

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

Ingars STEIKS

Doktora studiju programmas „Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**ŪDENRAŽA ENERĢĒTISKĀS IEKĀRTAS SPĒKA
ELEKTRONIKAS PĀRVEIDOTĀJU IZSTRĀDE**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
L.RIBICKIS

Rīga 2011

UDK 662.769.2 + 621.314 (043.2)
St 267 ū

Steiks I. Ūdeņraža enerģētiskās
iekārtas spēka elektronikas
pārveidotāju izstrāde. Promocijas
darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2011.-
17. lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU nozares
promocijas padomes „RTU P-14”
2011.gada 25.maija lēmumu,
protokols Nr.56

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU
doktora studiju īstenošanai”.

ISBN 978-9984-49-346-6

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.g. 2.augustā, Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 117 auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asoc. Profesore, Dr.sc.ing. Anastasija Žiravecka
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Andris Šnīders
Latvijas Lauksaimniecības universitāte

Vadošais pētnieks, Dr.sc.ing. Leonards Latkovskis
Latvijas Zinātņu akadēmijas Fizikāli Enerģētiskais institūts

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.

Ingars Steiks

Datums: 2011.gada 19.jūlijā

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 7 pielikumus, 130 attēlus, kopā 146 lappuses. Literatūras sarakstā ir 103 nosaukumi.

SATURS

DARBA AKTUALITĀTE.....	5
DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI.....	5
PĒTĪJUMA LĪDZEKĻI UN METODES.....	5
DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE.....	5
DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS	6
DARBA APROBĀCIJA.....	6
PUBLIKĀCIJAS	6
IZGUDROJUMI.....	7
PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA	8
IEVADS	8
1. DEGVIELAS ELEMENTU MODUĻA SISTĒMAS IZPĒTE UN ANALĪZE.....	9
2. DEGVIELAS ELEMENTU IEKĀRTU ENERGOELEKTRISKO PĀRVEIDOTĀJU PRINCIPIĀLO SHĒMU ANALĪZE UN KLASIFIKĀCIJA	11
3. ENERGOELEKTRISKĀ PĀRVEIDOTĀJA SISTĒMAS SPĒKA UN VADĪBAS SHĒMU DARBĪBAS MODELĒŠANA	12
4. DEGVIELAS ELEMENTU SISTĒMAS ENERGOELEKTRISKĀ PĀRVEIDOTĀJA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI	12
SECINĀJUMI	13
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI.....	13

DARBA AKTUALITĀTE

Aktuāls un nepieciešams darbs sadalītās elektroenerģijas ražošanas sistēmās un atjaunojamo enerģijas resursu izmantošanas jomā. Visā pasaulē un īpaši ES notiek intensīva degvielas elementu pārveidotāju izpēte un izstrāde dažādās tehnoloģijās. Ļoti aktuāla problēma ir energoelektronikas pārveidotāju izstrāde un izpēte degvielas elementu darbam tīklā un ar individuālo patērētāju. Modulāra spēka elektronikas pārveidotāja izmantošana pieļauj plaša spektra ūdeņraža enerģētisko iekārtu pieslēgšanu.

DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Promocijas darba mērķis ir modulāra ūdeņraža enerģētiskās iekārtas spēka elektronikas pārveidotāju izstrāde. Mērķa sasniegšanai tika izvirzīti sekojoši uzdevumi:

- Ūdeņraža degvielas elementa īpatnību, to virknes un paralēlā slēguma izpēte un analīze;
- Klasificēt iespējas ūdeņraža degvielas elementu enerģijas atdošanas tīklā;
- Galvaniski atsaistīta strāvas avota līdzstrāvas-līdzstrāvas paaugstinošo pārveidotāju izpēte, analīze un izstrāde, kā arī pielietot pusvadītāju slēdžu pārspriegumu samazināšanas iespēju;
- Modulāra vairākļimeņu līdzstrāvas-maiņstrāvas pārveidoju izpēte, analīze un izstrāde;
- Ūdeņraža enerģētiskās iekārtas spēka elektronikas pārveidotāja vadībai un atgriezeniskās saites realizācijai izmantot lauka programmējamo loģisko mezglu masīvu (FPGA).

PĒTĪJUMA LĪDZEKĻI UN METODES

Ūdeņraža degvielas elementu īpatnībām, līdzstrāvas-līdzstrāvas paaugstinošā pārveidotāja un vairākļimeņu līdzstrāvas-maiņstrāvas pārveidotāja shēmai un to vadību izpētei un analīzei tika izmantota matemātiskās analīzes programmatūra Matlab.

Vadības algoritmu un atgriezeniskās saites realizācija tika veikta, izmantojot Xilinx ISE Webpack 13.1 programmatūru un Xilinx Spartan 3E lauka programmējamo loģisko mezglu masīvu (FPGA) aparatūru.

Ekspimentālie pētījumi tika veikti Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātes Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūta ūdeņraža enerģētisko sistēmu pētniecību laboratorijā.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Tika veikta modulāras ūdeņraža enerģētiskās iekārtas spēka elektronikas pārveidotāju izstrāde un eksperimentāla pārbaude, kā arī tika pierādīta moduļu pielietošanas priekšrocības.

Tika veikta degvielas elementu moduļu virknes un paralēlā slēguma eksperimentālā izpēte, tādējādi iegūstot degvielas elementu moduļu raksturlieknes vienādojumus un tos izmantojot statisko režīmu modelēšanā.

Izmantota tranzistoru komutācijas aktīvā slāpēšanas ķēde, tādējādi samazinot pārspriegumu uz, strāvas avota divtaktu līdzstrāvas/līdzstrāvas paaugstinošā pārveidotāja ar divām ieejas droselēm, galvenajiem tranzistoriem.

Tika izveidoti matemātiskās analīzes modeļi, kā arī iegūti patenti par ūdeņraža degvielas elementu: kā barošanas avotu; kā sistēmu ar divslāņu kondensatoru un bateriju; un tā līdzstrāvas/līdzstrāvas un daudzļimeņu līdzstrāvas-maiņstrāvas enerģijas pārveidotājiem.

DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS

Izstrādātais strāvas avota divtaktu līdzstrāvas-līdzstrāvas paaugstinošais pārveidotājs ar divām ieejas drošlēm kopā ar kaskādes modulārā daudzlīmeņu līdzstrāvas – maiņstrāvas pārveidotāju ir piemērots ūdeņraža enerģētiskai sistēmai.

Izveidotā modulārā ūdeņraža enerģētiskās iekārtas spēka elektronikas pārveidotāju sistēma tiks izmantota autonomai mājsaimniecības energoapgādei, ka arī industriālā sprieguma patērētājiem. Modulārā pārveidotāja moduļu skaits var tikt pielāgots izmainoties patērētāja pieejamo/izmantojamo ūdeņraža degvielas elementu moduļu skaitam.

Izveidotais eksperimentālais laboratorijas stends sniedz iespēju pilnveidot kaskādes modulārā daudzlīmeņu līdzstrāvas/maiņstrāvas pārveidotāju vadības metodes, kā arī pielietot vektoru vai izplūdušās loģikas vadības metodes, izmantojot elektrotehnoloģiju datorvadības bloku DS1103PPC.

DARBA APROBĀCIJA

Darba aprobācija notikusi piedaloties sekojošās konferencēs:

1. 14-tā starptautiskā konference „EPE-PEMC 2010”, Ohrida, Maķedonija, 2010
2. 51-ā Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskā konference Energoelektronikas un Elektrotehnikas jomā, Rīga, Latvija, 2010
3. 9-ais Starptautiskais simpozijs „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering 2010”, Pērnavā, Igaunija, 2010
4. 8-ais Starptautiskais simpozijs „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering 2010”, Pērnavā, Igaunija, 2010
5. 13-tā Eiropas Energoelektronikas un elektropiedziņas asociācijas konference „EPE 2009”, Barselona, Spānija, 2009
6. 50-ā Rīgas Tehniskās universitātes Zinātniskā konference Energoelektronikas un Elektrotehnikas jomā, Rīga, Latvija, 2009
7. 5-ais Starptautiskais simpozijs „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering 2008”, Kuresāre, Igaunija, 2008
8. 4-ais Starptautiskais simpozijs „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering 2007”, Kuresāre, Igaunija, 2007
9. The IEEE Industry Applications Society Workshop, Renewable Energy Based Units and Systems, Sanktpēterburga, Krievija, 2006
10. 3-ais Starptautiskais simpozijs „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering 2006”, Kuresāre, Igaunija, 2006

PUBLIKĀCIJAS

1. A.Andreiciks, I.Steiks, O.Krievs and L.Ribickis „Current-fed DC/DC converter for fuel cell applications”, EPE-PEMC 2010,Ohrid, Macedonia, 2010, ISBN 978-1-4244-7854-5 (IEEE datubāze)
2. I.Steiks, L.Ribickis „Capacitor divider voltage monitoring by using Field-Programmable Gate Array (FPGA)”, EPE-PEMC 2010, Ohrid, Macedonia, 2010, ISSN 978-1-4244-7854-5 (IEEE datubāze)
3. A.Andreiciks, I.Steiks and O.Krievs „Current-fed Step-up DC/DC converter for Fuel Cell Applications with active Overvoltage Clamping”, Scientific Journal of Riga

Technical University: Power and Electrical Engineering, Riga, Latvia Volume 27, 2010, ISSN 1407-7345

4. O.Krievs, I.Steiks and L.Ribickis „A PLL Scheme for Synchronization with Grid Voltage Phasor in Active Power Filter Systems”, Scientific Journal of Riga Technical University: Power and Electrical Engineering, Riga, Latvia, Volume 27, 2010, ISSN 1407-7345
5. I.Steiks, O.Krievs and L.Ribickis „A PLL for Estimation of the Voltage Vector Position in a Parallel Active Filter System”, 8th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Parnu, Estonia, 2010, ISBN 978-9985-69-049-9
6. A.Andreiciks, I.Steiks, L.Ribickis „An active clamping current-fed double inductor push-pull converter with current control model for fuel cell applications”, 9th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Parnu, Estonia, 2010, ISBN 978-9985-9089-3-8
7. A.Purvins, O.Krievs, I.Steiks and L.Ribickis „Influence of the Current Ripple on the Hydrogen Fuel Cell Powered Inverter System Efficiency”, EPE 2009, Barcelona, Spain, 2009, ISBN 9789075815009 (EPE datubāze)
8. A.Andreiciks, K.Vitols, O.Krievs, I.Steiks „Current Fed Step-up DC/DC converter for fuel cell inverter applications”, Scientific Journal of Riga Technical University: Power and Electrical Engineering, Riga, Latvia, Volume 25, 2009, ISSN 1407-7345
9. I.Steiks, L.Ribickis „Voltage Monitoring on Capacitor of Modular Multilevel Converter”, Scientific Journal of Riga Technical University: Power and Electrical Engineering, Riga, Latvia, Volume 25, 2009, ISSN 1407-7345
10. I.Steiks, A.Purvins, O.Krievs, L.Ribickis, J.Greivulis „Modelling of a high efficiency DC/DC converter for the PEM fuel cell system”, 5th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Kuressaare, Estonia, 2008, ISBN 978-9985-69-046-8
11. A.Purvins, I.Steiks, O.Krievs, L.Ribickis „Modelling of a Low voltage PEM Fuel Cell Hybrid System”, 4th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Kuressaare, Estonia, 2007, ISBN 978-9985-69-041-3
12. A.Purvins, I.Steiks, O.Krievs, L.Ribickis „Integrated auxiliary power supply unit for a polymer electrolyte membrane fuel cell”, The IEEE Industry Applications Society Workshop, Renewable Energy Based Units and Systems, St. Petersburg, Russia, 2006, ISBN 83-7457-005-9
13. A.Purvins, O.Krievs, I.Steiks, L.Ribickis „Design of power circuit of DC/DC step-up converter for a PEM fuel cell”, 3th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Kuressaare, Estonia, 2006, ISBN 9985-69-036-2

IZGUDROJUMI

1. A.Purviņš, I.Steiks, O.Krievs, L.Ribickis „Daudzslīmeņu līdzstrāvas-maiņstrāvas enerģijas pārveidotājs ar ūdeņraža degvielas elementu”, Latvijas Republikas Patentu valde, 20.08.2009., Nr. LV 13948 B
2. A.Purviņš, J.Greivulis, I.Steiks, O.Krievs, L.Ribickis „Līdzstrāvas - līdzstrāvas enerģijas pārveidotājs ar ūdeņraža degvielas elementu”, Latvijas Republikas Patentu valde, 20.12.2008., Nr. LV 13804 B
3. A.Purviņš, J.Greivulis, I.Steiks, O.Krievs, L.Ribickis „Ūdeņraža degvielas elementa sistēma ar divslāņu kondensatoru un bateriju”, Latvijas Republikas Patentu valde, 20.12.2008., Nr. LV 13803 B

4. A.Purviņš, J.Greivulis, I.Steiks, O.Krievs, L.Ribickis „Barošanas avots ar ūdeņraža degvielas elementu”, Latvijas Republikas Patentu valde, 20.11.2008., Nr. LV 13774 B

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA

IEVADS

1. DEGVIELAS ELEMENTU MODUĻA SISTĒMAS IZPĒTE UN ANALĪZE
2. DEGVIELAS ELEMENTU IEKĀRTU ENERGOELEKTRISKO PĀRVEIDOTĀJU PRINCIPIĀLO SHĒMU ANALĪZE UN KLASIFIKĀCIJA
3. ENERGOELEKTRISKĀ PĀRVEIDOTĀJA SISTĒMAS SPĒKA UN VADĪBAS SHĒMU DARBĪBAS MODELĒŠANA
4. DEGVIELAS ELEMENTU SISTĒMAS ENERGOELEKTRISKĀ PĀRVEIDOTĀJA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

SECINĀJUMI

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

PIELIKUMI

IEVADS

Ūdeņraža enerģētika ik gadu arvien vairāk tiek integrēta dažādos pārvietošanās līdzekļos, autonomo mājāsaimniecību energoapgādē, kā arī elektroenerģijas rezerves barošanas avotos. Šādu ūdeņraža enerģētikas strauju attīstību galvenokārt veicina fosilo energoresursu alternatīvu izpēte. Šis promocijas darbs tika veidots ūdeņraža enerģētisko iekārtu spēka elektronikas pārveidotāju izstrādei, jo intensīva šādu pārveidotāju izstrāde un izpēte dažādās tehnoloģijās notiek Eiropas Savienībā un citur pasaulē.

Ūdeņraža enerģētisko iekārtu spēka elektronikas pārveidotāju izstrādi nosacīti var iedalīt divās daļās, t.i., pirmā daļa ietver ūdeņraža enerģētisko iekārtu izpēti un analīzi, bet otrā daļa - tās spēka elektronikas pārveidotāju izpēti.

Ūdeņraža enerģētisko iekārtu izejas spriegums vairumā gadījumu ir salīdzinoši zems, tādējādi to izmantošanai, piemēram, autonomajā energoapgādē vai arī elektroenerģijas atdošanai tīklā, ir nepieciešama sprieguma paaugstināšana. Kā viens no risinājumiem ir šādu enerģētisko iekārtu virknes slēgums, kas arī tika izpētīts un analizēts šajā darbā. Darba ietvaros tika apskatīts ūdeņraža enerģētisko iekārtu paralēlais slēgums – nodrošinot izejā lielāku jaudu patērētājam.

Pielietojot spēka elektronikas pārveidotājus ir iespēja ūdeņraža enerģētisko iekārtu, salīdzinoši zemo un no slodzes mainīgo, izejas līdzspriegumu paaugstināt vai pazemināt. Lai samazinātu strāvas radītos aktīvos zudumus, sprieguma paaugstināšana ir racionālāks risinājums. Vairākkārtīgai sprieguma paaugstināšanai izmanto transformatorus, kuri reizē nodrošina ieejas un izejas potenciāla atdalīšanu. Galvaniska atdalīšana starp ūdeņraža enerģētisko iekārtu un paaugstināto līdzspriegumu, nodrošina papildus aizsardzību ūdeņraža enerģētiskai iekārtai.

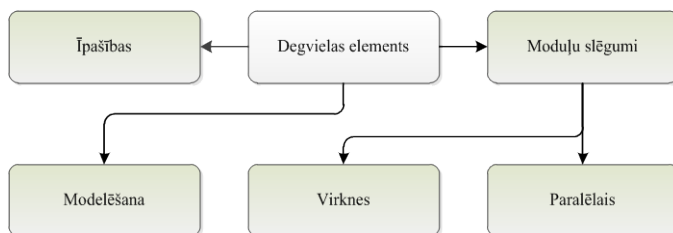
Paaugstināta līdzsprieguma izmantošana mājāsaimniecībās nav bieži sastopama, tādēļ ir nepieciešamība pēc līdzsprieguma/mainsprieguma pārveidotāja.

Elektroenerģijas pārveidotājam komutējot strāvas ar augstu frekvenci var rasties, piemēram, pārspriegums uz pusvadītāja slēdža, pieaugt pusvadītāja slēdža komutācijas zudumi, kā arī veicināt pārveidotāja elektromagnētiskos traucējumus. Lai samazinātu pārspriegumu līdzsprieguma paaugstināšanā pārveidotājā uz pusvadītāja slēdža, kā viens no risinājumiem ir komutācijas aktīvās slāpēšanas shēmas izmantošana. Turpretim, līdzsprieguma/mainsprieguma pārveidotāja izejas spriegums var tikt sadalīts vairākos līmeņos, tādējādi samazinot straujas sprieguma izmaiņas laikā.

Lai realizētu promocijas darba mērķi, t.i., veikt ūdeņraža enerģētisko iekārtu spēka elektronikas pārveidotāju izstrādi, tiek izdalīti sekojoši uzdevumi, pirmkārt, veikt ūdeņraža enerģētisko iekārtu izpēti un analīzi, kas iever to modelēšanas iespējas, kā arī to virknes un paralēlā slēguma izpēti un analīzi. Otrkārt, veikt ūdeņraža enerģētisko iekārtu spēka elektronikas pārveidotāju izstrādi un izpēti, kas ietver piemērota līdzstrāvas/līdzstrāvas paaugstinošā pārveidotāja, kā arī līdzstrāvas/maiņstrāvas pārveidotāja izstrādi/analīzi un to vadības realizāciju.

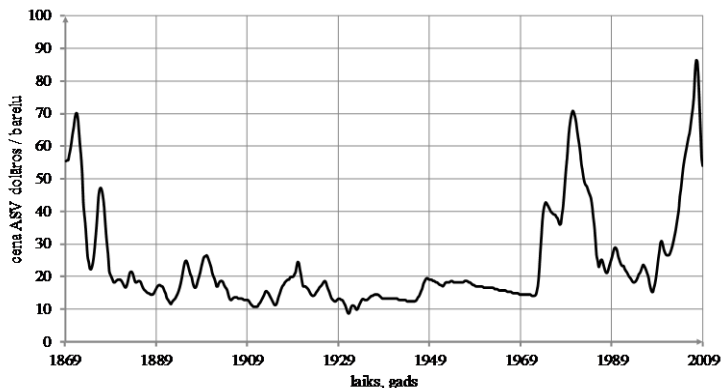
1. DEGVIELAS ELEMENTU MODUĻA SISTĒMAS IZPĒTE UN ANALĪZE

Pirmajā nodaļā apskatītā tematika ir ilustrēta 1.att.



1.att. Nodaļā apskatīto tematiku sadalījums

Pēdējo 20. gadu laikā fosilo resursu pieaugošā cena (skat. 2.att.) ir veicinājusi alternatīvu energoresursu tehnoloģiju izmantošanu, piemēram, degvielas elementu izmantošana elektroenerģijas un siltumenerģijas iegūšanai. Viena no degvielas elementu priekšrocībām ir to pieejamais jaudas diapazons sākot, piemēram, no 0,5 W līdz 10MW, kā arī to integrācija autonomajā energoapgādē.



2.att. Jēlnaftas cenas svārstības pasaulē no 1869.gada līdz 2009.gadam

Degvielas elementu izmantošanai var izmantot klasiskos elektroenerģijas pārveidotājus, bet ir nepieciešama to vadības pielāgošana degvielas elementu VA raksturlielnes īpašību dēļ, t.i., degvielas elementu moduļa izejas līdzspriegums tukšgaitā ir līdz 50V, bet, palielinot slodzi (pieaugot izejas strāvai), izejas līdzsprieguma vērtība

samazinās līdz 26V. Viens no degvielas elementu trūkumiem ir to inertums uz slodzes straujām izmaiņām, salīdzinājumā ar kondensatoriem un akumulatoriem. Matemātiski analizējot un praktiski izveidojot elektroenerģijas pārveidotājus, to precīzākai vadības algoritmu izstrādei, ir lietderīga degvielas elementu matemātiskā modeļa izveide. Iegūstot degvielas elementu eksperimentālās VA raksturliķnes datus un izmantojot aproksimācijas polinomus, ir iespēja izveidot analītisku VA raksturliķni. Analītisko VA raksturliķni var izmantot, gan matemātiskās analīzes programmās, gan integrēšanai energoelektrisko pārveidotāju vadības sistēmās. Iegūtās degvielas elementa polinomu funkcijas:

- virknes slēgumā gadījumā polinoma funkcija degvielas elementam „2” ir:

$$P_{DE2_vir} = -0,185i^2 + 37,133i + 15,67, \quad (1.)$$

- virknes slēguma gadījumā polinoma funkcija degvielas elementam „1” ir:

$$P_{DE1_vir} = -0,1962i^2 + 35,829i + 19,03, \quad (2.)$$

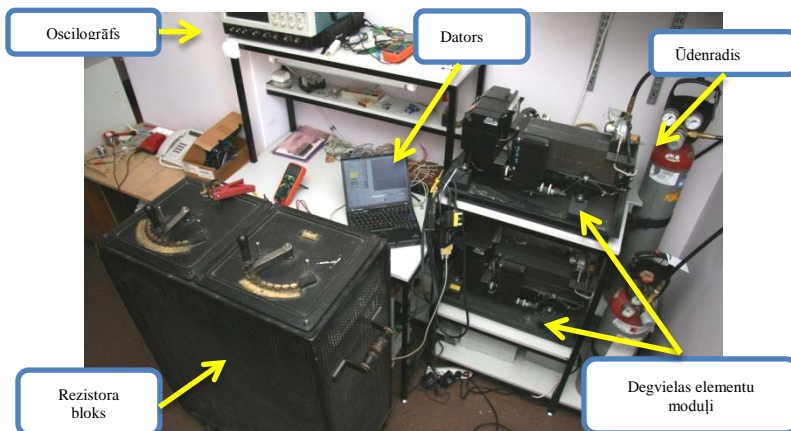
- paralēla slēguma gadījumā polinoma funkcija degvielas elementam „2” ir:

$$P_{DE2_par} = -0,1979i^2 + 38,171i + 10,528, \quad (3.)$$

- paralēla slēguma gadījumā polinoma funkcija degvielas elementam „1” ir:

$$P_{DE1_par} = -0,2235i^2 + 37,745i + 9,9914. \quad (4.)$$

Degvielas elementu moduļu virknes un paralēlā slēguma gadījumos ir jāņem vērā fakts, ka, pieaugot slodzei, ir nepieciešamība pēc jaudas balansēšanas iespējām. Nominālas slodzes gadījumā virknes slēgumā jaudas sadalījuma atšķirība ir 7,9%, bet paralēlā slēguma gadījumā - 13,7%. Virknes slēgumā slodzes strāvas atšķirība ir 0,9%, bet sprieguma atšķirība - 7,1%. Paralēlā slēguma gadījumā slodzes sprieguma atšķirība ir 0,7%, bet slodzes strāvas atšķirība - 13%. Moduļu darba temperatūras atšķirības, nominālas slodzes gadījumā, virknes slēgumā ir 4,9%, bet paralēlā slēguma gadījumā - 0,6%. Slodzes nevienmērīgo sadalījumu starp degvielas elementu moduļiem, galvenokārt, ietekmē to elektroķīmiski inertie procesi, kā arī degvielas elementu darba mūžs un ekspluatēto darba stundu skaits. Degvielas elementu moduļu pētījumu laboratorija ir attēlota 3.att.

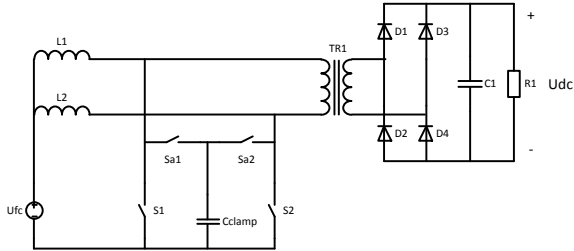


3.att. Degvielas elementu moduļu eksperimentālie pētījumu laboratorija

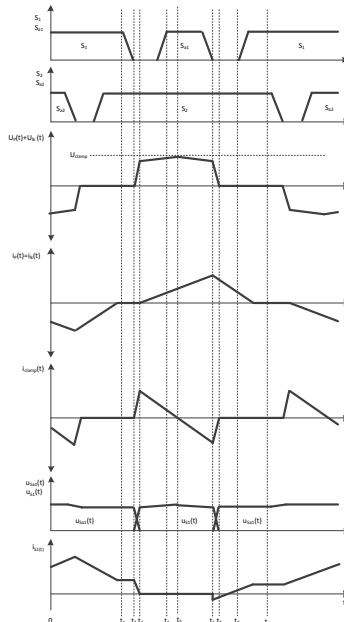
2. DEGVIELAS ELEMENTU IEKĀRTU ENERGOELEKTRISKO PĀRVEIDOTĀJU PRINCIPIĀLO SHĒMU ANALĪZE UN KLASIFIKĀCIJA

Degvielas elementu elektroķīmiskā procesā iegūtās elektroenerģijas atdošana tīklā var kalpot kā rezerves barošanas sistēma, vai arī, piemēram, apgādāt ar elektroenerģiju autonomas mājsaimniecības. Enerģijas atdošanai tīklā par piemērotāko variantu tiek atzīta augstfrekvences invertora izmantošana ar vadības atgriezenisko saiti pēc strāvas.

Salīdzinot trīs veidu līdzsprieguma paaugstinošos augstfrekvences pārveidotājus, par piemērotāko var atzīmēt divtaktu pārveidotāju ar divām ieejas droselēm. Šāda pārveidotāja ieejas strāvas pulsācijas ir mazākas, kā arī transformatora praktiskā realizācija ir vienkāršāka, t.i., transformatoram nav dalīts primārais tinums. Pārveidotāja shēma ir attēlota 4.att., bet tās darbības principi - 5.att.

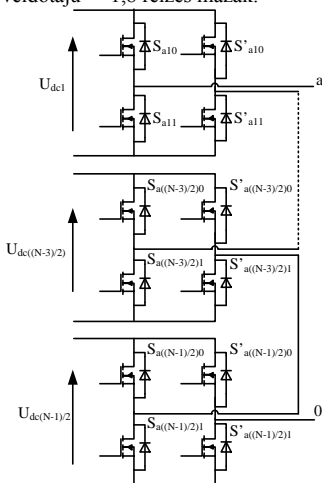


4.att. pārveidotājs ar aktīvo komutācijas slāpēšanas shēmu



5.att. aktīvās komutācijas slāpēšanas ķēdes darbības princips

Veicot vairāklīmeņu invertoru principiālo shēmu analīzi, par piemērotāko tika izvēlēts kaskādes modulārais daudzlīmeņu pārveidotājs (skat. 6.att.), jo nepieciešamību pēc galvaniski izolēta barošanas avota nodrošina degvielas elementa moduļi. Kaskādes modulārā daudzlīmeņu pārveidotāja gadījumā izmantojamais komponentu skaits ir salīdzinoši mazāks, t.i., salīdzinot ar starpslēdžu-sadalīšo-kondensatoru pārveidotāju ir ~1,4 reizes mazāk, bet ar neitrālā-punkta-sadalīto pārveidotāju - ~1,8 reizes mazāk.



6.att. Vispārināta N-līmeņu Kaskādes Modulārais pārveidotāja shēma

3. ENERGOELEKTRISKĀ PĀRVEIDOTĀJA SISTĒMAS SPĒKA UN VADĪBAS SHĒMU DARBĪBAS MODELĒŠANA

Šajā nodaļā tika realizēta divtaktu paaugstinošā pārveidotāja ar aktīvo slāpēšanas ķēdi MATLAB/Simulink vidē modelēšana, sastādīta tā slēdžu stāvokļu tabula. Tika realizēts kaskādes modulārā daudzlīmeņu invertora modelis MATLAB/Simulink vidē ar attiecīgo izejas sprieguma laika diagrammu, kā arī ir sastādīta tā slēdžu stāvokļu tabula. Analizējot augstfrekvences vadības metodes, ar vairāku nesējsignālu līmeņu nobīdi, tika novērotas THD izmaiņas $\pm 1\%$ robežās. Palielinot nesējsignāla frekvenci, THD izmaiņas ir novērojamas $\pm 1\%$ robežās.

Tāpat šajā nodaļā tika realizēta līdzstrāvas/līdzstrāvas paaugstinošā pārveidotāja ar divām ieejas droselēm vadība VHDL valodā, ar atgriezenisko saiti pēc sprieguma.

Kaskādes modulārā daudzlīmeņu invertora vadība, VHDL valodā, tika realizēta tā, lai moduļu noslodze būtu cikliska, t.i., lai, pēc noteiktu cikla skaita, moduļu noslodze būtu vienāda.

4. DEGVIELAS ELEMENTU SISTĒMAS ENERGOELEKTRISKĀ PĀRVEIDOTĀJA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Šajā nodaļā ir ietverti ūdeņraža enerģētiskās iekārtas spēka elektronikas pārveidotāju eksperimentālie pētījumi (funkcionālā blokskāma attēlota 7.att.), kuri ir sadalīti trīs etapos.

Pirmkārt tika izveidots līdzstrāvas/līdzstrāvas paaugstinošā pārveidotāja (ar divām ieejas droselēm un aktīvo komutācijas slāpēšanu) prototips, kā arī eksperimentāli pārbaudīta tā darbība izmantojot FPGA aparāturu.

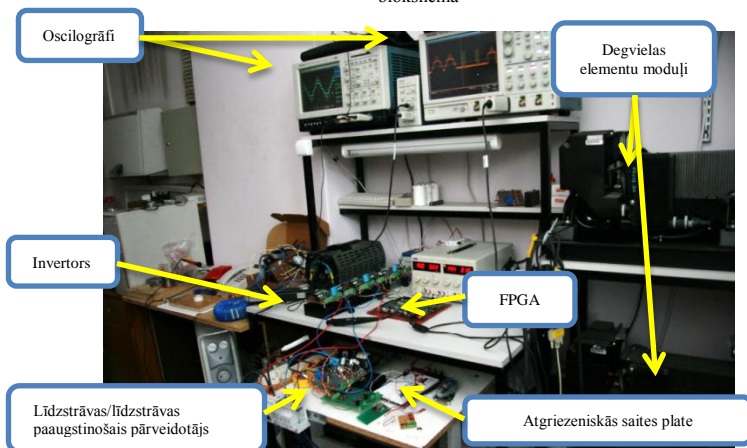
Otrkārt tika izveidots 7-līmeņu kaskādes modulārā invertora prototips un eksperimentāli pārbaudīta tā darbība izmantojot FPGA aparāturu ar tajā realizēto, savstarpēju vienādu noslodzes sadalījumu, vadības algoritmu VHDL valodā.

Treškārt tika realizēta sprieguma mērīšanas ierīce ar galvaniski izolēto līdzsprieguma/līdzsprieguma pārveidotāju. Izveidots impulsu signāla frekvences noteikšanas algoritms VHDL valodā, un veikta tā pārbaudīte izmantojot FPGA aparāturu.

Eksperimentālais pārveidotāju stends ir attēlots 8.att.



7. att. Īdeņraža enerģētiskās sistēmas spēka elektronikas pārveidotāja un palīgiekārtu funkcionālā blokhēma



8.att. Eksperimentālais stends pārveidotāja pārbaudei laboratorijā

SECINĀJUMI

Īdeņraža enerģētika ir daudzsoļa alternatīva fosilo energoresursu izmantošanai, ko galvenokārt ir veicinājis fosilo energoresursu izmaksu pieaugums. Lai arī degvielas

elementu izmantošana elektrotransportā dažās valstīs ir sastopama, to racionāla izmantošana arī iespējama, piemēram, elektroenerģijas rezerves barošanas avotos, elektroenerģijas autonomajās māsaimniecībās, kā arī industriālo ēku energoapgādē. Šajā promocijas darbā tika veikta ūdeņraža enerģētiskās iekārtas spēka elektronikas pārveidotāju izstrāde un izpēte, kuras ietvaros ir veikta degvielas elementu, līdzstrāvas/līdzstrāvas paaugstinošā pārveidotāja un kaskādes modulārā invertora izstrāde un izpēte.

Eksperimentāli tika izpētīts degvielas elementu modulis, pierādot, ka tā Volta-Ampēra raksturliktne veido histerēzes cilpu, tādējādi apstiprinot tās elektroķīmisko procesu inertumu, kas ir viens no degvielas elementu trūkumiem. No eksperimentāli iegūtajiem datiem tika izveidota analītiska degvielas elementu moduļa Volta-Ampēra raksturliktne, kura var tikt pielietota dažādu ūdeņraža enerģētisko iekārtu spēka elektronikas pārveidotāju modelēšanā.

Kā jaunums jāatzīmē degvielas elementu moduļu virknes un paralēlā slēguma izpēte un analīze, pierādot, ka jauda starp degvielas elementu moduļiem tiek sadalīta nevienmērīgi. Degvielas elementu moduļa nominālas slodzes gadījumā, virknes slēgumā, jaudas sadalījuma atšķirība ir 7,9%, bet paralēlā slēguma gadījumā - 13,7%.

No promocijas darbā salīdzinātajām strāvas avota augstfrekvences līdzsprieguma paaugstinošo pārveidotāju principiālajām shēmām, par piemērotāko var atzīmēt divtaktu pārveidotāju ar divām ieejas droslēm. Šāda veida pārveidotāja ieejas strāvas pulsācijas ir mazākas, kā arī transformatoram nav dalīts primārais tinums, tādējādi transformatora praktiskā realizācija ir vienkāršāka. Pārveidotāja spēka slēdžu pārsprieguma samazināšanai tika pievienoti papildus slēdži un kondensators, tādējādi enerģiju, kura rada pārspriegumu uz spēka slēdžiem, nododot transformatora primārajam tinumam.

Izpētes gaitā, veicot vairāklīmeņu invertoru principiālo shēmu analīzi, par piemērotāko tika izvēlēts kaskādes modulārais daudzlīmeņu pārveidotājs, jo nepieciešamību pēc galvaniski izolēta barošanas avota nodrošina degvielas elementu moduļi, bet tā galveno komponentu skaits, salīdzinot ar neitrālā-punkta-sadalīto daudzlīmeņu invertoru, ir 1,8 reizes mazāks.

Modelēšanas rezultāti pierādīja, ka, slēdžu komutācijas frekvences izmaiņas kaskādes modulārā daudzlīmeņu invertora gadījumā, THD koeficientu ietekmē $\pm 1\%$ robežās.

Kaskādes modulārā daudzlīmeņu invertora nevienmērīgā noslodze starp moduļiem tika pierādīta ar modelēšanas rezultātiem. Eksperimentālajos pētījumos tika realizēta moduļu noslodzes savstarpēja izlīdzināšana, izmantojot darbā apskatīto vadības algoritmu.

Tika izveidots ūdeņraža enerģētiskās iekārtas spēka elektronikas pārveidotāja prototips, kurš ietver degvielas elementa moduļus, līdzstrāvas/līdzstrāvas paaugstinošo pārveidotāju, kaskādes modulāro daudzlīmeņu invertoru, kā arī perifērijas iekārtas - sprieguma mērīšanas ķēdi un tās barošanas avotu. Ūdeņraža enerģētiskās iekārtas spēka elektronikas pārveidotāja prototipa vadība ir realizēta, izmantojot FPGA aparatūru.

Ūdeņraža enerģētisko iekārtu spēka elektronikas pārveidotāju izstrāde ir aktuāla tematika, par ko liecina, pirmkārt, promocijas darba aprobācija starptautiskās konferencēs [6] - [9], [95], kā arī [96]. Otrkārt, promocijas darba autora publikācijas par ūdeņraža enerģētisko iekārtu spēka elektronikas pārveidotājiem [76], [77], [79], [80], [94], un treškārt, promocijas darba autora Latvijas Republikas Patentu valdē reģistrētie patenti:

- Barošanas avots ar ūdeņraža degvielas elementu (Nr.13774) [73];
- Ūdeņraža degvielas elementa sistēma ar divslāņu kondensatoru un bateriju (Nr.13803) [75];
- Līdzstrāvas/līdzstrāvas enerģijas pārveidotājs ar ūdeņraža degvielas elementu (Nr.13804) [74];
- Daudzlīmeņu līdzstrāvas-maiņstrāvas enerģijas pārveidotājs ar ūdeņraža degvielas elementu (Nr.13984) [78].

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

- [1] Abu-Rub, H.; Holtz, J.; Rodriguez, J.; Baoming, G., "Medium-Voltage Multilevel Converters—State of the Art, Challenges, and Requirements in Industrial Applications," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 57, no. 8, 2010.
- [2] Aiello, M.F.; Hammondi, P.W.; Rastogi, M., Modular multi-level adjustable supply with parallel connected active inputs. ASV patents, Oktobris 2001, Nr.6 301 130.
- [3] Aiello, M.F.; Hammondi, P.W.; Rastogi, M., Modular multi-level adjustable supply with series connected active inputs. ASV patents, Maijs 2001, Nr.6 236 580.
- [4] Andersen, G.K.; Klumpner, C.; Kjaer, S.B.; Blaabjerg, F., "A New Green Power Inverter for Fuel Cells," *Proceedings of IEEE PESC'02*, vol. 2, 2002.
- [5] Anderson, M.; Alvesten, B., "200 W Low Cost Module Integrated Utility Interactive for Modular Photovoltaic Energy Systems," *Proceedings IEEE IECON '95*, vol. 1, 1995.
- [6] Andreiciks, A.; Steiks, I.; Krievs, O., Current-fed step-up DC/DC converter for fuel cell applications with active overvoltage clamping. Riga: Riga Technical University, 2010, vol. 27, Scientific Journal of Riga Technical University.
- [7] Andreiciks, A.; Steiks, I.; Krievs, O.; Ribickis, L., Current-fed DC/DC converter for fuel cell applications. Ohrid: EPE-PEMC, 2010.
- [8] Andreiciks, A.; Steiks, I.; Ribickis, L., An active current-fed double inductor push-pull converter with current control model for fuel cell applications. Parnu: Estonian Society of Moritz Hermann Jacobi, 2010.
- [9] Andreiciks, A.; Vitols, K.; Krievs, O.; Steiks, I., Current fed step-up DC/DC Converter for Fuel cell inverter applications. Riga: Riga Technical university, 2009.
- [10] Baker, R. H., Electric Power Converter. ASV patents, Februāris 1975, Nr. 3.867.643.
- [11] Baker, R. H., High-Voltage Converter Circuit. ASV patents, Maijs 1980, <http://www.freepatentsonline.com/4203151.pdf>.
- [12] Baker, R.H., Bridge converter circuit. ASV, May 1981.
- [13] Baker, R.H., Switching circuit. ASV patents, Jūlijs 1980, Nr.4 210 826.
- [14] Ballard Power System, Nexa Power Module Integration Guide., 2003.
- [15] Ballard Power Systems, Nexa Power Module User's Manual: MAN5100078., 2006.
- [16] Barbir, F., PEM Fuel Cells. London, Lielbritānija: Elsevier, 2005.
- [17] Barros, J.D.; Silva, J.F., "Optimal predictive control of three-phase NPC multilevel converter for power quality applications," *IEEE Trans.Ind. Electron.*, vol. 55, no. 10, 2008.
- [18] Beinhold, G.; Jacob, R.; Nahrstedt, M., A new range of medium voltage multilevel inverter drives with floating capacitor technology: Proc. European Power Electronics Conf., 2001, http://www.epe-association.org/epc/documents/download.php?type=view&documents_id=2174.
- [19] Bhat, A.K.S.; Dewan, S.B., "A Novel Utility Interfaced High-Frequency Link Photovoltaic Power Conditioning System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 35, no. 1, 1988.
- [20] Bhat, A.K.S.; Dewan, S.B., "Analysis and Design of a High-Frequency Link DC to Utility Interface Using Square-Wave Output Resonant Inverter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 3, 1988.
- [21] Bhat, A.K.S.; Dewan, S.B., "DC-to-Utility Interface Using Sine-wave Resonant Inverter," *IEEE Proceedings*, vol. 135, no. 5, 1988.
- [22] Bhat, A.K.S.; Dewan, S.B., "Resonant Inverters for Photo Voltaic Array to Utility Interface," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 24, no. 4, 1988.
- [23] Bhat, A.K.S.; Swamy, M.M., "Analysis of Parallel resonant Converter Operating Above Resonance," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 25, 1989.
- [24] Bonte, L.; Baert, D., "A Low Distortion PWM DC-AC Inverter with Active Current and Voltage Control, Allowing Line-Interfaced and Stand-Alone Photovoltaic Applications," *IEEE INTELEC'82*, 1982.
- [25] Brandon, N.; Thompson, D., Fuel Cell Compendium. London, Lielbritānija: Elsevier, 2005.
- [26] Cocconi, A.; Cuk, S.; Middlebrook, R., High-Frequency Isolated 4kW Photovoltaic Inverter for Utility Interface., 1983.
- [27] Corzine, K. A., Operation and Design of Multilevel Inverters: Developed for the Office of Naval Research, 2005, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.124.2866&rep=rep1&type=pdf>.
- [28] Corzine, K.; Familant, Y., A new cascaded multilevel H-bridge drive., 2002, vol. 17.
- [29] De Aragao Filho, W.C.P.; Barbi, I., A comparison between two current-fed push-pull dc-dc converters – analysis, design and experimentation.: IEEE, 1996.
- [30] De Souza, K.C.A.; De Castro, M.R.; Antunes, F., "A DC/AC Converter for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems," *Proceeding IEEE IECON '02*, vol. 4, 2002.
- [31] Duba, G. A.; Thaxton, E. S.; Walter, J., Modular Static Power Converter Connected in a Multi-Level, Multi-Phase, Multi-Circuit Configuration. ASV patents, Augusts 1999, Nr. 5.933.339.
- [32] Eichenberg, D.J., The Fuel Cell Powered Club Car Carryall. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, 2005.
- [33] Faramou, P.; Gemmen, R.S., Electrochemical circuit model of a PEM fuel cell. New York: IEEE, 2003.
- [34] Fazal, S.S., "Investigation and comparison of multi-level converters for medium voltage applications," Technische Universität Berlin, Berlin, PhD Thesis 2007.
- [35] Felix, J. P., Modulation and Control of three-phase PWM Multilevel Converters. Spānija: Katalonijas Tehniskā universitāte, 2002, <http://www.tesisenxarxa.net/TDX-0921104-155059/index.html>.
- [36] Fox, D.A.; Shuey, K.C.; Stechschulte, D.L., "Peak Power Tracking Technique for Photovoltaic Arrays," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1979.
- [37] Fracchia, M.; Ghiara, T.; Marchesoni, M.; Mazz, M., Optimized Modulation Techniques for the Generalized N-Level Converter.: *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialist Conference*, 1992, vol. 2.
- [38] Franquelo, L.G.; Rodriguez, J.L.; Leon, J.; Kouro, S.; Portillo, R.; Prats, M.A., "The age of multilevel converters arrives," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 2, no. 2, 2008.
- [39] Fujimao, H.; Kuroki, K.; Kagotani, T.; Kidoguchi, H., "Photovoltaic Inverter with a Novel Cycloconverter for Interconnection to a Utility Line," *Proceedings of IEEE IAS'95*, vol. 3, 1995.
- [40] Gurnathan, R., "Auxiliary Circuit Assisted Soft-switching Techniques and their Application to Power Converters," *Electrical and Computer Engineering*, University of Victoria, Victoria, PhD Thesis 1999.
- [41] Hammond, P. W., Medium Voltage PWM Drive and Method. ASV patents, Aprīlis 1997, Nr. 5.625.545.
- [42] Hammond, P.W., "A new approach to enhance power quality for medium voltage AC drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, no. 1, 1997.
- [43] Herrmann, U.; Langer, H.G.; Van Der Broeck, H., "Low Cost DC to AC Converter for Photovoltaic Power Conversion in Residential Applications," *Proceedings IEEE PESC'93*, 1993.
- [44] Holmes, D.G.; Lipo, T.A., Pulse Width Modulation for Power Converters.: Wiley Interscience, 2003.
- [45] Jin-Tae Kim; Byoung-Kuk Lee; Tae-Won Lee; Su-Jin Jang; Soo-Seok Kim; Chung-Yuen Won, An Active Clamping Current-Fed Half Bridge Converter for Fuel Cell Generation Systems. Aachen: IEEE, 2004.
- [46] Khersonsky, Y., Step Switched PWM Sine Generator. ASV patents, Aprīlis 2003, Nr. 6.556.461.
- [47] Khomfoi, S.; Tolbert, L.M., Multilevel Power Converters.: The University of Tennessee, [http://web.eccs.utk.edu/\[20.05.2011.\]](http://web.eccs.utk.edu/[20.05.2011.]).
- [48] Krievs, O.; Steiks, I.; Ribickis, L., A PLL Scheme for Synchronization with Grid Voltage Phasor in Active Power Filter Systems. Riga: Riga Technical University, 2010, vol. 27, Scientific Journal of Riga Technical University.

- [49] Lai, J.S.; Peng, F.Z., "Multilevel converters—A new breed of power converters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 3, 1996.
- [50] Larminie, J.; Dicks, A., *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd ed. London, Lielbritānija: Wiley, 2003.
- [51] Li, Q.; Wolfs, P., "The Analysis of the Power Loss in A Zero-Voltage Switching Two-Inductor Boost Cell Operating Under Different Circuit parameters," *Proceedings IEEE APEC'05*, vol. 3, 2005.
- [52] Lin, L.; Zou, Y.; Wang, Z.; Jin, H., "Modeling and control of neutral point voltage balancing problem in three-level NPC PWM inverters," *Proc. 36th IEEE PESC*, 2005.
- [53] Lohner, A.; Meyer, T.; Nagel, A., "A New Panel-Integratable Inverter Concept for Grid-Connected Photovoltaic Systems," *Proceedings IEEE ISIE'96*, vol. 2, 1996.
- [54] Manguelle, J.S.; Mariethoz, S.; Veenstra, M.; Rufer, A., "A Generalized Design Principle of a Uniform Step Asymmetrical Multilevel Converter For High Power Conversion," *European Conference on Power Electronics and Applications*, 2001, http://ieeewww.epfl.ch/publications/song_mariethoz_veenstra_rufer_epe_01.pdf.
- [55] Manjrekar, M.; Lipo, T., "A hybrid multilevel inverter topology for drive applications," *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf.*, vol. 2, 1998.
- [56] Manjrekar, M.; Steimer, P.; Lipo, T., "Hybrid multilevel power conversion system: A competitive solution for high-power applications," vol. 36, no. 3, pp. 834-841., *Maijs 2000*, <http://www.ece.wisc.edu/~lipo/1999pub/99-21T.pdf>.
- [57] Marchesoni M., "High-performance current control techniques for applications to multilevel high-power voltage source inverters," *IEEE Trans on Power Electronics*, 1992, vol. 7.
- [58] Marchesoni, M.; Tenca, P., "Theoretical and Practical Limits in Multilevel MPC Inverters with Passive Front Ends," *Graz, Austrija: EPE*, 2001, http://www.epe-association.org/epe/documents/download.php?type=view&documents_id=2186.
- [59] Martins, D.C.; Demonti, R., "Grid Connected PV System Using two Energy Processing Stages," *29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002.
- [60] Martins, D.C.; Demonti, R., "Interconnection of Photovoltaic Panels Array to a Single-Phase Utility Line from a Static Conversion System," *Proceedings of IEEE PESC'00*, vol. 3, 2000.
- [61] Martins, D.C.; Demonti, R., "Photovoltaic Energy Processing for Utility Connected System," *Proceedings IECN '01*, vol. 2, 2001.
- [62] Martins, D.C.; Demonti, R.; Barbi, I., "Usage of the Solar Energy from the Photovoltaic Panels for the Generation of Electrical Energy," *Proceedings of IEEE IN TELECOM'99*, 1999.
- [63] Martins, D.C.; Demonti, R.; Ruther, R., "Analysis of Utility Interactive Photovoltaic Generation System Using a Single Power Static Inverter," *Proceedings of IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2000.
- [64] Mekhilef, S.; Rahim, N.A.; Omar, A.M., "A New Solar Energy Conversion Scheme Implemented Using Grid-Tied Single Phase Inverter," *Proceedings IEEE TEN CON '00*, vol. 3, 2000.
- [65] Meynard, T. A.; Foch, H., "Multi-level Conversion: High Voltage Choppers and Voltage-source Inverters," *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialist Conference*, 1992, (IEEE data bāze).
- [66] Meynard, T. A.; Foch, H.; Thomas, P.; Courault, J.; Jakob, R.; Nahrstaedt, M., *Multicell Converters: Basic Concepts and Industry Applications*: IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2002, vol. 5, (IEEE data bāze).
- [67] Mohan, N.; Undeland, T.; Robbins, W.P., *Power Electronics. Converters, Applications and Design*: John Wiley & Sons, 2003.
- [68] Nabae, A.; Takahashi, I.; Akagi, H., "A new neutral-point clamped PWM inverter," *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting*, 1980.
- [69] Nome, F.J.; Barbi, I., "A ZVS Clamping Mode – Current-Fed Push-Pull DC-DC Converter," *IEEE*, 1998, ISIE'98.
- [70] Ojo, O.; Konduru, S., "A discontinuous carrier-based PWM modulation method for the control of neutral point voltage of three phase three-level diode clamped converters," *Proc. 36th IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, 2005.
- [71] Pitel, J.J., "Phase-Modulated Resonant Power Conversion Techniques for High-Frequency Link Inverters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 22, no. 6, 1986.
- [72] Purvins, A., "Dynamic characteristics and power electronic converters of the hydrogen fuel cell systems," *Rīga, 2008*, Doctoral thesis.
- [73] Purvins, A.; Krievs, O.; Steiks, I.; Ribickis, L., "Design of power circuit of DC/DC step-up converter for a PEM fuel cell," *Kuressaare, Estonia: Estonian Society of Moritz Hermann Jacobi*, 2006.
- [74] Purvins, A.; Krievs, O.; Steiks, I.; Ribickis, L., "Influence of the current ripple on the hydrogen fuel cell powered inverter system efficiency," *Barcelona: EPE*, 2009.
- [75] Purvins, A.; Steiks, I.; Krievs, O.; Ribickis, L., "Integrated auxiliary power supply unit for a polymer electrolyte membrane fuel cell," *St.Petersburg: The IEEE Industry Applications Society Workshop*, 2006.
- [76] Purvins, A.; Steiks, I.; Krievs, O.; Ribickis, L., "Modelling of a low voltage PEM Fuel Cell Hybrid System," *Kuressaare: Estonian Society of Moritz Hermann Jacobi*, 2007.
- [77] Purviņš, A.; Greivulis, J.; Steiks, I.; Krievs, O.; Ribickis, L., "Barošanas avots ar ūdeņraža degvielas elementu," *Rīga: Latvijas Republikas Patentu valde*, 2008, patents.
- [78] Purviņš, A.; Greivulis, J.; Steiks, I.; Krievs, O.; Ribickis, L., "Līdzstrāvas - līdzstrāvas enerģijas pārveidotājs ar ūdeņraža degvielas elementu," *Rīga: Latvijas Republikas Patentu valde*, 2008, patents.
- [79] Purviņš, A.; Steiks, I.; Krievs, O.; Ribickis, L., "Daudzļmeņu līdzstrāvas - mainstrāvas enerģijas pārveidotājs ar ūdeņraža degvielas elementu," *Rīga: Latvijas Republikas Patentu valde*, 2009, patents.
- [80] Purviņš, J.; Greivulis, I.; Steiks, O.; Krievs, O.; Ribickis, L., "Ūdeņraža degvielas elementa sistēma ar divslāņu kondensatoru un bateriju," *Rīga: Latvijas Republikas Patentu valde*, 2008, patents.
- [81] Rajagopalan, V., "Analysis and Design of a Dual Series Resonant Converter for Utility Interface," *Proceedings of IEEE PESC'1987*, 1987.
- [82] Rajagopalan, V.; Al Haddad, K.; Ayer, J., "Innovative Utility-Interactive D.C. to A.C. Power Conditioning System," *Proceedings of IEEE IECN '85*, vol. 2, 1985.
- [83] Ranganathan, V.T.; Ziozas, P.D.; Stefanovic, V.R., "A DC-AC power conversion technique using twin resonant high frequency links," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 17, 1982.
- [84] Raņķis, I., *Energoelektronika*. Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 2002.
- [85] Rodriguez, J.; Lai, J. S.; Zheng Peng, F., "Multilevel inverters: a survey of topologies, control and applications," *IEEE Trans. on Industrial Application*, 2002, vol. 49, http://www.dee.ucf.br/~fanunes/Eletronica%20de%20potencia%20II-%20%20Pos%20Grad/Multi_Level_Topologies_Survey.pdf.
- [86] Sedghisgarchi, K.; Feliachi, A., "Dynamic and transient analysis of power distribution systems with fuel Cells-part I: fuel-cell dynamic model," *10th ed. New York: IEEE*, 2004, vol. 2.
- [87] Singh, B.; Al-Haddad, K.; Chandra, A., "A review of active filters for power quality improvements," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, 1999.
- [88] Song, S.G.; Kang, F.S.; Park, S.J., "Cascaded multilevel inverter employing three-phase transformers and single dc input," *IEEE Trans.Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, 2009.
- [89] Srinivasan, S., *Fuel Cells From Fundamental to Applications*. New York, ASV: Springer, 2006.
- [90] Steigerwald, R.L., "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 3, no. 2, 1988.
- [91] Steigerwald, R.L., "High-Frequency Resonant Transistor DC-DC Converters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 31, no. 2, 1984.
- [92] Steigerwald, R.L.; Tompkins, R.E., "A Comparison of High-Frequency Link Schemes for Interfacing a DC Source to a Utility Grid," *Proceedings IEEE IAS'82*, vol. 17, 1982.
- [93] Steiks, I.; Krievs, O.; Ribickis, L., "A PLL scheme for estimation of the voltage vector position in parallel active filter system," *Parnu: Estonian Society of Moritz Hermann Jacobi*, 2010.
- [94] Steiks, I.; Purvins, A.; Krievs, O.; Ribickis, L.; Greivulis, J., "Modelling of a high efficiency DC/DC converter for PEM fuel cell system," *Kuressaare: Estonian Society of Moritz Hermann Jacobi*, 2008.

- [95] Steiks, I.; Ribickis, L., Capacitor divider voltage monitoring by using Field-Programmable Gate Array (FPGA). Ohrid: EPE-PEMC, 2010.
- [96] I. Steiks and L. Ribickis, Voltage monitoring on capacitor of modular multilevel converter. Riga: Riga Technical university, 2009.
- [97] Takebayashi, T.; Nakata, H.; Eguchi, M.; Kodama, H., "New Current Feed Back Control Method for Solar Energy Inverter Using Digital Signal Processor," Proceedings of IEEE Power Conversion Conference, vol. 2, 1997.
- [98] H. Terai et al., "Utility-Interactive Solar Photovoltaic Power Conditioner with Soft Switching Sine Wave Modulated Inverter for Residential Applications," Proceedings IEEE PESC'02, vol. 3, 2002.
- [99] Veenstra, M.; Rufer, A., "Control of a hybrid asymmetric multilevel inverter for competitive medium-voltage industrial drives," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 42, no. 2, 2005.
- [100] Wang, X.; Kazerani, M., "A Modular Photo-Voltaic Grid-Connected Inverter Based on Phase-Shifted-Carrier Technique," Proceedings of IEEE IAS'02 annual meeting, vol. 4, 2002.
- [101] Xilinx, Spartan-3E Starter Kit Board User Guide.: Xilinx, Inc, 2006, <http://www.xilinx.com>.
- [102] Xu, D.; Wu, B., "Multilevel current source inverters with phase-shifted trapezoidal PWM," Proc. 36th IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf., 2005.
- [103] D. Yu and S. Yuvarajan, A Novel Circuit Model for PEM Fuel Cells. New York: IEEE, 2004.

Ingars STEIKS

**Ūdeņraža enerģētiskās iekārtas spēka elektronikas pārveidotāju
izstrāde**

Promocijas darba kopsavilkums

Metiens 20 eks.

Iespiests RTU, Kronvalda bulvāris 1, Rīga, Latvija, LV- 1010