori un sparatori, var sniegt lielāku uzticamību. Dēļ to augstās uzticamības un ar vidi draudzīgās tehnoloģijas, nākotnē interese par alternatīvajiem enerģijas uzkrājējiem pieaugs. Līdz ar to, nepieciešamība pēc NBB ar šādiem uzkrājējiem arī pieaugs.

Kā var saprast, ir nepieciešami daudzi dažādi pārveidotāji, kuri var savienot visus iepriekš minētos enerģijas avotus un uzkrājējus. Atrast ražotāju, kurš piedāvā visus nepieciešamos pārveidotājus priekš NBB sistēmas, nav viegli.

Šī iemesla dēļ, tika nolemts izveidot universālu spēka moduli, kurš var tikt izmantots, lai samontētu dažādas NBB sistēmas vai citus spēka pārveidotājus.

1. Tīkla problēmu analīze un risinājumu metodes

1.1. *Tīkla problēmu klasifikācija*

Tīkla notikumi ir klasificēti pēc standarta EN 50160 [2]:

- 1) Sprieguma frekvence
- 2) Sprieguma amplitūdas izmaiņas
- 3) Straujas sprieguma izmaiņas
- 4) Sprieguma iekritieni
- 5) Īsi sprieguma pārrāvumi
- 6) Ilgi sprieguma pārrāvumi
- 7) Īslaicīgs pārspriegums
- 8) Pārejas procesa pārspriegums
- 9) Spriegumu disbalanss
- 10) Sprieguma harmonikas
- 11) Sprieguma zemākās harmonikas

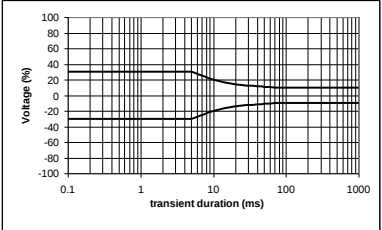
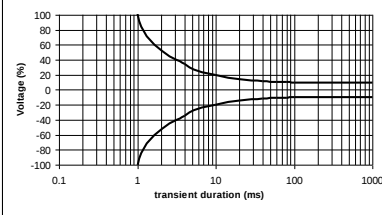
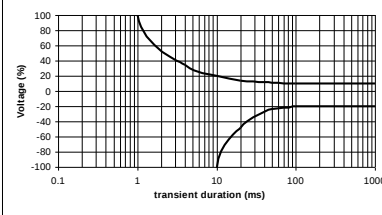
Teorētiski, visi tīkla notikumi (sprieguma nobīde $\pm 10\%$ ārpus no nominālās vērtības) var izsaukt elektrotehnikas kļūmi, īpaši, jūtīgām elektronikas iekārtām. Bieži vien par $+10\%$ palielināts spriegums samazina iekārtu darba mūžu, bet vēl lielāki sprieguma paaugstinājumi var sabojāt iekārtas. Sprieguma samazinājums par -10% , izraisa lielāku tīkla strāvu impulsveida barošanas blokos (IBB), līdz ar to vadītāju, droseļu un citu elementu temperatūra pieaug, kas ilgtermiņā var novest pie iekārtu bojājuma. Lielu sprieguma pazeminājumi var izsaukt tūlītēju iekārtas izslēgšanos. Pazemināts spriegums sastāda lielu daļu (līdz 95%) no tīkla problēmām un tie elektroenerģijas kvalitātes kategorijā ir klasificēti kā sprieguma iekritieni. Sprieguma iekritieni, iespējams, ir visnepatīkamākā elektroenerģijas kvalitātes problēma [1, 3, 4, 7]

Būtiski, ka sprieguma iekritieni un īslaicīgi sprieguma pārrāvumi izraisa $2/3$ no visiem bojājumiem (zaudējumiem) [4].

1.2. *NBB klasifikācija*

Lai pasargātu slodzi no tīkla problēmām, to var pieslēgt pie tīkla caur NBB. NBB klasifikācija ir aprakstīta standartā EN 620040-3 [3, 6]. Tabula 1.1. izskaidro klasifikācijas kodu.

Tabula 1.1. Klasifikācijas koda izskaidrojums

X X X	-	X X	-	X X X
Izejas atkarība		Izejas forma		Izejas dinamiskais sniegums
VFD – no sprieguma un frekvences atkarīgs Šajā grupā ir NBB ar pārslēgšanos. Pasargā no: 1) Tīkla pazušanas; 2) Sprieguma iekritiena; 3) Sprieguma pīķa.		S – sinusoidāls spriegums ar THD<8%. Visām harmonikām jāatbilst standartā EN 61000-2-2 noteiktajām.		1 – bez sprieguma pārrāvuma 
VI – no sprieguma neatkarīgs Šajā grupā ir NBB, kas mijiedarbojas ar tīklu. Pasargā no: 1) Tīkla pazušanas; 2) Sprieguma iekritiena; 3) Sprieguma pīķa; 4) Pazemināta sprieguma; 5) Palielināta sprieguma.		X- spriegums ir sinusoidāls pie lineāras slodzes. Pie nelineāras slodzes THD pārsniedz 8% un var būt ražotāja norādītajā diapazonā.		2 – sprieguma pārrāvums līdz 1 ms 
VFI – no sprieguma un frekvences neatkarīgs Šajā grupā ir dubultās pārveidošanas NBB. Pasargā no: 1) Tīkla pazušanas; 2) Sprieguma iekritiena; 3) Sprieguma pīķa; 4) Pazemināta sprieguma; 5) Paaugstināta sprieguma; 6) Sprieguma pīķiem; 7) Frekvences variācijām; 8) Sprieguma kropļojumiem; 9) Sprieguma harmonikām.		Y – spriegums ir nesinusoidāls ar THD, kas pārsniedz standartā EN 61000-2-2 norādīto.		3 – sprieguma pārrāvums līdz 10 ms 

No iepriekš minētā var secināt, ka vislabāko aizsardzību nodrošina NBB ar klasifikācijas kodu “VFI-SS-111”. Kas nozīmē, ka izejas spriegums:

- nav atkarīgs no ieejas sprieguma;
- izejas spriegums visos darbības režīmos (no akumulatora, tīkla un apejošajā režīmā) ir sinusoidāls ;
- pie darba režīmu maiņas, izejas spriegumam nav pārrāvumu;
- pārejas režīmā, izejas spriegums nepārsniedz $\pm 30\%$ no nominālā sprieguma.

Ir vēl daudz citu veidu NBB, taču tie netiek apskatīti. No citiem NBB vēl tiks apskatīti hibrīdais NBB (dubultās pārveidošanas pēc pieprasījuma) un DC NBB [8, 9], jo tie nākotnē varētu būt populāri dēļ augstās lietderības.

Tabula 1.2. Citi NBB tipi

Hibrīdais vai dubultās pārveidošanas pēc pieprasījuma	VFI – no sprieguma un frekvences neatkarīgs (dubultās pārveidošanas režīmā).	Tāds pats, kā dubultās pārveidošanas NBB.	Normālas darbības laikā darbojas kā NBB, kas mijiedarbojas ar tīklu, ar augstu lietderību, bet ieejas sprieguma nobīdes gadījumā tas pārslēdzas uz dubultās pārveidošanas režīmu.
DC UPS	VFI – no sprieguma un frekvences neatkarīgs	Tāds pats, kā dubultās pārveidošanas NBB.	Taisngriezis darbojas pastāvīgi.

1.3. *Nepārtrauktās barošanas bloku sistēmu enerģijas avotu apskats un to pārveidotāji*

Visu nepārtrauktās barošanas bloku galvenais enerģijas avots normālā darbības režīmā ir elektriskais tīkls. Kad tīkls nav pieejams, NBB nodrošina slodzi ar enerģiju no kāda cita avota. Avotus var sadalīt divās grupās: maiņstrāvas un līdzstrāvas avoti (tabula 1.3).

Tabula.1.3. Enerģijas avoti

Mainstrāvas avoti	Līdzstrāvas avoti
Tīkls - avots, kurš ir pieejams tuvu 99.9% + relatīvi lēts enerģijas avots - ir jāpārveido, lai saglabātu enerģijas uzkrājējā Dīzeļģenerators + augstas uzticamības enerģijas avots + enerģijas daudzums praktiski atkarīgs no degvielas tvertnes izmēra + nomaļās vietās var tikt izmantots tīkla vietā - augstas saražotās enerģijas izmaksas - gadījumos, kad izmanto iekšējās, ir nepieciešama speciāla telpa, lai samazinātu troksni un vibrācijas Vēja ģenerators + videi draudzīgs enerģijas avots + nomaļās vietās var tikt izmantots tīkla vietā - mainīgas jaudas avots - nepieciešams spēka pārveidotājs, lai pieslēgtu slodzi Spararats* + videi draudzīgs enerģijas avots (uzkrājējs) + liels jaudas blīvums + augsta uzticamība + īsā laika periodā (zem 30 s) var būt lētāks avots nekā akumulatori - mazs neliels enerģijas blīvums (parasti līdz 30s) - nepieciešams sarežģīts divvirzienu DC/AC pārveidotājs	Akumulators + lēts jaudas avots pie ilgiem rezerves režīmiem - zems enerģijas blīvums - nepieciešams pārveidotājs, lai barotu maiņstrāvas slodzi Superkondensators + augstas uzticamības enerģijas avots + daudz uzlādes/izlādes ciklu - augstas izmaksas pie gariem rezerves režīmiem - nepieciešams pārveidotājs, lai barotu maiņstrāvas slodzi Saules bateriju panelis + videi draudzīgs enerģijas avots + nomaļās vietās var tikt izmantots tīkla vietā - mainīgas jaudas avots - dārgs enerģijas avots Degvielas elements + enerģijas daudzums praktiski atkarīgs no degvielas tvertnes izmēra + videi draudzīgs enerģijas avots - ļoti dārgs enerģijas avots - nepieciešams pārveidotājs, lai barotu maiņstrāvas slodzi Spararats* + videi draudzīgs enerģijas avots (uzkrājējs) + liels jaudas blīvums + augsta uzticamība + īsā laika periodā (zem 30 s) var būt lētāks avots nekā akumulatori - mazs enerģijas blīvums (parasti līdz 30s) - nepieciešams sarežģīts divvirzienu DC/AC pārveidotājs

*- spararats darbojas no maiņstrāvas, taču daži ražotāji piedāvā spararatus ar integrētu DC/AC pārveidotāju. Tādā gadījumā spararats darbojas kā līdzstrāvas avots.

1.4. *Uz universālu spēka moduli bāzēta nepārtrauktās barošanas bloka izstrādes pamatojums*

Kā tika minēts iepriekš, eksistē daudz dažādi enerģijas avoti, kuri var tikt izmantoti NBB sistēmās. Katram no tiem ir savas priekšrocības un trūkumi. Tādēļ NBB sistēma nekad nesastāv tikai no viena enerģijas avota. NBB gadījumā, viens enerģijas avots papildina otru un līdz ar to sistēma kļūst uzticamāka. Sistēmā, kura nav ļoti augsti uzticama, parasti tiek izmantoti tikai divi enerģijas avoti (visbiežāk tīkls un svina skābes akumulatori). Uzticamākās sistēmās, parasti ir trīs enerģijas avoti (visbiežāk tīkls, svina skābes akumulatori un dīzeļģenerators) [5].

Mūsdienu tirgū ir pieejamas dažādas NBB sistēmas ar dažādām enerģijas avotu kombinācijām, piemēram: superkondensatoriem, spararatiem, degvielās elementiem, saules bateriju paneļiem un vēja ģeneratoriem.[11,19,20,21,22]. Lielākā daļa no šīm sistēmām joprojām nav papildināma ar papildus enerģijas avotiem. Piemēram, NBB sistēma, kurā rezerves barošanu veido svina skābes akumulatori, nevar tikt pārveidota uz superkondensatora

(vai kāda cita enerģijas avota) rezerves barošanu. Tas nozīmē, ka ja sistēmā ir vairāki, dažādi enerģijas avoti, tad ir nepieciešami arī dažādi pārveidotāji. Daudzi pārveidotāji padara sistēmu komplicētu un nestabilu.

Šī iemesla dēļ, tika nolemts izveidot universālu spēka moduli (USM), ar kura palīdzību tiks atvieglota sistēmas konstruēšana priekš jebkādiem enerģijas avotiem un uzkrājējiem.

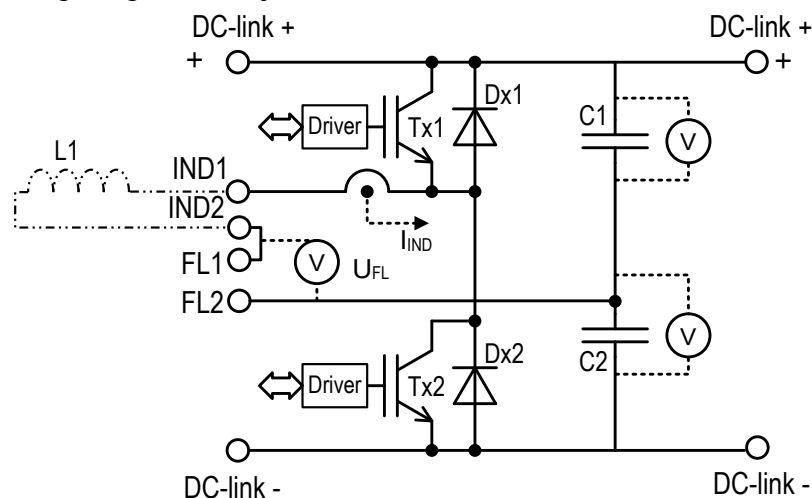
Spēka pārveidotāji (populāri pārveidotāji, kā taisngrieži, invertori, paaugstinošie DC/DC, pazeminošie DC/DC un citi) pamatā sastāv no viena vai vairākiem pustilta pleciem (divi virknē slēgti tranzistori ar pretēji paralēli slēgtām diodēm). Izmantojot n-USM, kuri katrs sastāv no pustilta pleca var samontēt teju jebkādu pārveidotāju.

Disertācijā piedāvātais „UNIVERSĀLAIS SPĒKA MODULIS” sastāv no visām nepieciešamajām daļām, lai darbotos kā vienkāršs spēka pārveidotājs. Vairāki savstarpēji savienoti spēka moduļi var darboties kā lielākā daļa NBB topoloģiju (arī 3 fāžu), frekvenču pārveidotāju, aktīvo filtru u.c.

Ierosinātajam USM jāsastāv no:

- diviem spēka slēdžiem ar pretēji paralēlām diodēm, kuri ir savienoti kā pustilta plecs;
- tranzistoru vadības shēmām;
- līdzstrāvas posma kondensatoriem;
- mērīšanas elementiem;
- dzesēšanas sistēmas;
- papildus barošanas bloka;
- vadības iekārtas.

Ierosinātā modulārā spēka pārveidotāja shēma ir attēlota attēlā 1.1.



Att. 1.1. Universālā spēka moduļa spēka shēma

Konstruējot spēka pārveidotāju no USM, ir iespējams izvēlēties NBB topoloģiju, līdz ar to ir iespēja izvēlēties starp elektroenerģijas kvalitāti un efektivitāti. Lielākā daļa no tirgū pieejamajiem NBB ir veidoti tā, lai tie darbotos tikai vienā režīmā (izņēmums ir “hibrīdā NBB”) topoloģija [9], kura var darboties kā “mijiedarbībā ar tīklu” vai kā “dubultās pārveidošanas NBB”).

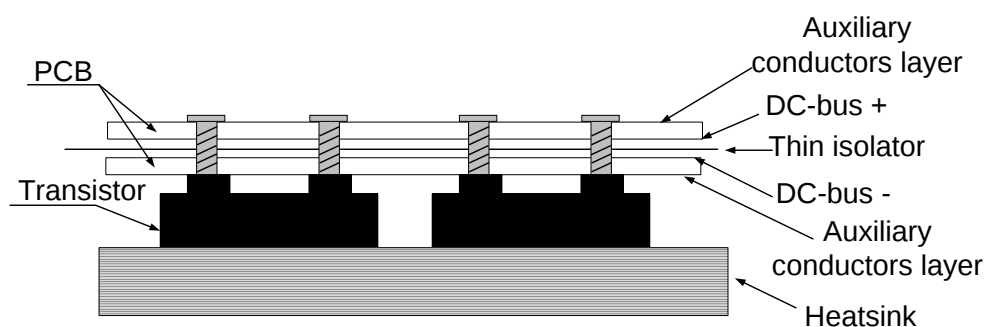
2. Universālā spēka moduļa izstrāde

Universālā spēka moduļa nepieciešamība tika apskatīta 1.5. nodaļā. Šajā nodaļā ir aprakstīta USM izstrāde.

2.1. Spēka plate

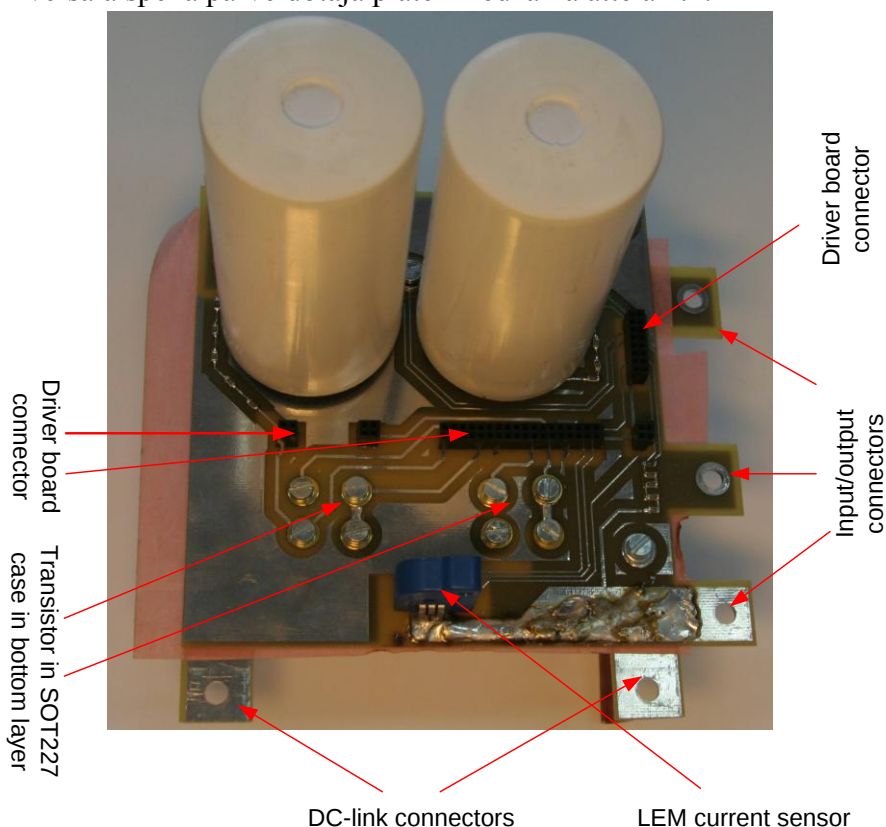
Tika nolemts izstrādāt universālus spēka moduļus ar nominālo strāvu līdz 20-25A, pie kuras invertora vai taisngrieža jauda būtu ap 4-5kW.

Izstrādājot spēka plati, tika pielietoti paņēmieni, lai samazinātu parazītiskās induktivitātes, samazinātu pārspriegumus tranzistoru pārslēgšanās laikā un palielinātu spēka plates drošumu. Attēlā 2.1. ir redzama plates skice, tranzistoru un dzesēšanas sistēmas novietojums.



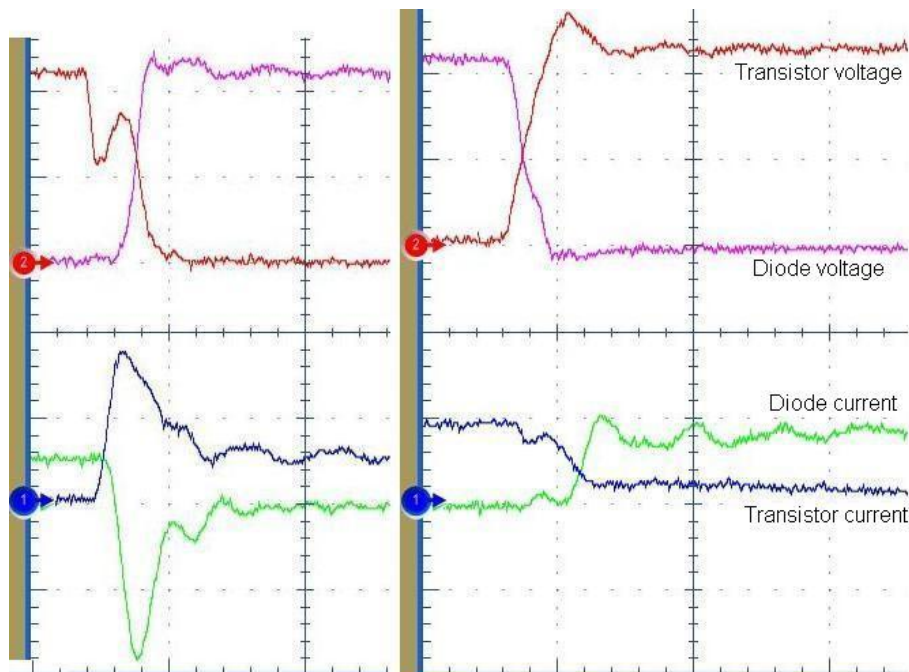
Att.2.1. Universālā spēka pārveidotāja šķērsgriezums

Samontēta universālā spēka pārveidotāja plate ir redzama attēlā 2.2.



Att.2.2. Universālais spēka pārveidotājs bez aizvara un mērījumu ķēdes

Attēlā 2.3 ir redzami eksperimentālie rezultāti no tranzistora un diodes pārslēgšanās. Eksperiments tika veikts pie līdzstrāvas posma sprieguma 550V un komutējamās strāvas 25A. Testēšana pie lielāka sprieguma (pie 800V un pie 25A) nebija iespējama dēļ laboratorijas aprīkojuma trūkuma.



Att. 2.3. Tranzistora un diodes pārslēgšanās (laika mērogs ir 200ns uz iedaļu, sprieguma mērogs ir 250V uz iedaļu, strāvas mērogs ir 25A uz iedaļu)

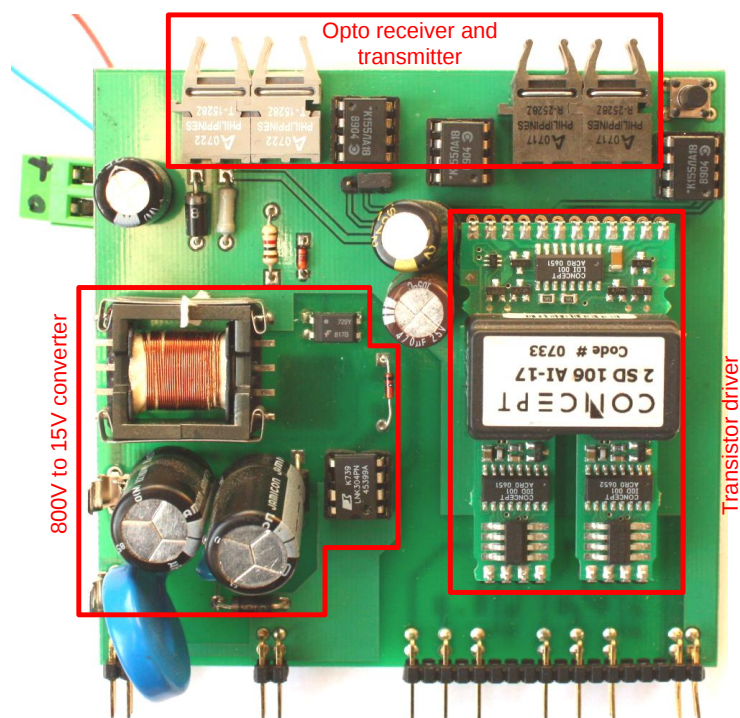
Kā var redzēt, diodei aizveroties, pārspriegums uz tranzistora ir relatīvi neliels (15-20% no nominālā sprieguma). Līdz ar to 1200V tranzistori var tikt droši pielietoti līdz līdzstrāvas posma spriegumiem līdz 800V.

2.2. Aizvaru vadības plate

Aizvaru vadības platei ir jānodrošina droša un uzticama vadības saskarne, kā arī lokāla aizsardzība pret nepareizu vadības signālu.

Lai nodrošinātu minētās prasības, aizvaru vadības plate (att.2.4.) satur:

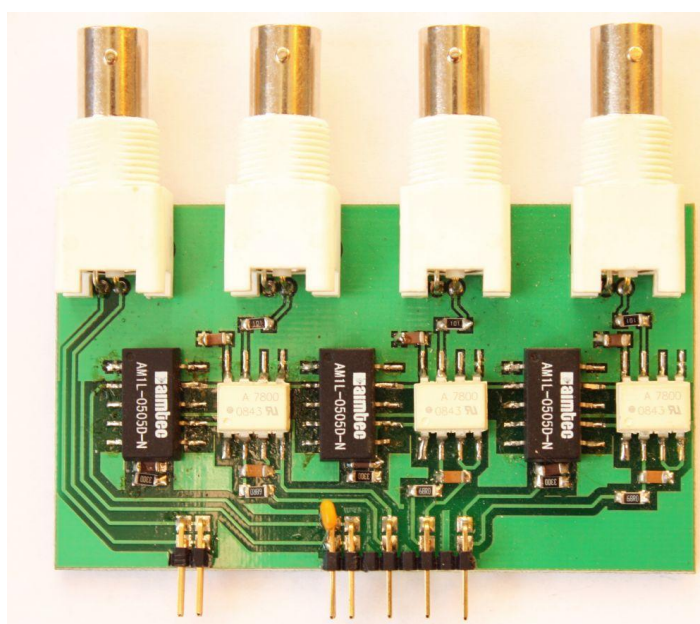
- Galvaniski atsaistītu spēka pārveidotāju, kurš pārveido līdzstrāvas posma spriegumu (800V) uz 15V. 15V ir nepieciešami, lai barotu tranzistoru aizvaru vadības shēmu;
- 15V uz 5V DC/DC spēka pārveidotāju, kurš baro optiskos uztvērējus, optiskos raidītājus un loģikas elementus;
- divu kanālu tranzistoru aizvaru vadības shēmu („CT Concept” ražoto Scale 2SD106A-17_E aizvaru vadības shēmu);
- Optiskos uztvērējus un raidītājus, kuri nodrošina galvanisku vadības un tranzistoru statusa signālu atsaistīšanu;
- loģiskos elementus, kuri nodrošina aizsardzību pret vienlaicīgu tranzistoru atvēršanu.



Att.2.4. Aizvaru vadības plates attēls

2.3. Mērījumu plate

Mērījumu plate (att.2.5.) nodrošina vadības sistēmai nepieciešamās atgriezeniskās saites, kā arī galvanisku signālu mērījumu atsaistīšanu. Tā ir aprīkota ar 3 kanāliem, ar BNC konektoriem, kuri nodrošina abu kondensatoru sprieguma un ieejas/izejas sprieguma mērīšanu, kā arī vienu BNC konektoru dēļ ieejas/izejas strāvas mērīšanas.



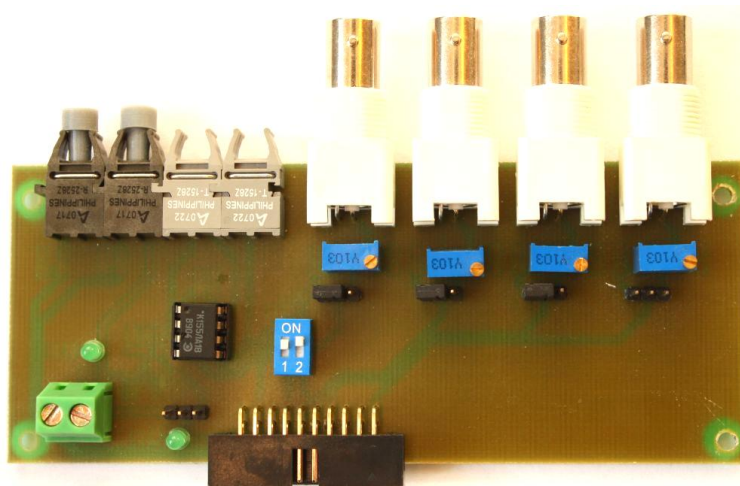
b)

Att.2.5. Mērījumu plates attēls.

2.4. Salāgošanas plate

Universālie spēka moduļi nākotnē tiks vadīti izmantojot DSP plati, taču, lai paātrinātu vadības algoritmu izstrādi un atvieglotu atklādošanu, tika nolemts izmantot reālā laika kontrolieri dSpace DS1103.

Tā kā vadības iekārtas un mērījumu plates signālu līmeņi var atšķirties, tad ir nepieciešams izmantot papildus elementus, lai salāgotu mērījumu signālu līmeņus. Salāgošanas plate (att.2.6.) saņem mērījumu signālus caur BNC konektoriem un izmantojot potenciometru sprieguma dalītājus šie signāli tiek pierēgulēti.



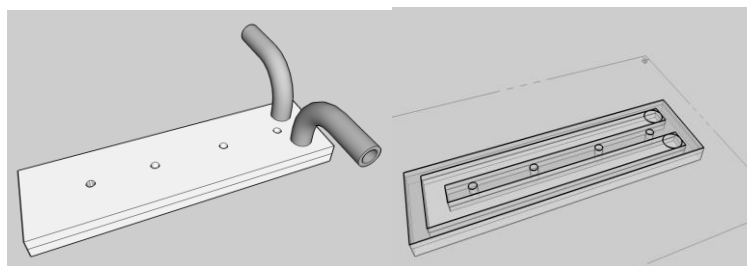
Att.2.6. Salāgošanas plate

2.5. Dzesēšanas sistēma

Modulāra spēka pārveidotāja konstrukcija nozīmē arī modulāru dzesēšanas sistēmas konstrukciju. Lai izveidotu kompaktu un modulāru dzesēšanu, tika nolemts izstrādāt ūdens dzesēšanas sistēmu.

Vietējās tirdzniecības vietās tika iegādāts ūdens sūkns, sekundārais siltummainis, caurules, ventilatori un citas detaļas. Kā tika minēts iepriekš, katram modulim ir divi pusvadītāju elementi, saslēgti pustilta plecā. Tā kā abi slēdži atrodas blakus, tad tos var novietot uz viena siltummaiņa. Tā kā atrast jau gatavu siltummaini priekš konkrētajiem tranzistoriem un specifiskajiem izmēriem bija ļoti sarežģīti, tad tika nolemts izstrādāt jaunu primāro siltummaini.

Lai noskaidrotu piemērotāko siltummaiņa konstrukciju, tika uzkonstruēti, aprēķināti [14,15,16,17] un pārbaudīti četri dažādi primārie siltummaiņi. Labākā konstrukcija ar $R_{th} - 0.019 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ tika izvēlēta turpmākai lietošanai (att.2.7).



Att. 2.7. Siltummaiņa konstrukcija

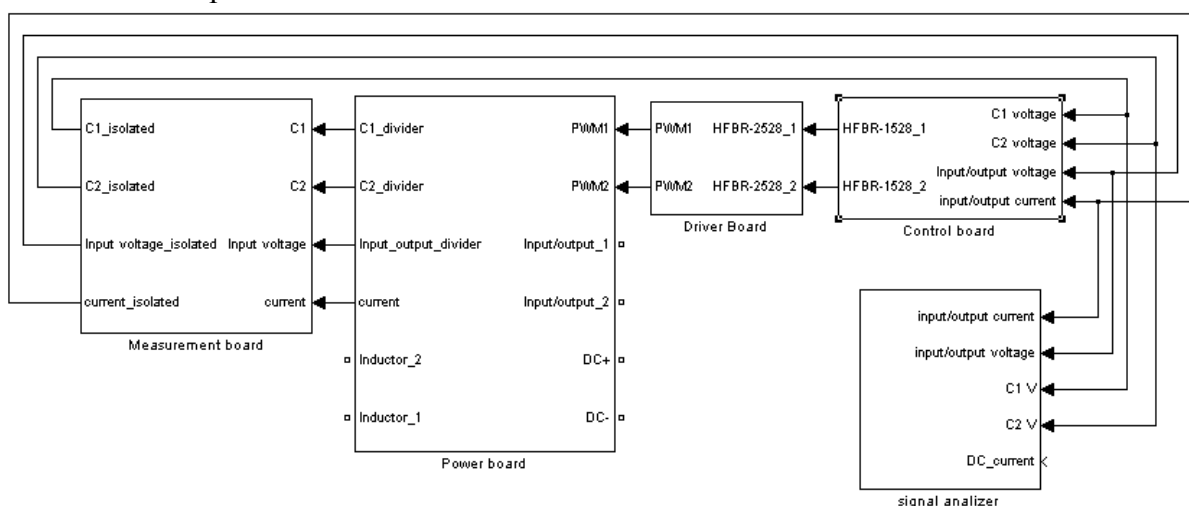
3. Universālā spēka moduļa, tā vadības kodola un NBBS Matlab-simulink modeļa izstrāde

Pirms eksperimentu veikšanas tika nolemts veikt pārveidotāju (invertoru, tainsngriežu, paaugstinošo, pazeminošo pārveidotāju u.c.) un to vadības algoritmu novērtēšanu izmantojot modelēšanu MATLAB-SIMULINK vidē. Modelēšana tika veikta Matlab-simulink vidē, jo tā ir saderīga ar reālā laika vadības iekārtu dSpace DS1103. Veicot nelielas izmaiņas, Matlab-simulink vadības algoritms var tikt izmantots koda izveidošanai priekš dSpace.

3.1. *Universālā spēka moduļa modelis*

Matlab modelis tika veidots līdzīgs reālajai universālā modulārā spēka pārveidotāja topoloģijai. Modelis satur tos pašus galvenos blokus, kā arī vēl papildus bloku spriegumu un strāvu analīzei (att.3.1):

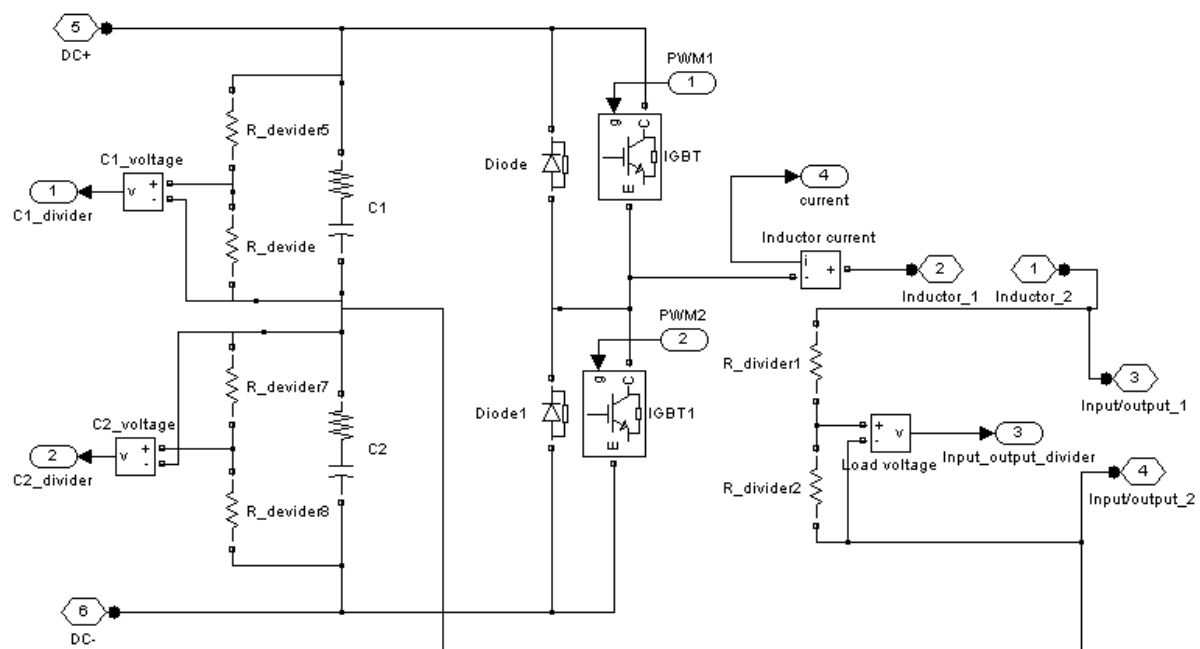
- Spēka plate
- Mērījumu plate
- Aizvaru vadības plate
- Vadības plate



Att. 3.1. Universālā modulārā spēka pārveidotāja Matlab simulink modelis

3.1.1. *Spēka plates modelis*

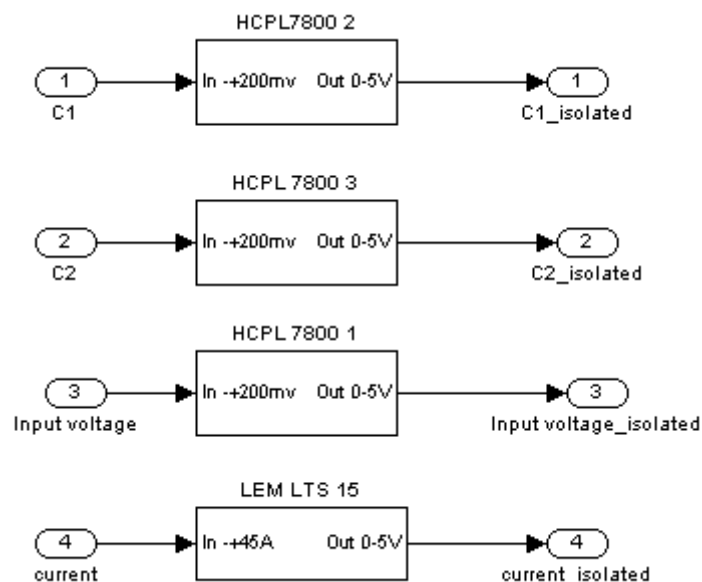
Spēka plates apakšsistēma (att.3.2.) satur tādus pašus elementus, kā reālā spēka pārveidotāja plate, ar parametriem, kuri ir iespējami tuvi reālo detaļu parametriem.



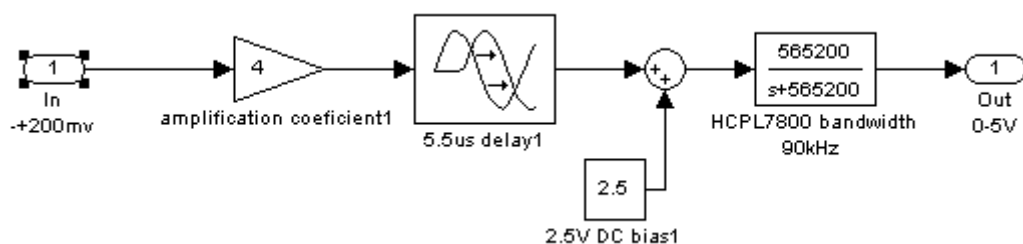
Att.3.2. Spēka plates apakšsistēmas shēma

3.1.2. Mērījumu plates modelis

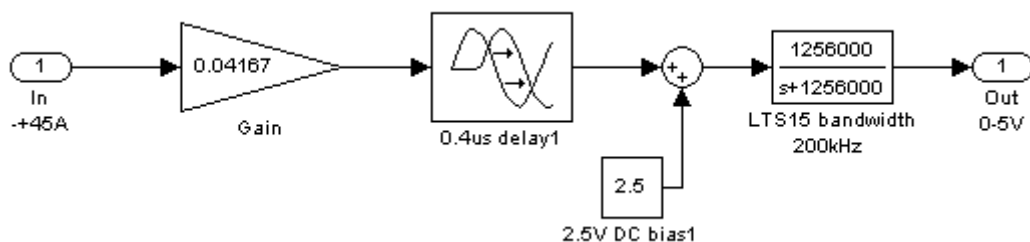
Attēlā 3.3. redzama mērījumu plates apakšsistēma. Viens no šīs apakšsistēmas uzdevumiem ir ņemt vērā HCPL7800 (att.3.4.) un LEM LTS 15-NT (att.3.45) frekvenču joslas platumu un laika aizkavējumu.



Att.3.3 Mērījumu plates apakšsistēma



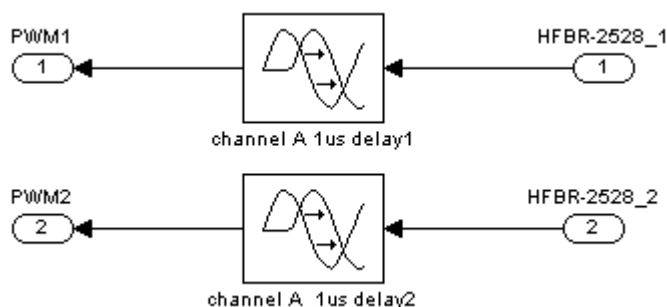
Att.3.4. AVAGO HCPL7800 Matlab modelis ņem vērā pastiprinājuma koeficientu, joslas platumu, fāzes nobīdi un sprieguma nobīdi.



Att.3.5. LEM LTS15 Matlab modelis ņem vērā pastiprinājuma koeficientu, joslas platumu, fāzes nobīdi un sprieguma nobīdi.

3.1.3. Aizvaru vadības plates modelis

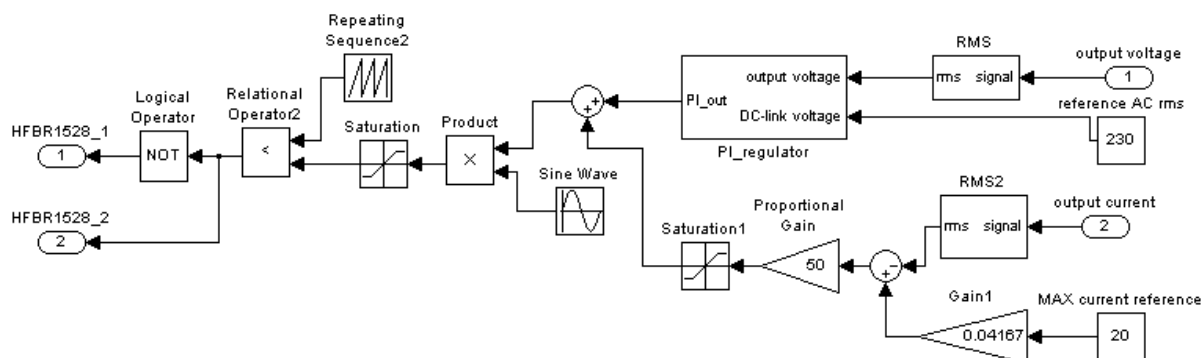
Aizvaru vadības plates Matlab-simulink modelis ir parādīts attēlā 3.6. Šīs apakšsistēmas galvenais uzdevums ir ņemt vērā vadības signālu laika aizkavējumu. Šajos blokos ir iekļauti aizkavējumi no visiem signāla pārraidē iesaistītajiem elementiem (loģikas elementu aizture, optisko raidītāju aizture, optisko uztvērēju aizture, tranzistoru aizvaru vadības shēmas aizture). Tā kā signālu aizkavējums ir ļoti neliels (zem 1 mikrosekundes), tad to lielākajā daļā gadījumu var neņemt vērā. Tātad, apakšsistēma „Aizvaru vadības plate” lielākoties var tikt izņemta. Tādējādi var samazināt modeļa elementu skaitu un samazināt modelēšanai nepieciešamo laiku.



Att.3.6. Aizvaru vadības plates apakšsistēmas modelis

3.1.4. Vadības plates modelis

Vadības plates apakšsistēma modelē vadības iekārtu. Vadības plates piemērs ir dots attēlā 3.7. Piemērā ir attēlots invertora vadības algoritms.



Att.3.7. Vadības plates apakšsistēmas piemērs

3.2. Saules paneļa modeļa izstrāde

Lai modelētu saules paneļa (SP) spēka pārveidotāju, ir nepieciešams SP modelis. Matlab-simulink bibliotēkās nav pieejams SP modelis. Šī iemesla dēļ, tika nolemts to izveidot [18]. Tika izmantots Matlab-simulink bloks “Vadāms sprieguma avots”, kuru vada atkarībā no ieejas parametriem, piemēram strāvas un apgaismojuma [24,25]. Lai izstrādātu precīzu SP modeli, izmantojot „vadāmu sprieguma avotu”, ir nepieciešams precīzi zināt sakarību starp SP spriegumu un strāvu.

Saules paneļa voltampēru raksturlīkne tika uzņemta eksperimentāli un izmantojot regresijas metodes tika iegūts vienādojums, kurš precīzi apraksta reālo SP voltampēru raksturlīkni pie pilna apgaismojuma:

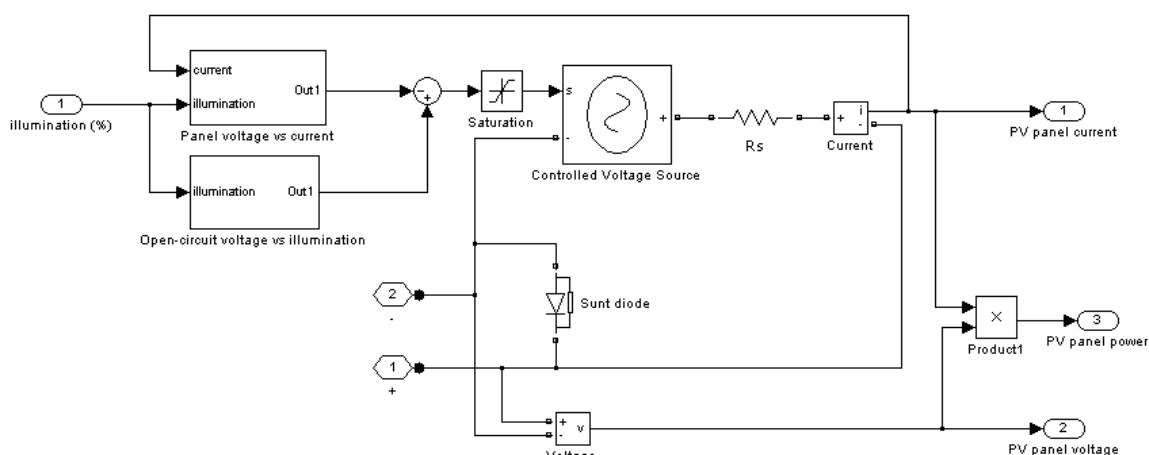
$$U(i) = 20 - 0.5 \cdot i - 3.4105 \cdot 10^{-12} \cdot i^{16} \quad (3.1)$$

Vienādojums (3.13) tika papildināts ar vēl vienu mainīgo, lai ņemtu vērā gaismas intensitāti:

$$U(i) = 36 \cdot \frac{333 \cdot k}{q} \cdot \ln\left(\frac{6.24 \cdot E}{I_0} + 1\right) - 0.5 \cdot i - \frac{3.4105 \cdot 10^{-12} \cdot i^{16}}{E} \quad (3.2)$$

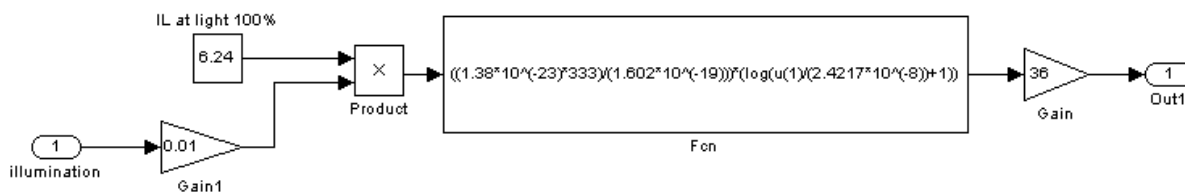
kur: E – gaismas intensitāte daļās, no eksperimentālās strāvas pie pilna apgaismojuma (6.24A). Praktiskais apgaismoja apgabals ir $0 < E < 2$.

Pēc tam tika izveidota SP Matlab-simulink apakšsistēma.(att.3.8).

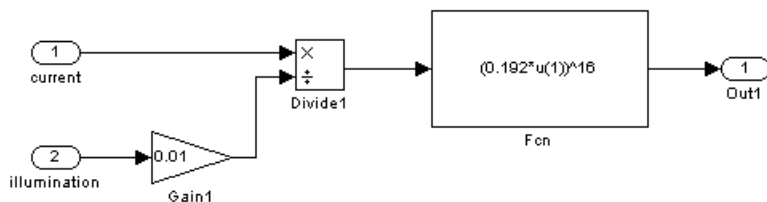


Att.3.8. Saules paneļa Matlab-simulink modelis

Sprieguma avots tiek vadīts izmantojot divas funkcijas. Apakšsistēma „Tukšgaitas spriegums pret apgaismojumu” (att.3.9) ataino pirmo vienādojuma daļu (3.2). Virknes pretestība “ R_s ” ataino otro vienādojuma daļu (3.2). Apakšsistēma „Paneļa spriegums pret apgaismojumu” (att.3.10) ataino trešo vienādojuma daļu (3.2).

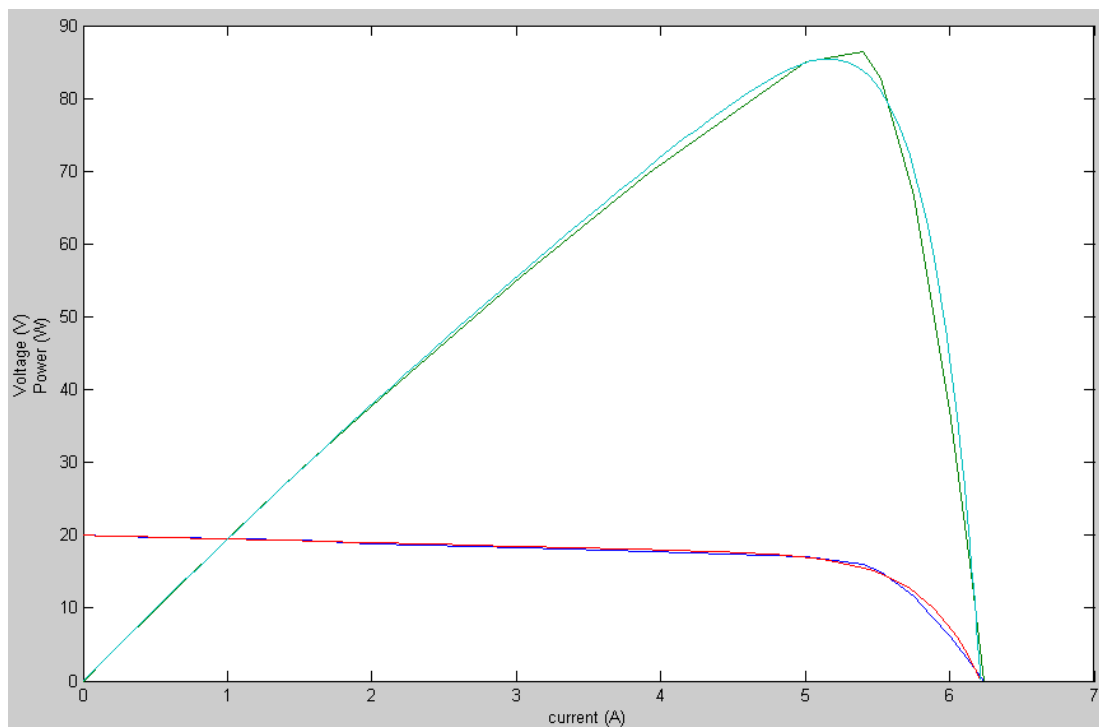


Att. 3.9. Apakšsistēma, kura attēlo shēmas tukšgaitas spriegumu atkarībā no apgaismojuma



Att.3.10. Apakšsistēma, kura attēlo shēmas sprieguma atkarību no strāvas

Eksperimentālo un modelēto datu salīdzinājums ir dots zemāk, attēlā 3.11.



Att. 3.11. Eksperimentālo un modelēto SP voltampēru un strāvas/jaudas raksturlīkņu datu salīdzinājums (pie 100% apgaismojuma) (tumši zils - eksperimentālā I-U līkne, sarkans - modelētā I-U līkne, zaļš – eksperimentālā I-P līkne, gaiši zils – modelētā I-P līkne)

4. Uz universāliem spēka moduļiem balstītas NBBS izstrāde

4.1. Invertora modelēšana

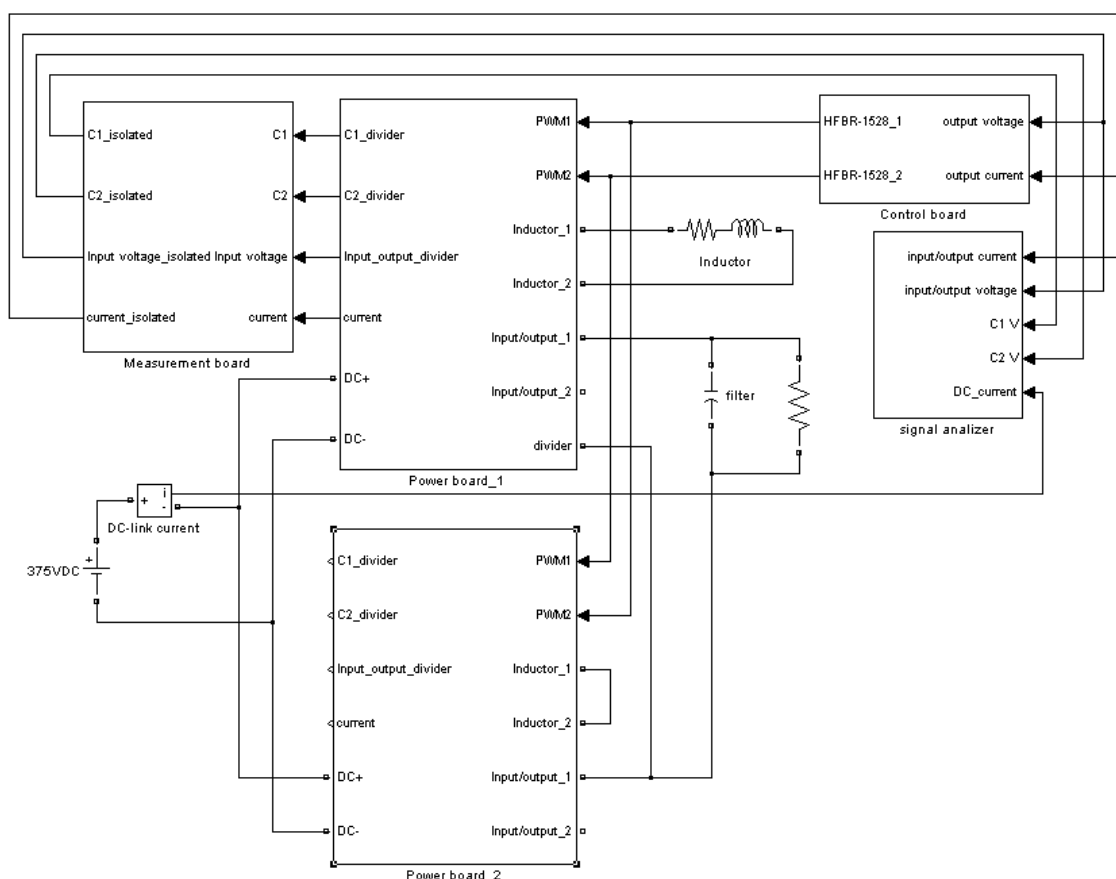
Ir divi plaši pazīstami invertoru tipi:

- Pilnais tilts
- Pustilts

Katram no šiem invertoriem piemīt priekšrocības un trūkumi. Pustilta invertoram ir augsts līdzsprieguma posma spriegums, bet dēļ nelielā pusvadītāju skaita, tiem var būt augsta lietderība. Pilnā tilta invertoram ir divas reizes zemāks līdzsprieguma posma spriegums, bet tam ir divas reizes vairāk pusvadītāju. Lai noskaidrotu, kura invertora topoloģija ir piemērotāka, abas topoloģijas tika modelētas. Tālāk ir parādīta pilnā tilta invertora modelēšana.

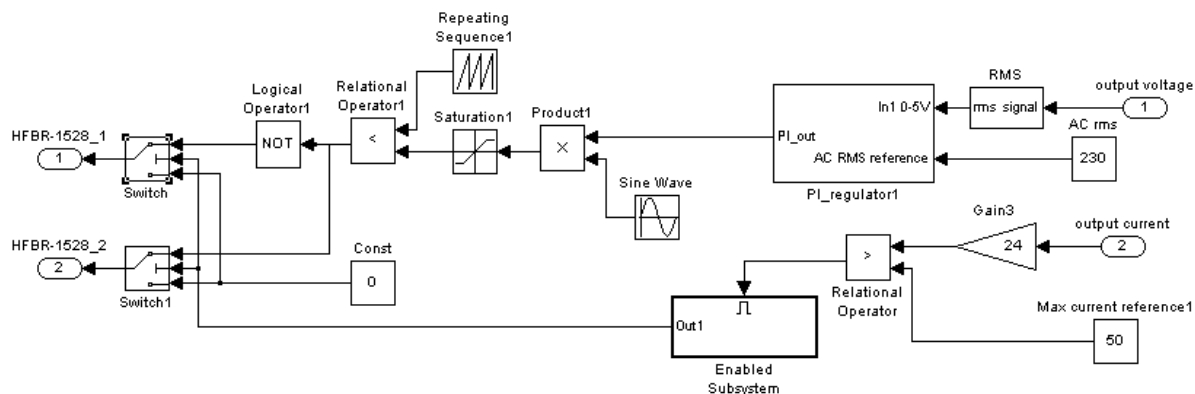
Pilnā tilta invertora modelēšana

Lai izveidotu pilnā tilta invertoru, ir nepieciešami divi USM (att. 4.1.)



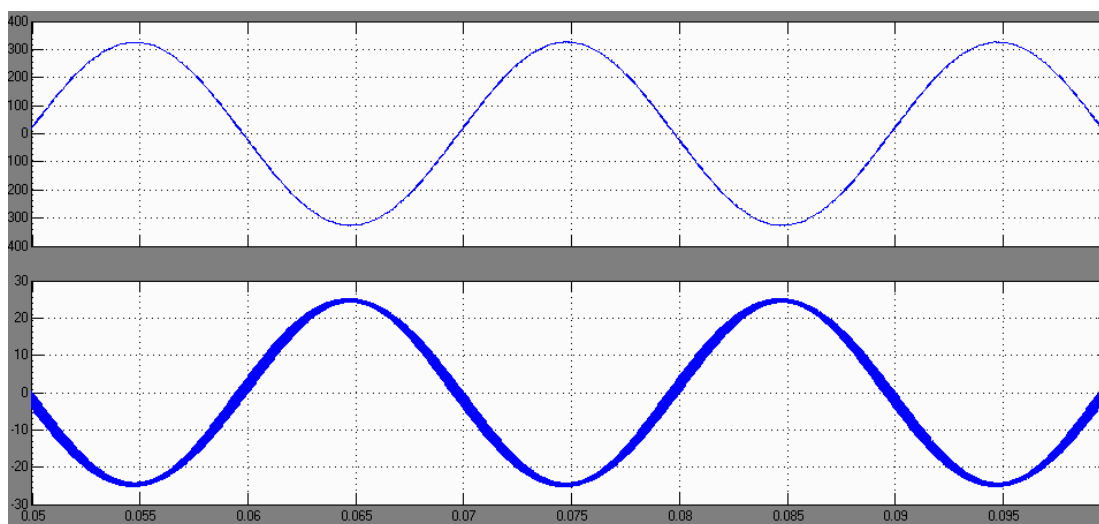
Att.4.1. Pilnā tilta invertora Matlab-simulink modelis

Vadības algoritms ir parādīts attēlā 4.2. Priekš šīs shēmas tiek mērīts izejas spriegums un strāva. Izejas strāva tiek mērīta, lai novērstu pārslodzi un īsslēgumu.



Att.4.2. Pilnā tilta invertora vadības sistēma ar diviem atgriezeniskās saites signāliem

Modelēšanas rezultāti pie izejas jaudas 4000W ir parādīti attēlā 4.3.



Att.4.3. Modelēšanas rezultāti pie 4000W. Augšējā līkne ir slodzes spriegums, apakšējā ir droseles strāva. Droseles strāvas THD ir 5.2%. Tā kā tiek izmantots papildus izejas filtrs (4,7uF kondensators), tad slodzes strāvas THD ir apmēram 1%.

Modelēšanas rezultāti pie dažādām slodzēm ir doti tabulā 4.1.

Tabula 4.1. Pilnā tilta invertora modelēšanas rezultāti pie dažādām slodzes jaudām

Jauda (W)	Strāva (A)	Izejas spriegums THD (%)	Pārveidotāja efektivitāte (%)
1000	4.5	0.8	96.5
2000	8.7	0.8	96.8
3000	13.1	0.8	96.7
4000	17.5	0.8	96.4

Tabulā 4.1. redzamie modelēšanas rezultāti uzrāda paaugstinātu invertora lietderību. Tam par iemeslu var būt idealizētie Matlab-Simulink pusvadītāju modeļi. Tie neņem vērā ieslēgšanās zudumus. Līdz ar to var secināt, ka modeļa lietderība būs lielāka nekā īsta pārveidotāja lietderība.

4.1.1. Aktīvā taisngrieža ar jaudas koeficienta korektoru modelēšana

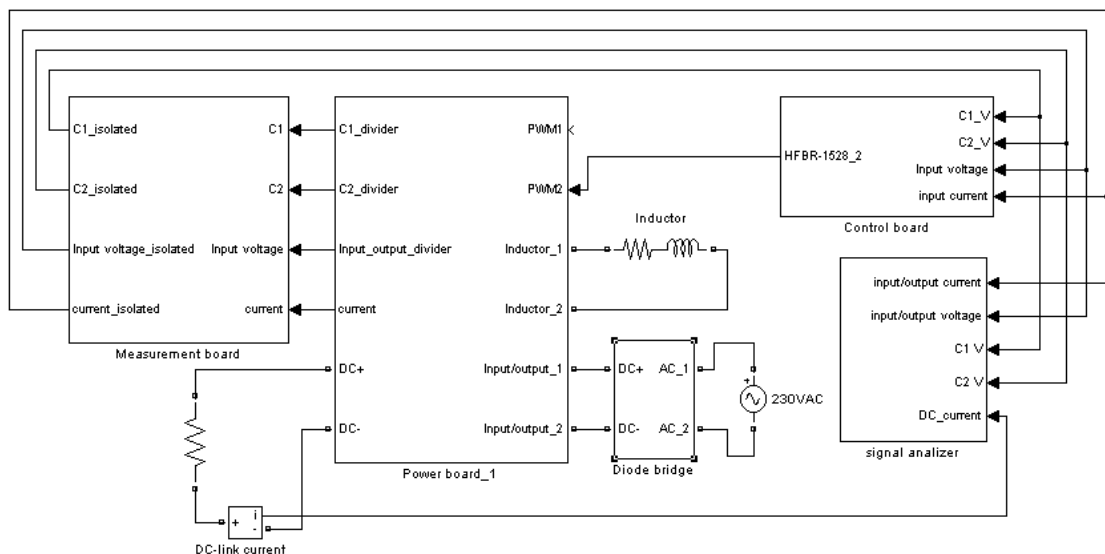
Ir daudz dažādu taisngriežu topoloģiju ar jaudas koeficienta korektoru (JKK). Lai noskaidrotu piemērotāko JKK taisngrieža topoloģiju priekš nepārtrauktās barošanas bloka sistēmas, tika modelētas un salīdzinātas sešas topoloģijas. Tālāk ir dots paaugstinošās JKK topoloģijas modelēšanas piemērs.

a) Paaugstinošā JKK topoloģija

Paaugstinošā JKK topoloģija ir vispopulārākā aktīvo JKK taisngriežu topoloģija. Tā tiek bieži pielietota barošanas blokos ar augsta jaudas koeficienta taisngriežiem, kā arī elektriskās piedziņas iekārtās.

Līnijas spriegums vienlaicīgi plūst caur trīs pusvadītājiem, kas tiek uzskatīts par vislielāko paaugstinošā JKK trūkumu. Šī iemesla dēļ, šādu pārveidotāju kopējā lietderība parasti ir zemāka par citu topoloģiju pārveidotāju lietderību.

Paaugstinošā JKK pārveidotāja Matlab-simulink modelis ir parādīts attēlā 4.4. Lai veiktu šī pārveidotāja modelēšanu, tika izmantots viens universālais spēka pārveidotājs un viens diožu tilta taisngriezis.



Att. 4.4. Paaugstinošā JKK pārveidotāja spēka shēmas Matlab modeļa apakšsistēma

Pie universālā spēka pārveidotāja ir pievienots:

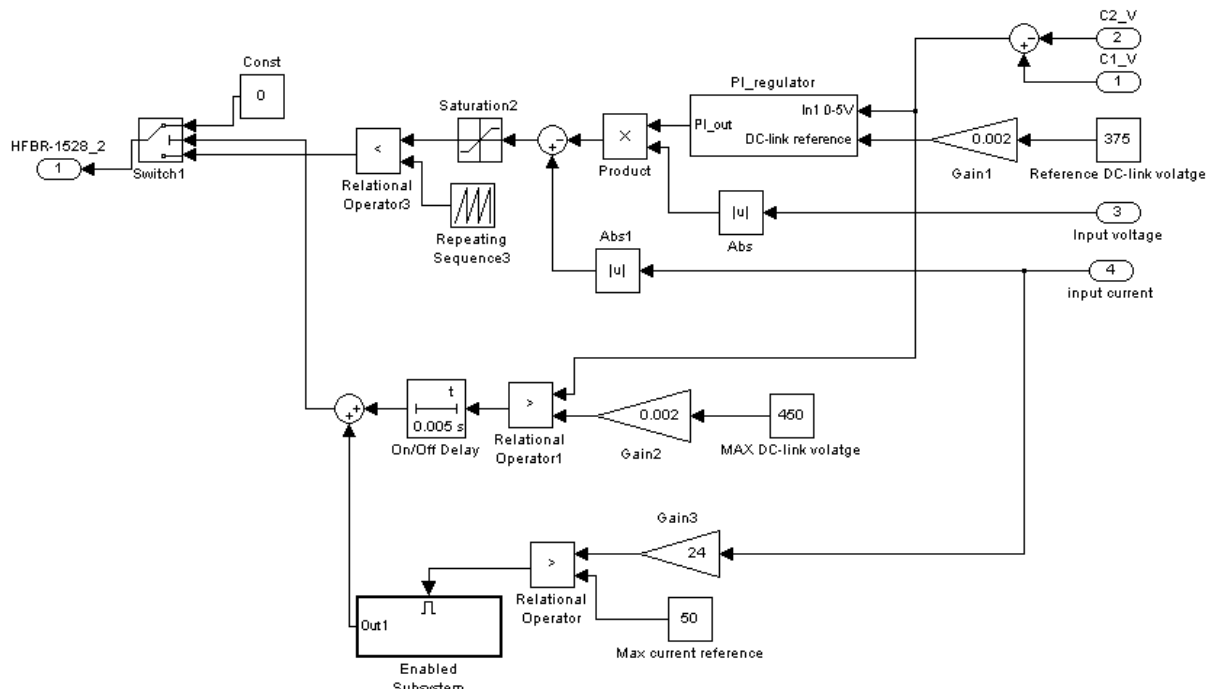
- maiņsprieguma avots (230V efektīvā vērtība), kurš emulē tīklu;
- diožu tilts, kurš iztaisno tīkla spriegumu;
- drosele (L -2 mH, pretestība - 0.13 Ω);
- maināma rezistīvā slodzes, lai iegūtu dažādas jaudas un ieejas strāvas vērtības;
- papildus strāvas mērīšanas bloks „DC-link current”, kurš ir nepieciešams tikai izejas strāvas mērīšanai un pārveidotāja lietderības aprēķinam.

Paaugstinošā JKK pārveidotāja vadības signāls var tikt aprēķināts izmantojot vienādojumu:

$$d(t) = 1 - \frac{\hat{V}_s \cdot |\sin(\omega t)|}{V_d} \quad (4.1)$$

Kur: d – aizpildījums, V_d – līdzstrāvas posma spriegums, $\hat{V}_s$ - ieejas sprieguma amplitūdas vērtība.

Paaugstinošā JKK vadības shēma ir dota attēlā 3.26. Kā atgriezeniskā saite tiek izmantots līdzstrāvas posma spriegums, kurš ir jāuztur tuvu 375V. Vadības algoritms nodrošina aizsardzību pret pārāk augstu līdzstrāvas posma spriegumu un pārāk lielu tranzistoru strāvu. Ja tiek pārsniegti, kāds no ierobežojumiem, tad tranzistori aizveras.



Att. 4.5. Paaugstinošā JKK taisngrieža vadības plates Matlab-simulink modelis

Modelēšanas rezultāti ir doti tabulā 4.2. Kā pēc tabulas var redzēt, tīkla strāva ir sinusoidāla un sakrīt fāzē ar spriegumu.

Tabula 4.2. Paaugstinošā JKK pārveidotāja modelēšanas rezultāti

Izejas jauda (W)	Ieejas strāva (A)	Ieejas strāvas THD (%)	Pārveidotāja lietderība (%)	Cos(f)
1100	5	13.6	96.7	1
2200	10	6.9	96.6	1
3300	15	4.7	96.2	1
4400	20	3.9	95.8	1

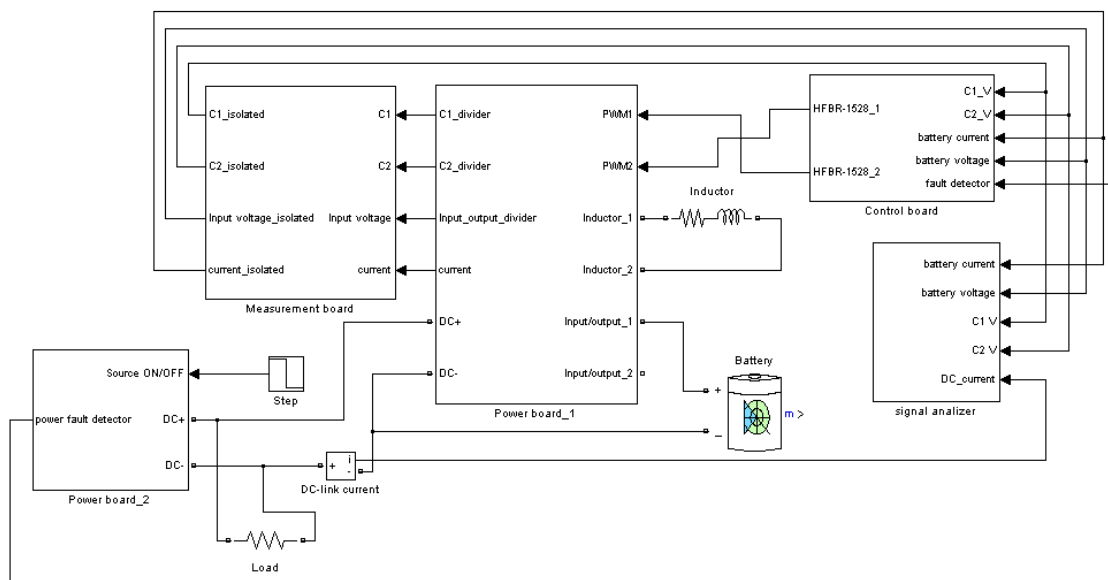
4.1.2. Uzlādēšanas/izlādēšanas pārveidotāja modelēšana

Kā tika minēts pirmajā nodaļā, ir iespējami vairāku veidu rezerves enerģijas avoti. Lai padarītu NBBS elastīgāku, ir nepieciešams panākt, ka divvirzienu DC/DC spēka pārveidotājs var strādāt ar jebkura veida līdzstrāvas avotiem vai uzkrājējiem. Eksperimentu veikšanai tika izmantoti šādi enerģijas uzkrājēji:

- Superkondensators 48.6V, 165F, 0.007Ω
- Superkondensators 125V, 63F, 0.018Ω
- Svina skābes akumulators, 6x12V=72V, 17Ah, 6x0.012=0.072Ω

Kā tika minēts iepriekš, ir divu veidu invertori: pilnā tilta un pustilta. Starp tiem ir būtiska atšķirība: pilnā tilta invertora līdzstrāvas posma spriegumam jābūt tuvu 375V, bet pustilta

līdzstrāvas posma spriegumam jābūt tuvu 750V. Izmantojot Matlab simulink, tika pārbaudīta abu DC/DC pārveidotāju darbība pie atbilstošajiem spriegumiem un iepriekš minētajiem uzkrājējiem. No universālajiem spēka moduļiem veidotā divvirzienu DC/DC pārveidotāja Matlab-simulink modelis ir dots attēlā 4.6.



Att.4.6. Divvirzienu DC/DC pārveidotāja Matlab-simulink modelis

Pie universālajiem spēka moduļiem tika pieslēgts:

- enerģijas uzkrājējs (akumulators vai superkondensators);
- drosele ($L = 1 \text{ mH}$, pretestība $= 0.05 \Omega$);
- sprieguma avots, kurš baro līdzsprieguma posmu un avārijas gadījumā nosūta signālu uz vadības sistēmu;
- rezistīva slodze līdzsprieguma posmā;
- papildus strāvas mērīšanas bloks „DC-link current”, kurš ir nepieciešams tikai izejas strāvas mērīšanai un pārveidotāja lietderības aprēķinam.

Kā tika paredzēts, Matlab-simulink modelēšana, dažādos darbības režīmos un ar dažādiem enerģijas uzkrājējiem, uzrādīja, ka 48,6V superkondensators nevar tikt izmantots kā enerģijas uzkrājējs (dēļ tā zemā sprieguma un pārveidotāja augstās ieejas strāvas) priekš minētā pārveidotāja.

Tā kā modelēšanā netika ņemti vērā tranzistoru termālie režīmi, tad tika nolemts pārbaudīt visu konfigurāciju termālos režīmos.

Lai aprēķinātu tranzistoru un diožu termālos režīmos un zudumus, tika izmantota “Semikron” “Semisel” programma [13]. Aprēķinos tika pieņemts, ka ūdens temperatūra ir 60°C un siltummaiņu parametri tika ņemti no otrās nodaļas. Visi aprēķini tika veikti pie pārslēgšanās frekvences 20kHz.

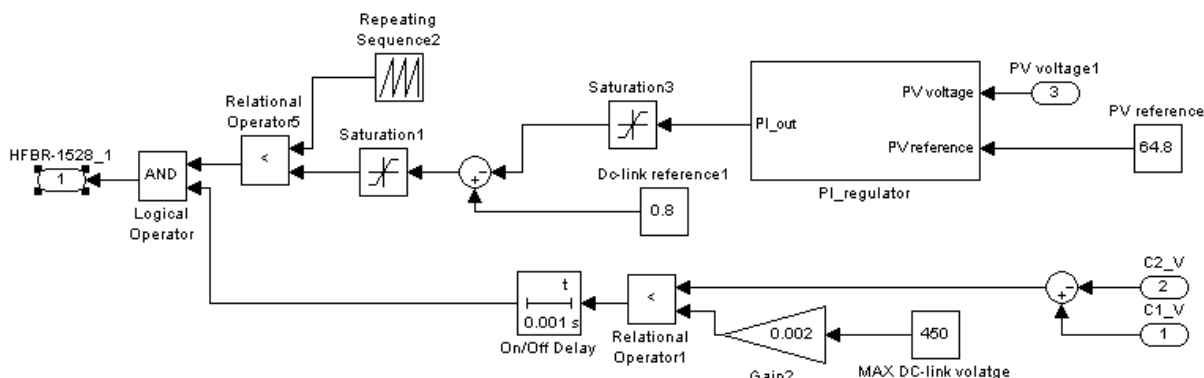
Aprēķini parādīja, ka izmantojot vienu universālo spēka moduli ar 72V svina skābes akumulatoru vai 125V superkondensatoru, nav iespējams iegūt 4,2kW jaudu.

Aprēķini tika atkārtoti ar diviem paralēli slēgtiem USM. Aprēķini parādīja, ka divi USM var tikt izmantoti, lai iegūtu 4,2kW, bet priekšroka ir slēgumam ar 375V līdzsprieguma posma spriegumu. Ja tiek izmantot augstāks līdzsprieguma posma spriegums (750V), tad, lai samazinātu zudumus tranzistorā un diodē, ir nepieciešams samazināt pārslēgšanās frekvenci (līdz 10kHz).

4.1.3. Saules paneļu masīva spēka pārveidotāja modelēšana

Izmantojot trešajā nodaļā izstrādāto SP modeli, tika veikta maksimālā jaudas punkta sekošanas (MJPS) vadības algoritma modelēšana. Universālais spēka pārveidotājs tika saslēgts kā paaugstinošais pārveidotājs un pie tā tika pieslēgts SP masīvs, kurš sastāv no četriem SP.

Var pieņemt, ka SP masīva sprieguma atkarība no apgaismojuma nav pārāk liela, līdz ar to, maksimālais jaudas punkts būs pie noteikta sprieguma, pie lielākās daļas apgaismojuma līmeņu. Šāds pieņēmums ļauj izmantot tāds MJPS algoritmus, kuros SP masīvu spriegums ir konstants. Četriem virknē slēgtiem paneļiem maksimālā jauda būs pie apmēram 65V.



Att.4.7. MJPS vadības algoritms

Modelēšanas rezultāti parāda, ka MJPS algoritms ļauj izmantot gandrīz visu SP masīva saražoto jaudu.

Tabula .4.3. SP masīva saražotās jaudas un uz MJPS balstīta spēka pārveidotāja pārveidotās jaudas salīdzinājums

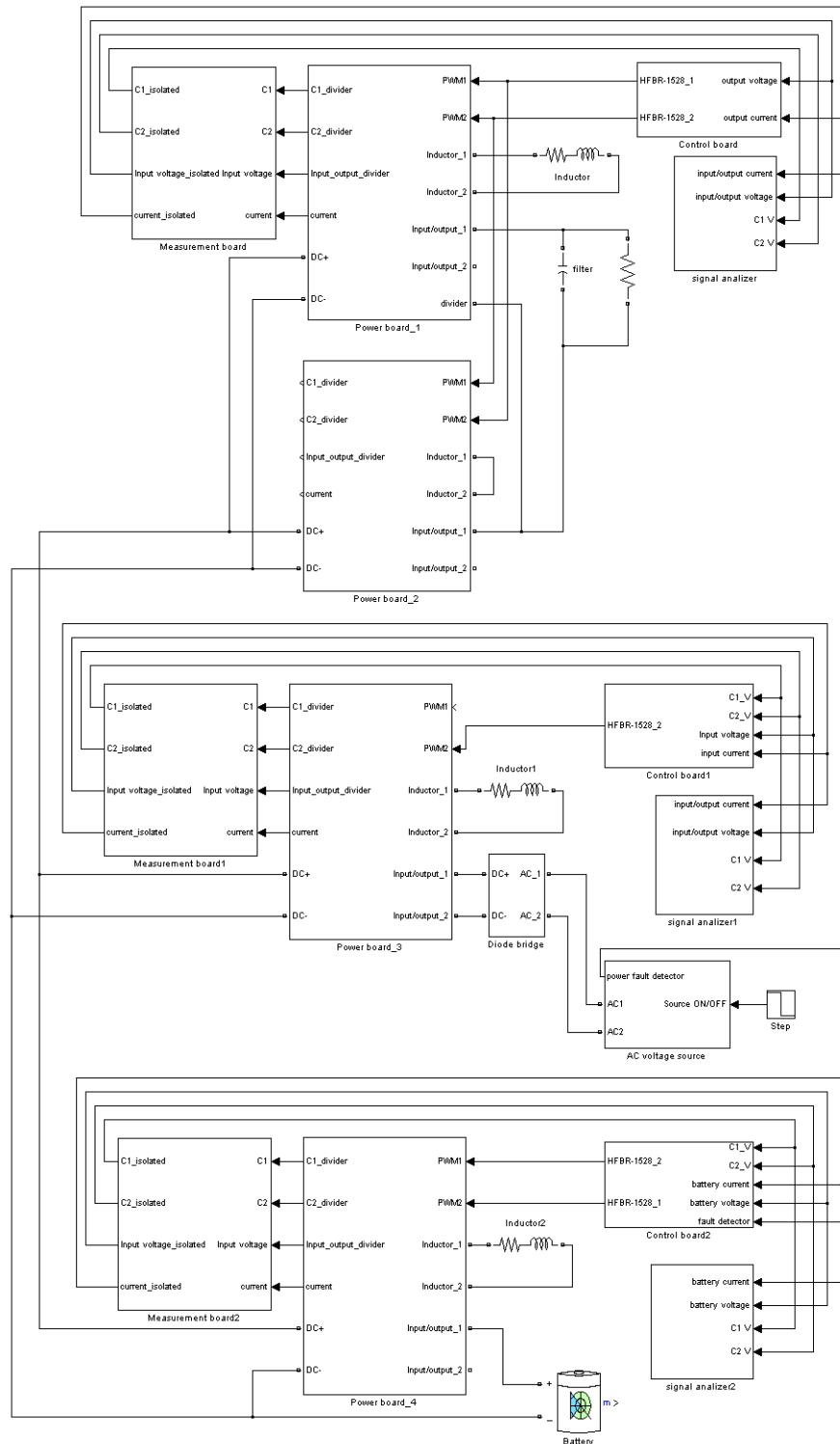
Apgaismojuma līmenis (%)	Saražotā jauda	Modelētā MJPS jauda
100	342	340
50	177	170
120	404	402

4.1.4. “Dubultās pārveidošanas” NBB topoloģijas un to modelēšana

Iepriekšējās nodaļās tika dots invertoru un taisngriežu apraksts kā arī parādīta modelēšana. No pārveidotāju aprakstiem, var secināt, ka ir divi iespējamie NBB līdzsprieguma posma spriegumi: zema (375V) spriegums un augstais (750V) spriegums. Tas nozīmē, ka pustilta invertors var tikt saslēgts tikai ar pustilta JKK taisngriezi, bet pilnā tilta invertors var tikt saslēgts ar minētajiem pieciem citiem JKK taisngriežiem. Paaugstinošai JKK topoloģijai ir nepieciešams viens universālais spēka pārveidotājs, bet citām topoloģijām ir nepieciešami divi universālie spēka pārveidotāji. Lai samazinātu spēka pārveidotāju skaitu, otrajai NBB topoloģijai tika izvēlēta paaugstinošā topoloģija. Abas NBB topoloģijas tika modelētas.

375V līdzstrāvas posma NBB topoloģijas Matlab-simulink modelis ir dots attēlā 4.8. Ar to var modelēt dažādus „dubultās pārveidošanas” NBB režīmus.

Modelis demonstrē, ka izejas spriegums ir sinusoidāls un, ka tas nav atkarīgs no ieejas sprieguma formas. Ieejas taisngrieža strāva ir sinusoidāla. Pie nominālās jaudas, strāvas THD ir tuvu 4-5%. Ieejas $\cos(f)$ ir tuvs 1. Kopējā modelētā dubultās pārveidošanas lietderība ir 0.93.



Att. 4.8. „Dubultās pārveidošanas” NBB ar līdzstrāvas posma spriegumu 375V Matlab-simulink modelis

4.2. Universālo spēka modeļu eksperimentālā aprobācija

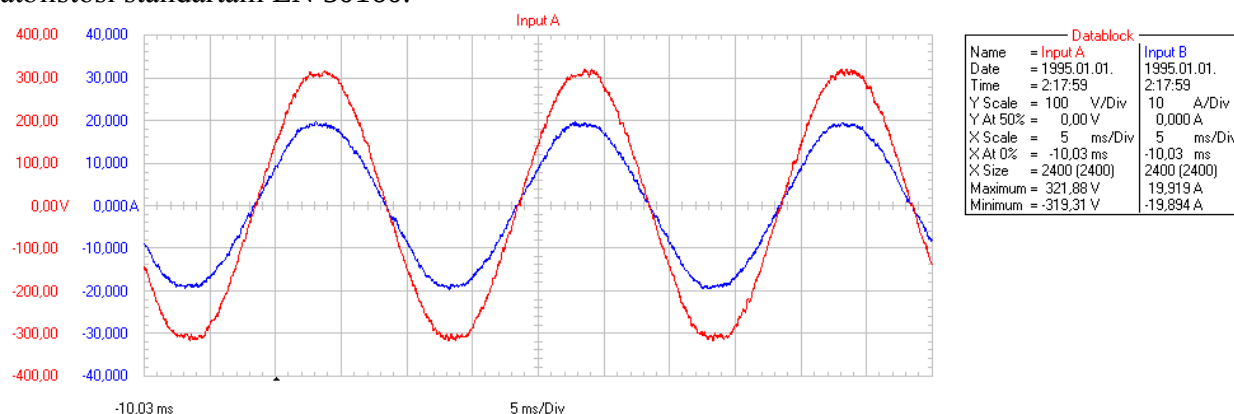
Kā tika minēts, apskatot pārveidotāja lietderību, modelēšanas rezultātus nevar uzskatīt par precīziem. Šī iemesla dēļ, tika nolemts eksperimentāli pārbaudīt lielāko daļu iepriekš minēto pārveidotāju topoloģiju. Vadībai tika izmantota reālā laika kontroles sistēma “dSpace DS1103”. Tā ir laboratorijas iekārta, kura paredzēta pārveidotāju vadībai un testēšanai. Tā ir aprīkota ar vairākām ciparu ieejām un izejām, ACP ieejām, CAP izejām, IPM izejām un citām iespējām. Tā ir pieslēdzama pie datora un savietojama ar Matlab-simulink. Tādēļ, veicot nelielus uzlabojumus, Matlab-simulink vadības algoritmi var tikt izmantoti, lai izveidotu vadības kodus priekš “dSpase” sistēmas.

Papildus “dSpace”, programma “dSpace ControlDesk” var tikt izmantota, lai uzbūvētu vizuālu vadības saskarni:

- lai redzētu signālus līdzīgi kā uz osciloskopa;
- vadītu un mainītu uzdotos signālus;
- sekotu vadības signāliem;
- u.c.

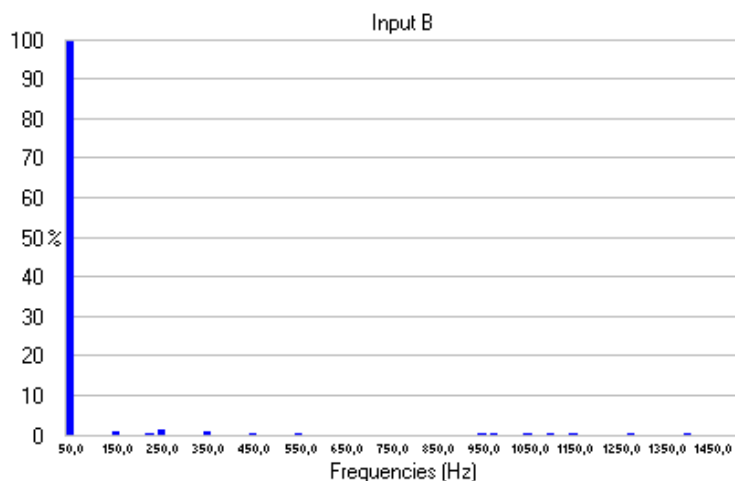
4.2.1. Taisngrieža testēšana

Izmantojot vienu universālo spēka moduli, tika veikta paaugstinošā JKK taisngrieža testēšana. Paaugstinošā JKK taisngrieža ieejas sprieguma un strāvas raksturlīknes ir dotas attēlā .3.55. Strāvas spektra analīze ir dota attēlā 4.9. Tādi ieejas strāvas harmoniskie kropļojumi ir atbilstoši standartam EN 50160.



7, DC=377,1V, Rload=50 Ohm, Uin=223, Iin=13,9A

Att. 4.9. Paaugstinošā JKK pārveidotāja eksperimentālie mērījumi pie 75% no nominālās slodzes (sarkans – ieejas spriegums, zils ieejas strāva). Strāvas THD=2.2%, cos(f) tuvu 1.



Att.4.10. Paaugstinošā JKK pārveidotāja spektra analīze pie 2,8kW

Tabulā 4.4. ir parādīti rezultāti pie dažādām slodzēm

Tabula 4.4. Eksperimentāli iegūtie dati

Izejas jauda (W)	Ieejas strāva (A)	Ieejas strāvas THD (%)	Pārveidotāja lietderība (%)	Cos (f)
706	3.4	7.2	93.7	0.99
2144.3	10.1	4.1	93.1	0.99
2842.6	13.7	2.2	92.6	0.99

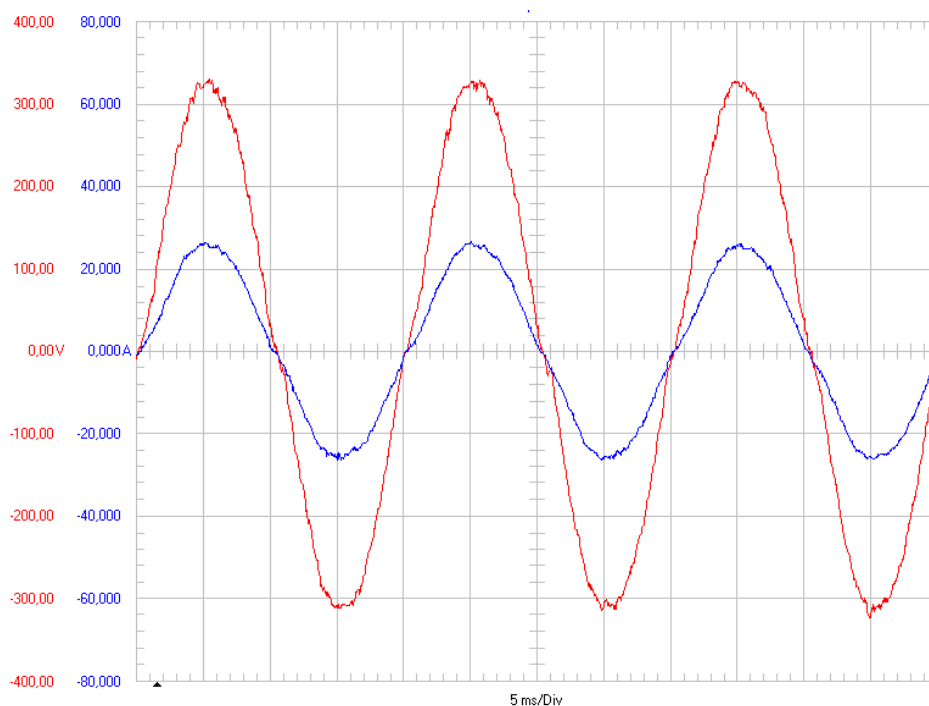
Ja tiek salīdzināti eksperimentālie un modelētie rezultāti, tad var pamanīt lietderību atšķirību. Tas tā ir dēļ Matlab tranzistoru modeļu nepilnībām. Ar tiem var aprēķināt vadāmības zudumus, bet pārslēgšanās zudumi lielākoties ir neprecīzi.

Līdzīgi tika pārbaudītas arī citas JKK topoloģijas. Eksperimentu rezultāti parāda, ka arī citas topoloģijas no tīkla patērē sinusoidālu strāvu. Visaugstāko lietderību uzrādīja beztilta topoloģija. Ir nepieciešams atzīmēt, ka sprieguma mērīšanas iekārtas precizitāte ir $\pm 0.5\%$, bet strāvas mērīšanas iekārtas precizitāte ir $\pm 2.5\%$. Tātad jaudas mērījuma precizitāte ir $\pm 3\%$. Diemžēl ar pieejamo laboratorijas aprīkojumu nav iespējams veikt precīzākus mērījumus.

4.2.2. Invertora testēšana

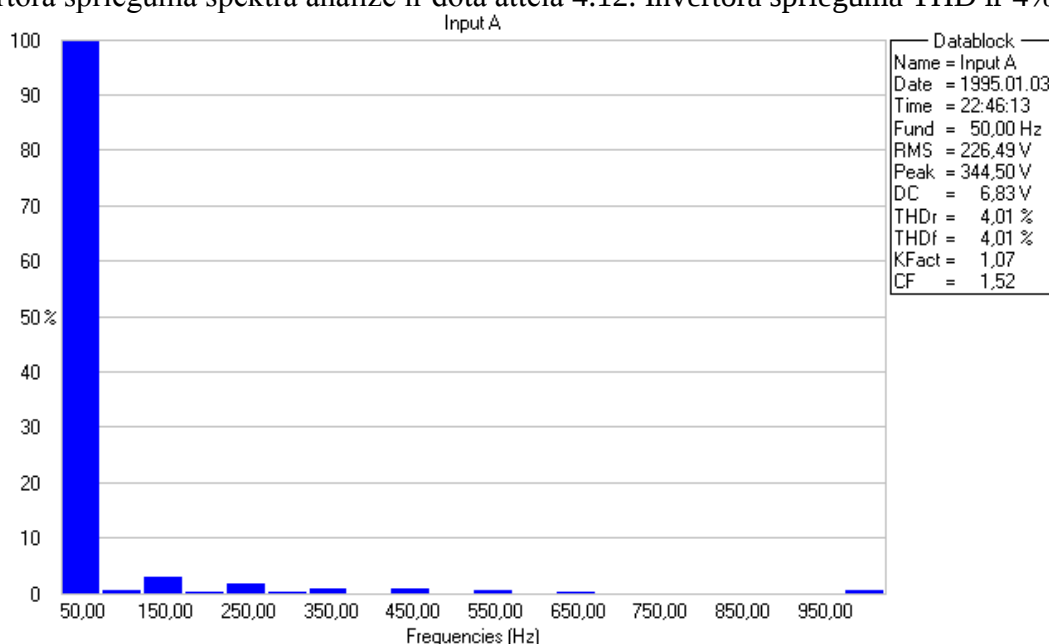
Testēšanas laikā laboratorijā nebija pieejams augsta sprieguma līdzstrāvas avots (800V, 5A), tādēļ tika testēts tikai pilnā tilta invertors.

Eksperimentāli iegūtais pilnā tilta strāvas un sprieguma mērījums pie lineāras slodzes ir parādīts attēlā 4.11. Invertora izejas efektīvais spriegums ir 226V. Tika izmantots 12.5Ω rezistors, līdz ar to slodzes jauda ir 4 kW. Sprieguma invertēšanas lietderība ir aptuveni 95%.



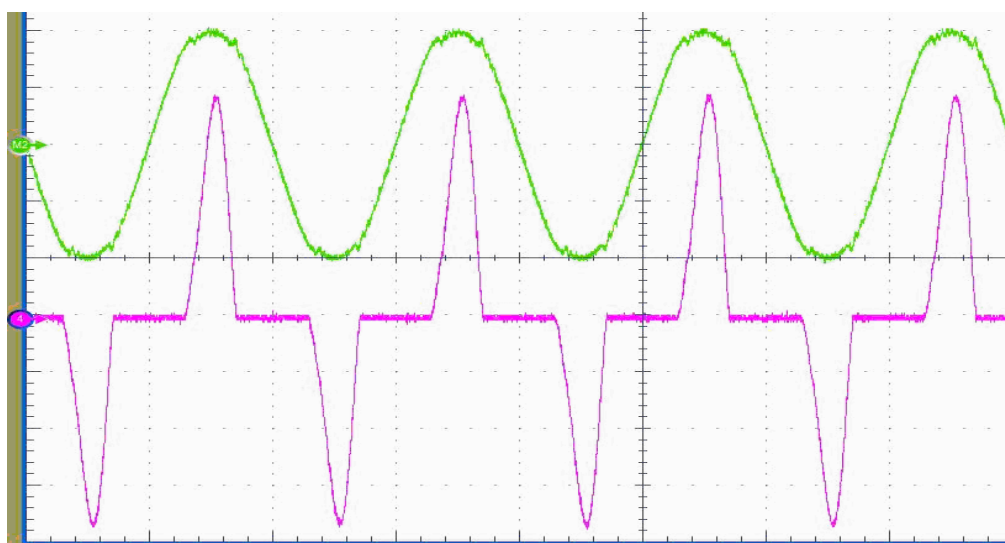
Att. 4.11. Invertora strāva un spriegums pie lineāras slodzes (strāva – 20A/iedaļa, spriegums – 100V/iedaļa)

Invertora sprieguma spektra analīze ir dota attēlā 4.12. Invertora sprieguma THD ir 4%.



Att. 4.12. Ar lineāru slodzi noslogota invertora sprieguma spektra analīze

Strāvas un sprieguma eksperimentālais mērījums pie nelineāras slodzes ir parādīts attēlā 4.13. Strāvas efektīvā vērtība ir 7.7A. Sprieguma efektīvā vērtība ir 209V.



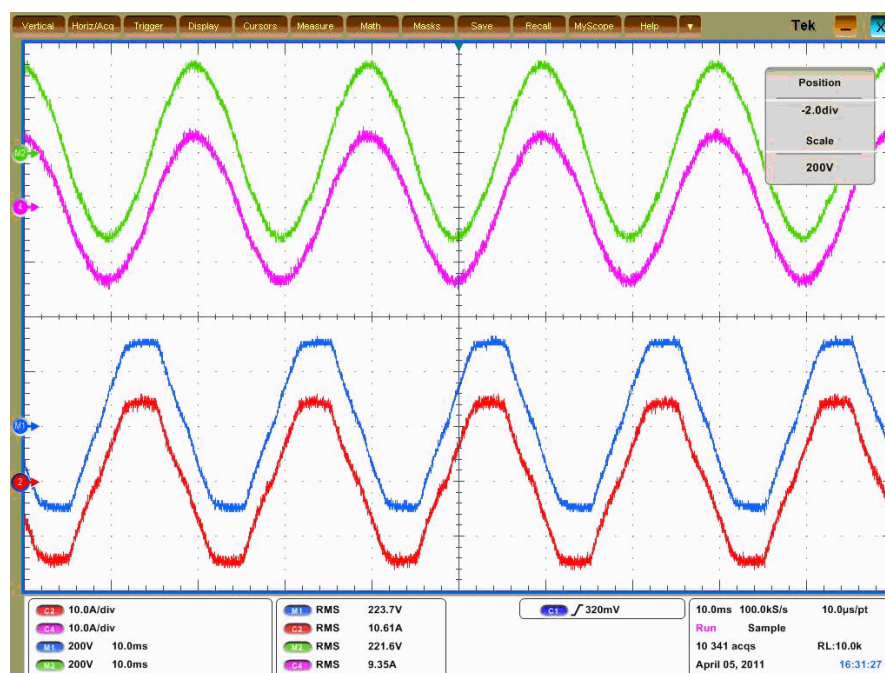
Att. 4.13. Invertora strāva un spriegums pie nelineāras slodzes (strāva – 5A uz iedaļu, spriegums – 150V uz iedaļu)

4.2.3. Dubultās pārveidošanas NBB testēšana

Pēc atsevišķas pārveidotāju testēšanas, tika veikta eksperimentāla dubultās pārveidošanas NBB testēšana. Testēšanai tika izmantota topoloģija ar 375V līdzsprieguma posma spriegumu. Lai realizētu šo pārveidotāju ir nepieciešami vismaz četri universālie spēka moduļi. Kā vadības iekārta tika izmantots “dSpace” modulis.

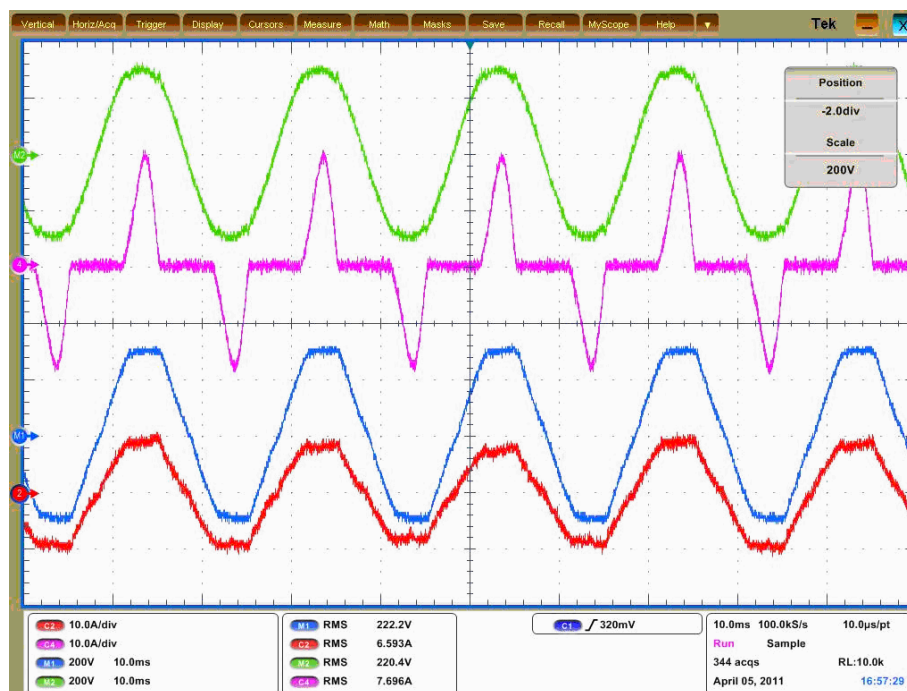
Attēlā 4.14. ir redzams dubultās pārveidošanas NBB darbība pie nominālā sprieguma (220V-230V) un 50% no nominālās slodzes. Attēlos ir redzams, ka izejas spriegums nav atkarīgs no ieejas sprieguma formas un amplitūdas. Ir zināms, ka ieejas sprieguma forma ir kropļota dēļ daudzām nelineārām slodzēm RTU sadales tīklā (sprieguma THD ir apmēram 8%), bet izejas

spriegums ir izlabots un tā THD ir 3-4%. Tika veikti eksperimenti pie pazemināta sprieguma (180V) un paaugstināta sprieguma (250V) un tika secināts, ka izejas spriegums nav atkarīgs no ieejas sprieguma lieluma.



Att. 4.14. NBB spriegumi un strāvas pie nominālā ieejas sprieguma. (ieejas spriegums – zils, ieejas strāva - sarkans, izejas spriegums – zaļš, izejas strāva – violets)

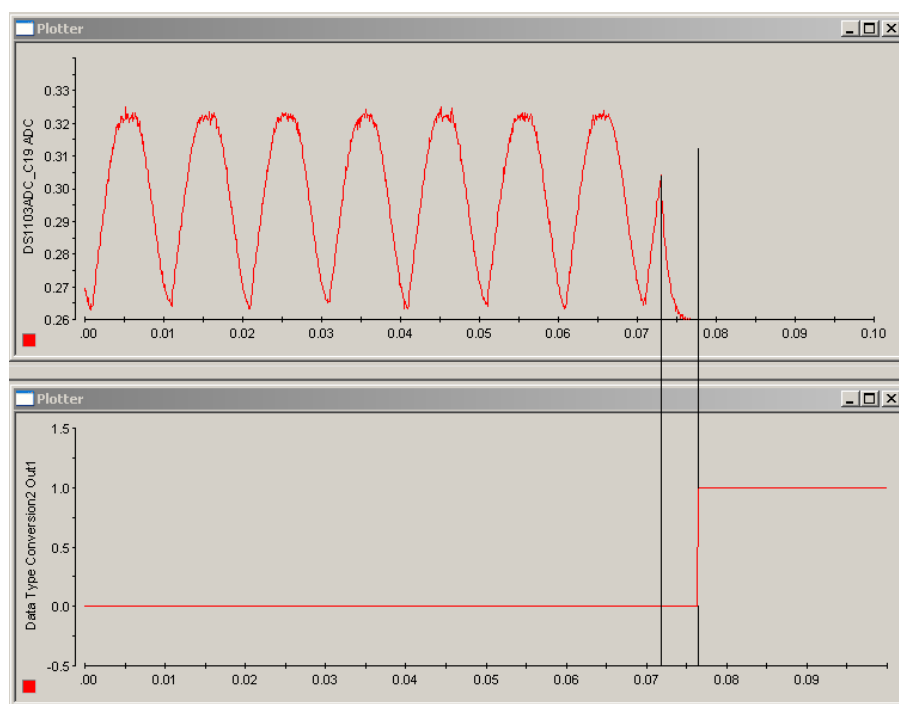
Nākamajā attēlā ir redzama dubultās pārveidošanas NBB darbība ar nelineāru slodzi. Kā var redzēt, ieejas strāva ir sinusoidāla.



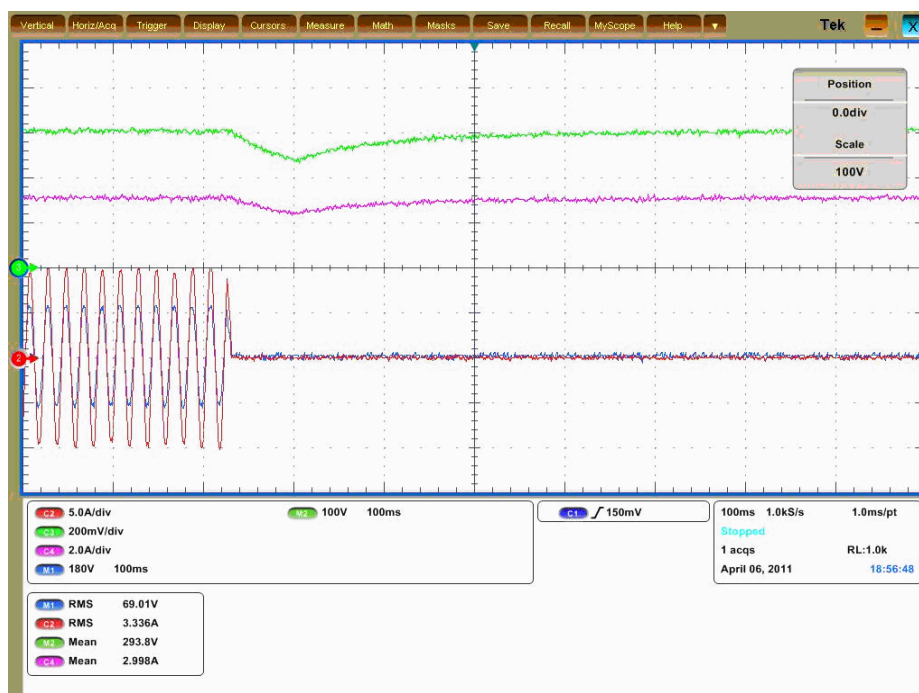
Att. 4.15. NBB spriegumi un strāvas pie nominālā ieejas sprieguma un nelineāras slodzes. (ieejas spriegums – zils, ieejas strāva - sarkans, izejas spriegums – zaļš, izejas strāva – violets)

Vēl viens svarīgs NBB parametrs ir pārslēgšanās laiks uz rezerves avotu. Lai realizētu pārslēgšanos, vadības algoritmā ir apakšsistēma „Sprieguma pazušanas detektors”. Ir nepieciešams detektēt ieejas sprieguma esamību un, tā neesamības gadījumā, pārslēgt NBB uz rezerves uzkrājēja izmantošanas režīmu.

„Sprieguma pazušanas detektors” tika eksperimentāli pārbaudīts. Attēls 4.16 parāda, ka detektēšanas laiks ir tuvu 5ms. „Sprieguma pazušanas detektora” darbība ar NBB ir parādīta attēlā 4.17.



Att.4.16. Eksperimentālais „Sprieguma pazušanas detektora” tests.
Detektēšanas laiks ir tuvs 5ms.



Att.4.17. „Sprieguma pazušanas detektora” darbība

5. Universālā spēka moduļa izmaksas

Šajā nodaļā ir parādīts cenu salīdzinājums starp klasisku NBB sistēmu un no USM konstruētu NBB sistēmu. Kā tika minēts, izmantojot piecus USM var izveidot 4kW dubultās pārveidošanas NBB. Tāda NBB izmaksas ir tuvas 1890Ls. Klasisks dubultās pārveidošanas NBB maksā apmēram 1500Ls [www.powerall.lv].

Kā var redzēt, izstrādātās NBB sistēmas izmaksas ir augstas. Tās ir augstas, jo tāme ir prototipa izmaksas. Sērijveida ražošanā cenas varētu samazināties līdz divām reizēm.

Galvenais iemesls ir, ka USM tika izstrādāts komplicētāku uzdevumu veikšanai, kurus nav iespējams realizēt ar NBB, kuri ir pieejami tirgū.

Galvenie rezultāti

- Tika piedāvāta un izstrādāta nepārtrauktās barošanas bloka sistēma, kura ļauj izmantot dažādus enerģijas avotus un
- Tika izstrādāts universālais spēka modulis priekš nepārtrauktās barošanas bloka sistēmas
- Tika piedāvāti, izstrādāti un pārbaudīti NBBS un tās elementu MATLAB-Simulink modeļi
- Vairākas no USM veidotas un ar dažādiem avotiem un uzkrājējiem aprīkotas NBBS konfigurācijas tika pārbaudītas

Papildus iegūtie rezultāti

- Papildus pētījumu rezultātā tika izstrādāts precīzs Industriālās Elektronikas un Elektrotehnikas institūtā pieejamā saules paneļa Matlab-Simulink modelis, kurš var tikt izmantots citos pētījumos
- Papildus pētījumu rezultātā tika izstrādāta lēta un robusta primārā siltummaiņa konstrukcija priekš ūdens dzesēšanas sistēmas.

Secinājumi

- Piedāvātais NBBS izstrādes paņēmieni dod palielinātu alternatīvo avotu un uzkrājēju izmantošanas iespēju
- Piedāvātais USM ir efektīva laboratorijas iekārta NBBS izstrādei un pētīšanai
- MATLAB-SIMULINK-dSpase(CP1103) modelēšanas un testēšanas vides izmantošana vēl vairāk paātrina NBBS iekārtas un programmatūras izstrādi
- Modelēšana un eksperimenti pierāda sākotnējo pieņēmumu par viegli pārveidojamu un universālu NBBS koncepcijas izstrādi

Izmantotā literatūra

- [1] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Poul Sørensen, Nicolaos Antonio Cutululis, "Mapping of grid faults and grid codes", Technical University of Denmark, July 2007
- [2] Standard LVS EN 50160
- [3] Muhammad H. Rashid, Power Electronics Handbook_Devices Circuits and Applications_Second Edition, Nov 8 2006
- [4] Kristina Hamachi LaCommare, Joseph H. Eto, "Understanding the Cost of Power Interruptions to U.S. Electricity Consumers", September 2004
- [5] www.ups-info.ru
- [6] "Electrical engineering Tables, Standarts, Formulas" Europa-Lehrmittel, 2008
- [7] Ewald Fuchs, Mohammad A. S. Masoum, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Academic Press, March 7 2008
- [8] Neil Rasmussen, "The Different Types of UPS Systems", White Paper #1, APC, 2004
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Eaton_BladeUPS
- [11] https://www.automation.siemens.com/sitop/html_76/ups500.htm
- [12] LVS EN 62040-3 standard
- [13] <http://www.semikron.com/>
- [14] Fraidoon Mazda, power electronics handbook Third Edition, January 1998
- [15] Lienhard J.H. "A Heat Transfer Textbook Third Edition", Phlogiston Press; 3rd edition, August 5, 2003
- [16] Nagla, J., Siltumtehnikas pamati : mācību līdzeklis LPSR augstsk. tehnisko specialitāšu studentiem, 1981
- [17] Nagla, J., Siltumtehniskie aprēķini piemēros : māc. līdz. tehn. spec. stud., 1982
- [18] Stuart R. Wenham, Martin A. Green, Muriel E. Watt, Richard Corkish, "Applied photovoltaics", Earthscan Publications Ltd., 2007-02, ISBN: 1844074013, 335 pages
- [19] Piller home page, http://www.piller.com/site/8/Dynamic.asp?nav_id=115
- [20] E1 DYNAMICS home page, <http://www.e1dynamics.com/topology.php>
- [21] POWERTHRU home page, <http://www.power-thru.com/22.html>
- [22] TEAL Electronics Corporation, BoostBridge, Short Term Ride-Through Batteryless UPS & Power Conditioning Units; 5kVa to 20kVA Models
- [23] My Ton, Brian Fortenbery DC Power for Improved Data Center Efficiency, March 2008
- [24] I. H. Altas, and A.M. Sharaf, "A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment", International Conference on CLEAN ELECTRICAL POWER, ICCEP '07, 21-23 May 2007
- [25] Kajihara, A.; Harakawa, A.T., "Model of photovoltaic cell circuits under partial shading", IEEE International Conference on Industrial Technology 2005, ICIT 2005, Hong Kong, 14-17 Dec., 2005
- [26] Florin IOV, Frede BLAABJERG, Roger BASSETT, Jon CLARE, Alfred RUFER, Stefano SAVIO, Peter BILLER, Paul TAYLOR, Brigitte SNEYERS, "Advanced power converter for universal and flexible power management in future electricity network", 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 21-24 May 2007
- [27] Joe Oreskovic, "The Modular UPS Responding to the Market's Need", Eaton Power Quality Company, INFOBATT, April 2010, Toronto
- [28] Koen De Gusseme, David M. Van de Sype, Jeroen Van den Keybus, Alex P. Van den Bossche, Jan A. Melkebeek, "Fully Equipped Half Bridge Building Block for Fast Prototyping of Switching Power Converters", 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany, 2004
- [29] Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, Zhe Chen, Marco Liserre, "Power converters and control of renewable energy system"