

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

Lauris BISENIEKS

Doktora studiju programmas „Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**Vēja turbīnas pastāvīgo magnētu
sinhronā ģeneratora un tīkla
salāgojošā pārveidotāja izstrāde un izpēte**

Promocijas darba kopsavilkums

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

Rīga 2011

UDK 621.311.245(043.2)

Bi 830 v

Bisenieks L. Vēja turbīnas pastāvīgo magnētu sinhronā ģeneratora un tīkla salāgojošā pārveidotāja izstrāde un izpēte. Promocijas darba kopsavilkums.- Lauris Bisenieks, 2011.-45 lpp.

Iespiests saskaņā ar IEE institūta 2011. gada 25. maija lēmumu, protokols Nr.56

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



ISBN 978-9984-49-344-2

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.g. 2. augustā plkst. 10:30 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

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Ričards Streļeckis
Gdaņskas Jūras akadēmija, Polija

Vadošais pētnieks Dr.sc.ing. Leonards Latkovskis
Fizikālās Enerģētikas institūts, Latvija

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.

Lauris Bisenieks

Datums

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 3 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 2 pielikumus, 88 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 108 lappuses. Literatūras sarakstā ir 100 nosaukumi.

DARBA AKTUALITĀTE

Arvien pieaugošais zemes iedzīvotāju skaits un dzīves kvalitātes uzlabošanās ir galvenie enerģijas pieprasījuma dzinējspēki. Lai arī enerģijas patēriņš uz vienu saražotā iekšzemes kopprodukta vienību arvien samazinās, tomēr kopprodukta pieauguma tempi ir daudz straujāki un tas izraisa pieaugošu resursu patēriņu enerģijas ražošanai. Prognozes liecina, ka šāda situācija saglabāsies arī turpmākajās desmitgadēs. Fosilo resursu izsīkšana liek meklēt jaunus risinājumus atjaunojamo enerģijas avotu izmantošanai elektroenerģijas ražošanai. Piedevām, fosilo resursu izmantošana ir saistīta ar siltumnīcas efektu gāzu emisiju, bet kodolenerģijas izmantošana ir saistīta ar nopietnu vides apdraudējumu, kodolavāriju gadījumā. Vides piesārņojuma aspekti un cenu palielinājums ir papildus motivācija atjaunojamo energoresursu izmantošanai.

Elektroenerģijas cena, kas iegūta no atjaunojamiem avotiem, vēl joprojām ir augsta un ir galvenais šķērslis plašākai tās izmantošanai. Tas attiecas arī uz mazas jaudas vēja iekārtām, jo dēļ to nelielā uzstādīšanas augstuma un ar to saistītā samazinātā vēja ātrumu, enerģijas ieguve ir neliela. Tā kā nav iespējams ietekmēt vidējo vēja ātrumu, vienīgais veids, kā samazināt iegūtās enerģijas cenu ir palielināt pārveidotāju lietderības koeficientu. Šis promocijas darbs ir veltīts jauna spēka elektronikas pārveidotāja spēka shēmas izstrādei mikro un mazas jaudas turbīnām.

DARBA MĒRĶIS UN IZPILDĪTIE UZDEVUMI

Šīs disertācijas mērķis ir izstrādāt elektroenerģijas sadales tīkla un vēja turbīnas ar patstāvīgo magnētu sinhrono ģeneratoru salāgojošo pārveidotāju. Tā kā salāgojošais pārveidotājs ir sarežģīta sistēma, kas sastāv no spēka shēmas, vadības sistēmas un citiem elementiem, tad tika izvirzīti konkrēti uzdevumi:

- Līdzstrāvas pārveidotāju ar augstfrekvences transformatoru analīze koncentrējoties uz to pielietojumu vēja iekārtās;
- Vēja teorijas analīze, un mainīga ātruma vēja turbīna īpašību izpēte, lai definētu pārveidotāja parametrus;
- Kvazi pretestības avota līdzstrāvas pārveidotāju analīze vēja iekārtu kontekstā;
- Salāgojošā pārveidotāja spēka shēmas prototipa izstrāde;
- Eksperimentālo rezultātu analīze un piedāvātās shēmas potenciāla novērtējums;
- Jauna kvazi pretestības avota DC/DC spēka shēmas izstrāde un izpēte ar uzlabotām sprieguma paaugstināšanas īpašībām.

PĒTĪJUMU METODES

Piedāvātā salāgojošā pārveidotāja spēka shēma tika novērtēta ar datormodelēšanas palīdzību. DC/DC pārveidotāja novērtēšanai tika izmantota PSIM programmatūra, bet vadāmais taisngriezis tika pētīts Matlab grafiskajā vidē Simulink.

Salāgojošā pārveidotāja darbība tika ar eksperimentu palīdzību. Vadāmai taisngriezis tika pārbaudīts ar ģeneratoru pie dažādiem ātrumiem, bet DC/DC pārveidotājs tika testēts pie dažādiem sprieguma līmeņiem un attiecīgām un jaudām

DC/DC pārveidotājam ar uzlabotām sprieguma paaugstināšanas īpašībām tika izveidots analītiskais apraksts.

Piedāvāto pārveidotāju piemērotība dažādu jaudas līmeņu vēja iekārtām tika veikta pamatojoties uz izmaksu un zudumu novērtējuma.

ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Ir izstrādāta un izpētīta jauna salāgojošā pārveidotāja ar vadāmo taisngriezi, kvazi pretestības līdzstrāvas pārveidotāju ar augstfrekvences transformatoru spēka shēma;

Ir izstrādāta un izpētīta jauna salāgojošā pārveidotāja ar nevadāmo taisngriezi, kvazi pretestības līdzstrāvas pārveidotāju ar augstfrekvences transformatoru spēka shēma mikro jaudas vēja iekārtām;

Ir izstrādāta jauna kvazi pretestības līdzstrāvas pārveidotāja ar komutējamām droselēm shēma un dots tās analītiskais novērtējums;

Tiek piedāvāts salāgojošā pārveidotāja aprēķins, lai nākotnē varētu sagatavot rūpnieciskai ražošanai;

Ir veikts piedāvāto spēka shēmu salīdzinājums.

DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Izstrādātais salāgojošā pārveidotāja prototips var tikt izmantots turpmākai komerciāla produkta izstrādei un laists mikro un mazas jaudas vēja iekārtu tirgū. Pārveidotājs var tikt izmantots gan ar tīklu saistītā, gan autonomā konfigurācijā.

DARBA APROBĀCIJA

Promocijas darba galvenie rezultāti tika prezentēti sekojošās zinātniskās konferencēs:

1. Bisenieks L., Galkins I. Estimation of Converter Topologies for Small Wind Turbine // Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering*Doctoral School of Energy and Geotechnology II : Proceedings, Igaunija, Pērnavā, 14.-19. jūnijs, 2010. - 25.-28. lpp.

2. Bisenieks L., Vinnikov D., Galkins I. New Isolated Converter for Interfacing PMSG Based Wind Turbine with Distribution Network // Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering*Doctoral School of Energy and Geotechnology II: Proceedings, Igaunija, Pērnavā, 10.-15. janvāris, 2011. - 100.-107. lpp.

3. Bisenieks L., Vinnikov D., Galkins I. New Isolated Interface Converter for Grid-Connected PMSG based Wind Turbines // Proceedings of 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Itālija, Roma, 8.-11. maijs, 2011. - 869.-872. lpp.

4. Bisenieks L., Vinnikov D., Zaķis J. Analysis of Operating Modes of the Novel Isolated Interface Converter for PMSG Based Wind Turbines // Proceedings of the III International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Spānija, Torremolinos, 11.-13. maijs, 2011. - 1.-8. lpp.

5. Bisenieks L., Vinnikov D., Galkins I. New Converter for Interfacing PMSG based Small-Scale Wind Turbine with Residential Power Network // Proceedings of the 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics, Igaunija, Tallina, 1.-3. jūnijs, 2011. - 354.-359. lpp.

6. Husev O., Bisenieks L. Control Algorithm for Front-End Active Rectifier for Grid-Connected PMSG based Wind Turbines // Student Forum Proceedings of the 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics CPE 2011, Igaunija, Tallina, 3.-3. jūnijs, 2011. - 82.-86. lpp.

7. Bisenieks, L.; Vinnikov, D.; Galkin, I. (2011). PMSG based residential wind turbines: possibilities and challenges. In: Agronomy research: Biosystems Engineering BSE2011. 2011, accepted for publication

8. Bisenieks, L.; Vinnikov, D.; Ott, S. (2011). Switched Inductor Quasi-Z-Source Based Back-to-Back Converter for Variable Speed Wind Turbines with PMSG. In: ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING: The 15th International Conference of ELECTRONICS, 2011, accepted for publication.

AUTORA PUBLIKĀCIJAS

1. Stepanovs A., Galkins I., Bisenieks L. Перспективы использования суперконденсаторов в источниках бесперебойного питания // Технічна Електродинаміка, Ukraina, Alušta, 17.-21. septembris, 2006. - 45.-48. lpp.

2. Bisenieks L., Galkins I. Simulation, validation and implementation of a control system for uninterruptible power supply // ISBN 978-9985-69-041-3 Proceedings of the 4th International Symposium "Topical Problems of Education in the Field of Electrical and Power Engineering" , Topical Problems of Education in the Field of Electrical and Power Engineering, Igaunija, Kuresāre, 15.-20. janvāris, 2007. - 130-135. lpp

3. Bisenieks L., Galkins I., Stepanovs A. Connection of Photovoltaic Modules to the Electricity Supply Grid or to a Local Consumer Utilizing Topology of the On-Line Converter // Conference Proceedings of the 11th International Conference on Solar Energy in High Latitudes, Latvija, Rīga, 30.maijs-1. jūnijs, 2007. - 1.-4. lpp.

4. Stepanovs A., Galkins I., Bisenieks L. Implementation of Supercapacitors in Uninterruptible Power Supplies // Proceedings of EPE 2007, Dānija, Alborga, 2.-5. septembris, 2007. - 1.-7. lpp.

5. Stepanovs A., Galkins I., Bisenieks L. Pspice Simulation of an On-Line Converter Powered by a Photovoltaic Array // Технічна електродинаміка, Ukraina, Alušta, 18.-22. septembris, 2007. - 79.-82. lpp.

6. Bisenieks L., Stepanovs A., Galkins I. Comparison of a Traditional Diode Photovoltaic Model and Simplified I-V Curve Based Model // Proceedings of the 5th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering", Igaunija, Kuresāre, 14.-19. janvāris, 2008. - 73.-77. lpp.

7. Stepanovs A., Bisenieks L., Galkins I. Comparison of Controllable Rectifiers for Direct-Current Supply System // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск „Силова електроніка та енергоефективність”. - Київ, 2008. - Частина 2, с. 96-99.

8. Galkins I., Stepanovs A., Bisenieks L. Direct-Current Supply System with Capability of an Uninterruptible Power Supply // BEC 2008 : 2008 International Baltic Electronics Conference : Proceedings of the 11th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn University of Technology, October 6-8, 2008, Tallinn, Estonia. - Piscataway, NJ : IEEE, 2008. - P. 301-304.

9. Stepanovs A., Galkins I., Bisenieks L., Sokolovs A. Development of a Modular Power Converter // RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. - 25. sēj. (2009), 107.-110. lpp.

10. Stepanovs A., Galkins I., Bisenieks L. Development of Fast and Easy Reconfigurable Modular Power Converter // Технічна Електродинаміка, UKRAINA, Alušta, 21.-26. septembris, 2009. - 17-20. lpp.

11. Bisenieks L., Vinogradov R., Lazdāns A., Galkins I. Upgrade Possibilities of Low-Power Electric Scooter // Proceedings of the 51st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, Latvija, Rīga, 11.-15. oktobris, 2010. - 213.-216. lpp.

12. Bisenieks L., Galkins I. Estimation of Step-up Converters for Photovoltaic // Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering*Doctoral School of Energy and Geotechnology II" : Proceedings, Igaunija, Pērnavā, 11.-16. janvāris, 2010. - 227-231. lpp.

DISERTĀCIJAS SATURS

Ievads

1. Vēja turbīnu ar pastāvīgo magnētu ģeneratoru apraksts
 - 1.1. Vēja enerģijas pārveidošana
 - 1.1.1. Vēja pārveidošana
 - 1.1.2. Vēja sadalījums
 - 1.2. Mainīga ātruma turbīnu konfigurācija
 - 1.2.1. Salāgojošo pārveidotāju spēka shēmas
 - 1.3. Sadales tīkla raksturojums
 - 1.4. Mainīga ātruma vēja turbīnu raksturlīknes
 - 1.5. Spēka shēmu analīze
 - 1.6. Slēdzieni
 2. Jauna pārveidotāja spēka shēma
 - 2.1. Ģeneratora daļas pārveidotājs
 - 2.1.1. Modelēšanas rezultāti
 - 2.2. Kvazi pretestības avota DC/DC pārveidotājs ar augstfrekvences transformatoru
 - 2.2.1. Kvazi pretestības avota DC/DC pārveidotāja darba režīmi
 - 2.2.2. Nepārtrauktas strāvas režīms
 - 2.2.3. Modelēšanas un eksperimentālie rezultāti
 - 2.3. Vadības metodes
 - 2.4. Salāgojošais pārveidotājs mikro turbīnām
 - 2.5. Slēdzieni
 3. Kvazi pretestības avota DC/DC pārveidotājs ar uzlabotam sprieguma paaugstināšanas īpašībām
 - 3.1. Salāgojošā pārveidotāja darba režīmi
 - 3.2. Modelēšanas un eksperimentālo rezultātu analīze
 - 3.2.1. Vadāma taisngrieža Modelēšanas un eksperimentālo rezultātu analīze
 - 3.2.2. Kvazi pretestības avota DC/DC pārveidotāja ar komutējamām droselēm modelēšanas un eksperimentālo rezultātu analīze
 4. Slēdzieni un turpmākie pētījumi
- Literatūra

IEVADS

Arvien pieaugošais zemes iedzīvotāju skaits un dzīves kvalitātes uzlabošanās ir galvenie enerģijas pieprasījuma dzinējspēki. Lai arī enerģijas patēriņš uz vienu saražotā iekšzemes kopprodukta vienību arvien samazinās, tomēr kopprodukta pieauguma tempi ir daudz lielāki un tas izraisa pieaugošu resursu patēriņu enerģijas ražošanai. Prognozes liecina, ka šāda situācija saglabāsies arī turpmākajās desmitgadēs. Fosilo resursu izsīkšana liek meklēt arvien jaunus risinājumus atjaunojamo enerģijas avotu izmantošanai elektroenerģijas ražošanai. Piedevām, fosilo resursu izmantošana ir saistīta ar siltumnīcas efektu gāzu emisiju, bet kodolenerģijas izmantošana ir saistīta ar nopietnu vides apdraudējumu, kodolavāriju gadījumā. Vides piesārņojuma aspekti un cenu palielinājums ir papildus motivācija atjaunojamo energoresursu izmantošanai.

Elektroenerģijas cena, kas iegūta no atjaunojamiem avotiem, vēl joprojām ir augsta un ir galvenais šķērslis plašākai tās izmantošanai. Tas attiecas arī uz mazas jaudas vēja iekārtām, jo dēļ to nelielā uzstādīšanas augstuma un ar to saistītā samazinātā vēja ātrumu enerģijas ieguve ir neliela. Tā kā nav iespējams ietekmēt vidējo vēja ātrumu, vienīgais veids, kā samazināt iegūtās enerģijas cenu ir palielināt pārveidotāju lietderības koeficientu. Šis promocijas darbs ir veltīts jauna spēka elektronikas pārveidotāja spēka shēmas izstrādei mikro un mazas jaudas turbīnām

Vēja enerģija tās pieejamības dēļ ir ļoti pievilcīga atjaunojamās enerģijas forma. Komerciālais potenciāls [72 TW] ir piecreiz lielāks par visas pasaules enerģijas patēriņu [8], bet uzstādītās jaudas 2009. gadā sasniedza vien 159GW [23].

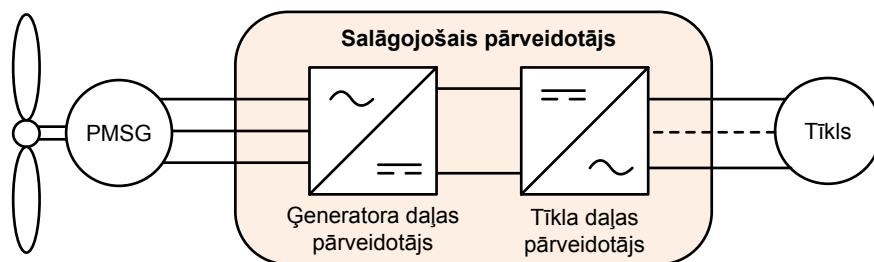
Vēja mehāniskā enerģija tiek pārvērstā elektriskajā ar ģeneratoru palīdzību. Pastāvīgo magnētu ģeneratori dominē mikro un mazo vēja iekārtu segmentā un kļūst populāri arī lielas jaudas pielietojumos, pateicoties iespējai viegli realizēt daudzpolu konstrukciju [19].

Lai arī saražotās enerģijas apjoms ir augstāks liels jaudas turbīnām iekšzemē un jūra, tomēr pārvades zudumi vēl arvien ir aktuāla problēma. Lai tos samazinātu tiek piedāvātas izklīdētās enerģijas ražošanas tehnoloģijas, kas satuvina ražošanu ar patēriņu un izlīdzina saražotās un patērētās enerģijas daudzumu. Elektromobiļi var kalpot par enerģijas akumulējošam iekārtam neprognozējamās vēja enerģijas uzkrāšanai, bet sadales tīklam var tikt nodots enerģijas pārpalikums. Viedie tīkli nākotnē būs līdzeklis, lai kontrolētu enerģijas plūsmas.

Mikro-ģenerācija ir daļa no viedo tīklu filozofijas un kalpo kā enerģijas avoti sadalītās enerģijas ražošanai. To var pievienot pie sadales tīkla vai maiņstrāvas viedā tīkla. Mikro-ģenerators iekļauj visas ierīces, lai tas

varētu darboties paralēli ar sadales tīklu. Ģeneratora jauda tiek ierobežota ar 16A fāzes strāvu [7]. Dažus avotus iespējams pieslēgt tieši pie sadales tīkla, bet līdzstrāvas avotu un mainīga ātruma vēja turbīnu gadījumā ir nepieciešams spēka elektronikas pārveidotājs, kas salāgo avotu ar tīklu.

Mikro-ģenerators ar mainīga ātruma vēja turbīnu ietver vēja turbīnu, ģeneratoru un salāgojošo pārveidotāju (Att. 0.1.) Šī disertācija ir veltīta salāgojošā pārveidotāja spēka shēmas ar jaudu līdz 11kW izstrādei, kas papildināta ar vadības un mērīšanas ķēdēm varētu tikt izmantota kā mikro-ģenerators.



Att. 0.1. Vēja ģenerators sistēmas bloka diagramma

1. VĒJA TURBĪNU AR PASTĀVĪGO MAGNĒTU ĢENERATORU APRAKSTS

Vēja enerģijas izmantošana

Vējš ir gaisa plūsma un tā kā gaisam ir masa un ātrums, tad tam piemīt kinētiskā enerģija, kuru ir iespējams izmantot. To veic ar vēja ģeneratoru palīdzību, kas vēja enerģiju pārveido elektriskajā. Vēja turbīnas jaudu var aprēķināt no:

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3, \quad (1)$$

kur A - rotora laukums (m^2);
 ρ - gaisa blīvums (kg/m^3);
 v - vēja ātrums (m/s);
 C_p - turbīnas jaudas koeficients.

Jaudas koeficienta teorētiskais maksimums ir 0,59, bet komerciālām turbīnām tas svārstās starp 0,4 un 0,5. Jaudas koeficients ir atkarīgs no spārnu galu un vēja ātrumu attiecības λ .

$$\lambda = \frac{v_t}{v} = \frac{r\omega}{v}, \quad (2)$$

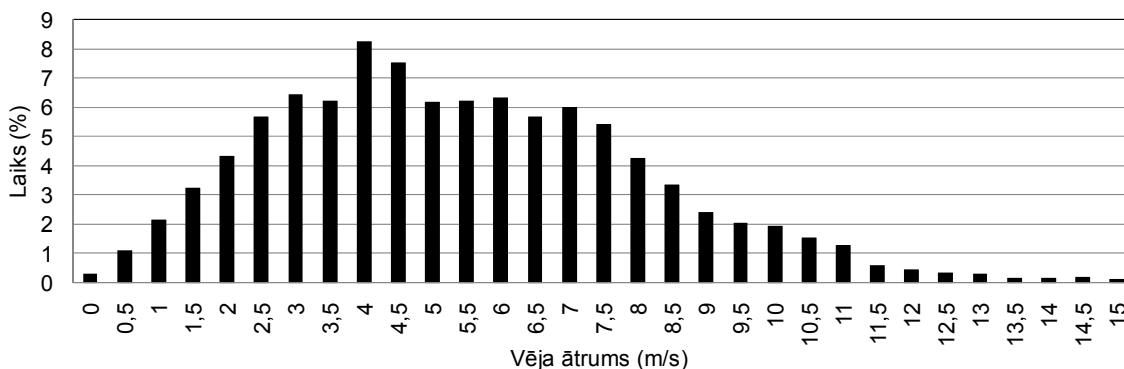
kur r - turbīnas rotora rādiuss (m);
 v_t - spārnu gala ātrums (m/s);
 ω - turbīnas leņķiskais ātrums (rad/s).

Jaudas koeficients sasniedz maksimālo vērtību pie noteiktas λ_{opt} vērtības. Tā ir atkarīga no turbīnas konstrukcijas, bet parasti ir robežās no 5 līdz 8 trīs spārnu rotoriem. [17]. Tā kā šis parametrs ir konstants konkrētam turbīnas tipam, tad, mainoties vēja ātrumam ir jāmaina turbīnas rotācijas frekvence, lai tiktu sasniegta maksimālā jauda. Šī apstākļa dēļ ir nepieciešams izmantot mainīga ātruma vēja ģeneratorus.

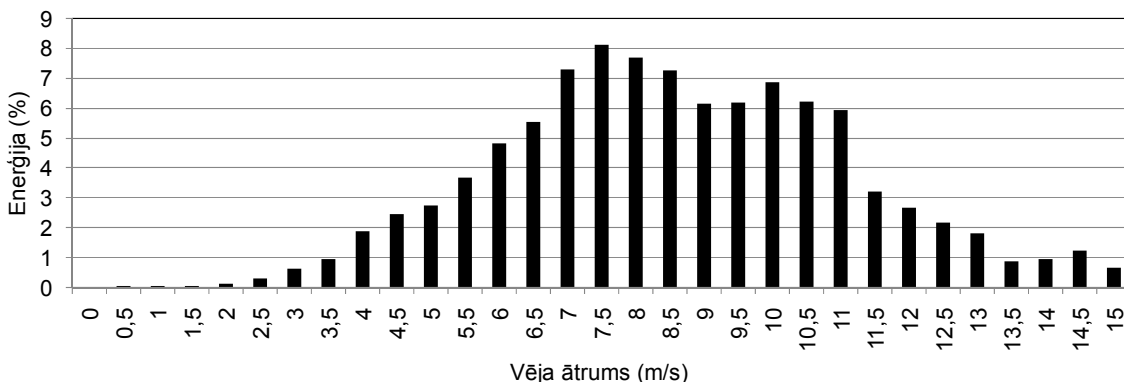
Turbīnu nominālais rotācijas ātrums ir atkarīgs no tās izmēra. Tas ir robežās starp 500 apgriezieniem minūte, turbīnai ar diametru 2 metri un 12,6 apgr/min turbīnai ar diametru 126m. Kā redzams, vēja ģeneratori ir lēni rotējošas iekārtas, kurām ir nepieciešamas daudzpolu elektriskās mašīnas, lai izvairītos no pārnēsūmkārības izmantošanas. Šim nolūkam, bieži tiek izmantoti sinhronie ģeneratori ar patstāvīgo magnētu ierosmi.

Vēja sadalījums

Tā kā vēja ātrums nosaka turbīnas rotācijas frekvenci un jaudu, bet šie parametri savukārt pārveidotāja režīmus, tad tika veikta vēja ātruma un tā sadalījuma 10 metru augstumā analīze. Vēja ātruma sadalījuma piemērs ar vidējo ātrumu 5,4 m/s (Pāvilosta, 2009. g.) ir parādīts attēlā 1.1., bet atbilstošais enerģijas sadalījums attēlā 1.2.



Att. 1.1. Vēja ātruma sadalījums

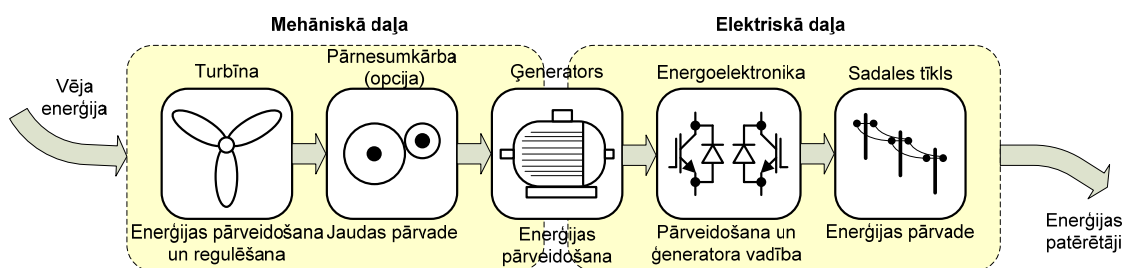


Att. 1.2. Vēja enerģijas sadalījums

Šos sadalījumus iespējams iegūt arī matemātiski no vidējā vēja ātruma [17].

Vēja enerģijas pārveidošana

Vēja ģenerators sistēma sastāv no mehāniskās un elektriskās daļas (Attēls 1.3.) Mehāniskā daļa nodrošina vēja kinētiskās enerģijas pārveidošanu mehāniskajā un tās nodošanu ģenerators vārpstai. Elektriskā daļa pārveido ģenerators elektrisko enerģiju tā, lai to varētu nodot elektriskajam tīklam. Ģenerators ir abu sistēmu saite, kas pārveido mehānisko enerģiju elektriskajā [29].



Att. 1.3. Enerģijas pārveidošanas etapi

No vēja ģenerators sistēmas apraksta ir redzams, ka šeit ir trīs atsevišķas daļas, kas var tikt optimizētas, lai palielinātu sistēmas efektivitāti. Tās ir mehāniskā, elektromehāniskā un elektriskā. Elektriskā daļa bieži sastāv no spēka elektronikas pārveidotāja, kas salāgo ģenerators un elektriskā tīkla spriegumus un kontrole aktīvās un reaktīvās jaudas plūsmas [7].

Salāgojošo pārveidotāju spēka shēmas vēja iekārtām ar pastāvīgo magnētu ģeneratoriem

Literatūrā tiek apskatītas daudzi salāgojošo pārveidotāju spēka shēmu varianti. Vispārīgi tās var iedalīt shēmas bez galvaniskās izolācijas un shēmās ar to, kas tiek realizēta ar augstfrekvences transformators palīdzību.

Viens no vienkāršākajiem spēka shēmas variantiem sastāv no taisngrieža un tiltveida tīkla invertora. Šāds risinājums ir pats lētākais pārveidotāja variants, jo ir vismazākais vadāmo slēdžu skaits un vienkārša vadības sistēma, kas atbild tikai par jaudas nodošanu tīklam. Šīs shēmas galvenais trūkums ir līdzstrāvas posma sprieguma līmeņa atkarība no ģenerators izejas sprieguma un līdz ar to nav piemērota mainīga ātruma vēja ģeneratoriem, jo nespēj nodrošināt ģenerators ātruma regulēšanu [20].

Salāgojošā pārveidotāja spēka shēma ar paaugstinošo pārveidotāju tiek pielietota, lai palielinātu ģenerators jaudas kontroles iespējas, saglabājot vienkāršu spēka shēmu [11]. Šī shēma ir piedāvā iespēju iegūt enerģiju no mainīga ātruma turbīnām un paplašina to izmantošanas diapazonu. Šāds

uzlabojums ir ievērojams, bet ģenerators nesinusoidālas strāvas dēļ samazinās ģenerators lietderība un tādēļ tā nav piemērota iekārtās, kur uzsvars tiek likts uz augstu sistēmas lietderību [20].

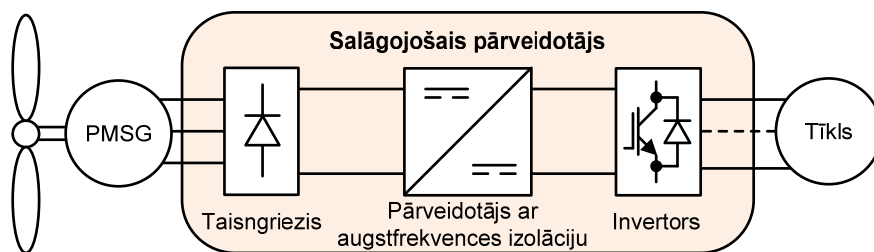
Divvirzienu pārveidotājam ir plašas ģenerators momenta un strāvu vadības iespējas [39]. Vadāmā taisngrieža izmantošana divvirzienu pārveidotājā, ļauj ģeneratoram strādāt ar augstu jaudas koeficientu un vienkārši ir iespējams realizēt maksimālā jaudas punkta sekošanas algoritmus.

Divvirzienu pārveidotāja papildināšanas ar enerģiju akumulējošām ierīcēm, paaugstina tā spēju nodrošināt papildus jaudu pārveidotāja izejā, kad tīkla spriegums īslaicīgi samazinās. [23]. Galvenais divvirzienu pārveidotāja trūkums ir tikai divas sprieguma regulēšanas iespējas. Ģenerators puses pārveidotājs var tikai paaugstināt līdzstrāvas posma spriegumu, bet tīkla – tikai to samazināt.

Tā kā mainīga ātruma vēja iekārtas strādā ar zemiem rotācijas ātrumiem ievērojamu laiku [4], un līdz ar to ģenerators spriegums ir ievērojami mazāks kā nominālais, tad pārveidotāja sprieguma paaugstināšanas īpašības kļūst īpaši nozīmīgas. Šī problēma ir īpaši aktuāla mikro jaudas vēja iekārtās, kurām ģenerators izejas spriegums parasti ir zemāks par nominālo tīkla spriegumu.

Pēdējos gados strauju popularitātes pieaugumu ir piedzīvojuši pretestības jeb tā sauktie Z-avota pārveidotāji, it īpaši pielietojumos, kur pārveidotāja paaugstinošās īpašības ir īpaši nepieciešamas [10]. Z-avota pārveidotājs sastāv no simetriski X veidā savienotiem diviem induktoriem un divām kapacitātēm, kas novietotas invertora ieejā. Z-avota invertori var strādāt, gan sprieguma paaugstināšanas, gan samazināšanas režīmā.

Pārveidotāji ar augstfrekvences transformatoru pamatā tiek lietoti kā ģenerators un sadales tīkla salāgojošie pārveidotāji (Att. 1.4.). Tie var tikt izmantoti arī viedo tīklu līdzstrāvas posma barošanai. Salāgojošie pārveidotāji ar augstfrekvence transformatoru ir galvenais šī pētījuma objekts



Att. 1.4. Salāgojošais pārveidotājs ar augstfrekvences transformatoru

Sadales tīkls

Mazas un mikro jaudas vēja iekārtas parasti tiek pievienotas privātmāju sadales tīklam. Šie tīkli izmanto 400 V līnijas vai 230 V fāzes spriegumu. Šis spriegumu vērtības var mainīties atkarībā no pieslēguma attāluma līdz transformatora un līnijas noslodzes. Pieļaujamo sprieguma vērtību diapazonu nosaka standarta EN 50610 [27] prasības un no tā izriet, ka pārveidotāja izejas spriegumam ir vērtība var tikt paaugstināta par 15% virs nominālās, lai tas spētu nodrošināt sinusoidālu strāvu visā pieļaujamajā tīkla sprieguma diapazonā [24].

Vēja iekārtu ar PMSG īpašības

PMSG iegūst ar vien lielāku popularitāti vēja iekārtās un plaši tiek izmantoti mazās un mikro jaudas turbīnās [2]. Šo ģeneratoru popularitāti nosaka to augstais lietderības koeficients un ekspluatācijas iespējas ar minimālu apkalpošanu.

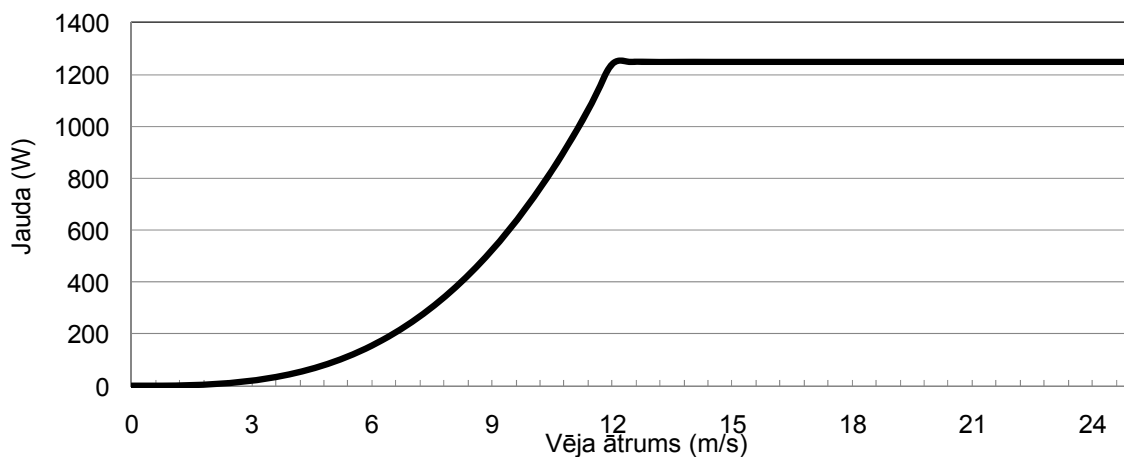
PMSG galvenais trūkums ir to izejas sprieguma atkarība no apgriezieniem, kas mainīga ātruma vēja turbīnu gadījumā var mainīties četras reizes [28]. Šo trūkumu var uzskatīt par nenozīmīgu, ja tiek izmantots atbilstošs salāgojošais pārveidotājs. Šajā pētījumā, kā salāgojošā pārveidotāja barojošais avots kalpo PMSG ar 8 polu pāriem un 1,2 kW jaudu. Tā galvenie raksturlielumi ir apkopoti 1.1. tabulā. Ģenerators tika piedzīts ar asinhrono dzinēju, kura rotācijas frekvenci tika regulēta ar firmas ABB frekvences pārveidotāju, tādējādi imitējot mainīga ātruma vēja turbīnas īpašības.

Tabula 1.1.

PMSG parametri

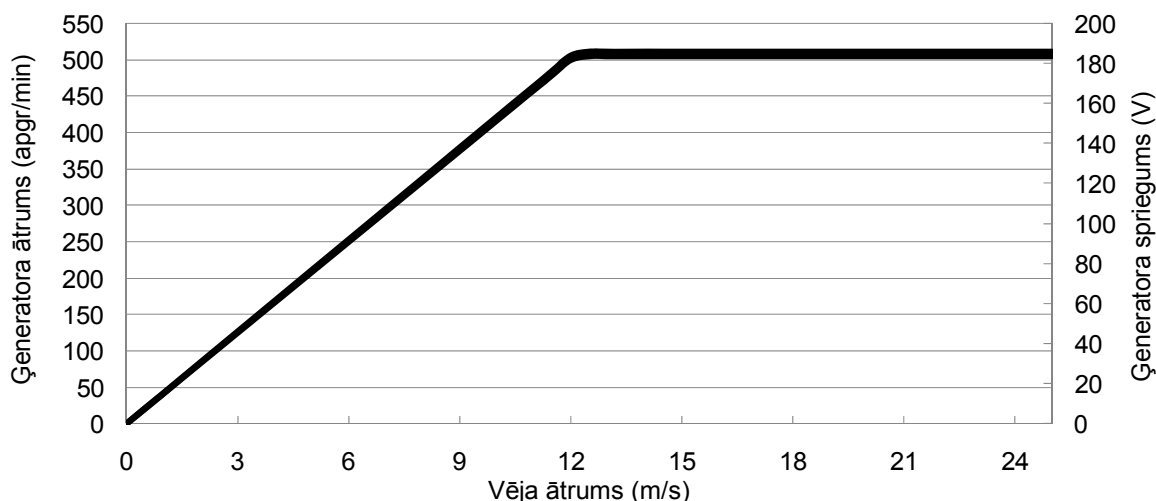
Nominālā jauda	1160 W
Nominālā strāva	5 A
Nominālā spriegums	134 V
Nominālā ātrums	375 rmp
Fāzes pretestība	1.2 Ω
Fāzes tinuma induktivitāte	5 mH
Polu pāru skaits	8

Mainīga ātruma vēja iekārtām var izdalīt trīs izteiktus režīmus; dīkstāve, kad vēja ātrums nav sasniedzis minimālo ātrumu, lai sāktu ražot elektrību, mainīga ātruma režīms un konstanta ātruma režīms, kad vēja ātrums pārsniedz turbīnas nominālo vēja ātrumu. Attēlā 1.5. ir redzama vēja turbīnas ar rādiusu viens metrs maksimālā jaudas raksturlīkne, kas atbilst mūsu ģeneratoram.



Att. 1.5. Vēja turbīnas jaudas raksturlīkne

Ģenerators rotācijas ātruma atkarība no vēja ātruma un atbilstošais izejas spriegums ir redzams 1.6. attēlā. Tas skaidri attēlo plašo salāgojošā pārveidotāja ieejas sprieguma diapazonu, bet attēls 1.5. attiecīgo jaudu diapazonu.



Att. 1.6. Ģenerators ātruma un sprieguma raksturlīknes

Ģenerators darba režīmi (Tabula 1.2.) tika noteikti atbilstoši tā rotācijas frekvencei un turbīnas saražotajai enerģijai. (Att. 1.2.) Nominālais ātrums atbilst vēja ātrumam ar vislielāko summāro enerģijas daudzumu un ir tuvs ģenerators nominālajam. Enerģijas un atbilstošo laiku sadalījums, norāda uz nepieciešamību izmantot vēja turbīnas kopā ar sadales tīklu, lai efektīvi varētu izmantot visu tās saražoto enerģiju, bez dārgām uzkrāšanas ierīcēm. Šis sadalījums norāda arī uz vēl vienu pārveidotājam nepieciešamu īpašību - tam ir jāstrādā ar augstu lietderības koeficientu plašā jaudu diapazonā.

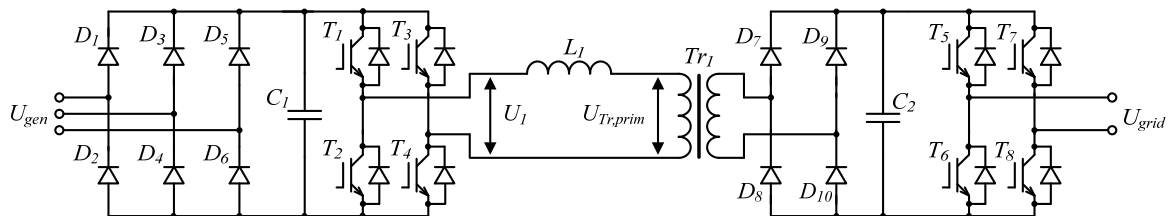
Tabula 1.2.

Ģenerators darba režīmi

	Stāv	Lēns ātrums	Nominālais ātrums	Paaugstināts ātrums
Vēja ātruma diapazons	0 – 3 m/s	3.5 – 6.5 m/s	7 – 8.5 m/s	9 – 25 m/s
Darbības laiks	25 %	46%	17%	12%
Summārā enerģija	0%	22%	27%	51%
Jaudas diapazons	0%	3 – 16 %	16 – 35 %	35 – 100 %
Ģenerators ātruma diapazons	0	147 – 273 rpm	273 – 357 rpm	357 – 510 rpm

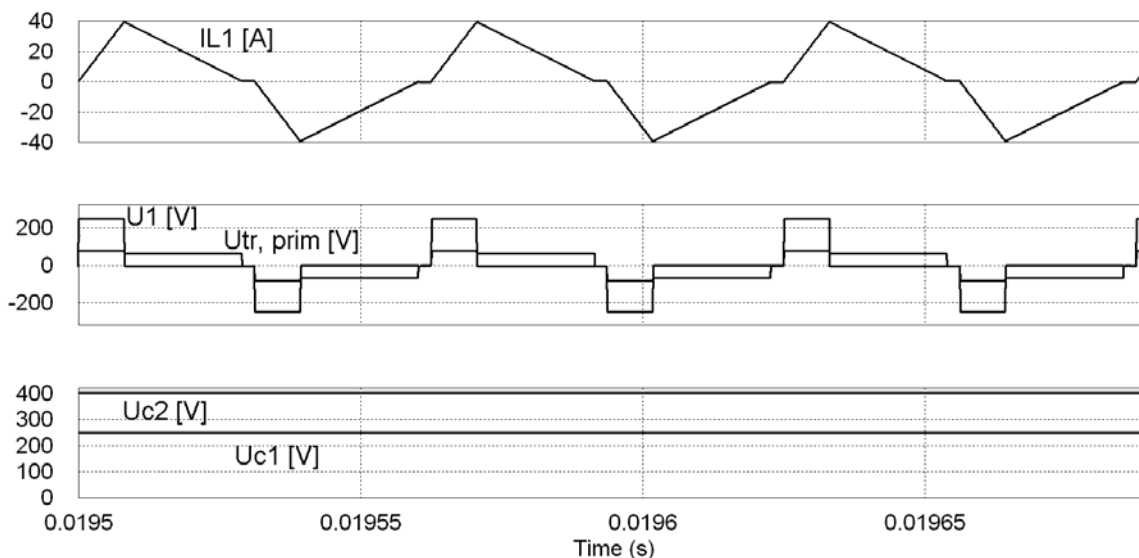
Salāgojošo pārveidotāju spēku shēma analīze

Literatūrā tiek plaši apskatītas shēmas bez galvaniskās izolācijas, bet ir tikai daži pētījumi par pārveidotājiem ar augstfrekvences transformatoriem vēja iekārtām [9,14,16]. [9] autori piedāvā buck pārveidotāju ar augstfrekvences transformatoru, izolācijas nodrošināšanai. (Att.1.7.).



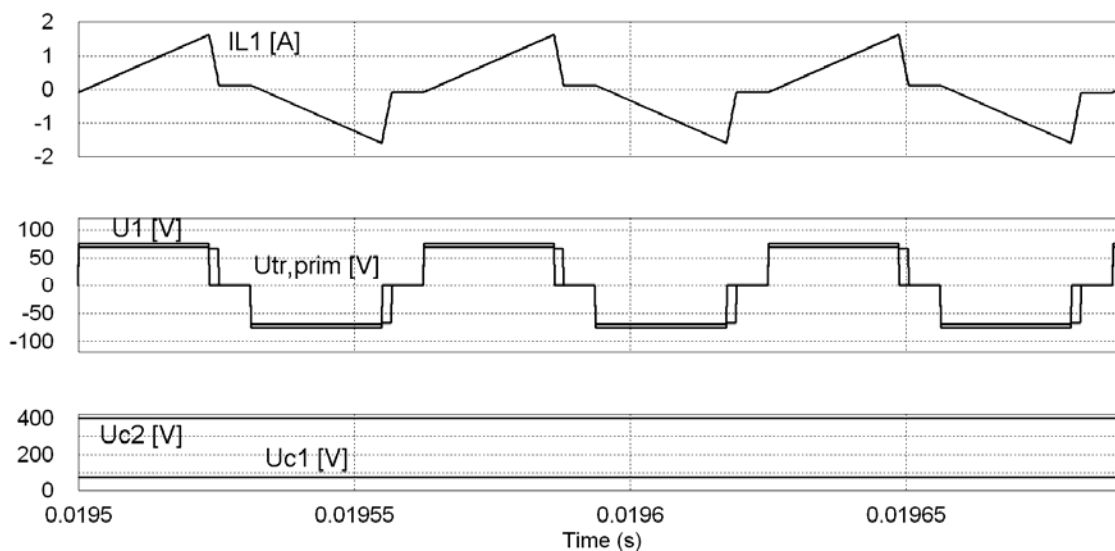
Att. 1.7. Pazeminošais pārveidotājs augstfrekvences transformatoru

Otrā līdzstrāvas posma sprieguma stabilizācija tiek veikta ar aizpildījuma koeficientu maiņu. Galvenais šīs shēmas trūkums ir lielas transformatora primārā tinuma un tranzistoru strāvas nominālajā, režīmā, kad spriegums tiks ievērojami pazemināts (Att. 1.8.). Attēlā 1.8. ir redzami salāgojošā pārveidotāja modelēšanas rezultāti ar 1250 W slodzi.



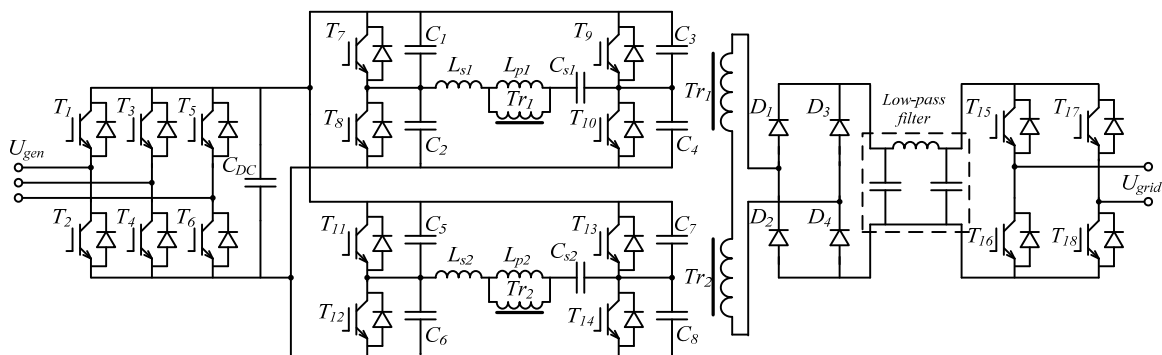
Att. 1.8. Galvenās strāvas un spriegumu formas buck tipa pārveidotājā ar 1250 W slodzi

Kā redzams no 1.8. attēla, tad strāvas primārajā tinumā ir milzīgas, ja ņem vērā, ka tas ir tikai 1,3 kW pārveidotājs. Šādas strāvas radīs ievērojamus zudumus arī pusvadītāju slēdžos. Droseles strāva I_{L1} , Augstfrekvences invertora izejas spriegums U_I un transformatora spriegums $U_{Tr, prim}$, kā arī abi līdzstrāvas posma spriegumi U_{C1} , U_{C2} pārveidotājam strādājot ar 40 W slodzi ir redzami 1.9. attēlā. Paredzamā zemā efektivitāte padara šo pārveidotāju nepievilcīgu vēja iekārtās



Att. 1.9. Galvenās strāvas un spriegumu formas buck tipa pārveidotājā ar 40 W slodzi

[16] avotā tā autori piedāvā vienfāzes mīkstās komutācijas pārveidotāju (Att. 1.10.).



Att.1.10 Divu tiltu LCL rezonanses pārveidotājs

Šī pārveidotāja ieejā tiek izmantots vadāmais taisngriezis, lai varētu stabilizēt ģenerators puses līdzstrāvas posma spriegumu. Augstfrekvences transformatoru izejas spriegums tiek modelēts tā, lai tā pamat harmonika saturētu sinusoīdas pusviļņus, kurus invertējot var iegūt sinusoīdu.

Galvenais šī pārveidotāja trūkums ir liels elementu skaits (Tabula 1.3.) un autoru ziņojums par zemu lietderību: 90 % pie 500 W (nominālā slodze) un 83 % pie 250 W slodzes [34]. Zemais lietderības koeficients pie daļējām slodzēm ir nopietns šķērslis, šāda pārveidotāja izmantošanai vēja iekārtās, ņemot vērā tā sarežģīto konstrukciju.

Abu literatūrā apskatīto pārveidotāju analīze parāda, ka to pielietošana vēja iekārtās ir saistīta ar zemu lietderības koeficientu pie daļējas vai nominālās slodzes. Šī iemesla dēļ tiek piedāvāta jauna salāgojošā pārveidotāja spēka shēma ar kvazi Z- avota DC/DC pārveidotāju, spriegumu salāgošanai un izolācijas nodrošināšanai. Šāda topoloģija tika izvēlēta, jo vēja īpašību dēļ piemērotāks varētu būt pārveidotājs ar spriegumu paaugstinošām īpašībām

Tabula 1.3.

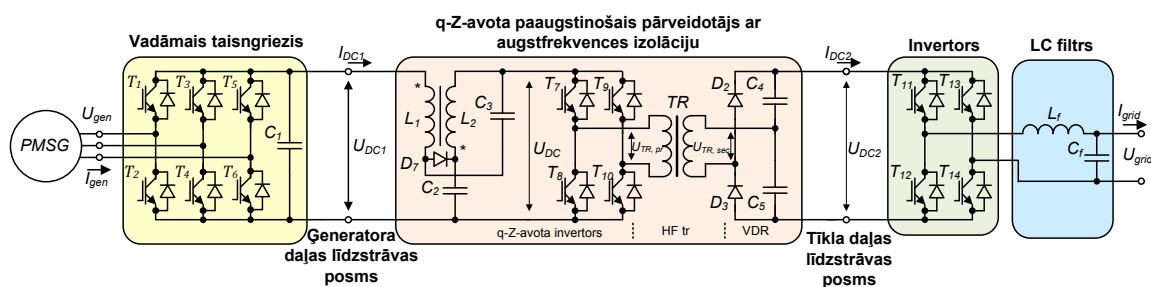
Elementu skaits apskatītajās spēka shēmās

Shēmas tips	Buck tipa pārveidotājs	LCL rezonanses pārveidotājs
Elementi		
Tranzistori	8	18
Diodes	10	4
Transformators	1	2
Induktori	1	2
Kondensatori	2	3

2. JAUNA PĀRVEIDOTĀJA SPĒKA SHĒMA

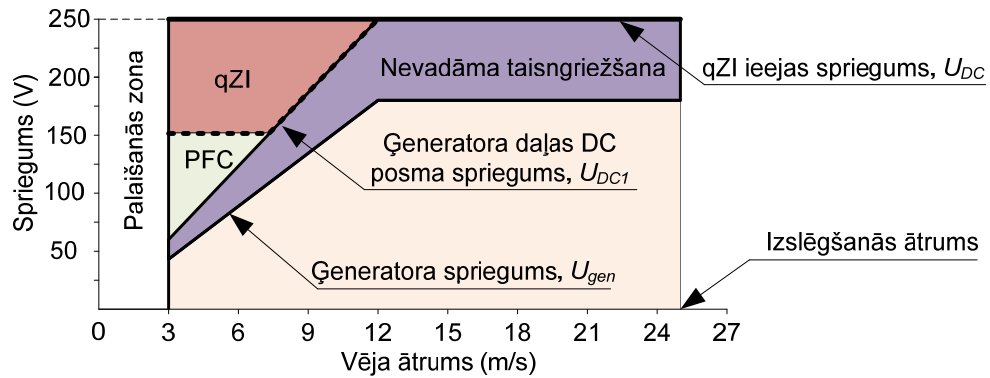
Lai uzlabotu vēja turbīnu ar PMSG īpašības, tiek piedāvāts izmantot jaunu salāgojošā pārveidotāja spēka shēmu [5] (Att. 2.1.). Tā sastāv no trīsfāzes tiltveida vadāmā taisngrieža, kvazi-Z-avota DC/DC pārveidotāja ar augstfrekvences transformatoru un tiltveida invertora ar LC filtru. Augstfrekvences transformatora izejas spriegums tiek taisngriezts ar pustilta taisngriezi, tādējādi divreiz paaugstinot līdzstrāvas spriegumu.

Piedāvātai salāgojošais pārveidotājs ģenerators spriegumu paaugstina divos etapos. Vispirms ģenerators spriegums tiek taisngriezts un stabilizēts ar vadāmā taisngrieža palīdzību. Tad kvazi-Z-avota DC/DC pārveidotājs nodrošina papildus sprieguma paaugstināšanu un galvanisko izolāciju. Unikālās kvazi-Z ķēdes izmantošana un atbilstoša augstfrekvences transformatora invertora vadība, nodrošina papildus sprieguma regulēšanas iespēju. Tādējādi abi pārveidotāji kopā nodrošina tīkla puses līdzstrāvas posma sprieguma U_{DC2} stabilizāciju. Stabilizētais līdzspriegums tiek invertēts ar tiltveida taisngriezi, bet LC filts nogludina izejas spriegumu, tādējādi nodrošinot sinusoidālu tīkla spriegumu. U_{grid} .



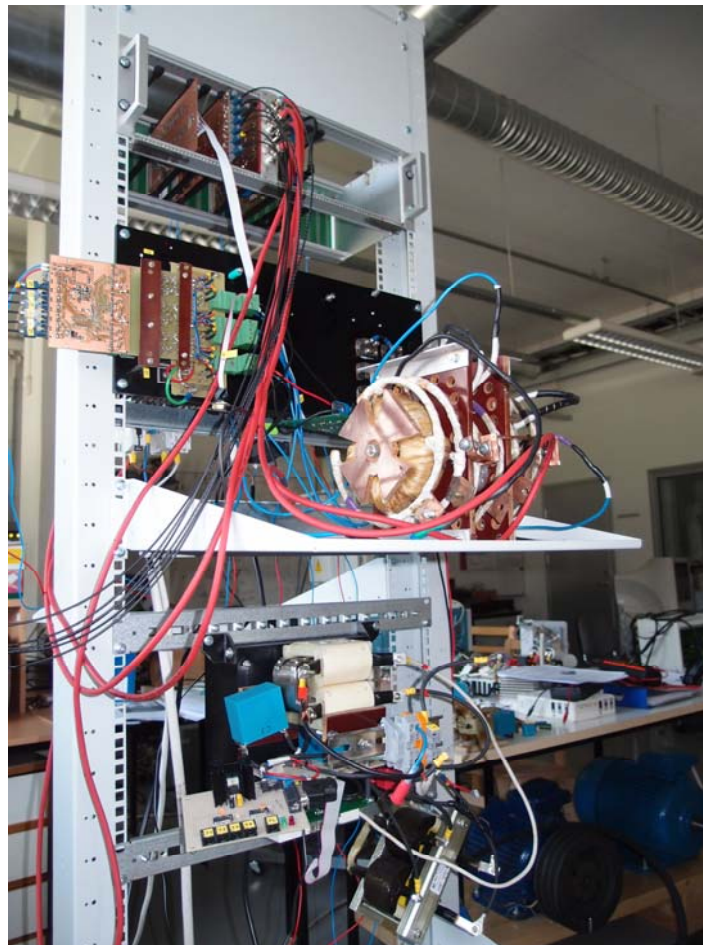
Att. 2.1. Salāgojošā pārveidotāja spēka shēma

Pārveidotāja darba režīmi ir ilustrēti attēlā 2.2. Ir redzams, ka pārveidotājs ģenerators spriegumu paaugstina divos etapos. Vispirms vadāmais taisngriezis stabilizē ģenerators puses DC posma spriegumu 150V līmenī līdz ģenerators līnijas sprieguma amplitūda sasniedz 150V. Vadāmais taisngriezis pāriet nevadāmā taisngrieža režīmā (tiek atslēgta vadība), kad ģenerators spriegums pārsniedz 112 V. Šajā režīmā spriegums mainās proporcionāli ģenerators spriegumam no 150 V līmeņa pie nominālā rotācijas ātruma līdz 250 V pie maksimālā ātruma. Tālāk ar kvazi-Z-avota DC/DC pārveidotāja palīdzību tiek stabilizēts tīkla puses DC posma spriegums U_{DC2} 400 V līmenī.



Att. 2.2. Salāgojošā pārveidotāja darba režīmi

Piedāvātie darba režīmi vispirms tika pārbaudīti ar dator modelēšanas palīdzību. Teorētiskie rezultāti vēlāk tika apstiprināti ar 1,3 kW testa stenda palīdzību (Att. 2.3.). Ģenerators puses pārveidotājs tika barots ar 1,3 kW PMSG un slogots ar elektronisko slodzi. Kvazi-Z-avota pārveidotājs tika pārbaudīts ar fiksētiem ieejas spriegumiem un atbilstošām izejas slodzēm.



Att. 2.3. Salāgojošā pārveidotāja stends

Stenda vispārīgs raksturojums ir dots tabulā 2.1.

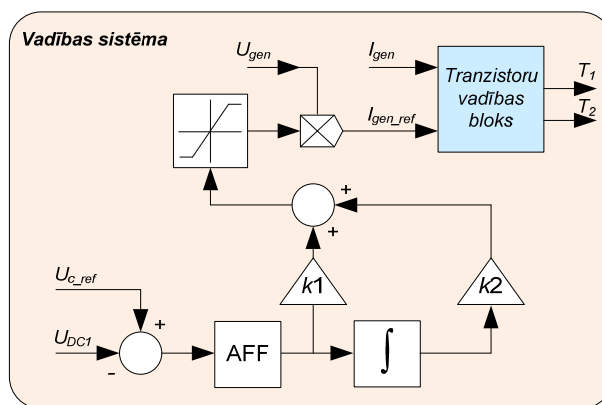
Tabula 2.1.

Pārveidotāja vispārīgie dati

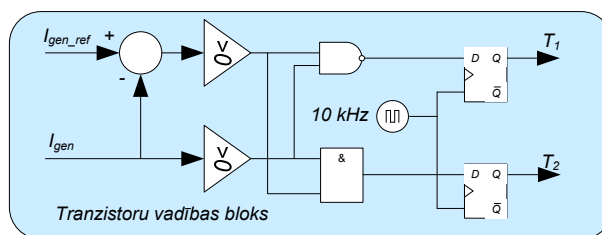
Komponentes	Vērtība vai tips
<i>PMSG</i>	
Fāzes pretestība	1.2 Ω
Fāzes inuktivitāte	5 mH
<i>Salāgojošais pārveidotājs</i>	
$T_1 \dots T_6$	600 V/48 A IGBT (IXSH24N60AU1)
$T_7 \dots T_{10}$	600 V/12 A IGBT (G4PC30UD)
D_1	600 V/120 A fast diode (STTH200L06TV)
D_2, D_3	1.2 kV /60 A FRED (DSEI2x61-12B)
Kondensators C_1	470 μF
Droseles L_1 un L_2	1.2 mH
Kondensatori C_2 un C_3	60 μF
Transformators	1: 1.2
Kondensatori C_4 un C_5	25 μF

Ģenerators puses pārveidotājs

Ģenerators puses pārveidotājs izmanto PWM metodi un vadības princips ir attēlots attēlā. 2.4.a.



a)

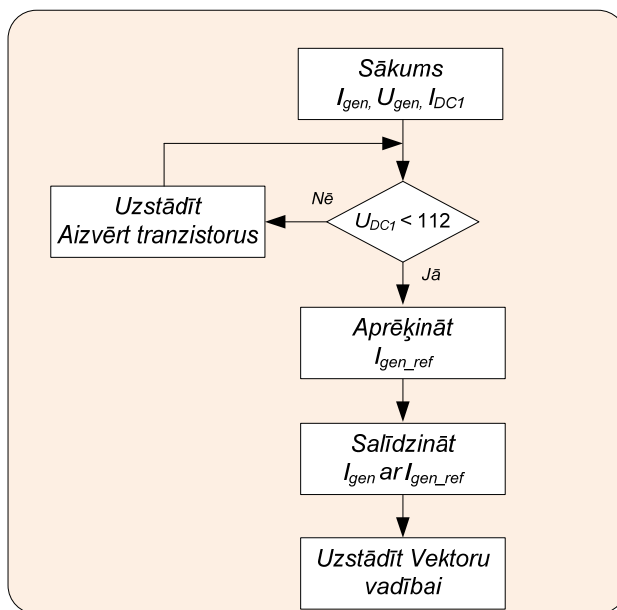


b)

Att. 2.4. Ģenerators vadības princips

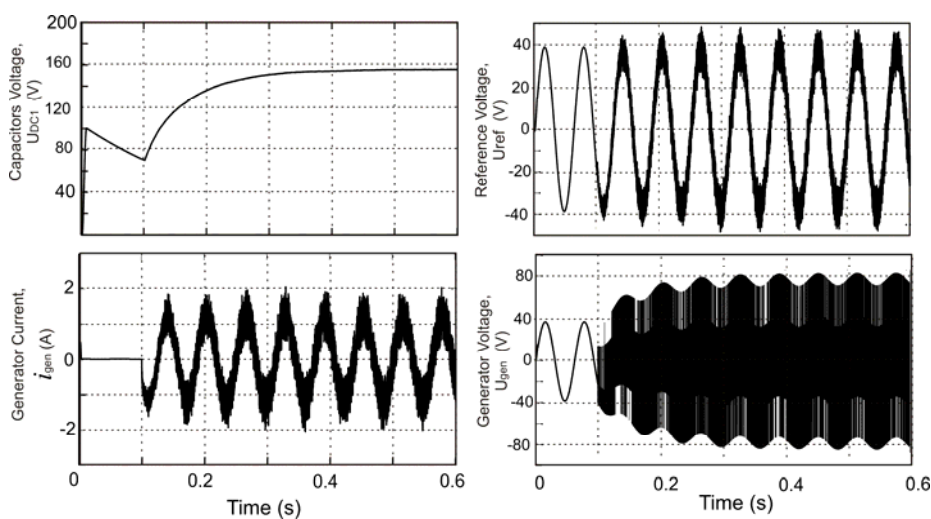
Regulatora ieejās tie padots ģenerators puses līdzstrāvas posma sprieguma vērtība U_{DC1} un tās vēlamā vērtība U_{C_ref} . Lai samazinātu sprieguma pulsācijas, tiek izmantota sprieguma signāla līdzstrāvas komponente. Tālāk signāli tiek padoti uz PI regulatoru, kura izeja nosaka nepieciešamo strāvu. Strāvas forma tiek iegūta to reizinot ar ieejas sprieguma vērtību, tādējādi nodrošinot augstu jaudas koeficientu.

Vadības algoritms ir attēlots 2.5. attēlā.



Att. 2.5. Ģenerators puses pārveidotāja vadības algoritms

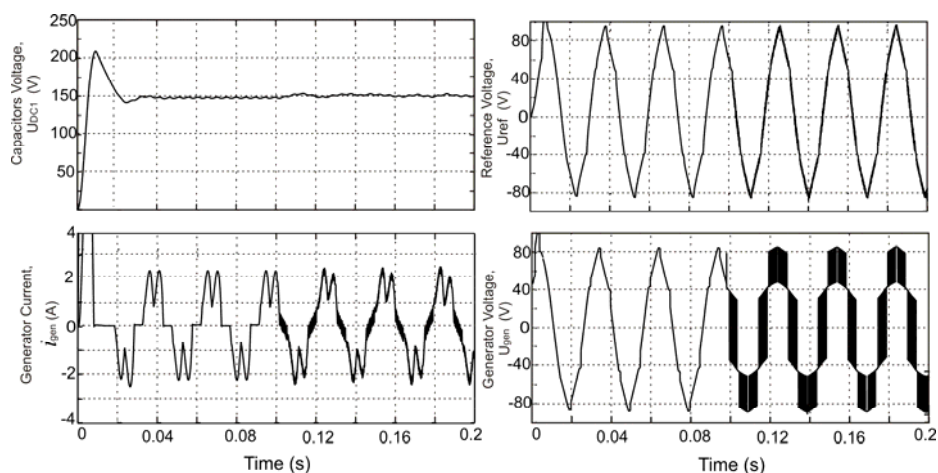
Lai pārlicinātos par izveidotā algoritmu pareizību, tas vispirms tika modelēts pie atbilstošiem darba režīmiem. Pirmā modelēšana tika veikta pie ģenerators sprieguma $U_{gen} = 53$ V līmeņa un 40 W slodzes (Att.2.6.).



Att. 2.6. Ģenerators puses DC posma spriegums U_{DC1} , PMSG strāva i_a , un spriegums U_{gen} un filtrēts ģenerators spriegums U_{ref} pie 40 W slodzes

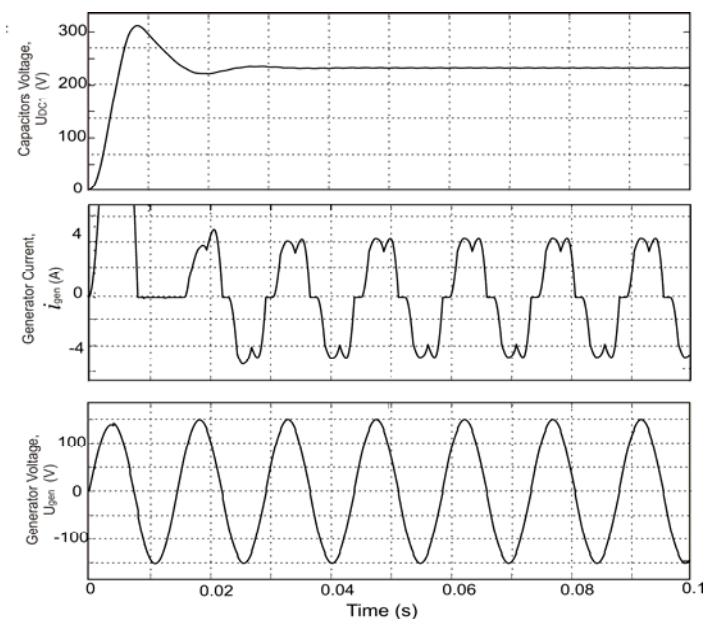
Laika momentā $t=0,1$ s, tiek ieslēgts regulators. Ir redzams kā uzlabojas strāvas forma un tiek nodrošināts nepieciešamais līdztāvas posma spriegums. THD ir 31% līmenī.

Otrā modelēšana tiek veikta pie 330W slodzes un 112 V ģenerators sprieguma. Šajā punktā sprieguma paaugstināšana vairs nav nepieciešama un tiek izmantots tikai strāvas formas korekcijai. Ģenerators strāva vairs nav sinusoidāla šajā režīmā un THD ir robežās no 41% līdz 31%.



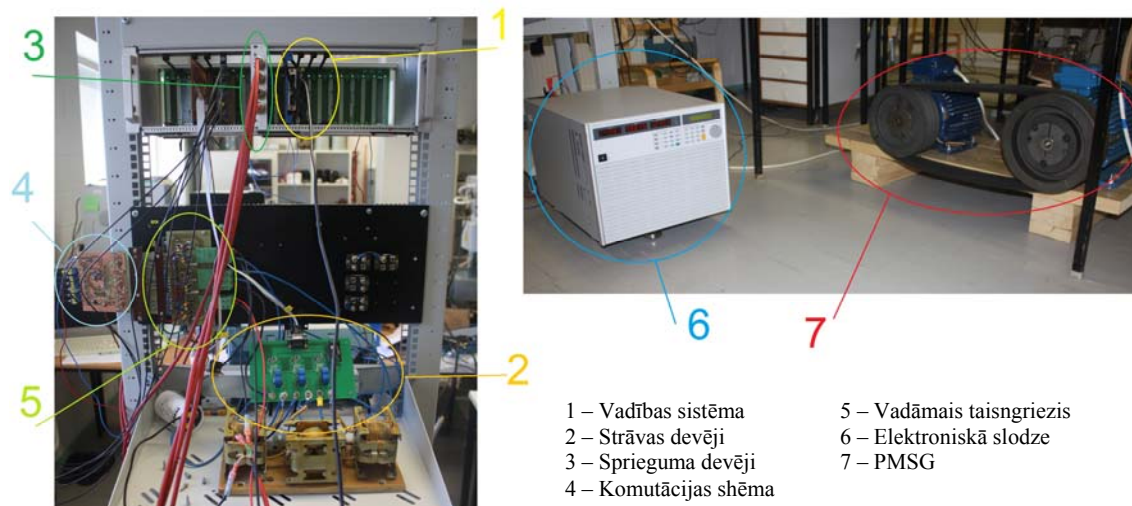
Att. 2.7. Ģenerators puses DC posma spriegums U_{DC1} , PMSG strāva i_a , un spriegums U_{gen} un filtrēts ģenerators spriegums U_{ref} pie 330 W slodzes

Trešā simulācija tiek dota pie maksimāliem ģenerators apgrīzieniem un maksimālās jaudas: 510 apgr/min un 1250 W, (Att.2.8.). Ģenerators strāvas THD ir 28% šajā režīmā (nevadāmā taisngrieža režīms)



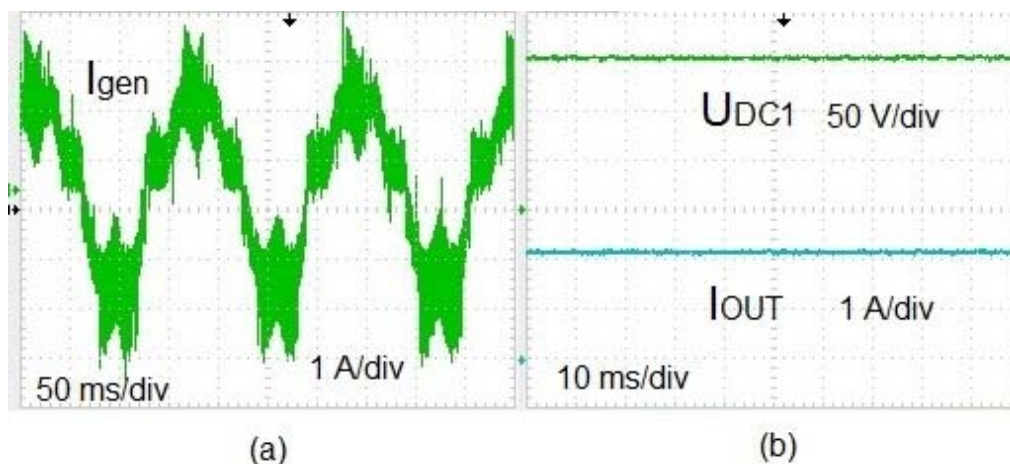
Att. 2.8. Ģenerators puses DC posma spriegums U_{DC1} , PMSG strāva i_a , un spriegums U_{gen} pie 1250 W slodzes

Modelēšanas rezultāti tika pārbaudīti eksperimentāli, lai pārliecinātos par PMSG un ģenerators puses pārveidotāja korektu darbību. Starp ģeneratoru un pārveidotāju tika pievienotas papildus droseles, lai samazinātu strāvas pulsācijas un atvieglotu sprieguma mērīšanu.



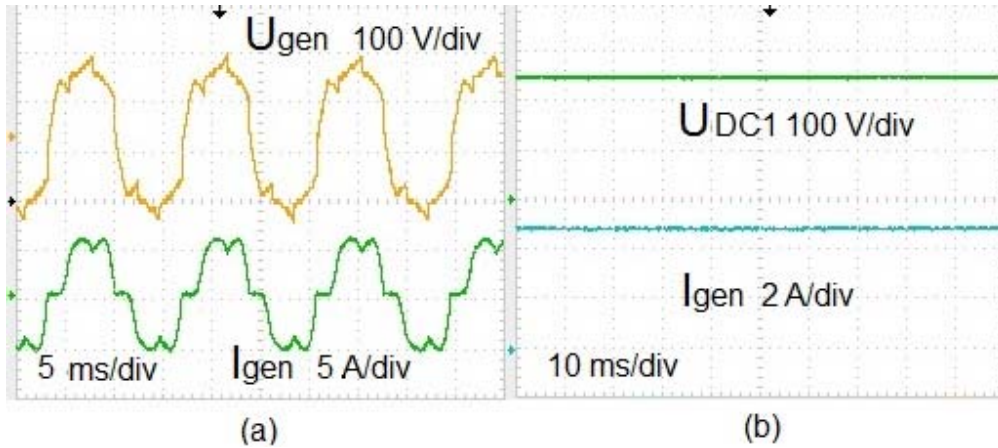
Att. 2.9. Ģenerators puses invertora laboratorijas prototips

Pirmie eksperimenti tika veikti pie 315 apgr/min un 330W slodzes. Šajā punktā ģenerators spriegums ir 112 V (Att. 2.10.)



Att. 2.10. Ģenerators strāva (a) un DC posma spriegums (b) pie 330 W

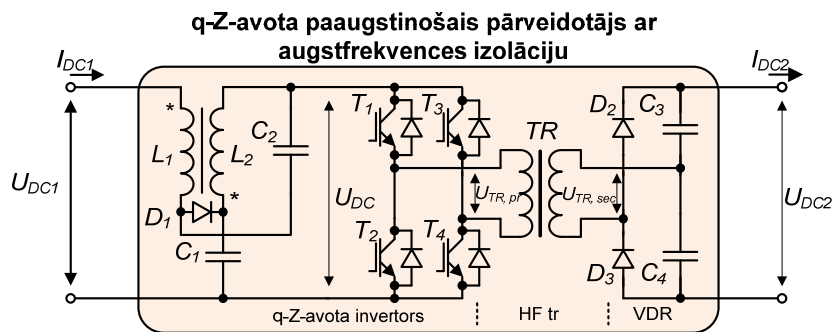
Otrs tests tika veikts, lai pārliecinātos par ģenerators spēju nodrošināt nepieciešamo jaudu (1250W) pie šiem apgrīzieniem (510 apgr/min), jo tā nominālais ātrums ir 375 apgr/min. Ģenerators izejas sprieguma amplitūda sasniedz 250 V un jaudas koeficienta korekcija šeit vairs nav iespējama.



Att. 2.11. PMSG spriegums un strāva (a) un ģenerators puses DC posma spriegums un strāva (b) pie 1250 W slodzes

Kvazi-Z-avota DC/DC pārveidotājs

Kvazi-Z-avota invertors ir atvasināts no tradicionālā Z-avota invertora [21] un tam piemīt izteiktas priekšrocības salīdzinājumā ar to kvazi-Z-avota invertoram ir iespējama nepārtraukta ieejas strāva un ir samazināts otrā kondensatora spriegums C_2 [1]. Praktiski tas ir parastais tiltveida invertors, kuram ieejā ir pievienots speciāls kvazi-Z-avota shēma. Kvazi-Z-avota shēmu veido divi kondensatori C_1 un C_2 un divas droseles L_1 un L_2 un diode D_1 .

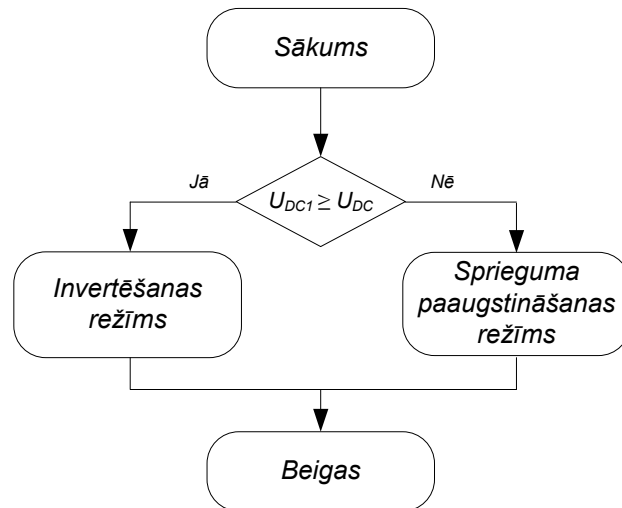


Att. 2.12. Kvazi-Z-avota paaugstinošais DC/DC pārveidotājs

Augstfrekvences pārveidotājs nodrošina galvanisko izolāciju.

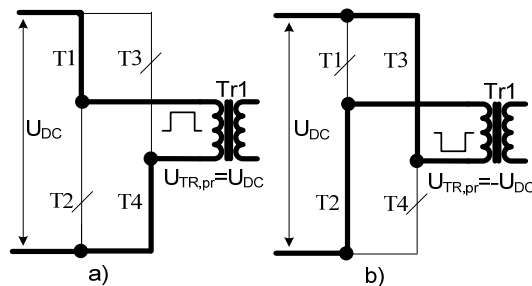
Galvenā kvazi-Z-avota funkcija ir nodrošināt stabilu tīkla puses DC posma spriegumu U_{DC2} , neskatoties uz ģenerators puses sprieguma izmaiņām. Saglabājot nemainīgu invertora ieejas sprieguma U_{DC} vērtību tiek nodrošināta optimāla transformatora darbība.

Atbilstoši ieejas sprieguma līmenim kvazi-Z-avota invertora darbību var iedalīt sprieguma paaugstinošā režīmā un invertora režīmā, kas ieejas spriegums tiek vienkārši invertēts, bez tā amplitūdas izmaiņām (Att. 2.13).

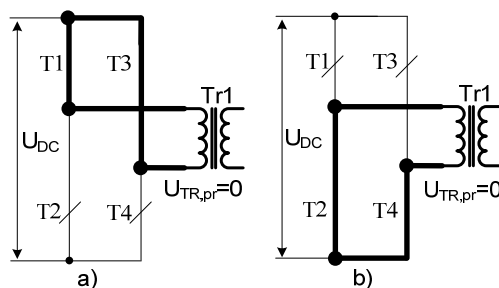


Att. 2.13. Kvazi-Z-avota DC/DC pārveidotāja darba režīmi

Ja ģenerators puses DC posma spriegums ir 250V tad pārveidotājs strādā invertora režīmā. Invertora darba režīms sastāv no aktīviem stāvokļiem un nulles stāvokļiem. Aktīvā stāvoklī notiek enerģijas nodošana no invertora uz transformatoru un invertora slēdzī tiek vadīti pa pāriem (T1, T4 un T2, T3) (Att. 2.14.). Nulles stāvoklī transformatora izvadi tiek noīsināti vai nu ar augšējiem (T1, T3) vai apakšējiem invertora tranzistoriem (T2, T4) (Att. 2.15) un uz transformatoru netiek padots spriegums.



Att. 2.14. Aktīvo stāvokļu ekvivalentās shēmas: pozitīvais (a) un negatīvais (b) sprieguma pusvilnis



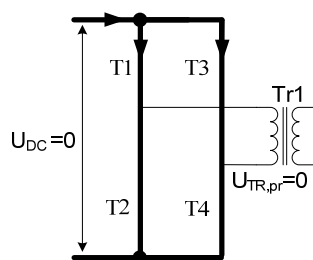
Att. 2.15. Ekvivalentās shēmas nulles stāvokļu laikā: augšējie (a) un apakšējie (b) slēdži

Invertora darba cikls invertora režīmā sastāv no aktīviem stāvokļiem t_A un nulles stāvokļiem t_Z :

$$T = t_A + t_Z \quad (3)$$

Ja ģenerators puses DC posma spriegums samazinās, tad pārveidotājs sāk strādāt spriegumu paaugstinošā režīmā. Ģenerators puses DC posma spriegums tiek paaugstināts līdz nepieciešamajam līdzstrāvas posma spriegumam mainot enerģijas uzkrāšanas laiku. Pēc tam uz transformatoru tiek padots stabilizētais invertora ieejas spriegums tāpat, kā invertora režīmā.

Enerģijas uzkrāšana kvazi-Z-avota droselēs tiek nodrošināta ar speciālu invertora stāvokli, kad tiek atvērti visi tranzistori (Att. 2.16.). Šāds stāvoklis ir aizliegts sprieguma avota invertoriem, jo var radīt īsslēgumu. Kvazi-Z-avota droselēs uzkrātā enerģija tiek atdota transformatoram aktīvo stāvokļa laikā.

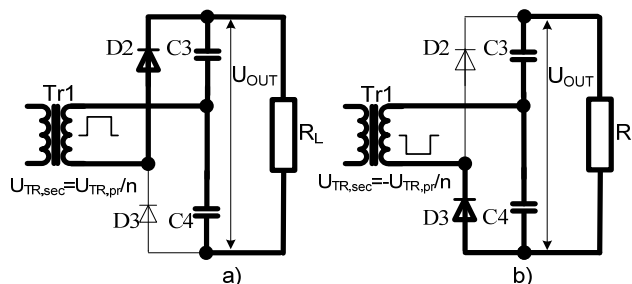


Att. 2.16. Invertora ekvivalentā shēma enerģijas uzkrāšanas stāvoklī

Invertora darba periods sprieguma paaugstinošā režīmā sastāv no aktīvā stāvokļa t_A , nulles stāvokļa t_Z un enerģijas uzkrāšanas stāvokļa t_S :

$$T = t_A + t_Z + t_S \quad (4)$$

Lai samazinātu transformatora sekundārā tinuma vijumu skaitu, tiek izmantots pustilta taisngriezis.



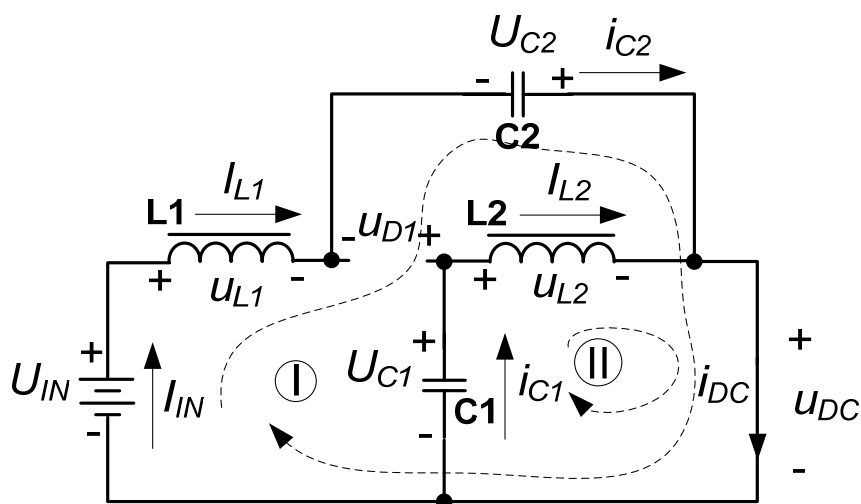
Att. 2.17. Pustilta taisngrieža ekvivalentās shēmas

Izejas spriegums (U_{DC2}) vienmēr būs summa no kondensatoru spriegumiem un divreiz lielāks, kā transformatora sprieguma ($U_{TR,sec}$) amplitūda:

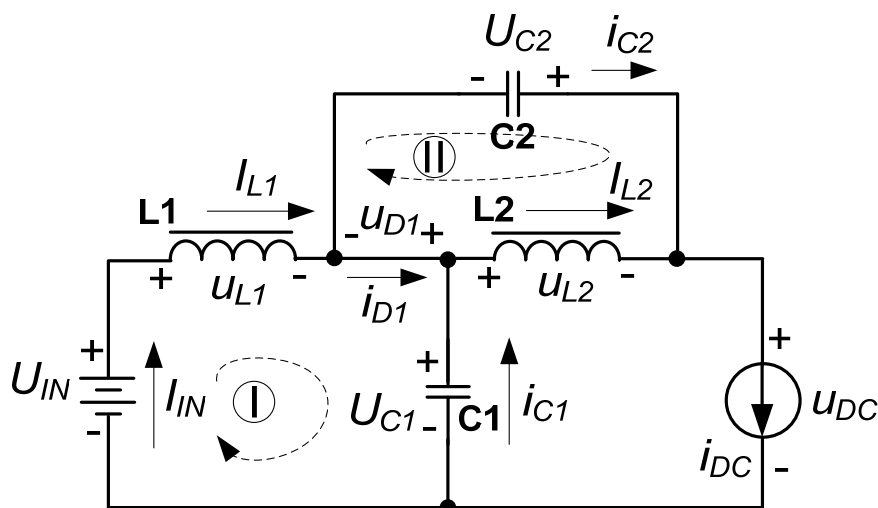
$$U_{DC2} = 2 \cdot U_{TR,sec} \cdot \quad (5)$$

Kvazi-Z-avota invertora darbības principi sprieguma paaugstinošā režīmā

Sprieguma paaugstinošā darba režīmā ir divi galvenie darba stāvokļi: enerģijas uzkrāšanas un aktīvais (enerģijas nodošanas) stāvoklis. Kvazi-Z-avota invertora ekvivalentās shēmas abos režīmos ir parādītas 2.18. attēlā[30].



(a)



(b)

Att. 2.18 . Kvazi-Z-avota invertora ekvivalentās shēmas enerģijas uzkrāšanas (a) un aktīvajā (b) stāvoklī

No Att. 2.18.a, kas attēlo enerģijas uzkrāšanas stāvokli ar ilgumu t_s iegūstam

$$u_{L1} = U_{C2} + U_{IN}, \quad U_{L2} = U_{C1}, \quad (6)$$

$$u_{DC} = 0, \quad u_{D1} = U_{C1} + U_{C2}. \quad (7)$$

No Att.2.18.b, kas attēlo aktīvo stāvokli ar laika intervālu $(T-t_s)$, iegūstam:

$$u_{L1} = U_{IN} - U_{C1}, \quad u_{L2} = -U_{C2}, \quad (8)$$

$$u_{DC} = U_{C1} - u_{L2} = U_{C1} + U_{C2}, \quad u_{D1} = 0. \quad (9)$$

Stacionārā režīmā, vidējais spriegums uz droselēm ir nulle, tādējādi no 6. un 8. vienādojuma iegūstam

$$\begin{cases} U_{L1} = u_{L1} = \frac{t_s \cdot (U_{C2} + U_{IN}) + (T - t_s) \cdot (U_{IN} - U_{C1})}{T} = 0 \\ U_{L2} = u_{L2} = \frac{t_s \cdot (U_{C1}) + (T - t_s) \cdot (-U_{C2})}{T} = 0 \end{cases}. \quad (10)$$

Pēc pārveidojumiem,

$$U_{C1} = \frac{1 - \frac{t_s}{T}}{1 - 2 \cdot \frac{t_s}{T}} \cdot U_{IN} \quad \text{un} \quad U_{C2} = \frac{\frac{t_s}{T}}{1 - 2 \cdot \frac{t_s}{T}} \cdot U_{IN}. \quad (11)$$

Invertora ieejas sprieguma amplitūda ir

$$\hat{u}_{DC} = U_{C1} + U_{C2} = \frac{1}{1 - 2 \cdot \frac{t_s}{T}} \cdot U_{IN} = B \cdot U_{IN}, \quad (12)$$

kur B - ieejas un DC posma sprieguma attiecība:

$$B = \frac{1}{1 - 2 \cdot \frac{t_s}{T}}. \quad (13)$$

Kvazi-Z-avota invertora elementu spriegumu un strāvu vērtības ir apkopotas 2.2. tabulā. Uzskatāmības labad enerģijas uzkrāšanas laika intervāls t_s tiek aizvietots ar enerģijas uzkrāšanas laika attiecību pret komutācijas periodu $D_s = t_s/T$.

Tabula 2.2.

Kvazi-Z-avota invertora darba spriegumi un strāvas

Stāvoklis	Aktīvais	Uzkrāšanas
Droseles spriegums ($u_{L1}=u_{L2}$)	$-\frac{D_S}{1-2 \cdot D_S} \cdot U_{IN}$	$\frac{1-D_S}{1-2 \cdot D_S} \cdot U_{IN}$
DC-posma spriegums (u_{DC})	$\frac{1}{1-2 \cdot D_S} \cdot U_{IN}$	0
DC-posma strāva ($I_{DC,av}$)	$\frac{P \cdot (1-2 \cdot D_S)}{U_{IN}}$	$\frac{2 \cdot P}{U_{IN}} \cdot D_S$
Diodes D_1 spriegums (u_{D1})	0	$\frac{1}{1-2 \cdot D_S} \cdot U_{IN}$
Kondensatora C_1 spriegums (U_{C1})	$\frac{1-D_S}{1-2 \cdot D_S} \cdot U_{IN}$	
Kondensatora C_2 spriegums (U_{C2})	$\frac{D_S}{1-2 \cdot D_S} \cdot U_{IN}$	
Ieejas strāva ($I_{IN,av}$)	$\frac{P}{U_{IN}}$	
Droseles strāva ($I_{L1,av}=I_{L2,av}$)	$\frac{P}{U_{IN}}$	
Kondensatora strāva ($I_{C1,av}=I_{C2,av}$)	$I_{DC,av} - I_{L1,av}$	
Diodes strāva ($I_{D1,av}$)	$2 \cdot I_{L1,av} - I_{DC,av}$	

Kvazi-Z-avota invertora pārtrauktas strāvas režīms

Tā kā kvazi-Z-shēma sastāv no droselēm kas nogludina ieejas strāvu, tad tā ir nepārtraukta. Ja droseles induktivitāte ir ļoti maza vai pārveidotājs strādā plašā jaudu diapazonā, tad ir iespējams pārtrauktas strāvas režīms [8].

Kvazi-Z-avota darba periods nepārtrauktas strāvas režīmā sastāv no aktīvā stāvokļa t_A , enerģijas uzkrāšanas stāvokļa t_S un pārtrauktas vadāmības stāvokļa t_D

$$\frac{t_A}{T} + \frac{t_S}{T} + \frac{t_D}{T} = 1, \quad (14)$$

Pārveidotāja ekvivalentā shēma pārtrauktas vadāmības stāvoklī ir līdzīga kā aktīvā stāvoklī (Att. 2.18.b), vienīgi diode D_I nevada.

Droseļu spriegumi ir nulle pārtrauktas vadāmības stāvoklī t_D . Pārtrauktas strāvas režīmā vienādojumu (19) paplašina sekojoši:

$$\begin{cases} U_{L1} = \bar{u}_{L1} = D_S \cdot (U_{C3} + U_{DC1}) + D_A \cdot (U_{DC1} - U_{C2}) + D_D \cdot 0 = 0 \\ U_{L2} = \bar{u}_{L2} = D_S \cdot (U_{C2}) + D_A \cdot (-U_{C3}) + D_D \cdot 0 = 0 \end{cases}, \quad (15)$$

kur D_A - laika attiecība aktīvā;

D_S - laika attiecība enerģijas uzkrāšanas;

D_D - laika attiecība pārtrauktas vadāmības stāvoklī.

Kondensatora C_2 spriegums pārtrauktas strāvas režīmā ir lielāks kā nepārtrauktā:

$$U_{C2} = \frac{1 - D_S - D_D}{1 - 2 \cdot D_S - D_D} \cdot U_{DC1}. \quad (16)$$

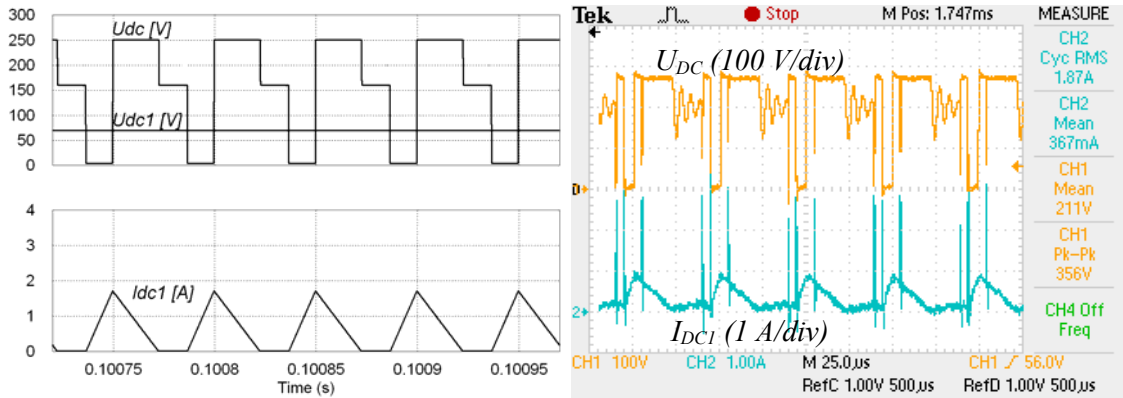
Tas noved pie paaugstinātas invertora ieejas sprieguma amplitūdas:

$$\hat{U}_{DC(DCM)} = U_{C2} + U_{C3} = \frac{1 - D_D}{1 - 2 \cdot D_S - D_D} \cdot U_{DC1}. \quad (17)$$

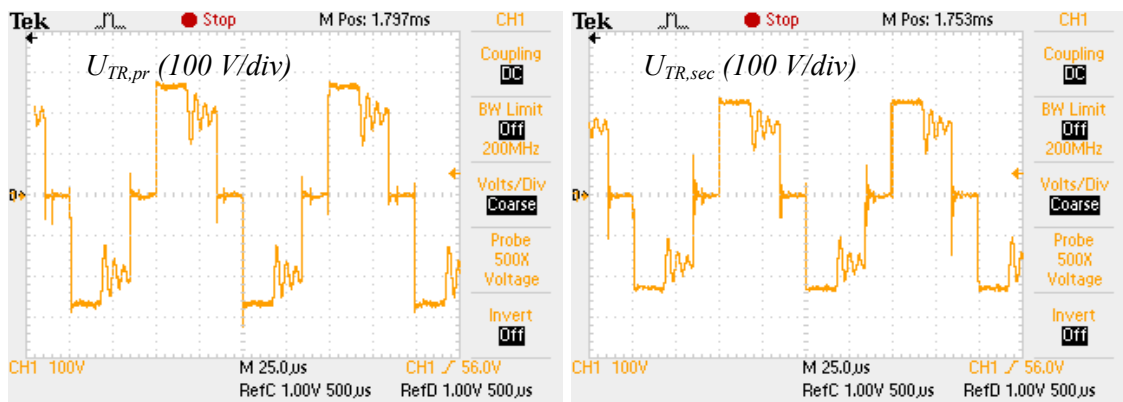
Modelēšanas un eksperimentālie rezultāti

Pirmie testi tika veikti ar 150 V ģenerators puses DC posma spriegumu un vismazāko jaudu – 40 W. Pārveidotājs strādā pārtrauktas strāvas režīmā pie šādas slodzes. Uzlaboto sprieguma paaugstināšanas īpašību dēļ tiek samazināts enerģijas uzkrāšanas stāvokļa D_S ilgums līdz 0.12. Invertora ieejas sprieguma U_{DC} amplitūda sasniedz 270 V (Att. 2.19.). Pārtrauktas strāvas režīms tika izvēlēts lai samazinātu ieejas droseles. Transformatora spriegums (Att.2.20.) atkārti invertora ieejas sprieguma formu un pārveidotāja prototipa garo vadu dēļ un saistīto parazitisko induktivitāšu dēļ ir novērojamas sprieguma svārstības pārtrauktas strāvas laikā.

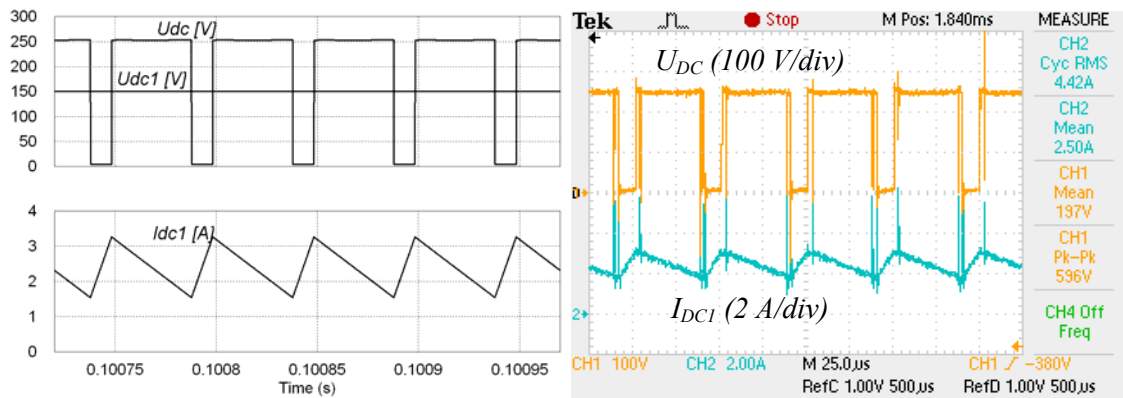
Otrs tests tiek veikts pie 150 V ģenerators puses DC posma sprieguma un 330 W slodzes, kas atbilst nominālajam režīmam. Šajā gadījumā enerģijas uzkrāšanas laika attiecība D_S bija 0.2. Attēls 2.21. liecina, ka pārveidotājs strādā nepārtrauktas strāvas režīmā un nodrošina nepieciešamos 250 V Transformatora spriegumam vairs nav iepriekš novēroto kropļojumu (Att.2.22.).



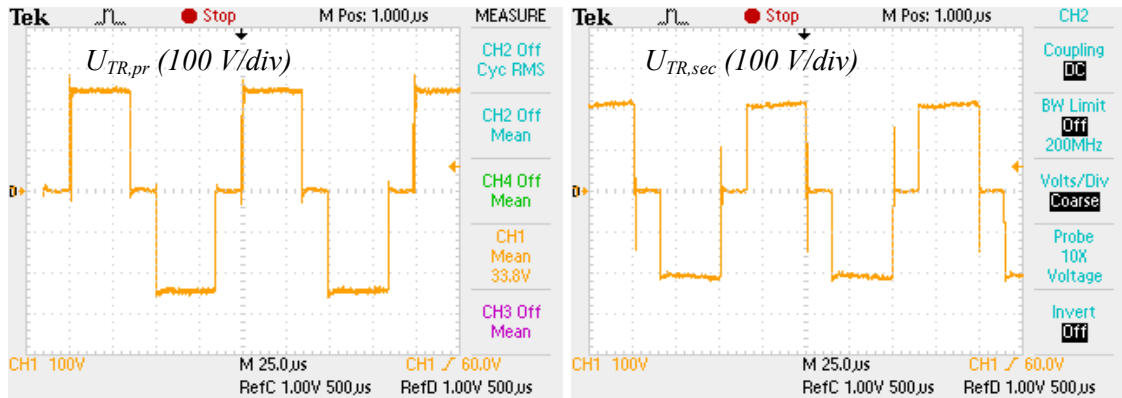
Att. 2.19 DC posma spriegums un ieejas stāva pie 40W slodzes



Att. 2.20. Transformatora primārā un sekundārā tinuma spriegumi

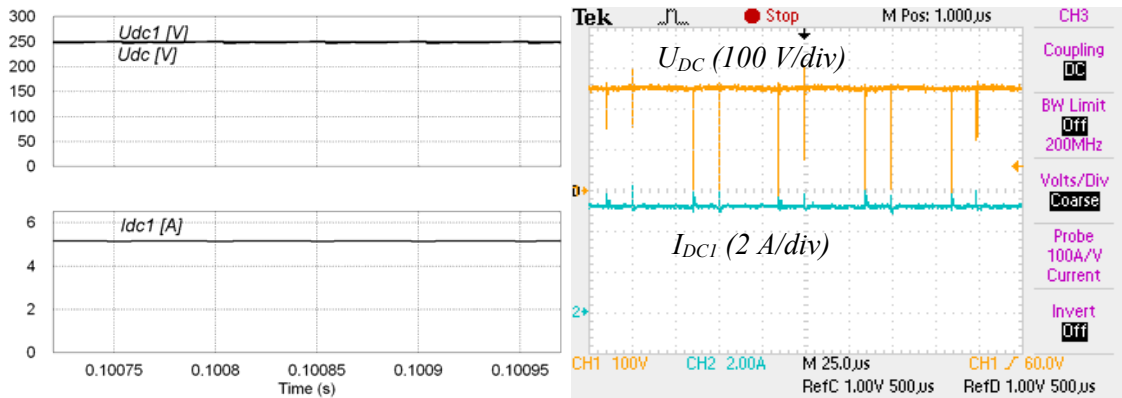


Att. 2.21. DC posma spriegums un ieejas stāva pie 330W slodzes

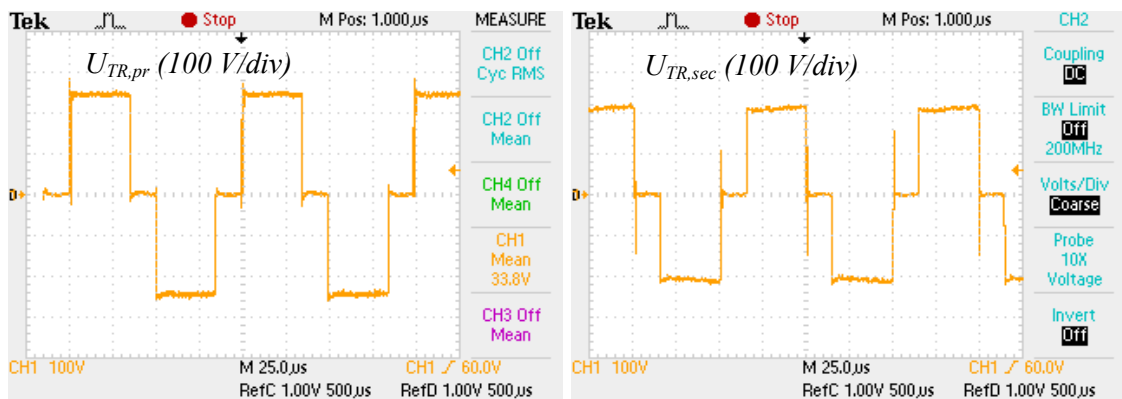


Att. 2.22. Transformatora primārā un sekundārā tinuma spriegumi

Trešais tests tika veikts pie maksimālā ģenerators sprieguma un jaudas. Ģenerators puses DC posma spriegums U_{DC1} ir 250 V un šeit vairs nav nepieciešama sprieguma paaugstināšana un enerģijas uzkrāšanas laiks D_S ir nulle. Pārveidotājs strādā invertora režīmā (Att.2.23.).



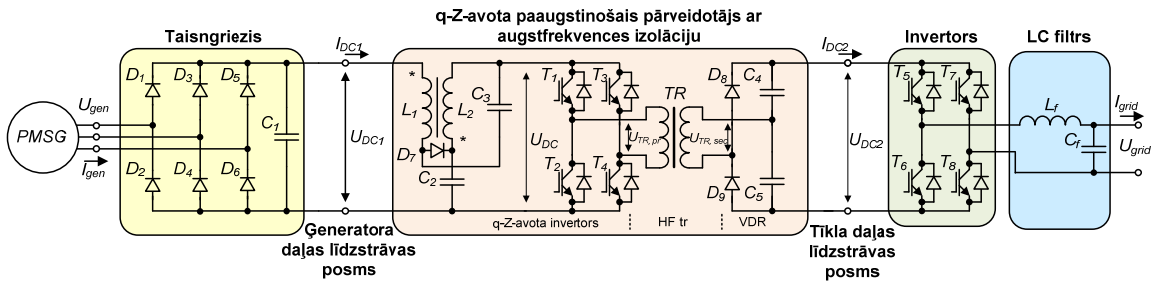
Att. 2.23. DC posma spriegums un ieejas stāva pie 1250W slodzes



Att. 2.24. Transformatora primārā un sekundārā tinuma spriegumi

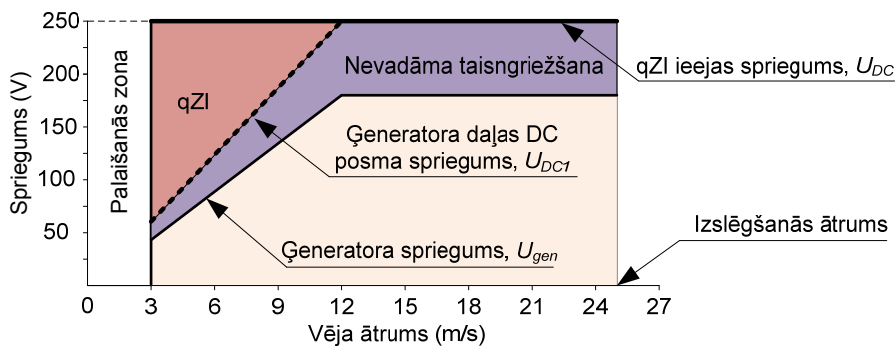
Salāgojošais pārveidotājs mikro jaudas turbīnām

Lai samazinātu pārveidotāja izmaksas, tika piedāvāta vienkāršota salāgojošā pārveidotāja shēma (Att.2.25.)



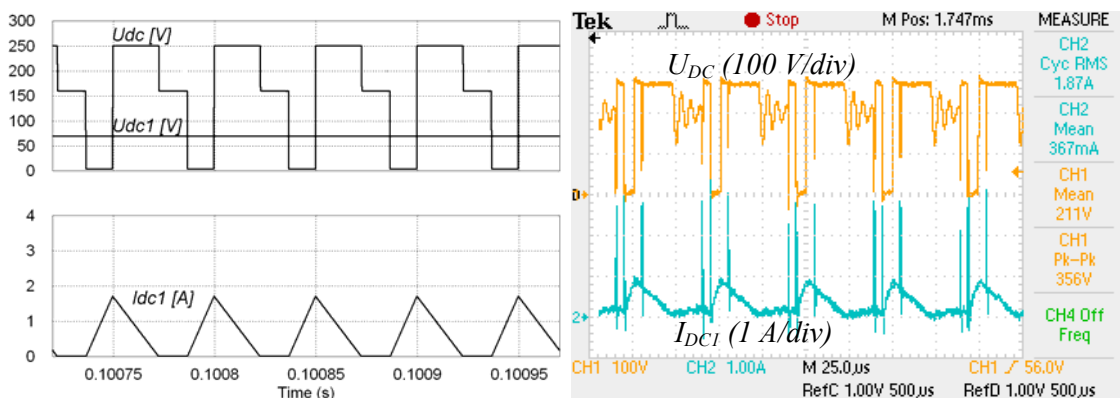
Att. 2.25. Vienkāršota salāgojošā pārveidotāja spēka shēma

Šajā gadījumā visu nepieciešamais sprieguma paaugstināšanu nodrošina kvazi-Z-avota DC/DC pārveidotājs. Atbilstošie pārveidotāja darba režīmi ir ilustrēti 2.26. attēlā.



Att. 2.26. Pārveidotāja darba režīmi

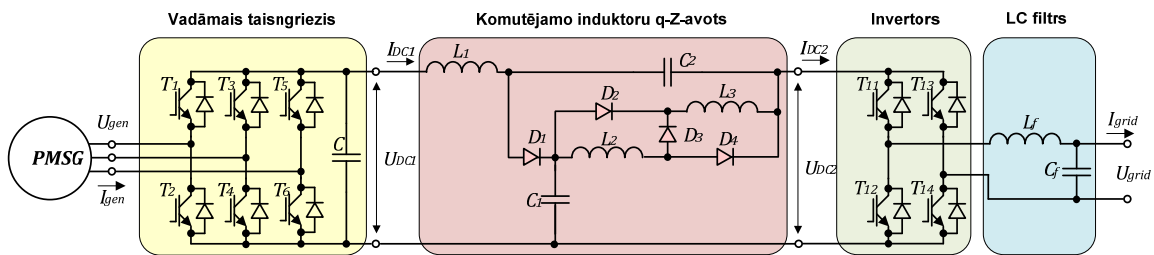
Tā kā vienīgā atšķirība no iepriekšējā pārveidotāja ir režīmā pie vismazākās jaudas, tad tikai testēts tikai šis režīms. Ģenerators puses DC posma spriegums ir 70 V, bet jauda 40 W. Enerģijas uzkrāšanas laika attiecība D_s šajā režīmā ir 0,27.



Att. 2.27. DC posma spriegums un ieejas stāva pie 40 W slodzes

3. KVAZI PRETESTĪBAS AVOTA DC/DC PĀRVEIDOTĀJS AR UZLABOTAM SPRIEGUMA PAAUGSTINĀŠANAS ĪPAŠĪBĀM

Kvazi-Z-avota DC/DC pārveidotāja drosele L_2 tika aizvietota ar komutējamām drošelēm. (Att.3.1.) Ar šādu paņēmieni ir iespējams būtiski paaugstināt, sprieguma paaugstināšanas īpašības kvazi-Z-avota pārveidotājam un samazināt spriegumu starpību starp kvazi-Z-shēmas kondensatoriem.



Att. 3.1. Salāgojošā pārveidotāja shēma ar komutējamām drošelēm

Piedāvātā kvazi-Z-shēma ar komutējamām drošelēm sastāv no trīs drošelēm ($L_1 \dots L_3$), četrām diodēm ($D_1 \dots D_4$) un diviem kondensatoriem (C_1 un C_2). Līdzīgi kā tradicionālam kvazi-Z-avota invertoram arī šeit tiek izmantoti divi režīmi: enerģijas uzkrāšanas un aktīvais režīms [75]. Att. 3.2. ir redzamas ekvivalentās shēmas, caursītes un aktīvajā režīmā.

Statiskā režīmā vidējie spriegumi uz drošelēm ir nulle:

$$U_{L1} = \int_t^{t+T} u_{L1} dt = 0; \quad U_{L2} = \int_t^{t+T} u_{L2} dt = 0; \quad U_{L3} = \int_t^{t+T} u_{L3} dt = 0 \quad (18)$$

Caursītes laiku definējot kā D_S un aktīvo stāvokli kā $(1-D_S)$, droseļu spriegumi vienā periodā var tikt aprakstīti kā:

$$\begin{cases} U_{L1} = \bar{u}_{L1} = D_S(U_{DC1} + U_{C2}) + (1-D_S)(U_{DC1} - U_{C1}) = 0 \\ U_{L2} = U_{L3} = \bar{u}_{L2} = \bar{u}_{L3} = D_S U_{C1} + (1-D_S)\left(-\frac{U_{C2}}{2}\right) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

Veicot pārveidojumus iegūstam invertora izejas sprieguma amplitūdas vērtību

$$\hat{U}_{DC2} = \frac{U_{DC1} \cdot (1 + D_S)}{(1 - 2 \cdot D_S - D_S^2)} = B \cdot U_{DC1} \quad (20)$$

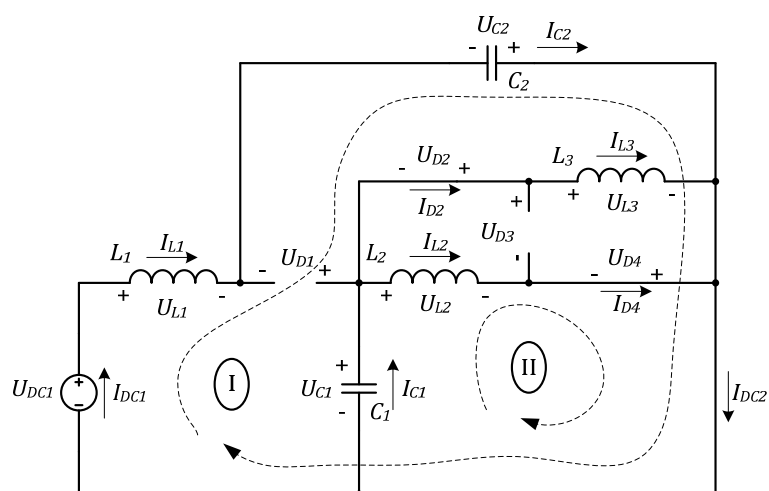
Ieejas un izejas sprieguma attiecība G visam pārveidotājam var tikt izteikta kā:

$$G = \frac{U_{gridm}}{U_{DC1}} = M \cdot B, \quad (21)$$

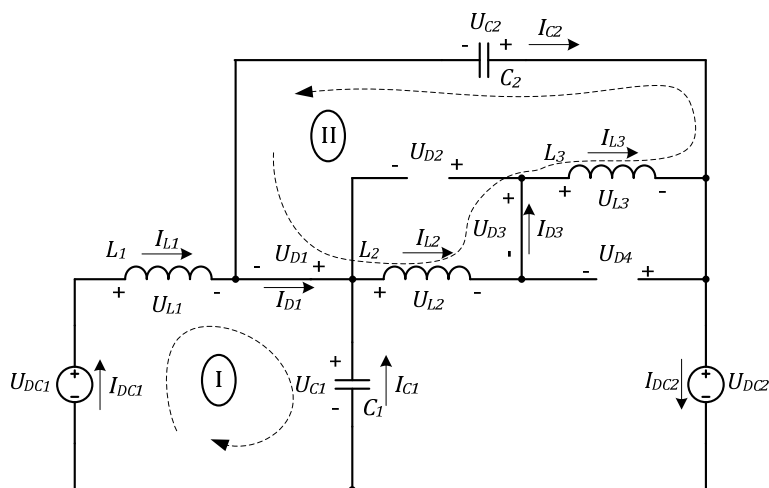
kur M - ir modulācijas indekss.

Modulācijas indekss un caursites laiks ir saistīts ar sekojošu izteiksmi [1]:

$$M \leq 1 - D_S, \quad (22)$$



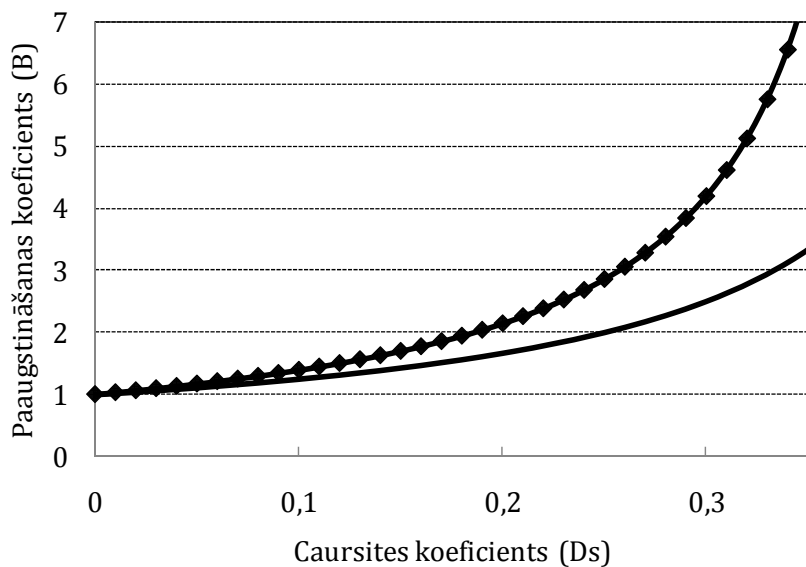
(a)



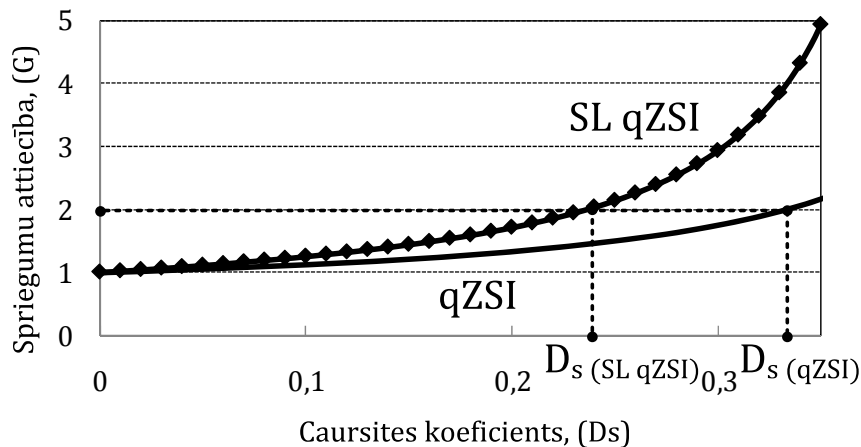
(b)

Att. 3.2. Komutējamo droseļu kvazi-Z-avota DC/DC pārveidotāja ekvivalentā shēma caursites laikā (a) un aktīvajā stāvoklī (b)

Attēlā 3.3 tiek salīdzināts sprieguma paaugstināšanas koeficients B un ieejas un izejas sprieguma attiecība G tradicionālajam un komutējamo droseļu pārveidotājam. Kvazi-Z-avota pārveidotājam ar komutējamām droseļēm sprieguma paaugstināšanas īpašībās ir ievērojami labākas kā klasiskajam pārveidotājam.



(a)

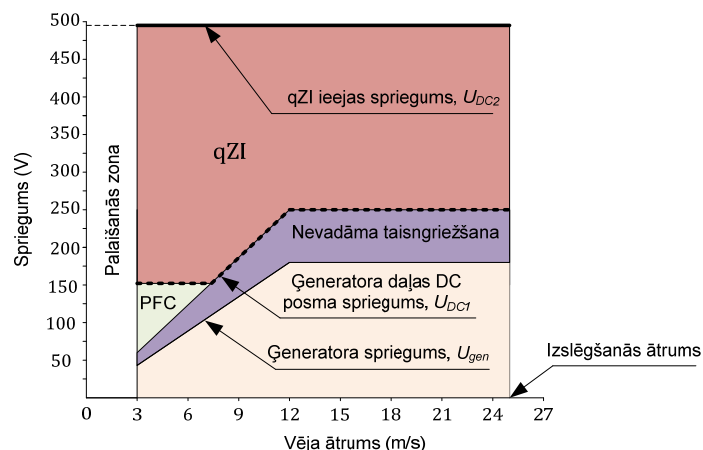


(b)

Att. 3.3. Sprieguma paaugstināšanas faktors B (a) un ieejas un izejas sprieguma attiecība G (b) kā funkcija no caursītes laika

Pārveidotāja darba režīmi

Pārveidotāja darba režīmi ir attēloti 3.4. attēlā. Ģenerators spriegums tiek paaugstināts divos posmos. Vispirms spriegumu paaugstina vadāmais taisngriezis, tad komutējamo droseļu kvazi-Z-avota invertors.



Att. 3.4. Salāgojošā pārveidotāja darba režīmi

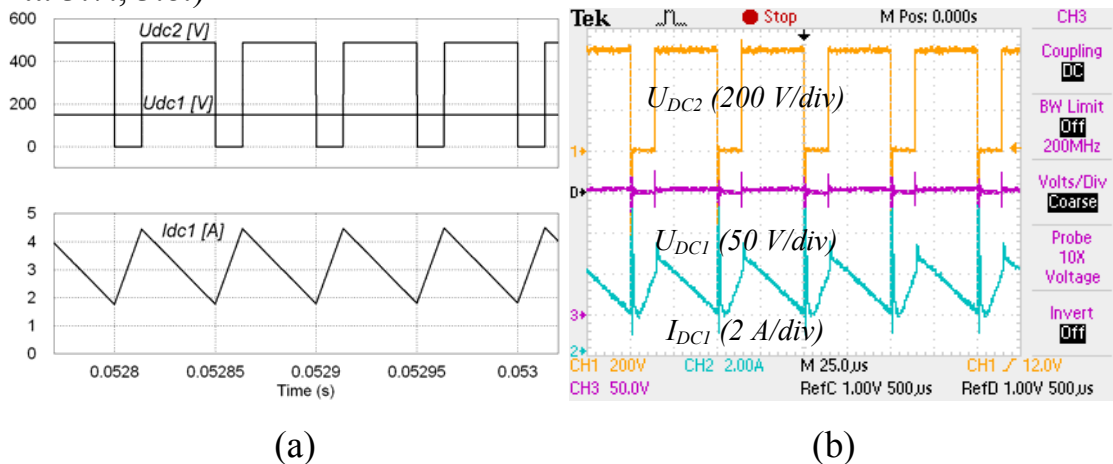
Kvazi-Z-avota pārveidotājs ar atbilstošu invertora vadību stabilizē invertora ieejas sprieguma amplitūdu U_{DC2} 490 V līmenī [5]. Invertora ieejā ir nepieciešams tik augsts spriegums, jo invertora izejas spriegumu nosaka modulēšanas indekss M , kura maksimālo vērtību ierobežo sasaiste ar caursites laiku.

Ekspērimētālie un modelēšanas rezultāti

Piedāvātā shēma tika eksperimentāli pārbaudīta pie diviem dažādiem vēja ģeneratora darba režīmiem: atbilstoši nominālajiem un maksimālajiem apgriezieniem (330 W un 1250 W attiecīgi). Pirmajā gadījumā pārveidotāja ieeja tika padota 150 V līdzstrāva un, lai nodrošinātu nepieciešamo izejas spriegumu, caursites laiks tika noteikts 0,27.

Modelēšanas eksperimentālie rezultāti ir attēloti 3.5 attēlā un 3.6 attēlā.

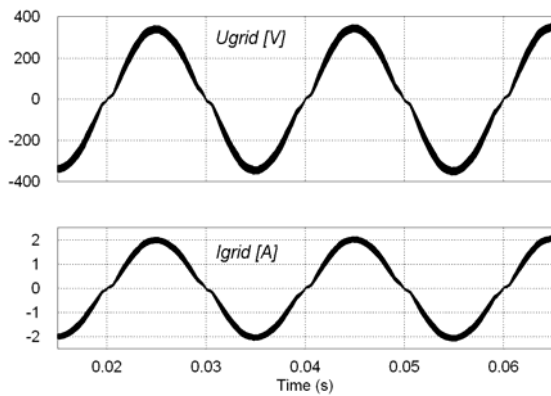
Otrajā gadījumā pārveidotāja ieejas spriegums bija 250 V un jauda 1250W, bet caursites laiks 0,17, kas nodrošināja atbilstošo izejas spriegumu (Att. 3.7., 3.8.)



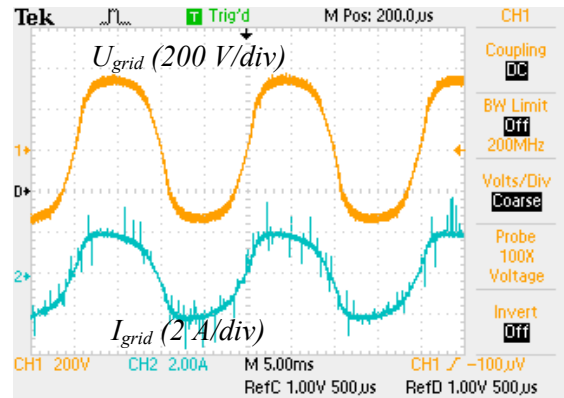
(a)

(b)

Att.3.5. Modelēšanas (a) un eksperimentālās (b) sprieguma līknes pie 330 W

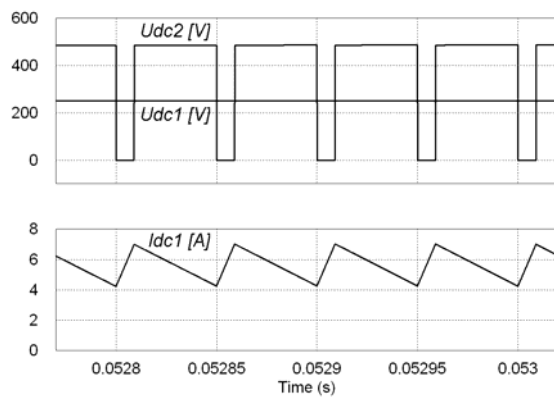


(a)

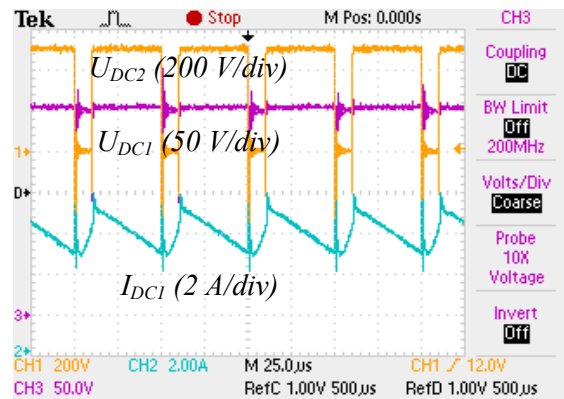


(b)

Att. 3.6. Modelēšanas (a) un eksperimentālās (b) sprieguma un strāvas līknes pie 330 W

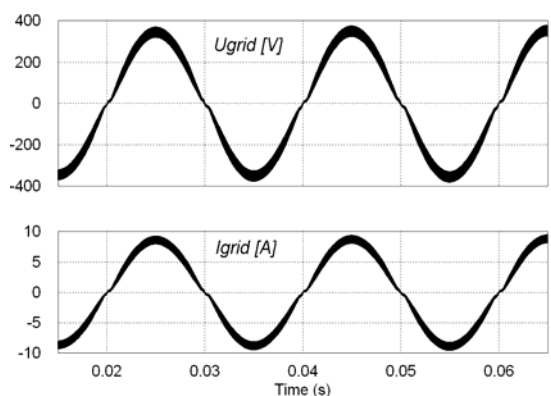


(a)

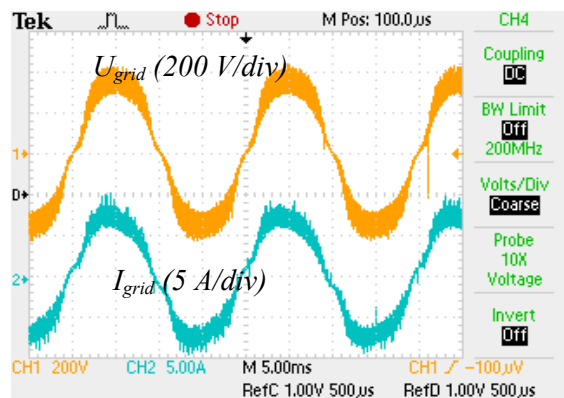


(b)

Att. 3.7. Modelēšanas (a) un eksperimentālās (b) sprieguma un strāvas līknes pie 1250 W



(a)



(b)

Att. 3.8. Modelēšanas (a) un eksperimentālās (b) sprieguma un strāvas līknes pie 1250 W

4. SLĒDZIENI UN TURPMĀKIE PĒTĪJUMI

Šajā disertācijā tiek piedāvāti vairāki jauni salāgojoša pārveidotāja spēku shēmu varianti vēja iekārtām izmantojot kvazi-Z-avota DC/DC pārveidotājus. Salāgojošais pārveidotājs ar vadāmo taisngriezi ģenerators vadībai ir piemērots mazas jaudas vēja iekārtām, jo nodrošina sinusoidālu strāvas formu un dubultu sprieguma paaugstināšana iespēju, kas paver plašas iespējas pārveidotāja darba režīmu optimizācijai.

Salāgojošā pārveidotāja shēma ar nevadāmo taisngriezi ir piemērota mikro-jaudas vēja iekārtām, jo būtiski vienkāršo pārveidotāja konstrukciju un līdz ar to cenu. Tā kā mikro-jaudas iekārtās saražotās enerģijas apjoms ir neliels, tad potenciālie ieguvumi nespēs atsvērt pārveidotāja izmaksas.

Pārveidotājs ar uzlabotām paaugstinošām īpašībā tiek piedāvāts shēmām, kurās maksimāli mazs caursites laiks ir nepieciešams. Kā piemērs tika apskatīts kvazi-Z-avota tīkla invertors. Turpmākie pētījumi būtu veltāmi jauno pusvadītāju elementu izmantošanas novērtēšanai, ar mērķi samazināt pārveidotāja zudumus un līdz ar to arī gabarītus.

REFERENCES

1. Anderson, J., Peng, F.Z., "Four Quasi-Z-Source Inverters", 2008 IEEE Power Electronics Specialist Conference, PESC 2008, Rhodes, Greece, 2008, pp. 2743-2749.
2. Arifujjaman, M.; Iqbal, M.T.; Quaicoe, J.E.; "A comparative study of the reliability of the power electronics in grid connected small wind turbine systems," Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2009. CCECE '09, pp.394-397, 3-6 May 2009
3. Bisenieks, L.; Galkins, I.; "Estimation of Converter Topologies for Small Wind Turbine," 9th international symposium, Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Doctoral School of Energy and Geotechnology II, 2010, pp. 25 – 28, January 2010
4. Bisenieks, L.; Vinikkov, D.; Galkin, I.; "New Converter for Interfacing PMSG based Small-Scale Wind Turbine with Residential Power Network," 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. 2011, EEEIC2011, pp. 869 – 872, 8-11 May 2011
5. Bisenieks, L.; Vinnikov, D.; Galkin, I.; "New Converter for Interfacing PMSG based Small-Scale Wind Turbine with Residential Power Network" 7th International Conference-Workshop Compability and power Electronics, pp. 1 – 6, June 2011
6. Bisenieks, L.; Vinnikov, D.; Zakis, J. "Analysis of Operating Modes of the Novel Isolated Interface Converter for PMSG Based Wind Turbines," International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2011, POWERENG2011, pp.1 – 8, 11 – 13 May 2011"
7. Blaabjerg, F.; Teodorescu, R.; Liserre, M.; Timbus, A.V.; "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics" vol.53, no.5, pp.1398-1409, Oct. 2006
8. Cristina L. Archer and Mark Z. Jacobson. Evaluation of global wind power, 2005. Journal Of Geophysical Research, Vol. 110
9. Darbyshire, J.; Nayar, C.V. "Modelling, simulation and testing of grid connected small scale wind systems," Australasian Universities Power Engineering Conference, 2007. AUPEC 2007, pp.1-6, 9-12 Dec. 2007
10. Dehghan, S.M.; Mohamadian, M.; Varjani, A.Y.; "A New Variable-Speed Wind Energy Conversion System Using Permanent-Magnet Synchronous Generator and Z-Source Inverter," IEEE Transactions on Energy Conversion , vol.24, no.3, pp.714-724, Sept. 200
11. Fujin Deng; Zhe Chen; , "Power control of permanent magnet generator based variable speed wind turbines," International Conference on

- Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009, vol.pp.1-6, 15-18 Nov. 2009
12. <http://www.windenergymarket.de/en/wind-turbines/>
 13. Leon, A.E.; Mauricio, J.M.; Solsona, J.A.; Gómez-Expósito, A.; , "Adaptive Control Strategy for VSC-Based Systems Under Unbalanced Network Conditions," IEEE Transactions on Smart Grid, vol.1, no.3, pp.311-319, Dec. 2010
 14. Li, H.; Chen, Z.; "Overview of different wind generator systems and their comparisons," IET, Renewable Power Generation, vol.2, no.2, pp.123-138, June 2008
 15. Li, H.; Chen, Z.; "Overview of different wind generator systems and their comparisons," IET Renewable Power Generation, vol.2, no.2, pp.123-138, June 2008
 16. Li, X.; Bhat, A.; "Multi-cell operation of a high-frequency isolated DC/AC converter for grid-connected wind generation applications," International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 2009, pp.169-174, 28-31 Dec. 2009 Xiaodong Li, Ashoka K.S.Bhat
 17. Manfred Stiebler. Wind Energy Systems for Electric Power Generation. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008
 18. P. Gipe, Wind Energy Basics, a guide to small and micro wind systems, Chelsea Green Publishing Company, ISBN-13: 978-1890132071, 1999.
 19. Pathmanathan, M.; Tang, C.; Soong, W.L.; Ertugrul, N.; "Comparison of power converters for small-scale wind turbine operation," Australasian Universities Power Engineering Conference, 2008, AUPEC '08, pp.1-6, 14-17 Dec. 2008
 20. Pathmanathan, M.; Tang, C.; Soong, W.L.; Ertugrul, N.; "Comparison of power converters for small-scale wind turbine operation," Australasian Universities Power Engineering Conference, 2008, AUPEC '08, pp.1-6, 14-17 Dec. 2008
 21. Peng, F.Z.; , "Z-source inverter," Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the , vol.2, no., pp. 775- 781 vol.2, 2002
 22. Polinder, H.; van der Pijl, F.F.A.; de Vilder, G.-J.; Tavner, P.; "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines," IEEE International Conference on Electric Machines and Drives 2005, 15 May 2005,pp.543-550.
 23. Rajveer Mittal, Sandhu K. S., Jain D. K. Low voltage ride-through of grid interfaced wind driven PMSG // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2009 – P. 73-83.
 24. Requirements for the connection of micro-generators in parallel with public low-voltage distribution networks, EN 50438:2007

25. Ribickis, L.; Kamolins, E.; Levin, N.; Pugachev, V.; "One-phase reluctance generators in low-power wind plants," European Conference on Power Electronics and Applications, 2007, pp.1-10, 2-5 Sept. 2007
26. Shchur, I.; "Impact of nonsinusoidalness on Efficiency of alternative electricity generation systems," International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC), 2010, pp.218-223, June 2010
27. Standard EN 50160 - Voltage Characteristics of Public Distribution Systems
28. Tan, K.; Islam, S. "Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.19, no.2, pp. 392- 399, June 2004
29. Teodorescu, R.; Liserre, M.; Rodriguez, P.; "Grid converters for photovoltaic and wind power systems" Singapore, A John Wiley and Sons, 2011.
30. Vinnikov, D.; Roasto, I.; , "Quasi-Z-Source-Based Isolated DC/DC Converters for Distributed Power Generation," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.58, no.1, pp.192-201, Jan. 2011
31. Vinnikov, D.; Roasto, I.; Jalakas, T.; , "Comparative study of capacitor-assisted extended boost qZSIs operating in continuous conduction mode," Electronics Conference (BEC), 2010 12th Biennial Baltic , vol., no., pp.297-300, 4-6 Oct. 2010
32. Vinnikov, D.; Roasto, I.; Zakis, J.; Strzelecki, R.; "New Step-up DC/DC Converter for Fuel Cell Powered Distributed Generation Systems: Some Design Guidelines", Przeglad Elektrotechniczny, 86 245-252.
33. World wind energy association. World Wind Energy Report 2009. [online]. available: www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2009_s.pdf
34. Xiaodong Li; Bhat, A.; "A phase-modulated high-frequency isolated dual LCL DC/AC converter," Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009 IEEE , pp.350-357, 20-24 Sept. 2009
35. Xiaohong Guan; Zhanbo Xu; Qing-Shan Jia; , "Energy-Efficient Buildings Facilitated by Microgrid," IEEE Transactions on Smart Grid, vol.1, no.3, pp.243-252, Dec. 2010
36. Yanto, H.A.; Chun-Ta Lin; Jonq-Chin Hwang; Sheam-Chyun Lin; "Modeling and control of household-size vertical axis wind turbine and electric power generation system," International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2009. PEDS 2009., pp.1301-1307, 2-5 Nov. 2009

37. Yogesh M.; Kawale Mtech; Subroto Dutt; "Comparative study of Converter Topologies used for PMSG Based Wind Generation", Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, Dubai, UAE, 2009, pp. 367-371
38. Yu-Shi Xue; Li Han; Hui Li; Li-Dan Xie; , "Optimal design and comparison of different PM synchronous generator systems for wind turbines," International Conference on Electrical Machines and Systems 2008. ICEMS 2008., pp.2448-2453, 17-20 Oct. 2008.
39. Zhang, S.; Tseng, K.; Vilathgamuwa, M.; Nguyen, D.; "Design of a Robust Grid Interface System for PMSG-based Wind Turbine Generators," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.PP, no.99, pp.1-1

LAURIS BIENIEKS

**VĒJA TURBĪNAS PASTĀVĪGO MAGNĒTU
SINHROŅĀ ĢENERATORA UN TĪKLA
SALĀGOJOŠĀ PĀRVEIDOTĀJA IZSTRĀDE UN IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums