

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

**Aleksandrs SUZDAĻENKO**

Doktora studiju programmas „Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**VIEDO MĀJSAIMNIECĪBAS ELEKTROAPGĀDES TĪKLU  
VADĪBAS SISTĒMU IZSTRĀDE UN IZPĒTE**

**Promocijas darba kopsavilkums**

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

**RTU Izdevniecība**

**Rīga 2013**

UDK 621.311(043.2)  
Su 980 v

Suzdaļenko A. Viedo mājsaimniecības elektroapgādes tīklu vadības sistēmu izstrāde un izpēte. Promocijas darba kopsavilkums.–R.: RTU Izdevniecība, 2013. - 27. lpp.

Iespiests saskaņā ar IEE institūta 2013. gada 19. jūnija lēmumu, protokols Nr.71.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».



ISBN 978-9934-507-42-7

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013. g. 28. novembrī plkst. 14:00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 117. auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Ivars Raņķis  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Vadošais pētnieks, Dr.sc.ing. Dmitrijs Viņņikovs  
Tallinas Tehnoloģiskā universitāte, Igaunija

Profesors, Dr.sc.ing. Enrikijs Romero-Kadavals  
Estremadūras universitāte, Spānija

**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.

Aleksandrs Suzdaļenko .....

Datums .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur 88 attēlus un ilustrācijas, 11 tabulas, 124 formulas, 8 pielikumus, un tajā ir izmantots 91 informācijas avots. Darba kopējais apjoms ir 114 lappuses.

## MOTIVĀCIJA

Elektroenerģijas patēriņš māsaimniecību sektorā veido apmēram ceturto daļu no globālā elektroenerģijas tirgus, bet Eiropas māsaimniecības patērē 28,6 % no saražotās elektroenerģijas daudzuma [1]. Slodzes līkne šajā sektora ir nelineāra, kas izskaidrojams ar cilvēku neesamību mājās darba stundu laikā un mazo aktivitāti naktī. Divi pīķi ir novērojami no rīta un vakaros, kas, pārklājoties ar industriālā sektora slodzes līkni, veido dienas pieprasījuma maksimumu [2]. Šī parādība ir cēlonis elektrostaciju nepilnai noslodzei, piemēram, 20 % no ASV spēkstacijām strādā 5 % no diennakts laika [3], kas paaugstina darbības izmaksas.

Pieprasījuma pārvaldība (demand-side management) [4]-[5] ir viens no paņēmieniem dzīvojamā sektora slodzes grafika maiņai, ko īsteno ar tarifu plāniem, līgumiem, elektroenerģijas cenas maiņu reālā laikā un valdības lēmumiem. Viedo tīklu īpašības ļauj īstenot vēl elastīgāku pieprasījuma pārvaldību, pateicoties tam, ka tīkls darbojas kā regulējama slodze, izmantojot iekšējos resursus, regulējot pieslēgtās slodzes vai arī generējot enerģiju ārējā tīklā.

Ņemot vērā Dānijas pieredzi fotoelektrisko pārveidotāju popularizēšanā māsaimniecībās, atļaujot uzglabāt enerģijas pārpalikumu tīklā pirms tā patērēšanas, arī citu valstu valdības ar atbilstošiem normatīvajiem aktiem var veicināt atjaunojamo enerģijas resursu izmantošanu, kas palīdzēs sasniegt valsts energoefektivitātes mērķus. Taču liels skaits mazo generatoru rada diskusijas par tīkla stabilitāti, piedāvājot īstenot virtuālo inerci tīklam piesaistītajiem invertoriem un izlīdzināt iezes jaudu ar nelieliem enerģijas uzkrājējiem[6].

Mazo AER un enerģijas uzkrājēju izplatība ļauj iedomāties par līdzstrāvas apakštīkla ieviešanu paralēli maiņstrāvas tīklam[7][8][9], jo vairums AER un enerģijas uzkrājēju ir līdzstrāvas elementi, kā arī līdzstrāvas elementi ir vairums māsaimniecības slodžu. Piemēram, pētījumā [10] noteikts, kā ir iespējama enerģijas zudumu samazināšana par 15 %, pateicoties samazinātam enerģijas pārveidošanas skaitam.

Turklāt energoefektivitāti var veicināt, sniedzot galalietotājam detalizētu informāciju par elektroenerģijas patēriņu. Pilotprojekti ar šī paņēmiena rezultātiem ir aprakstīti [11] [12] un [13], secinot, ka elektroenerģijas patēriņa samazināšana par 5-15 % ir iespējama, pateicoties enerģijas patēriņa datu sniegšanai tādā formātā, lai lietotājs redzētu sadalījumu pēc māsaimniecības patērētājiem. Rezultātā īpašnieks var izmantot dažādus uzvedības scenārijus: ieradumu un dienas ritma maiņa; mazcenā ieguldījums (nomainot neefektīvo apgaismojumu); ieguldījums energoefektīvās iekārtās.

Pieminētās idejas nosaka enerģijas vadības sistēmas (EVS) nepieciešamību katrai mājsaimniecībai, kas ļautu īstenot pieprasījuma pārvaldību, kontrolējot slodzes un enerģijas avotus pēc tīkla operatora pieprasījuma vai strādājot savrupa režīmā (island mode), nodrošinot jaudas bilanci starp AC un DC tīkliem, kā arī nodrošinot lietotāju ar detalizētu elektroenerģijas datu analīzi, lai veicinātu energoefektivitāti.

## GALVENĀS HIPOTĒZES UN MĒRĶI

### ***Hipotēzes***

1. Piedāvāta ievadkomutatora izmantošana ļauj īstenot viedo tīklu netiešo slodzes monitoringa funkciju.
2. Dažādu kategoriju slodzes grafiku izmantošana, ļauj realizēt prognozējamo ilgtermiņa jaudas balansēšanu viedos tīklos.
3. Mājsaimniecības viedā tīkla maiņsprieguma un līdzsprieguma daļas salāgojošā pustilta pārveidotāja speciālā strāvas vadības algoritma izmantošana ļauj izvairīties no momentānas strāvas mērīšanas pārveidotāja spolē.

### ***Mērķi***

1. Izstrādāt daudzfunkcionālo ievadkomutatoru, integrējot netiešo slodzes monitoringa funkciju ar iespēju atdalīt ar AER saražoto enerģijas daudzumu.
2. Izstrādāt komunikācijas mezglu viedā tīkla slodžu vadībai.
3. Izanalizēt eksistējošos enerģijas balansēšanas algoritmus un uzlabot tos labākai viedā tīkla darbībai.
4. Izstrādāt viedā tīkla maiņsprieguma un līdzsprieguma daļas salāgojošā pustilta pārveidotāja strāvas vadības algoritmu tīklam piesaistītam un autonomam režīmam.

## PĒTNIECĪBAS LĪDZEKĻI UN METODES

Matemātiskajiem aprēķiniem un funkciju grafiskai attēlošanai tika izmantota *Mathcad* programmatūra. Spēka elektronikas shēmas tika modelētas *PSIM* vidē, kur tika pārbaudītas analītiski izvadītas tranzistoru vadības funkcijas. *LabVIEW* tika izmantota ilgtermiņa enerģijas balansēšanas algoritma pārbaudei, kā arī lai kontrolētu *Lambda* laboratorijas barošanas bloku automatizētu testu vadīšanai. Programmējamo loģisko iekārtu un mikrokontrolleru vadības algoritmi

tika rakstīti ar *Quartus WEB edition* un *Code Composer Studio* programmatūru, kā arī optimizācijas procesā tika izmantoti iebūvētie atklūdošanas līdzekļi. Spiesto plašu projekti tika izstrādāti ar *OrCAD*.

Spēka elektronikas shēmu analīzei tika izmantota ķēžu teorija. Bisekcijas metode tika izmantota, lai skaitliski atrastu transcendentālās izteiksmes saknes.

## ZINĀTNISKĀS NOVITĀTES

1. Ir izveidots elektroenerģijas cenas noteikšanas algoritms viedo tīklu ilgtermiņa jaudas balansēšanai.
2. Ir izstrādāts strāvas vadības algoritms ar konstantu pārslēgšanas frekvenci reversīvajam taisngriezum uz pustilta shēmas bāzes, kas neizmanto strāvas mērpārveidotāju un nav jūtīgs ieejas sprieguma harmoniskajiem kropļojumiem.
3. Ir definēti adaptīvās histerēzes strāvas vadības algoritma robežlīmeņi, kas nodrošina gandrīz konstantu pārslēgšanas frekvenci reversīvam taisngriezum, kas strādā taisngrieža un tīklam piesaistīta invertora režīmā.

## PRAKTISKĀS NOVITĀTES

1. Ir izstrādāts daudzfunkcionāls ievadkomutators ar netiešo slodzes monitoringa funkciju izmantošanai viedā tīklā.
2. Ir piedāvāta beztransformatora shēma reversīvam taisngriezum uz dubulta pustilta bāzes ar kopējo neitrāli.
3. Ir izstrādāta vadības plate ar programmējamo loģisko ierīci, kas ir kontaktsaderīga ar *TI Piccolo LaunchPad* izstrādes plati, kuru var izmantot Digitālās elektronikas specializētajā kursā elektroinženieriem.

## DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Piedāvāto daudzfunkcionālo ievadkomutatoru kopā ar reversīvo taisngriezi var pilnveidot līdz komerciālam produktam, kas ir domāts vēl nepiesātinātai enerģijas kontroles elementu tirgus nišai. Modernās mājsaimniecības, kurās izmanto AER, ir uzskatāmas par tipiskiem šo enerģijas vadības elementu lietotājiem.

## DARBA APROBĀCIJA

1. Suzdaļenko, A., Stepanovs, A., Galkins, I. Choice of Power Factor Corrector for Effective Operation of MicroGrid and its Elements. No: *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation: Proceedings of the 10th Conference-Seminar: International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, Polija, Lagova, 15.-18. jūnijs, 2010. Red Hook: Curran Associates, Inc., 2010, p. 170-174. ISBN 9781424478941.
2. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Investigation of Power Supply Methods for Intelligent LED Luminary. No: *Proceedings of EPE-PEMC 2010: 14th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Maķedonija, Ohrida, 6.-8. septembris, 2010. Ohrid: IEEE Press, 2010, p. 66-69. ISBN 9781424478569.
3. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Choice of Power and Control Hardware for Smart LED Luminary. No: *Proceedings of the 12th Biennial Baltic Electronics Conference: 2010 12th Biennial Baltic Electronics Conference*, Igaunija, Tallina, 4.-6. oktobris, 2010. Tallinn: Infotrükk, 2010, p. 331-334. ISBN 9781424473571.
4. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Comparison of Two Power Electronic Schemes for 3 kW Li-Ion Battery Charger. No: *Compatibility and Power Electronics (CPE), 2011 7th International Conference-Workshop: 7th International Conference-Workshop "Compatibility and Power Electronics"* (CPE 2011), Igaunija, Tallinna, 1.-3. jūnijs, 2011. Tallinna: IEEE Press, 2011, 400.-403.lpp. ISBN 9781424488063.
5. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Evaluation of Power Consumption Minimization Approaches for Autonomous Electronic Equipment. *Energētika un elektrotehnika*. Nr.29, 2011, 101.-104. lpp. ISSN 14077345.
6. Suzdaļenko, A., Galkins, I., Milaševski, I. Comparative Study of Smart Lighting Grids with LEDs Operated with Concentrated, Localized or Distributed Control. No: *21st Edition of the International Symposium on Power, Electrical Drives, Automation and Motion: International Symposium on Power, Electrical Drives, Automation and Motion*, Itālija, Sorrento, 20.-22. jūnijs, 2012. Sorrento: University Federico II of Naples, 2012, p.1437-1441. ISBN 9781467312998.
7. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Advantages of Enhancement of Street Lighting Infrastructure with DC link. No: *Proceedings of the 13th Baltic Electronic Conference: 13th Baltic Electronic Conference*, Igaunija, Tallina, 3.-5. oktobris, 2012. Tallinn: 2012, p. 235-238. ISBN 9781467327756.

8. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Instantaneous, Short-Term and Predictive Long-Term Power Balancing Techniques in Intelligent Distribution Grids. No: *Technological Innovation for the Internet of Things SE - 37: 4th Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems*, Portugāle, Lisabona, 15.-17. aprīlis, 2013. Berlin: Springer, 2013, p. 343-350. ISBN 9783642372902.
9. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Case Study on Using Non-intrusive Load Monitoring System with Renewable Energy Sources in Intelligent Grid Applications. No: *Proceedings of CPE 2013: 2013 International Conference on Compatibility and Power Electronics*, Slovēnija, Ļubļana, 5.-7. jūnijs, 2013. Ljubljana: IEEE Publishing, 2013, p. 115-119. ISBN 9781467349116.
10. Suzdaļenko, A., Vorobjovs, M., Galkins, I. Development of Distributed Energy Management System for Intelligent Household Electricity Distribution Grid. No: *Proceedings of EUROCON 2013: EuroCon*, Horvātija, Zagreba, 1.-4. jūlijs, 2013. Zagreb: IEEE Press, 2013, p. 1474.-1478. ISBN 9781467322317.
11. [akceptēts publicēšanai] Suzdalenko, A., Galkin, I. Current Sensorless Control of Front-end Bidirectional AC/DC Converter Based on Half-bridge Topology. *Electrical, Control and Communication Engineering*. Nr.4, 2013, 1.–7. lpp.

## AUTORA PUBLIKĀCIJAS

1. Galkins, I., Avotiņš, A., Suzdaļenko, A., Ribickis, L. Comparison and Choice of Supply and Driver Unit for Power LED Luminary. *Enerģētika un elektrotehnika*. Nr.25, 2009, 137.-140.lpp.
2. Suzdaļenko, A., Stepanovs, A., Galkins, I. Choice of Power Factor Corrector for Effective Operation of MicroGrid and its Elements. No: *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation: Proceedings of the 10th Conference-Seminar: International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, Polija, Lagova, 15.-18. jūnijs, 2010. Red Hook: Curran Associates, Inc., 2010, p. 170-174. ISBN 9781424478941.
3. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Investigation of Power Supply Methods for Intelligent LED Luminary. No: *Proceedings of EPE-PEMC 2010: 14th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Maķedonija, Ohrida, 6.-8. septembris, 2010. Ohrid: IEEE Press, 2010, p. 66-69. ISBN 9781424478569.
4. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Choice of Power and Control Hardware for Smart LED Luminary. No: *Proceedings of the 12th Biennial Baltic Electronics Conference: 2010 12th Biennial Baltic Electronics Conference*, Igaunija, Tallina, 4.-6. oktobris, 2010. Tallinn: Infotrükk, 2010, p. 331-334. ISBN 9781424473571.

5. Galkins, I., Bisenieks, L., Suzdaļenko, A. Impact of Pulse Modulation Method of LED Dimmer for Street Lighting on its Efficiency . No: *Proceedings of the 4th European DSP Education & Research Conference: European DSP Education & Research Conference*, Francija, Nica, 1.-2. decembris, 2010. Nice: Texas Instruments, 2010, p. 160-164. ISBN 9780955204753.
6. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Comparison of Two Power Electronic Schemes for 3 kW Li-Ion Battery Charger. No: *Compatibility and Power Electronics (CPE)*, 2011 7th International Conference-Workshop: 7th International Conference-Workshop "Compatibility and Power Electronics" (CPE 2011), Igaunija, Tallinna, 1.-3. jūnijs, 2011. Tallinna: IEEE Press, 2011, 400.-403.lpp. ISBN 9781424488063.
7. Suzdaļenko, A. Guidelines for Autonomous Data Logger Design. No: *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics: 20th International Symposium on Industrial Electronics*, Polija, Gdaņska, 27.-30. jūnijs, 2011. Gdaņska: IEEE Press, 2011, 1426.-1429.lpp. ISBN 9781424493104.
8. Galkins, I., Avotiņš, A., Suzdaļenko, A. LED Dimmer as Versatile Hardware Platform for Practical Exercises in Power Electronics and Control Courses. No: *Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2011): The 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2011)*, Lielbritānija, Birmingema, 30. augusts-1. septembris, 2011. Birmingham: IEEE Press, 2011, p. 1-9. ISBN 9781612841670.
9. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Evaluation of Power Consumption Minimization Approaches for Autonomous Electronic Equipment. *Energētika un elektrotehnika*. Nr.29, 2011, 101.-104. lpp. ISSN 14077345.
10. Suzdaļenko, A., Galkins, I., Milaševski, I. Comparative Study of Smart Lighting Grids with LEDs Operated with Concentrated, Localized or Distributed Control. No: *21st Edition of the International Symposium on Power, Electrical Drives, Automation and Motion: International Symposium on Power, Electrical Drives, Automation and Motion*, Itālija, Sorrento, 20.-22. jūnijs, 2012. Sorrento: University Federico II of Naples, 2012, p.1437-1441. ISBN 9781467312998.
11. Avotiņš, A., Suzdaļenko, A., Galkins, I. Implementation of FPGA Based LED Dimmer Control as Practical Workshop for Students of Power Electronics. No: *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC): 15th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Serbija, Novisada, 4.-6. septembris, 2012. Novisada: IEEE Press, 2012, p. 1-7. ISBN 9781467319706.

12. Milaševski, I., Tetervenoks, O., Suzdaļenko, A. Comparative Study of LED Ballasts for Different Light Regulation Techniques. No: *Proceedings of the 15th International Conference Power Electronics and Motion Control Conference: 15th International Conference on Power Electronics and Motion Control Conference*, Serbija, Novisada, 4.-6. septembris, 2012. Novisada: IEEE Press, 2012, p.1-6. ISBN 9781467319706.
13. Suzdaļenko, A., Lazdāns, A., Galkins, I. Development of Multi-Channel Analogue Signal Data Logger Based on MSP430. No: *Proceedings of the 5th European DSP in Education and Research Conference: 5th European DSP in Education and Research Conference*, Nīderlande, Amsterdamā, 13.-14. septembris, 2012. Amsterdamā: IEEE Press, 2012, p.40.-43.
14. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Advantages of Enhancement of Street Lighting Infrastructure with DC link. No: *Proceedings of the 13th Baltic Electronic Conference: 13th Baltic Electronic Conference*, Igaunija, Tallina, 3.-5. oktobris, 2012. Tallinn: 2012, p. 235-238. ISBN 9781467327756.
15. Galkins, I., Suzdaļenko, A., Armas, J. Distance Encoding Waves for Identification of Lighting Failures. No: *Proceedings of the 13th Baltic Electronic Conference: 13th Baltic Electronic Conference*, Igaunija, Tallina, 3.-5. oktobris, 2012. Tallinn: 2012, p. 227-230. ISBN 9781467327756.
16. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Instantaneous, Short-Term and Predictive Long-Term Power Balancing Techniques in Intelligent Distribution Grids. No: *Technological Innovation for the Internet of Things SE - 37: 4th Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems*, Portugāle, Lisabona, 15.-17. aprīlis, 2013. Berlin: Springer, 2013, p. 343-350. ISBN 9783642372902.
17. Suzdaļenko, A., Galkins, I. Case Study on Using Non-intrusive Load Monitoring System with Renewable Energy Sources in Intelligent Grid Applications. No: *Proceedings of CPE 2013: 2013 International Conference on Compatibility and Power Electronics*, Slovēnija, Ļubļana, 5.-7. jūnijs, 2013. Ljubljana: IEEE Publishing, 2013, p. 115-119. ISBN 9781467349116.
18. Suzdaļenko, A., Vorobjovs, M., Galkins, I. Development of Distributed Energy Management System for Intelligent Household Electricity Distribution Grid. No: *Proceedings of EUROCON 2013: EuroCon*, Horvātija, Zagreba, 1.-4. jūlijs, 2013. Zagreb: IEEE Press, 2013, p. 1474.-1478. ISBN 9781467322317.
19. [akceptēts publicēšanai] Suzdalenko, A., Galkin, I. Current Sensorless Control of Front-end Bidirectional AC/DC Converter Based on Half-bridge Topology. *Electrical, Control and Communication Engineering*. Nr.4, 2013, 1.-7. lpp.

# DISERTĀCIJAS SATURS

## IEVADS

### 1 VET FUNKCIONĀLAIS APRAKSTS

- 1.1 VET barošanas shēmas
- 1.2 EPS vadības topoloģijas
- 1.3 Piedāvātie vadības elementi
- 1.4 Kopsavilkums

### 2 JAUDAS BALANSĒŠANA VET

- 2.1 Jaudas balansēšanas algoritmu apskats
- 2.2 Piedāvātie jaudas balansēšanas algoritmi
- 2.3 Kopsavilkums

### 3 REVERSĪVĀ PĀRVEIDOTĀJA VADĪBA

- 3.1 Topoloģijas izvēle
- 3.2 Tranzistora pārslēgšanas algoritma izvēle
- 3.3 Kondensatoru spriegumu izmaiņas analīze
- 3.4 Taisngrieža režīma analīze
- 3.5 Tiklam piesaistīta režīma analīze
- 3.6 Autonomā invertora režīma analīze
- 3.7 Kondensatoru spriegumu balansēšana
- 3.8 Izejas līdzstrāvas pārveidotāja vadība
- 3.9 LCL filtra aprēķins
- 3.10 Zudumu analīze
- 3.11 Kopsavilkums

### 4 EKSPERIMENTĀLĀ PĀRBAUDE

- 4.1 Daudzfunkcionālā ievadkomutatora eksperimentālā pārbaude
- 4.2 Īstermiņa jaudas balansēšanas algoritmu pārbaude
- 4.3 Reversīvā taisngrieža eksperimentālā pārbaude
- 4.4 Kopsavilkums

## SECINĀJUMI

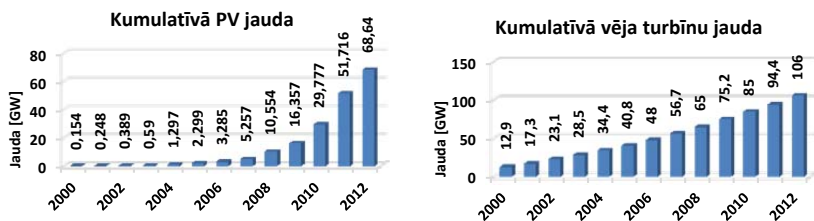
## IZMANTOTIE LIETERATŪRAS AVOTI

## PIELIKUMI

## IEVADS

Energija ir svarīgs resurss, pateicoties kuram cilvēce attīstās, gadsimtiem ilgi izmantojot to ikdienas dzīvē, lai radītu spēku vai transformētu to citā enerģijas veidā. Taču enerģijas iegūšanas process izraisa globālas izmaiņas- derīgo izrakteņu ieguve maina ainavu, naftas rafinēšanas procesi rada izmešus, kas nonāk zemē, ūdenī un gaisā, bet fosilo kurināmo dedzināšana ietekmē Zemes klimatu CO<sub>2</sub> emisiju dēļ.

Elektriskās enerģijas pieprasījums aug par 2,4 % gadā pasaules mērogā, bet attīstības valstīs tas ir vēl augstāks – patēriņa pieaugums ir 4 % [14] iedzīvotāju skaita pieauguma [15] un dzīves līmeņa uzlabošanās dēļ, liekot valstīm regulāri veidot jaunas enerģijas ražošanas stacijas. Neskatoties uz to, ka pagaidām fosilo kurināmo izmantošana ir racionāla, lielas investīcijas tiek ieguldītas atjaunojamās enerģētikas sektora attīstībā, kas 2011. gadā bija 257 miljardu ASV dolāru apjomā [16]. Pateicoties tam, saules enerģijas spēkstaciju un vēja parku uzstādītās jaudas apjoms katru gadu pieaug (sk. 1.1. att.), kas labvēlīgi ietekmē tehnoloģijas izmaksu samazināšanos. Piemēram, Vācijā uzstādītai saules enerģijas spēkstacijai enerģijas pašizmaksa ir 0,138-0,163 €/kWh (atkarībā no jaudas un vietas) [17]. Katru gadu tiek izveidotas arī hidroelektriskās stacijas , it īpaši Āfrikā un Āzijā, kur joprojām ir daudz neizmantotu resursu [18].



1.1. att. Eiropā uzstādīto kumulatīvo saules un vēja jaudas apjoms [19][20]

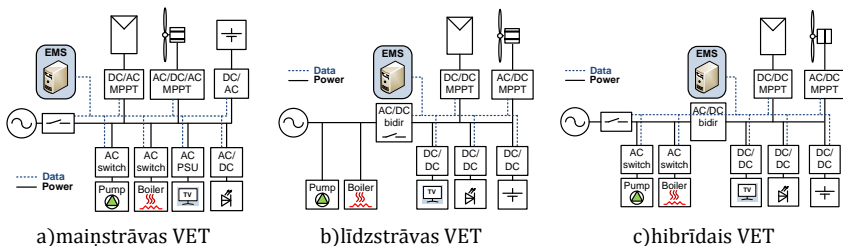
Valstu valdības var sekmēt AER izmantošanu mājāsaimniecību sektorā, mainot noteikumus mazo ģeneratoru pieslēgšanai ārējam tīklam un atļaujot galalietotājam kļūt par ražotāju-patērētāju (prosumer – producer and consumer). Vēra ņemams piemērs ir Dānija, kur katru mēnesi 36 MW saules paneļu tiek pieslēgti tīklam mājāsaimniecību sektorā, saskaņā ar jaunajiem noteikumiem atļaujot saglabāt enerģijas pārpalikumu ārējā tīklā. Tas palīdzēja sasniegt valsts mērķus 20-20-20 programmas ietvaros, sasniedzot 200 MW mājāsaimniecību sektorā jau 2012. gada beigās [21].

# 1 VET FUNKCIONĀLAIS APRAKSTS

Viedais elektroapgādes tīkls (VET) sastāv no vairākiem māsaimniecības elektriskajiem patērētājiem, ko vada ar komunikāciju elementiem, kas ļauj izmantot enerģijas regulēšanas sistēmā (ERS) tālvadības un telemetrijas funkcijas. Šī tīkla konfigurācija nodrošina vislabāko lokālā tīkla funkcionalitāti, mijiedarbojoties ar ārējo tīklu kā regulējamā slodze, ļaujot tīkla operatoram veikt pieprasījuma regulēšanu.

## VET barošanas topoloģijas

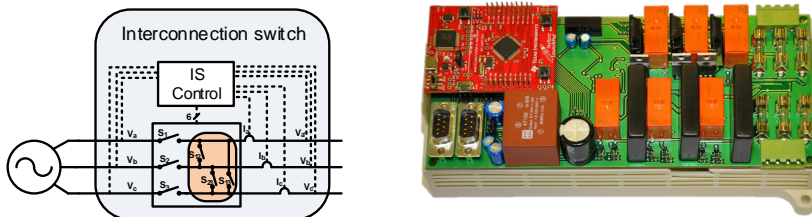
VET konfigurācijas var iedalīt trīs grupās atkarībā no barošanas topoloģijas: maiņstrāvas, līdzstrāvas un hibrīdais VET (sk.1.1. att.).



1.1. att. VET barošanas topoloģijas

## Daudzfunkcionālais ievadkomutators

Tiek piedāvāts speciāls ievadkomutators (IK), kas spēj pārvarēt vienas vai divu fāžu problēmas, pārslēdzot kritisko slodžu barošanu uz strādājošo fāzi. Šī ierīce arī pieļauj paralēlo invertoru darbību, kas ir pieslēgti dažādām fāzēm, lai barotu slodzi, kas ir lielāka par atsevišķo invertoru nominālo jaudu.



1.2. att. Piedāvātais IK – konfigurācija (pa kreisi) un fotogrāfija (pa labi)

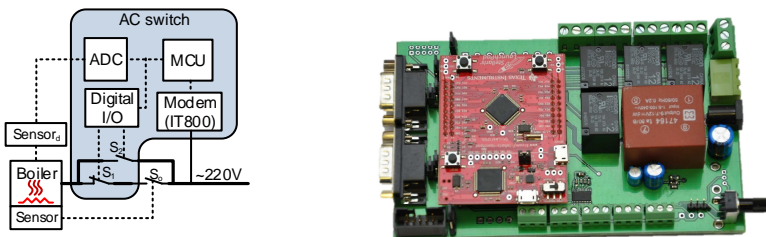
Piedāvātā IK galvenā funkcionalitāte ir aprakstīta zemāk:

- ārējā un lokālā tīkla spriegumu un frekvences mērīšana;
- fāžu komutēšana saskaņā ar atļauto spriegumu un frekvences nobīdi;
- starpfāžu komutēšana saskaņā ar iekšējo programmatūras loģiku;
- netiešā slodzes monitoringa funkcija, kas spēj atdalīt ar AER saražoto enerģijas daudzumu.

Izmantotais aparātu nodrošinājums ļauj īstenot netiešo slodzes monitoringa funkciju, ko 1983. gadā patentēja Džordžs V. Harts (George W. Hart) 1983. gadā [22], kurš nedefinēja slodžu atpazīšanu ar klastera metodi [23]. Kopš tā laika slodžu atpazīšanas algoritmi tika uzlaboti, izmantojot strāvas spektra analīzi [24] un pārejas procesa analīzi [25]. Datu analīzei izmanto modernās programmēšanas tehnoloģijas, piemēram, izplūdušo loģiku [26], skaitlisko programmēšanu [27], dinamisko programmēšanu [28], ģenētiskos algoritmus [29] u. c. Ņemot vērā AER izplatību mājāsaimniecībās, rodas nepieciešamība atpazīt šādi saražotu enerģiju, ko šī promocijas darba autors piedāvā veikt ar trim metodēm: izmantojot meteoroloģiskos mērpārveidotājus, papildu strāvas sensorus un harmonisko analīzi.

### ***Neviedās slodzes pieslēgšanas modulis***

Neviedo slodžu pieslēgšanai un vadībai tiek piedāvāts universālais modulis (kontrolējamais slēdzis), kas ļauj veikt neviendās slodzes tālvadību un telemetriju. Pateicoties tam, EVS var īstenot slodžu kontroli un ieplānoto ieslēgšanu. Šo moduli var arī izmantot viedās slodžu pieslēgšanai, darbojoties kā interfeisu konvertors.



1.3. att. Piedāvātais komunikāciju mezgls: iespējamā konfigurācija (pa kreisi) un fotogrāfija (pa labi)

## 2 JAUDAS BALANSĒŠANA VIEDĀ TĪKLĀ

Jaudas balansēšanai mazajos viedajos tīklos tiek piedāvātas vairākas metodes, tādas kā nanotīkls [30][31] un mikrotīkls [32].

Enerģijas regulēšanas paņēmieni tiek dalīti grupās pēc laika intervāliem, kuros šis paņēmieni iedarbojas uz tīklu: momentānās jaudas balansēšana, kas regulē tīkla spriegumu vai frekvenci, strādājot milisekunžu intervālu robežās; īsa laika jaudas balansēšana, kas nodrošina prioritāro slodžu barošanu, strādājot sekunžu intervālos, un ilgtermiņa jaudas balansēšana, kas ir atbildīga par slodžu iepļānoto ieslēgšanu, regulējot bilanci lielākos laika periodos (kopsavilkums ir apskatāms 2.1. 2.1. tabula .

2.1. tabula

Jaudas balansēšanas paņēmieni salīdzinājums

Jaudas balansēšanas paņēmieni [laika intervāls]	Īstenošana		Funkcionalitāte
	Bez komunikācijas	Ar komunikāciju	
Momentānais [ms ... s]	Slīpuma kontrole	-	Sprieguma vai frekvences kontrole
Īstermiņa [s ... min]	Sprieguma līmeņu signalizācija	Pieprasījuma/atļaujas komandas	Prioritārā slodžu barošana
Ilgtermiņa [min ... h]	-	Regulējamie parametri; elektroenerģijas cenas izmaiņas	Pieprasījuma regulēšana; iepļānota enerģijas uzkrāšana; ģeneratoru jaudas plānošana;

Slīpuma vadības paņēmieni izmanto gan maiņstrāvas, gan arī līdzstrāvas tīklos, kas nosaka jaudas proporcionālo sadali starp ģenerējošajām iekārtām, pateicoties dažādiem slīpuma koeficientiem, kas atkarīgi no atsevišķā enerģijas avota nominālās jaudas [33]. Maiņstrāvas un līdzstrāvas tīklu vadības problemātika ir salīdzināta tabulā zemāk.

2.2 tabula

Momentānās jaudas balansēšanas problēmas salīdzinājums maiņstrāvas un līdzstrāvas tīklos

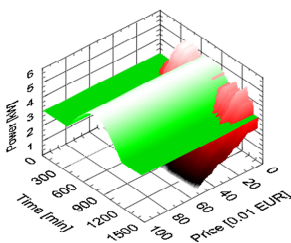
Problēma	Maiņstrāvas tīkls	Līdzstrāvas tīkls
P – aktīvās jaudas balansēšana	●	●
Q – reaktīvās jaudas balansēšana	●	
F – frekvences kontrole; resinhronizācija;	●	
harmonikas, 3 fāžu disbalance	●	
R=∞ – tukšgaitas režīms	●	
I <sub>max</sub> – palaides strāva	●	●

## Piedāvātais ilgtermiņa jaudas balansēšanas algoritms

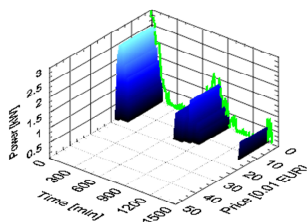
Tiek piedāvāta māsaimniecības elektrisko ierīču kategorizācija, kuru ieslēgšana atkarīga no dažādiem nosacījumiem:

1. noteiktā laikā strādājošas slodzes – sūkņi, vispārējais apgaismojums – slodzes, kuras strādā prognozējamos laika momentos;
2. pēc elektroenerģijas cenas līmeņiem strādājošas slodzes – enerģijas uzkrāšanas elementi, veļas mašīnas – slodzes, kuras sāk strādāt pēc noteiktiem elektroenerģijas cenas līmeņiem;
3. hibrīdās slodzes – apkure, sildītājs, ledusskapis – apvieno abu iepriekšējo slodžu īpašības;
4. uz elektroenerģijas cenu reaģējošas slodzes – kontrolējamais apgaismojums – slodzes, kas maina patērējamo jaudu atkarībā no aktuālās elektroenerģijas cenas.

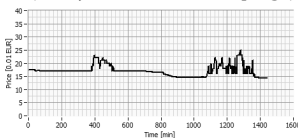
Izmantojot slodžu kategorizāciju, ilgtermiņa jaudas balansēšanas algoritms tiek īstenots ar cenas regulēšanas paņēmieni divos piegājienos: sākumā noteiktā laikā strādājošas slodzes un hibrīdo slodžu ielānotie darba laiki tiek salīdzināti ar prognozētajiem ģeneratoru izejas jaudas datiem. Otrajā kārtā enerģijas pārpalikumu izmanto uz elektroenerģijas cenu reaģējošo slodžu darbības plānošanai.



a) Elektroenerģijas cenas noteikšana pirmajā piegājiēnā (3D attēlojums)



b) Elektroenerģijas cenas noteikšana otrajā piegājiēnā (3D attēlojums)



c) Noteiktā elektrības cena

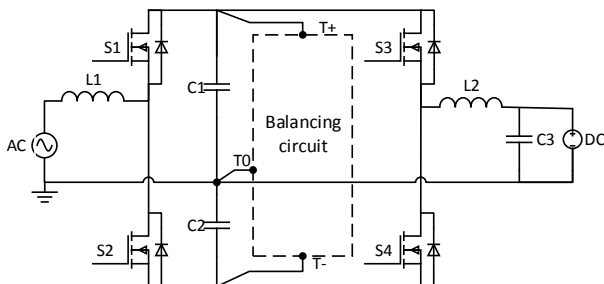
### 2.1. att. Ilgtermiņa jaudas balansēšanas algoritma rezultātu attēlojums

Līdz ar to piedāvātais algoritms ļauj plānot pieslēgto slodzes daudzumu regulējot elektroenerģijas cenu, kas kopumā īsteno pieprasījuma pārvaldību – VET vēlamā īpašība, kura ļauj izlīdzināt dienas pieprasījuma slodzi.

### 3 REVERSĪVĀ TAISNGRIEŽA VADĪBA

Līdzstrāvas tīkla ieviešana viedajā tīklā pozitīvi iespaido enerģijas izmantošanas efektivitāti, kur reversīvais taisngriezis ir centrālais mezgls, nodrošinot abu tīklu stabilitāti, izmantojot jaudas balansēšanas algoritmus, strādājot gan tīklam piesaistītajā, gan autonomajā režīmā.

Autors piedāvā izmantot dubultā pustilta shēmu ar kopējo neitrāli, kas ļauj samazināt pusvadītāju slēdžu skaitu un izslēgt transformatoru, jo neitrāle netiek komutēta pārveidotāja darbības laikā.



3.1. att. Piedāvātā reversīvā taisngrieža shēma

Literatūrā ir zināmi vairāki tranzistoru komutācijas algoritmi [36], [37]. Tika izvēlēts algoritms ar konstanto pārslēgšanas frekvenci, kas saskaņā ar [38] samazina pārslēgšanas zudumus salīdzinājumā ar histerēzes kontroli ar mainīgo pārslēgšanas frekvenci, kā arī samazina augstfrekvences komponentes, bez tam, izvairoties no droseles momentānās strāvas mērīšanas, piedāvātais algoritms samazina vadības sistēmas izmaksas un gabarītus [39].

#### 3.1 Darbības režīmu analīze

Kondensatoru spriegumu funkciju sakarības ir aprakstītas ar diviem vienādojumiem:

$$v_{c1}(t) - v_{c2}(t) = \frac{I_m}{C \cdot \omega} \cdot (1 - \cos(\omega t)) + C_d, \quad (3.1)$$

$$\frac{v_{c1}^2(t)}{2} + \frac{v_{c2}^2(t)}{2} = \frac{I_m \cdot V_m}{4 \cdot C \cdot \omega} \cdot (2\omega t - \sin(2\omega t)) + C_0. \quad (3.2)$$

Tad kondensatora  $C2$  sprieguma funkciju var aprakstīt šādi:

$$v_{c2}^2(t) + v_{c2}(t) \cdot \left( \frac{I_m}{C \cdot \omega} \cdot (1 - \cos(\omega t)) + C_d \right) + \frac{\left( \frac{I_m}{C \cdot \omega} \cdot (1 - \cos(\omega t)) + C_d \right)^2}{2} = \frac{I_m \cdot V_m}{4 \cdot C \cdot \omega} \cdot (2\omega t - \sin(2\omega t)) + C_0, \quad (3.3)$$

ko var aprēķināt kā parasto kvadrātisko vienādojumu ( $ay^2 + by + c = 0$ ), kur pozitīvā sakne apraksta kondensatora  $C2$  spriegumu, bet negatīvā sakne – negatīvo kondensatora  $C1$  vērtību.

Nākamā tabula parāda strāvas komutējamās ceļus un formas viena pārslēgšanas perioda dažādos darbības režīmos. Tika ņemts vērā ieejas sprieguma pozitīvais pusperiods.

3.1. tabula

Strāvas komutējamās ķēdes un formas

Režīm	Strāvas ķēde ar vadāmo slēdži	Strāvas ķēde ar diodi	Strāvas forma
Taisngriezijs			
Tīklam piesaistīts invert.			
Autonomais invertors			

Nākamā tabula apkopo strāvas vadības algoritmus dažādiem pārveidotāja režīmiem.

3.2. tabula

Strāvas vadības algoritmi

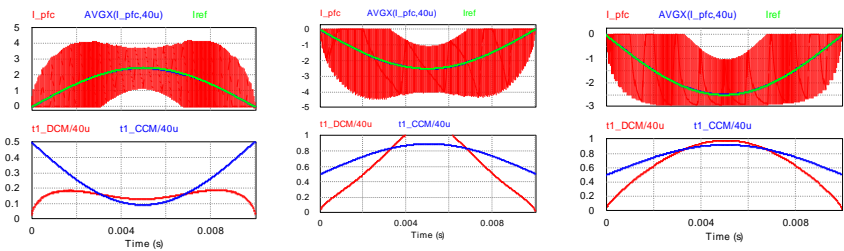
Režīms	Pārtrauktās strāvas režīms	Nepārtrauktās strāvas režīms
Taisngr.	$t_{1,k} = \sqrt{\frac{ i_{avg,k}  \cdot 2 \cdot L \cdot T_{sw} \cdot (v_{c1,k} - v_{in,avg,k})}{(v_{in,avg,k} + v_{c2,k}) \cdot (v_{c1,k} + v_{c2,k})}}. \quad (3.4)$	$t_{1,k} = \frac{\Delta i_{ref,k} \cdot L + (v_{c1,k} - v_{in,avg,k}) \cdot T_{sw}}{v_{c2,k} + v_{c1,k}}. \quad (3.5)$
Tīklam pies. invertors	$t_{1,k} = \sqrt{\frac{ i_{avg,k}  \cdot 2 \cdot L \cdot T_{sw} \cdot (v_{c2,k} + v_{in,avg,k})}{(v_{c1,k} - v_{in,avg,k}) \cdot (v_{c1,k} + v_{c2,k})}}. \quad (3.6)$	$t_{1,k} = \frac{-\Delta i_{ref,k} \cdot L + (v_{c2,k} + v_{in,avg,k}) \cdot T_{sw}}{v_{c2,k} + v_{c1,k}}. \quad (3.7)$
Auton. invertors	$\frac{v_{c2,k}}{v_{c1,k}} e^{-\frac{R}{L} t_{1,k}} = \left(1 + \frac{v_{c2,k}}{v_{c1,k}}\right) e^{-\frac{R}{L} t_{2,k}} - e^{-\frac{R}{L} (t_{1,k} + t_{2,k})}. \quad (3.8)$	$t_{1,k} = \frac{-\Delta i_{ref,k} \cdot L + (v_{c2,k} - R \cdot i_{avg,k}) \cdot T_{sw}}{v_{c1,k} + v_{c2,k}} \quad (3.9)$

Pārtrauktās strāvas režīmu (PSR) autonomām invertora režīmam apraksta ar transcendentālo vienādojumu. Vienkāršotā atbilde vienādojumam (3.8) ir noteikta zemāk:

$$t_{1,k} = \left( \frac{R^2 \cdot i_{avg,k} \cdot T_{sw}}{L \cdot v_{c2,k}} - \ln \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{v_{c2,k} \cdot L}{v_{c1,k} \cdot R}. \quad (3.10)$$

Lai aprēķinātu precīzu atbildi vienādojumam (3.8), tika izmantota bisekcijas metode [40] kā skaitliskais paņēmieni transcendentālā vienādojuma sakņu atrašanai.

Dažādu darbības režīmu modelēšanas rezultāti ir parādīti attēlos zemāk (sk. 3.2. att.), kas sakrīt ar analītiskajiem grafikiem.



a) taisngriezis

b) tīklam piesaistīts invert.

c) autonomais invertors

3.2. att. Modelētās strāvas un laika diagrammas

## Adaptīvās histerēzes strāvas kontrole NSR periodā

Adaptīvās histerēzes vadības algoritms, kas nodrošina gandrīz konstantu pārslēgšanas frekvenci, tiek noteikts ar diviem vienādojumiem, ko var aplūkot zemāk (ir apskatīts taisngrieža režīms) – augšējais un apakšējais induktora strāvas līmenis, kas noteikti no strāvas grafiskā attēlojuma:

$$i_{ccm\_min,k} = i_{avg,k} + \frac{v_{in\_avg,k} + v_{C2,k} \cdot \frac{t_{1\_ccm,k}^2}{T_{sw}} - \frac{v_{C1,k} - v_{in\_avg,k}}{2L} \cdot \frac{(T_{sw} - t_{1\_ccm,k})^2}{T_{sw}}}{\frac{v_{in\_avg,k} + v_{C2,k}}{L} \cdot t_{1\_ccm,k}} \quad (3.11)$$

$$i_{ccm\_max,k} = i_{avg,k} + \frac{v_{in\_avg,k} + v_{C2,k} \cdot \frac{t_{1\_ccm,k}^2}{T_{sw}} - \frac{v_{C1,k} - v_{in\_avg,k}}{2L} \cdot \frac{(T_{sw} - t_{1\_ccm,k})^2}{T_{sw}}}{\frac{v_{in\_avg,k} + v_{C2,k}}{2L} \cdot \frac{t_{1\_ccm,k}^2}{T_{sw}} - \frac{v_{C1,k} - v_{in\_avg,k}}{2L} \cdot \frac{(T_{sw} - t_{1\_ccm,k})^2}{T_{sw}}} \quad (3.12)$$

Līdzīgus rezultātus var iegūt, pieņemot, ka induktora strāva šķērso uzdo strāvas vērtību tranzistora vadīšanas laika vidū:

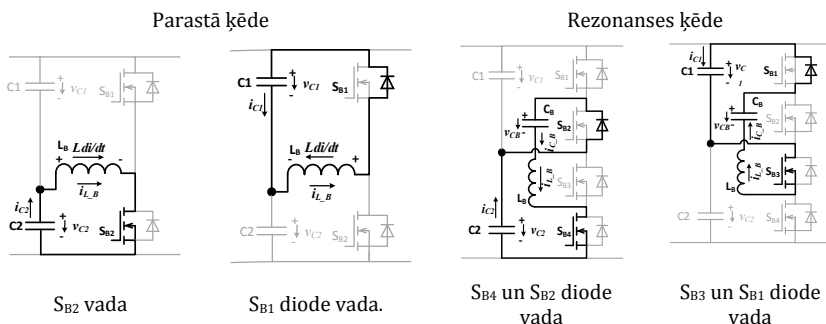
$$i_{ccm\_min,k} = i_{ref}(t_k) - \left( \frac{v_{in\_avg,k} + v_{C2,k}}{L} - \frac{\Delta i_{ref,k}}{T_{sw}} \right) \cdot \frac{t_{1\_ccm,k}}{2}, \quad (3.13)$$

$$i_{ccm\_max,k} = i_{ref}(t_k) + \left( \frac{v_{in\_avg,k} + v_{C2,k}}{L} + \frac{\Delta i_{ref,k}}{T_{sw}} \right) \cdot \frac{t_{1\_ccm,k}}{2}. \quad (3.14)$$

Divu paņēmieni rezultātu starpība ir niecīga, tāpēc otrais variants ir vispiemērotākais mazākas skaitļošanas slodzes dēļ.

## 3.2 Kondensatoru spriegumu balansēšana

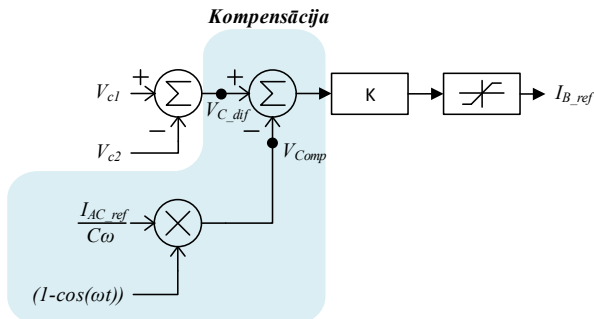
Piedāvātajam pārveidotajam ir nepieciešama spriegumu balansēšanas ķēde, jo izejas pustilts pārsvarā izmanto kondensatoru  $C1$ . Līdz ar to balansēšanas ķēdei ir jānodrošina puse no izejas jaudas. Tiek analizētas divas shēmas: parastā un rezonanses balansēšanas ķēde.



3.3. att. Komutējamās strāvas ķēdes tiešās enerģijas plūsmi – izlādējot kondensatoru  $C2$  un uzlādējot kondensatoru  $C1$

## Balansēšanas ķēdes kontrolleris

Kondensatoru C1 un C2 spriegumi mainās ieejas sprieguma periodā saskaņā ar iepriekš noteikto vienādojumu (3.1). Tāpēc šīs izmaiņas ir jāņem vērā balansēšanas ķēdes kontrollerī (sk. 3.4. att.).



3.4. att. Balansēšanas ķēdes kontrollera shēma

## 3.3 LCL filtra aprēķins

Tabulā zemāk ir apskatīti modelēšanas rezultāti aprēķinātajam LCL filteram (pārveidotāja puses inductivitāte  $L_{FC}=2,2$  mH,  $C_F=1,6$   $\mu$ F, tīkla puses inductivitāte  $L_{FG}=0,2$  mH).

3.3. tabula

LCL filtra modelēšanas rezultāti

	$I_M$ [A]	7,5	5	2,5	1	0,5
Taisngrieža režīmā	THD( $I_{L,C}$ ) [%]	13,6	19,5	34,9	67,3	101,2
	THD( $I_{L,G}$ ) [%]	1,8	2,7	4,5	8,2	11,5
Invertora režīmā	THD( $I_{L,C}$ ) [%]	12,1	17,7	32,4	63,8	96,1
	THD( $I_{L,G}$ ) [%]	1,7	2,5	4,4	8,2	11,5

Aprēķinātā LCL filtra THD vērtības ir piemērotas IEC61727 [41] standartam, kurš nosaka maksimālos harmoniskos kropļojumus 5 % līmenī tīklam piesaistītajiem invertoriem, strādājot ar 75 % no nominālās jaudas.

Ir jāpievērš uzmanība strāvas vadības algoritma izvēlei, kad pārveidotājs strādā ar LCL filtru. PSR periodā ir jāņem vērā tikai pārveidotāja-puses induktora inductivitāte, kamēr NSR ir jāreķinās ar kopējo LCL filtra inductivitāti, lai aprēķinātu tranzistora vadāmības laiku. Autonomajā režīmā strādājošu invertoru kopā ar LCL filtru var uzskatīt par tīklam piesaistītu invertoru, jo filtra kapacitāte iespaido induktora strāvas formu, kas ir līdzīga tīklam piesaistītam invertoram.

## 4 EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

### *Eksperimenti ar IK*

IK integrētas netiešās slodzes monitoringa funkcijas uzlabošanai piedāvāto variantu eksperimentu rezultātu salīdzinājums ir apskatāms 4.1. tabula.

4.1. tabula

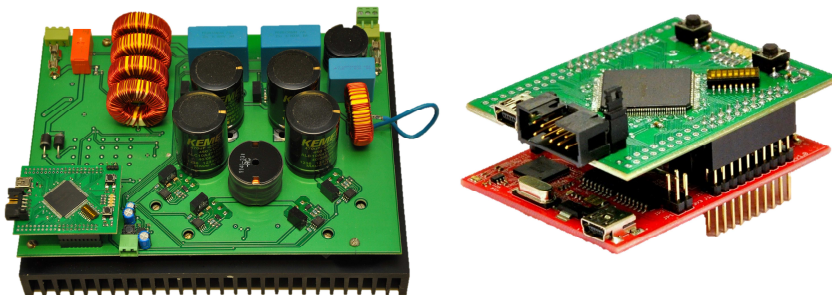
Piedāvāto NSM funkcijas uzlabošanas paņēmieni salīdzinājums

Paņēmiens	Precizitāte	Skaitļojamā slodze	Papildu aprīkojums
Meteoroloģiskais mērpārveidotājs	92 %	Zema	Jā
Strāvas mērpārveidotājs	97 %	Zema	Jā
Spektrālā analīze	84 %	Augsta	Nē/jā

Otrajam paņēmienam ir priekšrocība augstās mērīšanas precizitātes dēļ, proti, ir iespēja mērīt atsevišķi ģenerējamās un patērējamās strāvas. Turpretim pēdējam paņēmienam nav nepieciešams papildu aprīkojums, tomēr augstās skaitļojamās slodzes dēļ ierīci var nākties mainīt.

### *Reversīvā taisngrieža pārbaude*

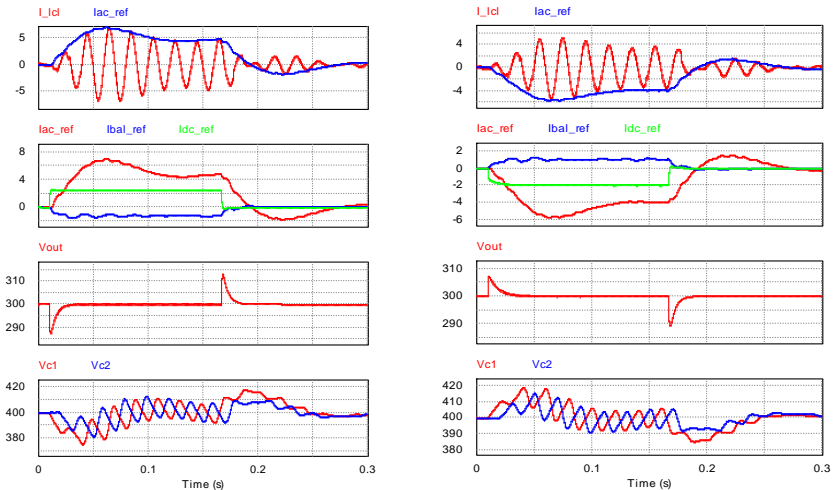
Reversīvā taisngrieža prototips tika uzprojektēts uz divu slāņu spiestās plates (vara biezumus - 70  $\mu\text{m}$ ), izmantojot gaisa dzesēšanas sistēmu.



4.1. att. Reversīvā taisngrieža prototipa fotogrāfija (pa kreisi) un PLI vadības plate (pa labi)

## Reakcija uz iedarbību

Pārveidotāja reakcija uz iedarbību ir apskatīta zemāk. Enerģijas trūkums tika pārbaudīts, pieslēdzot 124  $\Omega$  nominālo slodzi (sk. 4.2. att. pa kreisi) līdzstrāvas tīklā, bet enerģijas pārpalikums (sk. 4.2. att. pa labi) – pieslēdzot 900 W avotu. Pārveidotājs strādā tukšgaitā sākotnējā momentā, kad laika momentā 0,01 s tika pieslēgta slodze vai avots, kas izraisīja līdzstrāvas tīkla sprieguma izmaiņas par 4%, liekot ieejas shēmas, balansēšanas shēmas un izejas shēmas regulatoram veikt darbību, lai stabilizētu kontrolējamos parametrus, kas atbilstoši ir 800 V abu kondensatoru summārais spriegums, 0 V kondensatoru sprieguma atšķirība un 300 V līdzstrāvas ķēdes spriegums. Visi kontrolējamie parametri tika stabilizēti ap laiku 0,15 s. Otrā iedarbība notika laikā 0,16 s, kad atbilstošajā modeli tika atslēgta slodze vai enerģijas avots, kas izraisīja kontrolējamo parametru izmaiņas, liekot PI regulatoram atkal iedarboties, lai stabilizētu atbilstošos parametrus.



4.2. att. Modelēšanas rezultāti, pārbaudot pārveidotāja reakciju uz iedarbību (pa kreisi – 124  $\Omega$  slodze; pa labi – 900 W līdzstrāvas avots)

## SECINĀJUMI

Šis darbs ir veltīts viedo elektroapgādes tīklu (VET) analīzei, kuru pamatā ir moderna mājsaimniecība ar atjaunojamajiem enerģijas resursiem (AER). Galvenais uzsvars likts uz enerģijas pārvaldības vadības sistēmu uzlabošanas iespējām. Apskatot darbu kopumā var secināt, ka izvirzītās hipotēzes ir atzītas par patiesām, un nostādītie mērķi ir sasniegti.

Darbā piedāvāts daudzfunkcionālais ievadkomutators (IK), kas apvieno vairāku viedā tīkla komponentu funkcionalitāti: IK, fāzes selektoru un netiešās slodzes monitoringa (NSM) ierīci. Piedāvātais produkts ļauj veikt tas pašas funkcijas ar mazāku elektronisko un mehānisko slēdžu daudzumu, kā arī mazāku sprieguma un strāvas mērpārveidotāju skaitu. Darbā aplūkota iespēja, kā uzlabot NSM funkciju ar trim paņēmieniem, kas ļauj noteikt ar AER ģenerēto enerģijas daudzumu. Vislabākais rezultāts tika sasniegts, izmantojot papildu strāvas mērpārveidotāju ar kļūdu 3 % apmērā. Ja mājsaimniecībā izmanto vairākus AER, piedāvāto risinājumu kombināciju var izmantot atsevišķu avotu enerģijas daudzuma uzskaitēi.

Darbā ir aprakstīts jauns ilgtermiņa jaudas balansēšanas algoritms, kura pamatā ir slodžu kategorizācija: noteiktā laikā strādājošās slodzes, pēc elektroenerģijas cenas līmeņiem strādājošās slodzes, hibridās slodzes un uz elektroenerģijas cenu reaģējošās slodzes. Ar šo paņēmieni tiek realizēta ģeneratoru un enerģijas uzkrājēju elementu ieplānotā ieslēgšana, kā arī tiek nodrošināta slodžu nobīde vai atslēgšana, definējot elektroenerģijas cenas funkciju, kad VET strādā savrupā režīmā. Gadījumā, kad VET strādā tīklam piesaistītā režīmā un elektroenerģijas cenas funkciju nosaka tīkla operators, piedāvātais algoritms ļauj realizēt enerģijas pārvaldību – tīkla operatoram vēlamā funkcija elektroenerģijas pieprasījuma pīķa regulēšanai.

Izstrādātais strāvas vadības algoritms reversīvajam taisngriezim uz pustilta shēmas, kas neizmanto strāvas mērpārveidotāju un darbojas ar konstantu frekvenci, ir izmantojams dažādos režīmos: taisngrieža, tīklam piesaistītā un autonomā invertora režīmā, kā arī tika adaptēts darbībai ar LCL ieejas filtru. Piedāvātajam paņēmienam nav nepieciešama momentānā strāvas mērīšana, un tas samazina vadības sistēmas izmaksas un izmērus. Nozīmīgs, ka strāvas forma ir noturīga pret ieejas sprieguma harmoniskajiem kropļojumiem, kas uzlabo tīkla strāvas THD vērtību. Aprēķinātais LCL filtrs kopā ar piedāvāto strāvas vadības algoritmu nodrošināja THD vērtību, kura atbilst IEC 61727 standartam.

Turpmākie pētījumi ir saistīti ar sekojošām aktivitātēm: piedāvātā strāvas vadības algoritma pielāgošana nelineāras slodzes barošanai; pārveidotāja vadības sistēmas funkcionalitātes uzlabošana, izstrādājot savrupā režīma noteikšanu un paralēlu inverteru darbību.

## IZMANTOTIE LITERATŪRAS AVOTI

- [1] P. Bertoldi and B. Atanasiu, "Electricity Consumption and Efficiency Trends in European Union," 2009.
- [2] J. A. Jardini, C. M. V. Tahan, M. R. Gouvea, S. U. Ahn, and F. M. Figueiredo, "Daily load profiles for residential, commercial and industrial low voltage consumers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 375–380, 2000.
- [3] R. H. Lasseter, "Smart Distribution: Coupled Microgrids," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1074–1082, Jun. 2011.
- [4] B. Droste-Franke, B. P. Paal, C. Rehtanz, D. U. Sauer, J.-P. Schneider, M. Schreurs, and T. Ziesemer, *Balancing Renewable Electricity*, 1 edition., vol. 40. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, p. 301.
- [5] P. Palensky and D. Dietrich, "Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 3, pp. 381–388, Aug. 2011.
- [6] R. Bründlinger, "Inverter Technology enabling high penetration PV," 2010.
- [7] A. Suzdalenko, A. Stepanov, and I. Galkin, "Choice of power factor corrector for effective operation of MicroGrid and its elements," in *2010 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, 2010, pp. 234–238.
- [8] G.-S. Seo, J. Baek, K. Choi, H. Bae, and B. Cho, "Modeling and analysis of DC distribution systems," in *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, 2011, pp. 223–227.
- [9] K. Shenai and K. Shah, "Smart DC micro-grid for efficient utilization of distributed renewable energy," in *IEEE 2011 EnergyTech*, 2011, pp. 1–6.
- [10] H. Kakigano, M. Nomura, and T. Ise, "Loss evaluation of DC distribution for residential houses compared with AC system," *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA* -, pp. 480–486, Jun. 2010.
- [11] S. Darby, "The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption - A Review for DEFRA of the Literature on Metering, Billing and Direct Displays," *Change*, vol. 22, no. April, pp. 33–35, Apr. 2006.
- [12] K. Ehrhardt-Martinez, K. Donnelly, and S. Laitner, "Advanced metering initiatives and residential feedback programs: a meta-review for household electricity-saving opportunities," *Energy*, 2010.

- [13] H. Kim, M. Marwah, M. Arlitt, and G. Lyon, "Unsupervised disaggregation of low frequency power measurements," *Conference on Data*, no. i, pp. 747–758, 2010.
- [14] F. Birol, "Power to the people," *IAEA Bulletin*, vol. 46, no. June, pp. 9–12, 2004.
- [15] Population Reference Bureau, "2012 World Population Data Sheet," pp. 1–20, 2012.
- [16] A. McCrone, "Global Trends in Renewable Energy Investment 2012," 2012.
- [17] "Germany hits 32.6 GW cumulative PV capacity," 2013. [Online]. Available: [http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/germany-hits-326-gw-cumulative-pv-capacity\\_100010394/](http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/germany-hits-326-gw-cumulative-pv-capacity_100010394/). [Accessed: 01-Jun-2013].
- [18] "Technology Roadmap - Hydropower," Paris, 2011.
- [19] "PVPS Report A Snapshot of Global PV 1992-2012," 2013.
- [20] L. Fried, "Global wind statistics 2012," 2013.
- [21] A. Lubbe, "Denmark reaches 2020-goal for solar energy before time," 2012. [Online]. Available: <http://um.dk/en/news/newsdisplaypage/?newsID=25147B44-3DCE-4647-8788-AD9243C22DF2>. [Accessed: 01-Dec-2012].
- [22] G. W. Hart, E. C. J. Kern, and F. C. Shweppe, "Non-intrusive appliance monitor apparatus," 48581411989.
- [23] G. W. Hart, "Nonintrusive appliance load monitoring," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 12, pp. 1870–1891, 1992.
- [24] J. F. Martins, R. Lopes, C. Lima, E. Romero-Cadaval, and D. Vinnikov, "A novel nonintrusive load monitoring system based on the S-Transform," in *2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2012, pp. 973–978.
- [25] C. Laughman, R. Cox, S. Shaw, S. Leeb, L. Norford, and P. Armstrong, "Power signature analysis," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 56–63, Mar. 2003.
- [26] S. P. Kamat, "Fuzzy logic based pattern recognition technique for non-intrusive load monitoring," in *2004 IEEE Region 10 Conference TENCN 2004*, 2004, vol. C, pp. 528–530 Vol. 3.
- [27] K. Suzuki, S. Inagaki, T. Suzuki, H. Nakamura, and K. Ito, "Nonintrusive appliance load monitoring based on integer programming," in *2008 SICE Annual Conference*, 2008, vol. 174, no. 2, pp. 2742–2747.
- [28] M. Baranski and J. Voss, "Detecting Patterns of Appliances from Total Load Data Using a Dynamic Programming Approach," in *Fourth IEEE International Conference on Data Mining (ICDM'04)*, 2004, pp. 327–330.

- [29] H.-H. Chang, P.-C. Chien, L.-S. Lin, and N. Chen, "Feature Extraction of Non-intrusive Load-Monitoring System Using Genetic Algorithm in Smart Meters," in *2011 IEEE 8th International Conference on e-Business Engineering*, 2011, pp. 299–304.
- [30] J. Bryan, R. Duke, and S. Round, "Decentralized generator scheduling in a nanogrid using DC bus signaling," in *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE, 2004*, pp. 977 – 982 Vol.1.
- [31] I. Cvetkovic, D. Dong, W. Zhang, L. Jiang, D. Boroyevich, F. C. Lee, and P. Mattavelli, "A testbed for experimental validation of a low-voltage DC nanogrid for buildings," in *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, 2012, pp. LS7c.5-1–LS7c.5-8.
- [32] P. Piagi and R. H. Lasseter, "Autonomous control of microgrids," in *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006, p. 8 pp.
- [33] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna, and M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, Jan. 2011.
- [34] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3 edition. Wiley, 2002, p. 824.
- [35] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, "Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 5, pp. 691–703, 1998.
- [36] T. Narongrit, K. Areerak, and K. Areerak, "The Comparison Study of Current Control Techniques for Active Power Filters," *Word Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 60, pp. 471–476, 2011.
- [37] H. Choi, "Interleaved Boundary Conduction Mode (BCM) Buck Power Factor Correction (PFC) Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 6, pp. 2629–2634, Jun. 2013.
- [38] H. Vahedi, A. Sheikholeslami, M. Tavakoli Bina, and M. Vahedi, "Review and Simulation of Fixed and Adaptive Hysteresis Current Control Considering Switching Losses and High-Frequency Harmonics," *Advances in Power Electronics*, vol. 2011, pp. 1–6, 2011.
- [39] T. Qi, L. Xing, and J. Sun, "Dual-Boost PFC Converter Control Without Input Current Sensing," in *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2009, pp. 1855–1861.
- [40] M. Moazzam, A. Chakraborty, and M. Bhuiyan, "A Robust Method for Solving Transcendental Equations," *International Journal of Computer Science Issues*, vol. 9, no. 6, pp. 413–419, 2012.
- [41] IEC61727, Photovoltaic (PV) systems – Characteristics of the utility interface. 2004, p. 23.

**ALEKSANDRS SUZDAĻENKO**

**VEDO MĀJSAIMNIECĪBAS ELEKTROAPGĀDES TĪKLU  
VADĪBAS SISTĒMU IZSTRĀDE UN IZPĒTE**

**Promocijas darba kopsavilkums**

---

Parakstīts iespiešanai 2013.22.10. Reģ. apl. Nr. 2-0282.  
Formāts 60x84/16. Ofseta papīrs. Ofseta papīrs. 1,75 iesp.l.,  
1,22 uzsk.izd.l. Metiens 50 eks. Pasūt. Nr. 87.  
Iespiests RTU tipogrāfijā, Rīga LV-1658, Kaļķu ielā 1.