

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Genadijs Zaļeskijs

Doktora studiju programmas „Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

VĒJA ĢENERATORU AUTOMATIZĀCIJAS UZDEVUMU IZPĒTE MAZAS JAUDAS MIKROTĪKLOS

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Profesors *Dr. habil. sc. ing.*
IVARS RAŅČIS

**RTU Izdevniecība
Rīga 2017**

Zaļeskijs G. Vēja ģeneratoru automatizācijas uzdevumu izpēte mazas jaudas mikrotīklos. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2017. – 33 lpp.

Iespiests saskaņā ar IEE institūta 2017. gada 30. maija lēmumu, protokols Nr. 114.

ISBN 978-9934-10-983-6

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2017. gada ____ . _____ Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesore *Dr. sc. ing.* Anastasija Žiravecka
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors (*Emeritus*) *Dr. sc. ing.* Algirdas Smilgevičius
Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Lietuva

Profesors (*Emeritus*) *Dr. sc. ing.* Andris Šnīders
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

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

Genadijs Zaļeskijs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu/angļu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras un informācijas saraksts, 101 attēls, sešas tabulas, trīs pielikumi, kopā 117 lappušu. Literatūras un informācijas sarakstā ir 175 nosaukumi.

TĒMAS AKTUALITĀTE

Eiropas Parlamenta un Padomes 2009. gada 23. aprīļa direktīva 2009/28/EK par atjaunojamo energoresursu (AER) izmantošanas veicināšanu nosaka obligātos mērķus Eiropas Savienības kopējam atjaunojamo energoresursu īpatsvaram energoresursu gala patēriņā un transporta degvielas patēriņam. Statistiskie dati par elektroenerģijas ražošanu no atjaunojamiem resursiem Latvijā liecina par AER izmantošanas pieaugumu pēdējos gados, kas ļauj secināt par iespējamām perspektīvām atjaunojamās enerģētikas attīstībā Latvijā.

Eiropas Parlamenta un Padomes 2010. gada 19. maija direktīva 2010/31/EK par ēku energoefektivitāti un Latvijas Republikas Ēku energoefektivitātes likums (spēkā no 09.01.2013.) nosaka, ka līdz 2020. gada 31. decembrim visas jaunās ēkas ir gandrīz nulles enerģijas ēkas un pēc 2018. gada 31. decembra jaunās ēkās, kurās atrodas valsts iestādes un kuru īpašnieces ir valsts iestādes, ir gandrīz nulles enerģijas ēkas.

No politiskā viedokļa jebkura enerģētiski atkarīga valsts var tikt pakļauta iedarbei uz ekonomiskiem un politiskiem procesiem no piegādātāja valsts puses. Atjaunojamās enerģētikas elektroapgādes sistēmu attīstība var palielināt valsts enerģētisko drošību un neatkarību.

Atjaunojamo enerģijas resursu lietošanas stratēģiskie mērķi ir:

- samazināt neatjaunojamu enerģijas resursu patēriņu;
- samazināt konvencionālā enerģētiskā kompleksa darbības ekoloģisko slodzi;
- samazināt importa kurināmā izmaksas;
- nodrošināt ar enerģiju decentralizētos patērētājus un reģionus ar attālinātu vai sezonas kurināmā piegādi.

DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Šī darba galvenais mērķis ir izveidot tehniskos priekšlikumus vēja ģeneratoru efektīvai izmantošanai mazas jaudas mikrotīklos, kas nozīme stabili patērētāju darbību un vēja enerģijas pārveidošanu pēc iespējas plašākā vēja ģeneratora ātrumu diapazonā.

Mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi uzdevumi:

- formulēt automatizācijas uzdevumu uz vēja enerģijas balstītās elektroapgādes sistēmās;
- izveidot sinhronā ģeneratora automatizācijas sistēmas principus darbā ar līdzsprieguma mikrotīkla slodzes posmu;
- izveidot sinhronā ģeneratora automatizācijas sistēmas principus mazjaudas līdzstrāvas mikrotīkla sasaistei ar maiņstrāvas elektroapgādes tīklu;
- izstrādāt metodiku vēja ģeneratora ekonomiskās efektivitātes novērtēšanai.

PĒTĪJUMA LĪDZEKĻI UN METODES

- Atjaunojamo enerģijas avotu ietekmes uz konvencionālo maiņsprieguma tīklu novērtēšanai tika veikti praktiskie mērījumi konkrētos, problemātiskos sadales tīklu mezglos.
- Eksperimentos izmantojamo ģeneratoru parametru noteikšanai tika veikti praktiskie mērījumi Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūta laboratorijās.
- Datu par vēja ātrumu iegūšanai izmantota RTU EEF meteostacija.
- Matemātiskiem aprēķiniem un funkciju grafiskai attēlošanai tika izmantota *MS Excel* un *Matlab* programmatūra.
- Energoelektronikas shēmu analīzei tika izmantota energoelektronikas teorija.
- Energoelektronikas ķēdes tika modelētas *PSIM* vidē.

- Spiestās plates tika projektētas, izmantojot *Cadence OrCAD* programmatūru.
- Mikrokontrolleru programmēšana tika veikta, izmantojot *Microchip MPLAB IDE* programmatūru.
- Izstrādāto algoritmu pārbaudei tika veikti praktiskie eksperimenti Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūta laboratorijās.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

- Izstrādāta sinhronā ģenerators pašierosmes sistēma, kurā tiek izmantots kondensators ģenerators paliekošā magnētisma līmeņa paaugstināšanai, iegūts Latvijas patents uz izgudrojumu Nr. LV 14496 B „Sinhronā ģenerators pašierosināšanās sistēma”.
- Izstrādāta sinhronā ģenerators pašierosmes sistēma, kurā tiek izmantots pazeminošs līdzstrāvas–līdzstrāvas pārveidotājs ģenerators ierosmes strāvas regulēšanai, iegūts Latvijas patents uz izgudrojumu Nr. LV 14951 B „Sinhronā ģenerators pašierosināšanās sistēma ar pazeminošo līdzstrāvas pārveidotāju”.
- Izstrādāta metodika vēja turbīnu ekonomiskās efektivitātes noteikšanai.

DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

- Izstrādātā vēja turbīnu ekonomiskās efektivitātes noteikšanas metodika var tikt izmantota vēja enerģijas cenas noteikšanai konkrētās vietās.
- Izpētīta elektroenerģijas norēķinu sistēmas un sadales operatora noteikumu ietekme uz vēja turbīnu ekonomisko efektivitāti.
- Izstrādāti uz vēja enerģijas balstīta līdzstrāvas mikrotīkla salāgošanas principi ar maiņsprieguma tīklu.
- Izstrādātā vēja turbīnu ekonomiskās efektivitātes noteikšanas metodika var tikt izmantota vēja turbīnu piemērotības noteikšanai konkrētai slodzei.

DARBA APROBĀCIJA

Promocijas darba galvenie rezultāti tika prezentēti šādās zinātniskās konferencēs.

1. 20th International Conference Electronics 2016, Kaunas, KTU, 2016.
2. 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, RTU, 2015.
3. 14th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical Engineering * Doctoral School of Energy and Geotechnology II,” 2014.
4. 55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, 2014.
5. 54th International Scientific Conference of Riga Technical University (RTUCON), Riga, 2013.
6. 16th International Conference Electronics 2012, Palanga, June 19, 2012.

AUTORA PUBLIKĀCIJAS

1. G. Zaleskis, I. Steiks. Alternative Energetics DC Microgrid with Hydrogen Energy Storage System. The Scientific Journal of Riga Technical University – Electrical, Control and Communication Engineering, Riga, RTU, 2016, pp. 21–26.
2. G. Zaleskis, I. Rankis. Problem of an Estimation of the Wind Generators Economic Efficiency in Latvia. Proceedings of the 20th International Conference Electronics 2016, Kaunas, KTU, 2016, pp. 16–21.
3. G. Zaleskis, I. Steiks, A. Pumpurs, O. Krievs. DC-AC Converter for Load Supply in Autonomous Wind-Hydrogen Power System. 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, RTU, 2015, pp. 169–173.
4. G. Zaleskis, I. Rankis. An Overview on the Synchronous Generator Self-Excitation Converter Possible Configurations. 14th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical Engineering * Doctoral School of Energy and Geotechnology II,” 2014, pp. 78–81.
5. G. Zaleskis, M. Gavrilovs, I. Rankis. Improvement of Self-Excitation Process in Synchronous Generator. 55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Riga, RTU, 2014, pp. 22–25.
6. G. Zaleskis, I. Rankis, M. Prieditis. Self-Excitation System for Synchronous Generator. Electrical, Control and Communication Engineering, Riga, RTU, 2013 Nr. 4, 32–37 pp.
7. G. Zaleskis, I. Rankis. Self-Excitation System of Synchronous Generator with Buck-Converter. Electronic Proceedings of the 54th International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, RTU, 2013, p 3.1. – p 3.4.
8. G. Zaleskis, I. Rankis. Capacitor Activated Self-Excitation System of Synchronous Generator. Electronics and Electrical Engineering, Kaunas, KTU, 2012 Nr. 7 (123), 53–56 pp.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

ANOTĀCIJA

IEVADS

1. VĒJA TURBĪNU IZMANTOŠANAS PRIEKŠNOSACĪJUMI

2. UZ VĒJA ENERĢIJAS BALSTĪTA MIKROTĪKLA IZVEIDES PRINCIPI

3. SINHRONIE ĢENERATORI MAZJAUDAS MIKROTĪKLOS

4. SINHRONĀ ĢENERATORA AUTOMATIZĀCIJAS SISTĒMAS PRINCIPU IZVEIDE

5. VĒJA TURBĪNU EKONOMISKĀS EFEKTIVITĀTES NOVĒRTĒŠANA

SECINĀJUMI

LITERATŪRAS UN INFORMĀCIJAS AVOTI

PIELIKUMI

IEVADS

Enerģētiskā problēma ir viena no fundamentālām cilvēces problēmām. Ir skaidrs, ka galveno energonesēju resursi, pirmkārt, nafta un gāze, nav bezgalīgi, un agrāk vai vēlāk mūsu civilizācija vai nu attīstīsies enerģijas patēriņa samazināšanas un atjaunojamās enerģētikas izplatīšanas virzienā, vai nu pārtrauks savu eksistenci esošā kvalitātē. Protams, atjaunojamās enerģētikas risinājumi var būt efektīvs bagātināšanas veids, ievērojot to relatīvi augstās izmaksas un, sekojoši, augsto tirgus cenu, bet nevar apšaubīt vides piesārņojumu ar fosilā kurināma dedzināšanas produktiem un tehnogēno katastrofu dēļ.

Atjaunojamo enerģijas resursu lietošanas stratēģiskie mērķi saskaņā ar [1] un [2] ir neatjaunojamu enerģijas resursu patēriņa, enerģētiskā kompleksa ekoloģiskās slodzes un importa kurināmā izmaksu samazināšana, kā arī decentralizēto patērētāju un reģionu ar attālināto vai sezonas kurināma piegādi elektroapgādes nodrošināšana.

Centralizētas elektroapgādes izmantošanas iespēja dažādos rajonos bieži ir tehniski vai ekonomiski ierobežota. Iespējamo dabas katastrofu apstākļos centralizēta elektroapgāde var tikt pārtraukta. No tā izriet, ka kādā izolētā teritorijā elektriskās enerģijas ražošana var tikt īstenota, tikai izmantojot lokālo autonomo elektroapgādes sistēmu, kas var tikt balstīta, piemēram, uz vēja enerģiju. Vairāki tehnoloģiskie procesi ir atkarīgi no nepārtrauktās elektroapgādes, pie tam medicīnas jomā no enerģijas padeves ir atkarīga cilvēku dzīvība. Autonomās elektroapgādes sistēmas var palīdzēt izpildīt šo nosacījumu sadales tīkla avārijas gadījumā.

No politiskā viedokļa jebkura enerģētiski atkarīga valsts var tikt pakļauta iedarbei uz ekonomiskiem un politiskiem procesiem no piegādātāja valsts puses. Atjaunojamo enerģijas resursu integrēšana var palielināt valsts enerģētisko drošību un neatkarību [3].

Pētījumi parādīja, ka noteiktos apstākļos elektroenerģija, kas tika iegūta no atjaunojamiem avotiem, var būt krietni dārgāka par enerģiju, kas iepirkta no centralizētā tīkla, bet Eiropas Parlamenta un Padomes direktīvas nosaka konkrētas prasības katrai dalībvalstij attiecībā uz atjaunojamo enerģijas resursu izmantošanu un ēku energoefektivitāti. No otras puses, veicot konkrēta objekta potenciāla izpēti un izvēloties piemērotāko atjaunojamo enerģijas avotu, var iegūt pozitīvo ekonomisko efektu. Šo iemeslu dēļ ir svarīgi izveidot tehniskos risinājumus vēja turbīnu efektīvai izmantošanai. Šajā darbā tiek apskatītas mazas jaudas sistēmas ar vēja ģeneratoriem, kas ir aktuāli nelielām saimniecībām. Tika izpētīti vēja enerģijas cenu noteicošie faktori, kā arī pozitīva ekonomiskā efekta sasniegšanas nosacījumi. Efektīvai atjaunojamo enerģijas avotu izmantošanai tiek piedāvāts izmantot mikrotīklus [4], kas pēc savas definīcijas var darboties gan sinhroni ar centralizēto elektroapgādes tīklu, gan autonomi, atbilstoši fizikālām un/vai ekonomiskām prasībām [5]–[8]. Tika novērtēta sinhrono ģeneratoru ar neatkarīgās ierosmes tinumu lietošanas iespēja vēja turbīnās salīdzinājumā ar sinhroniem ģeneratoriem ar pastāvīgiem magnētiem. Uzstādot vēja turbīnas esošās saimniecībās, ir iespējams nodrošināt pieslēgumu centralizētām elektroapgādes tīklam, kas ļauj pārdot vai uzkrāt saražotās enerģijas pārpalikumu atbilstoši tīkla operatora noteikumiem, tāpēc tika izstrādāta metodika vēja turbīnu ekonomiskās efektivitātes novērtēšanai, kā arī analizēta norēķinu sistēmas ietekme uz vēja turbīnu ekonomisko efektivitāti.

1. VĒJA TURBĪNU IZMANTOŠANAS PRIEKŠNOSACĪJUMI

Vēja turbīnas izmantošanas ekonomiskais pamatojums

Vēja enerģijas cena ir atkarīga no vairākiem faktoriem [18]–[20], bet kopumā tos var definēt šādi:

- uzstādīšanas ieguldījumi;
- ekspluatācijas izmaksas;
- ekspluatācijas laika periods;
- jaudas izmantošanas koeficients (angļu val. *capacity factor*).

Šajā darbā elektroenerģijas tirgus cena $C_{kWh,tirgus}$ tiek pieņemta vienāda ar 0,065 EUR par 1 kWh saskaņā ar [93]. Vēja enerģijas cena dažādos gadījumos tiek salīdzināta tikai ar centralizēta elektroapgādes tīkla enerģijas cenu $C_{kWh,s.t.}$, kas tiek pieņemta vienāda ar 0,16 EUR par 1 kWh.

Vēja turbīnas izmantošana ir ekonomiski pamatota šādos gadījumos:

- ja centralizētā elektroapgādes tīkla un citu AER izmantošana tehnoloģiski nav iespējama;
- ja centralizētā elektroapgādes tīkla un citu AER izmantošana ir relatīvi dārga, ievērojot iepriekšminētos faktorus.

Vēja ģeneratora enerģijas cenu noteicošie faktori

Apskatāmā sistēma [84] iekļauj vēja turbīnu ar nominālo jaudu $P_{v,nom}$, kas gada laikā saražo vidējo jaudu $P_{v,vid}$. Vēja enerģija daļēji tiek patērēta ar slodzi ar vidējo gada jaudu $P_{sl,vid}$. Starpība starp saražoto un patērēto jaudu tiek pārvadīta centralizētā maiņstrāvas tīklā caur divvirzienu līdzstrāvas/maiņstrāvas pārveidotāju. Šī starpība $P_{s.t.,vid}$ ir vienāda ar:

$$P_{s.t.,vid} = P_{v,vid} - P_{sl,vid}. \quad (1.1.)$$

Vēja turbīnas saražoto vidējo jaudu raksturo vēja turbīnas jaudas izmantošanas koeficients α , kas ir vienāds ar vidējās saražotās jaudas un nominālās jaudas attiecību:

$$\alpha = \frac{P_{v,vid}}{P_{v,nom}} \leq 1. \quad (1.2.)$$

Daļa no vidējās saražotās vēja turbīnas jaudas tiek pārvadīta mikrotīkla patērētājiem, un to vidējā patērēta jauda var tikt raksturota ar vēja turbīnas jaudas sadalījuma koeficientu:

$$\beta = \frac{P_{sl,vid}}{P_{v,vid}} = \frac{P_{sl,vid}}{\alpha P_{v,nom}}. \quad (1.3.)$$

Vēja enerģijas cena ir būtiski atkarīga no uzstādīšanas ieguldījumiem un no vēja jaudas izmantošanas koeficienta:

$$C_{kWh} = \frac{C_{kW} k_a}{T_{an} \alpha}, \text{ EUR}, \quad (1.4.)$$

kur $T_{an} = 8760$ – stundu skaits gadā;
 C_{kw} – uzstādīšanas izmaksas par katru 1 kW no visas uzstādītās vēja ietaises jaudas, ieskaitot energoelektronisko pārveidotāju izmaksas, EUR;
 k_a – uzstādītās jaudas izmaksu reducēšanas koeficients.

Pieņemot normālās ekspluatācijas laika periodu vienādu ar 20 gadiem un ikgadējo ekspluatācijas izmaksu relatīvo daļu vienādu ar 20 %, $k_a = 0,06 \text{ gads}^{-1}$.

Vēja turbīnu ietekme uz konvencionālā elektroapgādes tīkla jaudas kvalitāti

Saskaņā ar 14.06.2013. starp AS „Latvenergo” un Rīgas Tehnisko universitāti noslēgto līgumu par sprieguma kvalitātes mērījumu veikšanu konkrētos, problemātiskos sadales tīklu mezglos tika veikti sprieguma kvalitātes mērījumi uz elektroietaišu piederības robežas pie AS „Sadales tīkls” izvēlētiem lietotājiem ar mērķi identificēt sprieguma kvalitātes traucējumu cēloņus un piedāvāt praktiski lietojamus tehniskos risinājumus problēmu risināšanai. Tika apskatīti objekti ar uzstādītām vēja turbīnām, kas tika pieslēgtas trīsfāžu tīklam caur invertoriem un divvirzienu elektroenerģijas skaitītāju. Tika konstatēts, ka esošā pieslēguma shēma nenodrošina nepārtrauktu elektroapgādi, jo invertori ir sinhronizēti ar centralizēto elektroapgādes tīklu, līdz ar to tīkla sprieguma pazušanas gadījumā vēja enerģija arī netiek izmantota vai nodota tīklam.

Šī problēma varētu tikt atrisināta, ja invertoru darbība notiktu autonomā režīmā, pie tam objekts drošības mērķos jāatslēdz no elektroapgādes tīkla, bet invertoru darbība jāsaskaņo attiecīgi pēc sprieguma līmeņa, frekvences un fāžu skaita.

Secinājumi par nodaļu

Atjaunojamo enerģijas resursu lietošanas stratēģiskie mērķi, tādi kā neatjaunojamo enerģijas resursu patēriņa un līdz ar to importa kurināmā izmaksu un ekoloģiskas slodzes samazināšana var tikt sasniegti, integrējot atjaunojamās enerģijas avotus, tajā skaitā vēja turbīnas, tādā veidā pilnībā vai daļēji izpildot atbilstošus normatīvus aktus par atjaunojamo resursu izmantošanu un ēku energoefektivitāti.

Politiskie un ekoloģiskie faktori stimulē atjaunojamās enerģētikas, tajā skaitā vēja enerģētikas attīstību. Vēja turbīnu izmantošana ir ekonomiski pamatota gadījumos, kad centralizētā elektroapgādes tīkla un citu atjaunojamo enerģijas resursu izmantošana nav tehnoloģiski iespējama, vai centralizētā elektroapgādes tīkla un citu atjaunojamo enerģijas resursu izmantošana ir relatīvi dārga, ievērojot vēja enerģijas cenu ietekmējošos faktorus.

Ikgadējās izmaksas par vēja turbīnas izmantošanu un iegūtās vēja enerģijas cena ir atkarīgas no jaudas izmantošanas koeficienta, kas norāda uz vēja jaudas izmantošanu gada laikā un ir atkarīgs no turbīnas konstruktīvām īpašībām un vidējā vēja ātruma, kā arī no patērētās vēja enerģijas attiecības pret saražotu vēja enerģiju.

Vēja turbīnu izmantošanas ekonomiskais efekts ir atkarīgs no konvencionālā elektroapgādes tīkla operatora noteikumiem un elektroenerģijas norēķinu sistēmas, saskaņā ar kuriem vēja turbīnas īpašnieks var iegūt vai neiegūt kompensāciju par sadales tīklā nodoto enerģiju. Aprēķinot vēja turbīnas ekonomisko efektivitāti, ir jāņem vērā konkrētā reģiona prasības.

Jaudas kvalitātes izpēte ar AER aprīkotos objektos liecina, ka esošā pieslēguma shēma nenodrošina visas pieejamās vēja enerģijas izmantošanu un nepārtrauktu elektroapgādi, jo vēja ģeneratoru invertori ir sinhronizēti ar centralizēto elektroapgādes tīklu un to darbība nav iespējama tīkla sprieguma pazušanas gadījumā. Ievērojot šo problēmu, kā arī gandrīz nulles enerģijas ēku koncepciju un to, ka vēja turbīnas ekonomiskais efekts ir grūti sasniedzams zema

vēja ātruma apstākļos, tika noformulēts uz vēja enerģijas balstītās elektroapgādes sistēmās automatizācijas uzdevums.

Uz vēja enerģijas balstītās elektroapgādes sistēmās automatizācijas uzdevums ir minimizēt elektroenerģijas patēriņu no centralizētā elektroapgādes tīkla, lietderīgi izmantojot atjaunojamus enerģijas avotus un nodrošinot enerģijas patērētāju stabilu darbību.

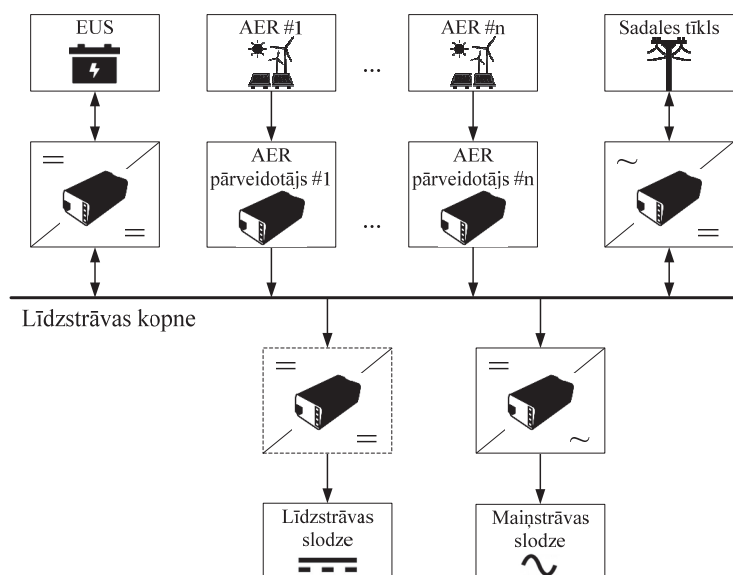
Efektīvākai vēja enerģijas izmantošanai tika izlemts izmantot mikrotīklu, kas pēc savas definīcijas var darboties gan sinhroni ar centralizēto elektroapgādes tīklu, gan autonomā režīmā, kas ļauj nodrošināt enerģijas piegādi decentralizētiem patērētājiem, tādā veidā izpildot vienu no atjaunojamo enerģijas resursu lietošanas stratēģiskiem mērķiem, vai centralizētā tīkla avārijas gadījumā. Jāņem vērā, ka vēja ātrums un, attiecīgi, vēja turbīnas ģenerētā jauda ir nejaušie lielumi un pieejamais vēja enerģijas daudzums ir atkarīgs no enerģijas ražošanas un patērēšanas stohastiskā sadalījuma.

2. UZ VĒJA ENERĢIJAS BALSTĪTA MIKROTĪKLA IZVEIDES PRINCIPI

Mikrotīklu tehnoloģiskās konfigurācijas

Šajā darbā tiek apskatīta uz līdzstrāvu balstīta mikrotīkla topoloģija. Pirmkārt, šāda izvēle ir noteikta ar efektīvāku AER izmantošanu, kas tiek sasniegta, samazinot pārveidošanas zudumus, un iespēju nodrošināt nepārtraukto enerģijas apgādi. Tiek ņemta vērā arī iespēja izmantot rekuperēto elektriskās piedziņas sistēmu bremsēšanas enerģiju tīklā, un tā dēļ līdzstrāvas mikrotīkli kļūst populāri arī ražošanas sektorā [113].

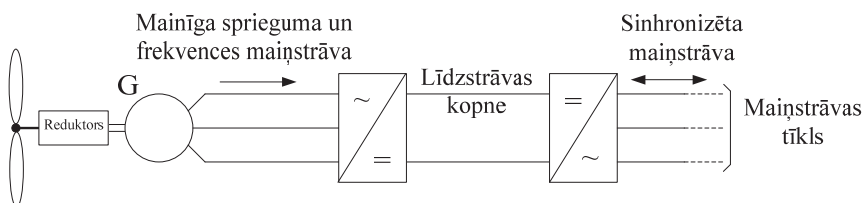
Uz līdzstrāvu balstītā topoloģijā (2.1. attēls) visi elektroenerģiju ģenerējošie objekti tiek pieslēgti līdzstrāvas kopnei, no kuras notiek uzkrājēju sistēmas uzlāde. Maiņstrāvas ģenerējošiem objektiem ir vajadzīgi maiņstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāji. Uzkrājēju sistēma dod enerģiju patērētājiem pēc pieprasījuma. Maiņstrāvas patērētāji tiek pieslēgti līdzstrāvas kopnei caur invertoru.



2.1. attēls. Uz līdzstrāvu balstīta mikrotīkla blokshēma ar AEI [37]: EUS – enerģijas uzkrājēju sistēma; AER – atjaunojamais enerģijas resurss.

Vēja turbīnas

Uz līdzstrāvu balstītā mikrotīklā ir lietderīgi izmantot mainīga ātruma vēja turbīnu ar sinhrono ģeneratoru ar pastāvīgiem magnētiem un pilnu energoelektronisko pārveidošanu [37] (2.2. attēls).



2.2. attēls. Vēja turbīna ar sinhrono ģeneratoru ar pastāvīgiem magnētiem.

SĢPM vietā ir iespējams izmantot SĢ ar neatkarīgo ierosmi, kas darbojas pašierosmes režīmā [120]–[125]. Šajā režīmā ģenerators izejas spriegumu var mainīt ar pašierosmes pārveidotāja starpniecību atkarībā no ģenerators griešanās ātruma, kas ir aktuāli stipra vēja gadījumā, kad ģenerators spriegums var pārsniegt pieļaujamo vērtību.

Līdzstrāvas kopnes sprieguma līmeņa izvēle

Ievērojot Latvijas Republikas zemsprieguma sadales tīkla standartu 230/400 V, atkarībā no mājāsaimniecības pieslēguma tipa fāžu skaita ir iespējams pieslēgt mikrotīklu gan vienfāzes tīklam, gan trīsfāžu tīklam. Pieslēgums trīsfāžu maiņsprieguma tīklam tiek realizēts, izmantojot aktīvo taisngriezi [65], šajā gadījumā līdzsprieguma kopnes sprieguma vērtībai jābūt lielākai par taisngrieztā maiņsprieguma pīķa vērtību [103], kas vienāda ar maiņsprieguma līnijas amplitūdas vērtību:

$$U_{d,min} = U_{l,m} = U_1 \sqrt{2} = 565 \text{ V}, \quad (2.1.)$$

kur $U_1 = 400 \text{ V}$ – līnijas sprieguma efektīvā vērtība.

Saskaņā ar standartu LVS EN 60038 [131] šajā darbā tiek pieņemta kopnes nominālā sprieguma vērtība $U_{d,nom} = 600 \text{ V}$.

Secinājumi par nodaļu

Atjaunojamo enerģijas resursu lietošanas stratēģisko mērķu sasniegšanai un atbilstošo normatīvo aktu izpildei tika izvēlēta uz līdzstrāvu balstītā mikrotīkla topoloģija. Šāda izvēle tiek pamatota, pirmkārt, ar efektīvāko AER integrēšanu un izmantošanu, un, otrkārt, tiek ņemta vērā iespēja rekuperēt gan slodžu elektriskās piedziņas sistēmu bremsēšanas enerģiju, gan pārpalikuma ģenerēto jaudu tīklā, kā dēļ līdzstrāvas mikrotīkli kļūst populāri arī ražošanas sektorā.

Par līdzstrāvas mikrotīkla bāzes avotu tiek izvēlēts mainīga ātruma sinhronais ģenerators ar pilnu energoelektronisko pārveidošanu. Ir iespējams izmantot sinhrono ģeneratoru ar pastāvīgiem magnētiem vai sinhrono ģeneratoru ar neatkarīgo ierosmi, kas darbojas pašierosmes režīmā.

Autonomos mikrotīklos ir nepieciešams ieviest enerģijas uzkrājēju sistēmu, kas nodrošinās objekta nepārtrauktu elektroapgādi. Gadījumā, ja mikrotīkls ir pieslēgts centralizētam elektroapgādes tīklam, enerģijas uzkrājēju sistēma var tikt izmantota centralizētā tīkla enerģijas patēriņa samazināšanai laika posmos, kad AER enerģija nav pieejama nepieciešamā daudzumā, vai centralizētā elektroapgādes tīkla avārijas gadījumā. Enerģijas uzkrājēju sistēma jāizvēlas atbilstoši tai izvirzītiem uzdevumiem, t. i., atbilstoši slodzes veidam un patērētai jaudai. Ievērojot plašo enerģijas uzkrājēju klāstu, šajā darbā to izvēle dziļāk netiek pētīta.

Pieslēgums maiņsprieguma tīklam tiek realizēts, izmantojot aktīvu taisngriezi. Saskaņā ar valsts standartiem un līdzstrāvas kopnes salāgošanās ar trīsfāžu maiņstrāvas tīkla īpatnībām tika izvēlēts mikrotīkla nominālais spriegums 600 V, pieļaujama minimālā spriegums ir vienāds ar 565 V.

3. SINHRONIE ĢENERATORI MAZJAUDAS MIKROTĪKLOS

Sinhronā ģenerators ar pastāvīgiem magnētiem raksturojumi

Sinhronā ģenerators-taisngrieža modelis rāda, ka iekšējā sprieguma krituma un komutācijas procesu dēļ pastāvīgo magnētu sinhronā ģenerators slodzes raksturlīkne $U_{g,dc} = f(I_{g,dc})$, kur $I_{g,dc}$ ir izejas taisngrieža slodzes strāvas stiprums (vienkāršības labad turpmāk tekstā – strāva), praktiski izskatās kā taisne:

$$U_{g,dc} = k_{dc} n - I_{g,dc} R_g, \quad (3.1.)$$

kur k_{dc} – koeficients, kas ir atkarīgs no ģenerators konstrukcijas un pastāvīgo magnētu magnētiskās plūsmas, konkrētam eksemplāram vienāds ar 3,26;
 n – ģenerators griešanas ātrums, apgr./min;
 R_g – ģenerators iekšējo pretestību un komutācijas ietekmi raksturojošs parametrs, Ω .

Aproksimējot SG GL-PMG-5000 jaudas līkni, tika iegūta šāda izteiksme references (atbalsta) jaudai:

$$P_{ref} = 0,089n^2 + 8,929n - 357,143. \quad (3.2.)$$

Parametrs R_g var tikt aprēķināts no ģenerators tukšgaitas sprieguma un jaudas līknēm:

$$R_g = \frac{U_{g,dc,0}}{I_{g,dc,max}} - \frac{P_{ref}}{I_{g,dc,max}^2}, \quad \Omega, \quad (3.3.)$$

kur $I_{g,dc,max}$ – ģenerators izejas līdzstrāvas maksimālā vērtība.

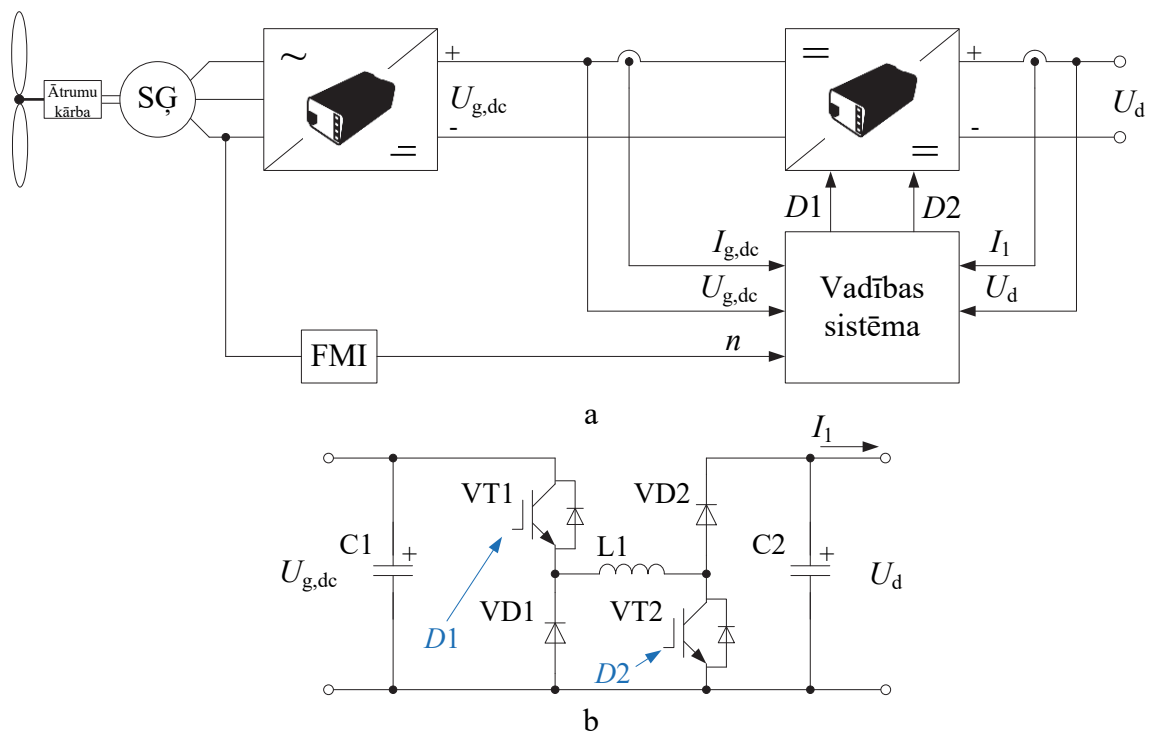
Sinhronā ģenerators ar pastāvīgiem magnētiem sasaiste ar līdzstrāvas tīklu

Saskaņā ar pētāmā ģenerators parametriem tika piedāvāts izmantot neinvertējošo pazeminoši-paaugstinošo līdzstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāju [138]–[140] ar vadības sistēmu, kas balstās uz vēja ģenerators optimālās jaudas līknes uzdošanu un pārveidotāja aizpildījuma koeficienta pielāgošanu [135]–[137]. Piedāvātās sistēmas blokshēma un pārveidotāja principiālā shēma parādītas 3.1. attēlā. Kopnes līdzspriegums, neievērojot zudumus pārveidotājā, ir vienāds ar:

$$U_d = U_{g,dc} \frac{D1}{1 - D2}, \quad V, \quad (3.4.)$$

kur $D1$ – tranzistors VT1 aizpildījuma koeficients;
 $D2$ – tranzistors VT2 aizpildījuma koeficients.

Sprieguma pazemināšanas režīmā $D1 = 0 \dots 1$ un $D2 = 0$, sprieguma paaugstināšanas režīmā $D1 = 1$ un $D2 = 0 \dots 1$.



3.1. attēls. Piedāvātās sistēmas blokshēma (a) un līdzstrāvas–līdzstrāvas pārveidotāja principiālā shēma (b).

Kad ģenerators griešanas ātrums ir mazs, pārveidotājs darbojas sprieguma paaugstinošā režīmā ar $D1 = 1$ maksimālo $D2$, kas pēc lieluma tiek ierobežots ar $D2_{\max}$; pieņemam, ka tas ir 0,9 [141]. Tad ģenerators spriegums ir arī mazs, un tas var tikt izteikts kā:

$$U_{g,dc}^1 = 0,1U_d, \text{ V.} \quad (3.5.)$$

Lai nodrošinātu šādu spriegumu, ģenerators izejas līdzstrāvai ir jābūt:

$$I_{g,dc}^1 = \frac{k_{dc}n}{R_g} - \frac{0,1U_d}{R_g}, \text{ A.} \quad (3.6.)$$

Tātad, mazu ātrumu diapazonā pārveidotāja izejas strāva ir vienāda ar:

$$I_1^1 = 0,1I_{g,dc}^1 = \frac{0,1k_{dc}n}{R_g} - \frac{0,01U_d}{R_g}, \text{ A.} \quad (3.7.)$$

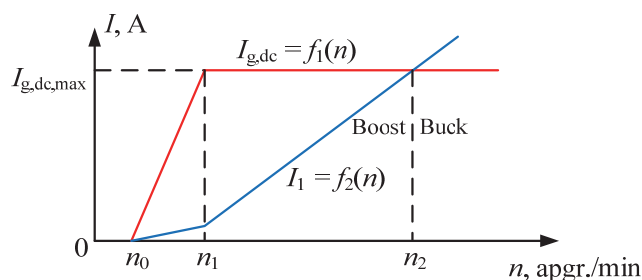
Kad $I_1 = 0$ A, ģenerators ātrums ir vienāds ar:

$$n_0 = \frac{0,1U_d}{k_{dc}}, \text{ apgr./min.} \quad (3.8.)$$

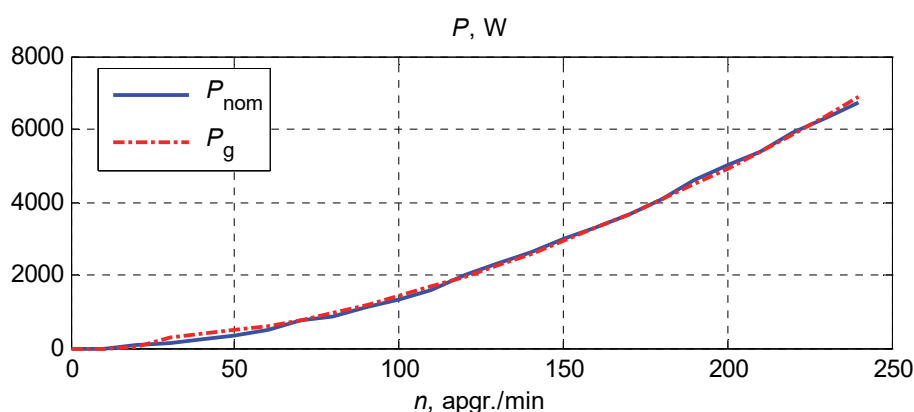
Ģenerators līdzstrāva pieņem maksimālo vērtību $I_{g,dc,\max}$, ja ātrums ir vienāds ar n_1 (3.2. attēls), šajā gadījumā pārveidotāja strāva ir vienāda ar:

$$I_1^1 = 0,1I_{g,dc,\max}, \text{ A.} \quad (3.9.)$$

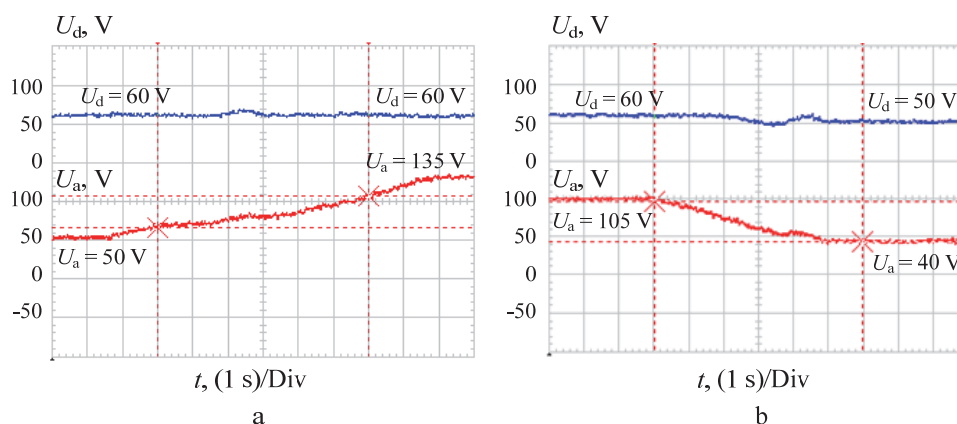
Ja līdzstrāvas kopnes nominālais spriegums ir 600 V, pētāmā ģeneratoram GL-PMG-5000 ar $I_{g,dc,max} = 10$ A ātrums n_0 ir vienāds ar 18,5 apgr./min, bet n_1 ir apmēram vienāds ar 65 apgr./min (3.2. attēls). Starp n_0 un n_1 ģeneratora līdzspriegums ir vienāds ar 60 V saskaņā ar (3.5.). Pie ātruma n_2 , pārveidotāja strāva I_1 kļūst vienāda ar $I_{g,dc,max}$, un pārveidotāja darbības režīms mainās no paaugstinošā (*Boost*) uz pazeminošo (*Buck*). Pie $n > n_2$ pārveidotājs darbojas sprieguma pazemināšanas režīmā. Ģeneratora jauda, kas tiks iegūta atkarībā no ātruma (3.2. attēls), lielākā diapazona daļā sakrīt ar nominālo jaudu. Sākotnējās pārveidotāja darbības pārbaudes, kas tika veiktas pie līdzstrāvas kopnes uzdotā sprieguma 60 V un slodzes pretestības 200 Ω , parādīja aizpildījuma koeficienta pielāgošanas algoritma atbilstību pārveidotāja uzdevumam (3.4. attēls).



3.2. attēls. Vēja turbīnas mezgla strāvas kā funkcija no ģeneratora ātruma.



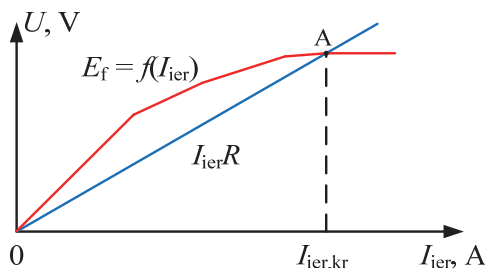
3.3. attēls. Vēja ģeneratora GL-PMG-5000 nominālās (P_{nom}) un teorētiski iegūtās (P_g) jaudas līknes.



3.4. attēls. Pārveidotāja darbība ar līdzstrāvas slodzi ieejas sprieguma palielināšanas (a) un samazināšanas (b) apstākļos: U_a – pārveidotāja ieejas līdzspriegums; U_d – kopnes līdzspriegums.

Sinhronā ģeneratora ar neatkarīgo ierosmi sākuma pašierosmes uzlabošana

Pašierosmes procesu sinhronā ģeneratorā ietekmē ģenerētais EDS un sprieguma kritums $I_{ier}R$ uz ģeneratora tinumu aktīvās pretestības R , ko izraisa ierosmes strāva I_{ier} . Ja sprieguma kritums $I_{ier}R$ sasniedz punktu A (3.5. attēls), ģeneratora enerģijas izmantošana kļūst neiespējama, jo visa enerģija tiek izkliedēta ģeneratora tinumu pretestībā [123].



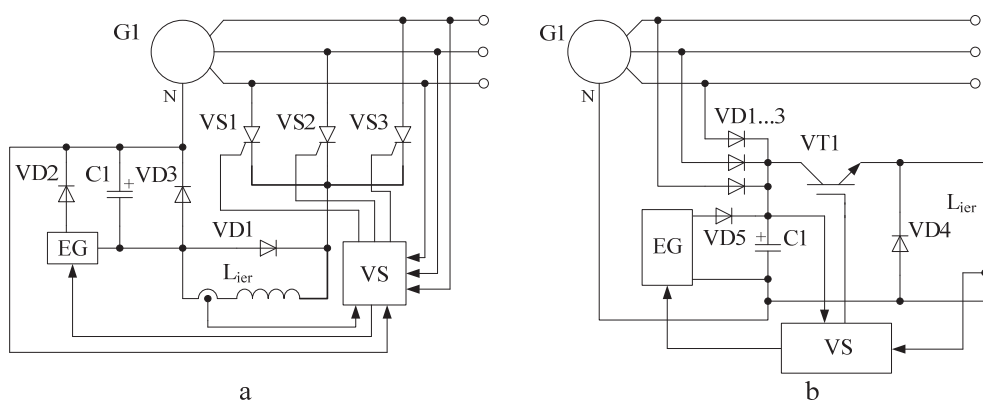
3.5. attēls. Ģeneratora fāzes EDS E_f un sprieguma kritums uz tinumu aktīvās pretestības.

Kritiskā ierosmes strāva, kas atbilst punktam A, tiek atrasta no (3.10.):

$$I_{ier}R = kn \frac{I_{ier}}{a + bI_{ier}}, \quad (3.10.)$$

kur n – griešanas ātrums, apgr./min;
 a, b, k – koeficienti.

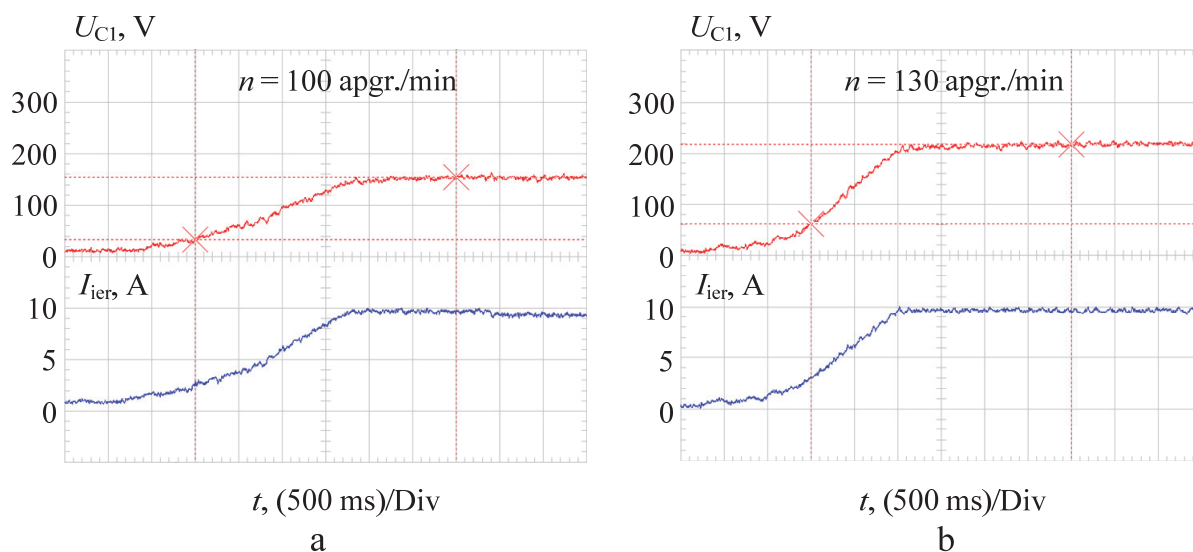
No aprēķiniem izriet, ka pētāmais SĢ ar neatkarīgo ierosmi teorētiski var darboties pašierosmes režīmā kopā ar pašierosmes sistēmu [123] pie ātruma, kas ir zemāks par nominālo (3.6. attēls). Eksperimentāli tika pierādīts, ka zema paliekošā magnētisma līmeņa dēļ pašierosmes process pētāmā ģeneratorā bez uzlabošanas neattīstās.



3.6. attēls. SĢ pašierosmes sistēma ar vadāmo pustilta taisngriezi (a) un ar nevadāmo pustilta taisngriezi un pazeminošo līdzstrāvas–līdzstrāvas pārveidotāju (b): EG – elektroniskais ģenerators; VS – pašierosmes ierīces vadības sistēma; L_{ier} – ierosmes tinums.

Izanalizējot zināmo pašierosmes procesa uzlabošanas paņēmieni [64] priekšrocības un trūkumus, tika piedāvāts nodrošināt sākotnējo ģeneratora pašierosināšanu ar strāvas impulsu, kas uzmagnezē ierosmes sistēmu. Šī metode ļauj neizmantojot speciālo ārējo barošanas avotu, kas tiek izmantots tikai pašierosmes procesa sākumā, kā arī regulēt ierosmes strāvu, izmantojot shēmu ar vadāmo taisngriezi vai shēmu ar nevadāmo taisngriezi un pazeminošo

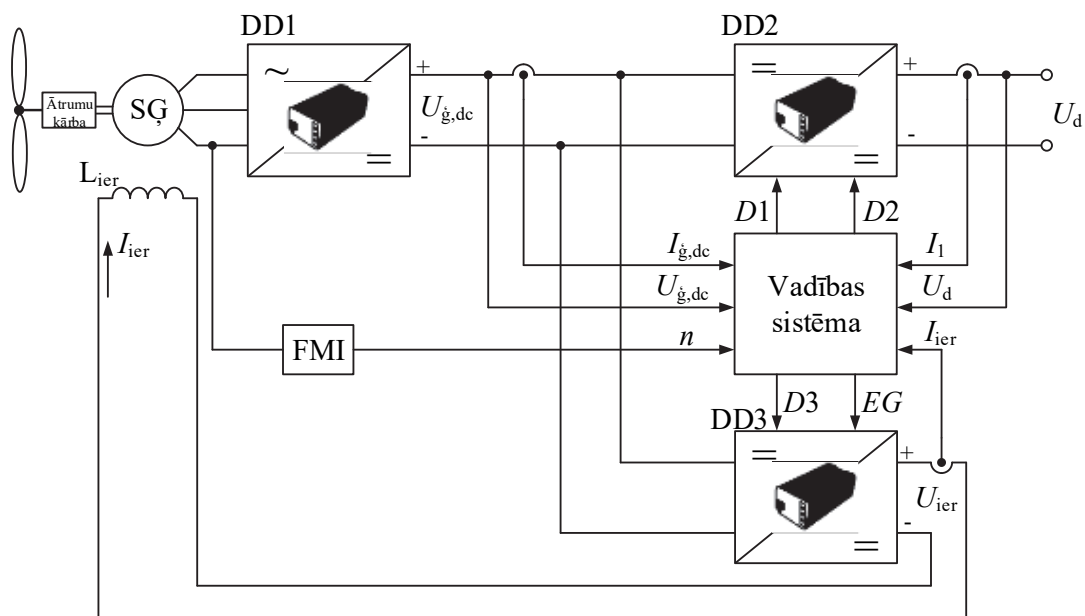
līdzstrāvas/līdzstrāvas pārveidotāju [121]–[123], [125], [145]. Strāvas impulss tiek veidots, izlādējot kondensatoru C1 ierosmes ķēdē, pie tam pats kondensators C1 var tikt uzlādēts, izmantojot mazjaudas elektronisko ģeneratoru. Eksperimenti [122] parādīja pašierosmes procesa attīstību jau pie ātrumiem, kas ir zemāki par nominālo ātruma diapazonu (3.7. attēls).



3.7. attēls. Pētāmā ģenerators ierosmes sistēmas pārveidotāja ieejas sprieguma un ierosmes strāvas eksperimentālās diagrammas pašierosmes procesa gaitā.

Pašierosinātā sinhronā ģenerators sasaiste ar līdzstrāvas kopni

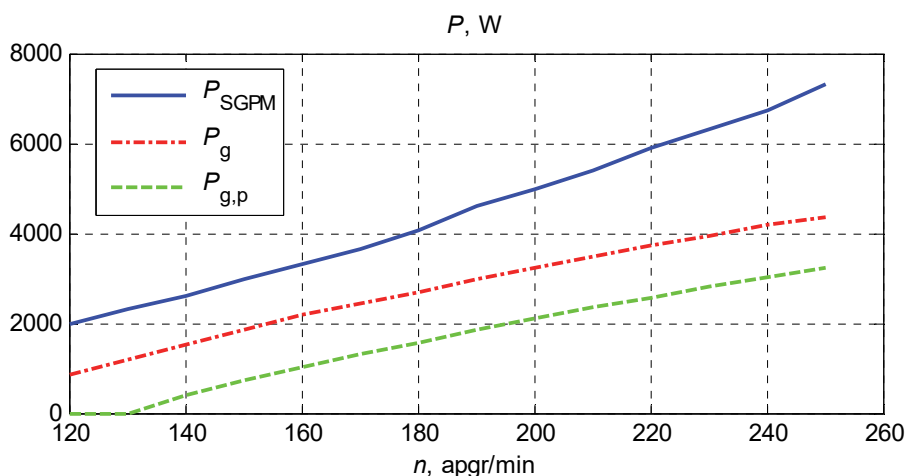
Sinhronā ģenerators ar regulējamo ierosmi sasaisti ar līdzstrāvas kopni ir iespējams veikt pēc blokshēmas (3.1. a. attēls), papildinot to ar pašierosmes pārveidotāju DD3 (3.8. attēls).



3.8. attēls. SĢ ar neatkarīgo ierosmi un līdzstrāvas kopnes sasaistes sistēmas blokshēma:

DD1 – nevadāmais taisngriezis; DD2 – līdzstrāvas–līdzstrāvas pārveidotājs; DD3 – SĢ pašierosmes sistēma; FMI – frekvences mērīšanas ierīce; D1–D3 – tranzistoru vadības signāli; EG – elektroniskā ģenerators vadības signāls.

Pie nominālās ierosmes strāvas un ierosmes tinuma pretestības $2,85 \, \Omega$ ierosmes jauda ir vienāda ar 1140 W, kas ir gandrīz 23 % no nominālās jaudas. Pie maziem ģenerators ātrumiem nepieciešamā ierosmes jauda pārsniedz jaudu, ko var attīstīt ģenerators, tāpēc patērētājam pieejamā jauda pie maziem ātrumiem pieņemta vienāda ar 0 (3.9. attēls).



3.9. attēls. Pētāmā pašierosinātā ģenerators nominālā jauda P_g un pieejamā jauda $P_{g,p}$ salīdzinājumā ar SGPM nominālo jaudu P_{SGPM} .

Kā redzams 3.9. attēlā, šī darba 3.2. apakšnodaļā apskatītā SGPM jaudas līkne atrodas krietni augstāk par pētāmā SG ar neatkarīgo ierosmi jaudas līkni, īpaši, ievērojot jaudas zudumus uz ierosmi. Tāpēc tika secināts, ka pētāmām sinhronam ģeneratoram ar neatkarīgās ierosmes tinumu ierosmes jauda ir nesamērīgi liela attiecībā pret ģenerators nominālo jaudu. Tāpēc tā lietošana vēja turbīnā kopā ar pašierosmes sistēmu nav izdevīga, jo patērētājam pieejamā jauda ir krietni mazāka par uzstādīto, kas rada arī darba ātruma diapazona samazinājumu salīdzinājumā ar SGPM ar vienlīdzīgu uzstādīto jaudu.

Secinājumi par nodaļu

Sinhronā ģenerators sasaiste ar līdzstrāvas kopni tiek nodrošināta, lietojot pazeminoši-paaugstinošu līdzstrāvas-līdzstrāvas pārveidotāju, kas tika izvēlēts pētāmā ģenerators tehnisko parametru dēļ. Pārveidotāja vadības sistēma balstās uz vēja ģenerators optimālās strāvas uzdošanas un pārveidotāja aizpildījuma koeficienta pielāgošanas metodēm. Pētāmām sinhronām ģeneratoram ar pastāvīgiem magnētiem minimālais ātrums, sākot ar kuru ģenerators var darboties ar 600 V līdzstrāvas kopni, ir 18,5 apgr./min.

Aprēķini un praktiskie eksperimenti parādīja izstrādātu algoritmu atbilstību pārveidotāja uzdevumam, līdz ar to izveidotā sistēma var tikt izmantota mikrotīkla salāgošanai ar ārējo maiņsprieguma tīklu.

Pašierosmes procesa izpēte sinhronā ģeneratorā ar neatkarīgo ierosmi parādīja, ka noteiktos gadījumos pastāv nepieciešamība uzlabot sākuma pašierosmi zema paliekošā magnētisma līmeņa dēļ. Tika izstrādāta metode, kas ļauj uzlabot ģenerators sākuma pašierosmi, neveicot ģenerators konstruktīvas izmaiņas un neizmantojot ārējo barošanas avotu. Sākotnējā ģenerators pašierosināšana tiek nodrošināta ar strāvas impulsu no kondensatora, kas uzmagnetizē ierosmes sistēmu. Tika izstrādāts sinhronā ģenerators pašierosmes sistēmas prototips, eksperimentāli sasniegta ģenerators pašierosināšana, sākot ar ātrumu 100 apgr./min, tomēr pie tāda ātruma nevar nodrošināt nominālo ierosmes strāvu, kas ir vienāda ar 20 A, jo pie ātruma, kas ir zemāks par 130 apgr./min, nominālā ierosmes jauda pārsniedz ģenerators attīstīto jaudu.

Līdz ar to pētāmām SĢ ar neatkarīgo ierosmi, kas darbojas ar pašierosmes sistēmu, minimālais ātrums, sākot ar kuru patērētājam kļūst pieejama ģenerators izejas jauda, ir 130 apgr./min pie maksimālā darba ātruma 300 apgr./min. Pie nominālās ierosmes strāvas ierosmes jauda ir vienāda ar 1140 W, kas ir 23 % no attīstītās jaudas pie ātruma 300 apgr./min un 57 % no attīstītās jaudas pie ātruma 160 apgr./min.

Ievērojot iepriekšminēto, secināts, ka sinhrono ģeneratoru ar neatkarīgo ierosmi var izmantot vēja turbīnās, tam darbojoties pašierosmes režīmā, ja tiek veikti pasākumi sākotnējās pašierosmes veicināšanai, kā arī, ja to ierosmes nominālā jauda ir samērīga pret ģenerators nominālo. Pretējā gadījumā ir konstatēts būtisks darba ātrumu diapazona samazinājums salīdzinājumā ar pētāmo sinhrono ģeneratoru ar pastāvīgiem magnētiem. Pamatojoties uz pētījuma rezultātiem, sinhronie ģeneratori ar pastāvīgiem magnētiem tiek uzskatīti par labāk piemērotiem izmantošanai mazas jaudas mikrotīklos.

4. SINHRONĀ ĢENERATORA AUTOMATIZĀCIJAS SISTĒMAS PRINCIPU IZVEIDE

Aktīvā taisngrieža vadība līdzstrāvas mikrotīklā

Pieņemot, ka $I_{g,dc} = I_{g,dc,max} = 10 \text{ A}$ un $U_d = U_{d,nom} = 600 \text{ V}$, ģenerators pārveidotāja strāva var tikt aprēķināta šādi:

$$I_1 = \frac{I_{g,dc} U_{g,dc}}{U_d} = \frac{U_{g,dc}}{60} = \frac{k_{dc} n - R_g I_{g,dc}}{60}. \quad (4.1.)$$

Strāva, kas jāiegūst no vēja ģenerators pārveidotāja, ir vienāda ar:

$$I_1 = \frac{k_{dc} n}{60 + \frac{R_g D1}{(1 - D2)}}, \text{ A}. \quad (4.2.)$$

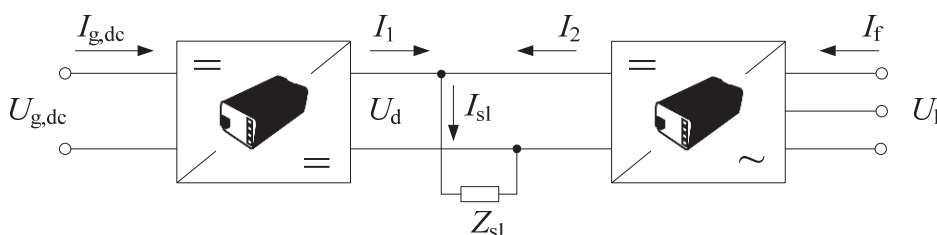
No sadales tīkla iegūta (invertētā) strāva (4.1. attēls) ir vienāda ar:

$$I_2 = I_{sl} - I_1, \text{ A}, \quad (4.3.)$$

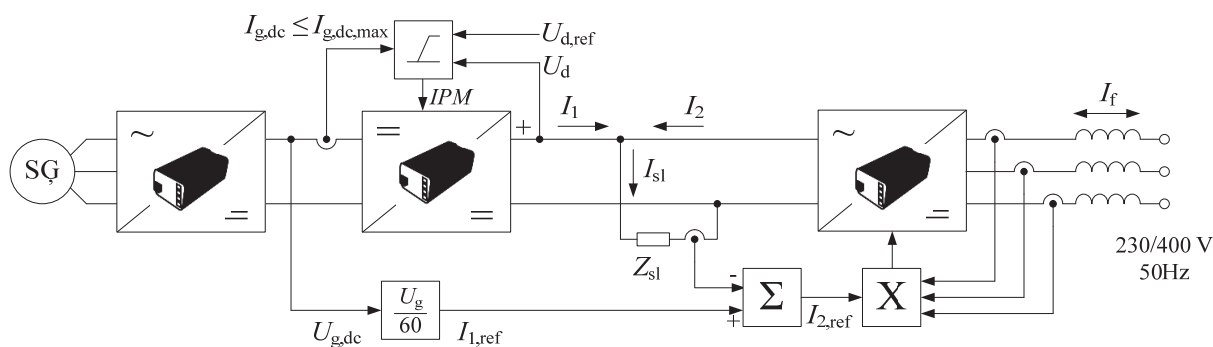
kur I_{sl} – slodzes strāva, A.

Līdzstrāvas mikrotīkla simulācijai tiek izvēlēta aktīvā taisngrieža vadība pēc strāvas [65]. Ja slodzes strāva ir lielāka par I_1 , no aktīvā taisngrieža jāņem strāva ar pozitīvu zīmi, ja mazāka, tīklā var nodot strāvu starpību ar negatīvu zīmi. Aktīvā taisngrieža references strāvas $I_{2,ref}$ noteikšanas blokshēma parādīta 4.2. attēlā. Sadales tīkla fāzes strāvas amplitūda tiek uzstādīta vienāda ar:

$$I_{f,m} = \frac{2I_2}{\sqrt{3}}, \text{ A}. \quad (4.4.)$$

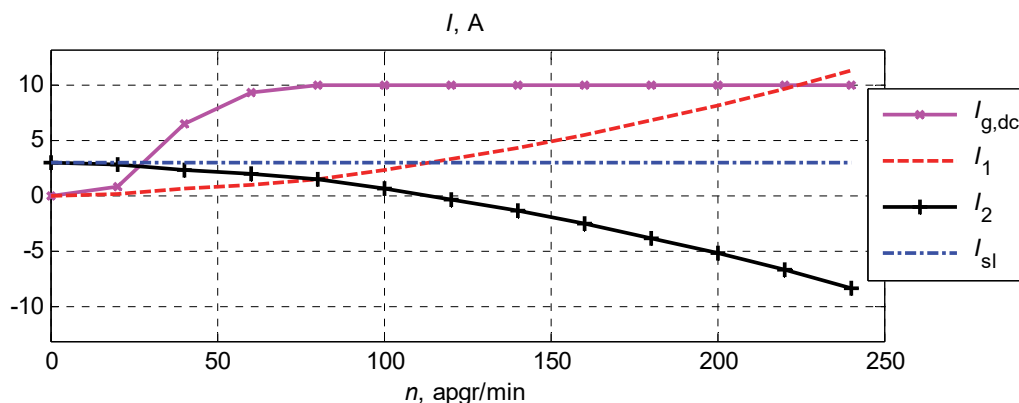


4.1. attēls. Līdzstrāvas kopnes darbība ar maiņsprieguma tīklu: $U_{g,dc}$ – vēja ģenerators izejas līdzspriegums; U_d – kopnes līdzspriegums; U_1 – maiņsprieguma tīkla līnijas spriegums; Z_{sl} – slodzes pretestība; $I_{g,dc}$ – vēja ģenerators izejas strāva; I_1 – vēja ģenerators pārveidotāja izejas strāva; I_f – maiņsprieguma tīkla fāzes strāva; I_2 – aktīva taisngrieža izejas strāva; I_{sl} – slodzes strāva

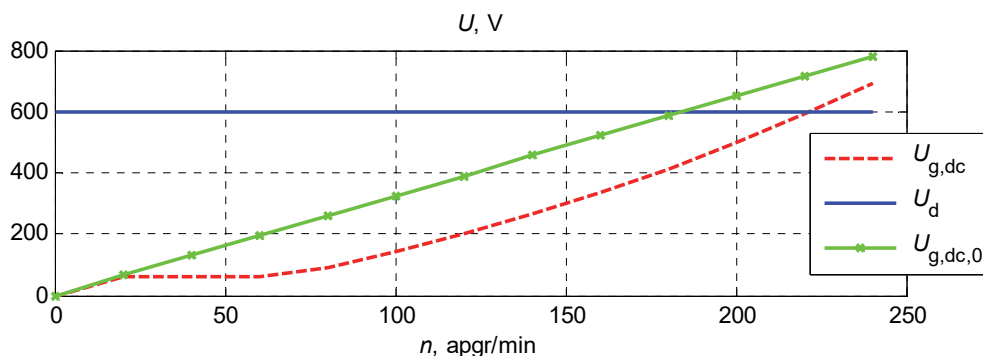


4.2. attēls. Aktīvā taisngrieža strāvas noteikšana.

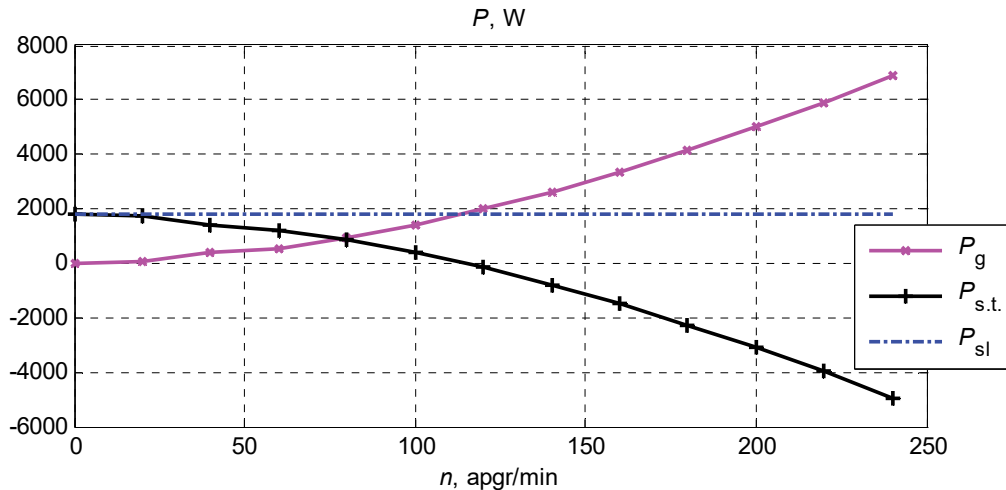
Strāvu sadalījums atbilstoši shēmai (4.1. attēls) slodzei $200\ \Omega$ parādīts 4.3. attēlā. Ģenerators līdzspriegums (zem slodzes un tukšgaitā) pie uzdota kopnes sprieguma 600 V parādīts 4.4. attēlā, no kura izriet, ka ātrums n_2 (3.2. attēls) dotajam ģeneratoram ir aptuveni vienāds ar 222 apgr./min , ja ģenerators darbojas ar nominālo strāvu 10 A , un nominālais kopnes spriegums ir vienāds ar 600 V . Iegūtā ģenerators jauda, sadales tīkla jauda un slodzes jauda parādītas 4.5. attēlā, kas norāda uz to, ka no ātruma apm. 118 apgr./min pie slodzes $200\ \Omega$ ģenerators sāk atdot enerģiju sadales tīklā, uz ko norāda jaudas $P_{s.t.}$ negatīvās vērtības.



4.3. attēls. Uz vēja enerģijas balstītā līdzstrāvas mikrotīkla darbības ar maiņsprieguma tīklu simulācijas rezultāti: $I_{g,dc}$ – vēja ģenerators izejas strāva; I_1 – vēja ģenerators pārveidotāja izejas stāva; I_2 – aktīva taisngrieža izejas strāva; I_{sl} – slodzes strāva.



4.4. attēls. Uz vēja enerģijas balstītā līdzstrāvas mikrotīkla darbības ar maiņsprieguma tīklu simulācijas diagrammas: $U_{g,dc}$ – vēja ģenerators izejas līdzspriegums; U_d – kopnes līdzspriegums; $U_{g,dc,0}$ – vēja ģenerators izejas līdzspriegums tukšgaitā.

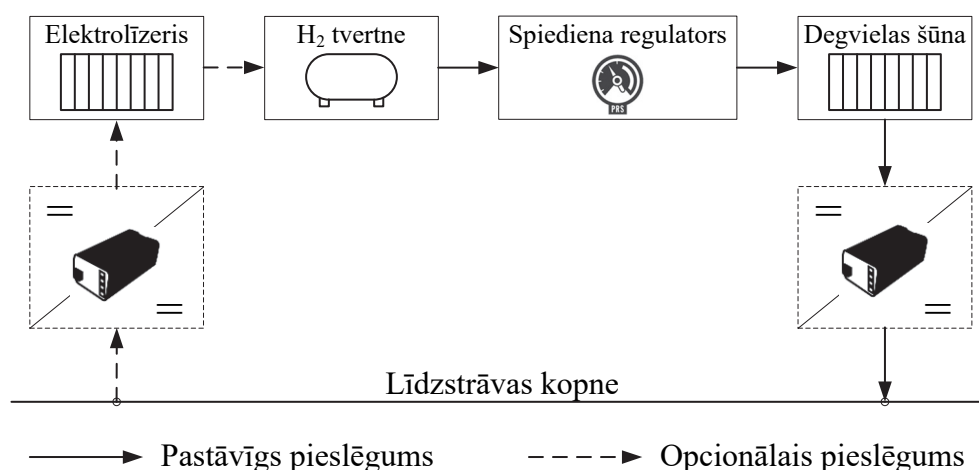


4.5. attēls. Uz vēja enerģijas balstītā līdzstrāvas mikrotīkla darbības ar maiņsprieguma tīklu simulācijas diagrammas: P_g – vēja ģenerators jauda; $P_{s.t.}$ – sadales tīkla jauda; P_{sl} – slodzes jauda.

Nepārtrauktās elektroapgādes nodrošināšanas problēma

Nepārtraukto elektroapgādi centralizētā elektroapgādes tīkla avārijas gadījumā vai autonomā mikrotīklā var nodrošināt ar enerģijas uzkrājēju sistēmām. Enerģijas uzkrājēju sistēmu izpētei ir veltīti vairāki pētījumi, tajā skaitā [126], [147]–[149]. Katrai sistēmai ir savi raksturojumi un līdz ar to savas priekšrocības un trūkumi. Akumulatora baterijām ir mazāka īpatnējā jauda (W/kg) salīdzinājumā ar superkondensatoriem. No otras puses, superkondensatoriem ir mazāka īpatnējā enerģija (Wh/kg) salīdzinājumā ar akumulatoriem. Tāpēc EUS izvēle ir atkarīga gan no konkrēta uzdevuma, gan no izmantojamā jaudas diapazona. Viens no enerģijas uzkrājēju veidiem ir ūdeņraža enerģijas uzkrājēji.

Ūdeņraža enerģijas uzkrājēju sistēmas pamata komponentes [106], [149] parādītas 4.6. attēlā. Elektrolīzeris [83] un degvielas šūna tiek pieslēgti līdzstrāvas kopnei caur atbilstošiem pārveidotājiem, bet elektrolīzeris var tikt izslēgts no sistēmas, un tvertne tiek apskatīta kā ierobežota ūdeņraža daudzuma avots [149].



4.6. attēls. Ūdeņraža enerģijas uzkrājēja pieslēgums līdzstrāvas kopnei.

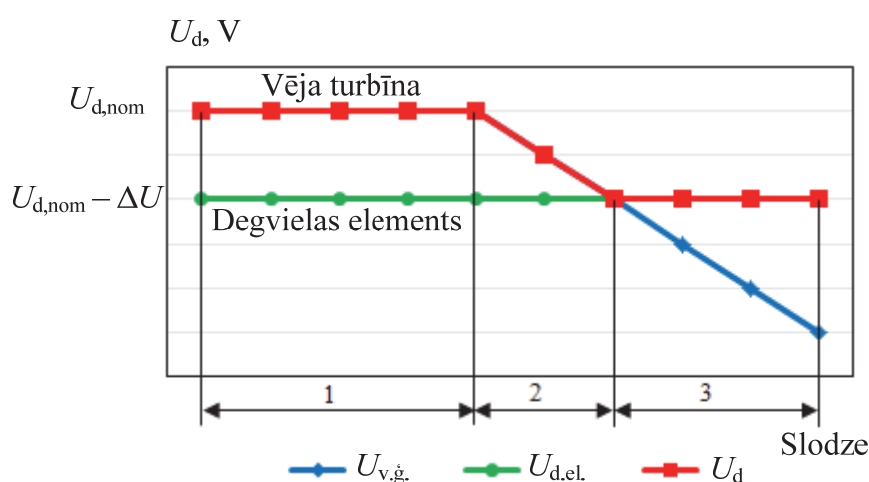
Lai nodrošinātu automātisko pārslēgšanos uz ūdeņraža enerģiju, kad vēja jauda nav pietiekama, vēja ģenerators pārveidotāja izejas spriegums tiek stabilizēts uz vērtību $U_{dc,nom}$ V

(intervāls „1”, 4.17. attēls), un gadījumā, kad slodzes jaudas pieprasījums pieaug vai vēja ātrums būtiski samazinās, šī sprieguma vērtība sāk samazināties (intervāls „2”, 4.17. attēls). Intervālā „1” ir iespējams vēja enerģijas pārpalikums. Jauda P_{H2} , kas ir pieejama ūdeņraža ražošanai, ir vienāda ar vēja jaudas un slodzes jaudas starpību:

$$P_{H2} = P_v - P_{sl}, \quad (4.5.)$$

kur P_v – vēja ģenerators jauda, W;
 P_{sl} – slodzes jauda, W.

Degvielas elementa izejas spriegums ir stabilizēts uz zemāko vērtību $[(U_{dc,nom} - \Delta U) \text{ V}]$. Avots ar lielāku spriegumu nodrošinās elektrisko jaudu intervālos „1” un „2”, un abi divi avoti var nodrošināt jaudu intervālā „3”. Minēti intervāli nepārtraukti mainās atkarībā no vēja ātruma.



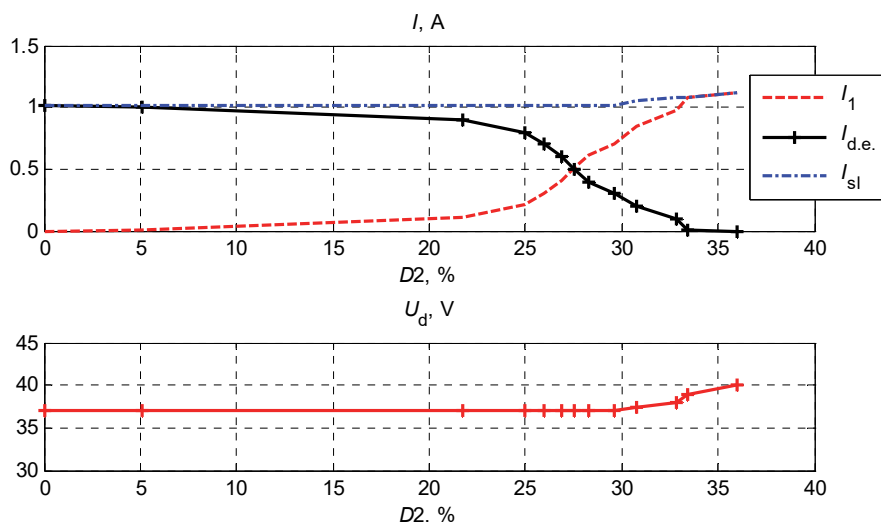
4.7. attēls. Sprieguma/slodzes raksturlīknes: $U_{v.ġ.}$ – vēja ģenerators spriegums;
 $U_{d.el.}$ – degvielas elementa spriegums; U_d – līdzstrāvas kopnes spriegums.

Intervālā “3” slodzes strāva ir vienāda ar:

$$I_{sl} = I_1 + I_{d.e.}, \quad A, \quad (4.6.)$$

kur I_{sl} – slodzes strāva, A;
 I_1 – vēja ģenerators pārveidotāja strāva, A;
 $I_{d.e.}$ – degvielas elementa strāva, A.

Eksperimenti [149] samazinātā mērogā tika veikti līdzstrāvas kopnei ar nominālo spriegumu 40 V bez elektrolīzera, un to mērķis bija pārbaudīt, vai ir iespējams sasniegt nepieciešamo strāvu sadalījumu starp pamata enerģijas avotu un degvielas elementu pēc (4.6.), izmantojot pārveidotāja aizpildījuma koeficienta pielāgošanas metodi, kas arī tika sasniegts (4.8. attēls).



4.8. attēls. Strāvas un līdzstrāvas kopnes spriegums atkarībā no līdzstrāvas–līdzstrāvas pārveidotāja aizpildījuma koeficienta $D2$.

Secinājumi par nodaļu

Uz vēja enerģiju balstītā līdzstrāvas mikrotīkla salāgošanai ar ārējo maiņstrāvas tīklu tika piedāvāta sistēma, kas balstās uz aktīva taisngrieža vadības pēc vēja iekārtas un slodzes strāvu starpības. Atbilstoši piedāvātajam vadības principam tika aprēķināta un ar datormodelēšanas rezultātiem apstiprināta optimālā strāvas līkne pētāmajam sinhronajam ģeneratoram ar pastāvīgiem magnētiem.

Autonomā darbības režīmā mikrotīklā ir nepieciešams ieviest enerģijas uzkrājēju sistēmu vai rezerves barošanas avotu, kas nodrošinās nepārtraukto slodzes elektroapgādi gadījumā, kad to nevar nodrošināt bāzes avots. Ūdeņraža degvielas elements ir viena no iespējam nodrošināt nepārtraukto elektroapgādi līdzstrāvas mikrotīklā. Degvielas elementam nepārtraukti jāatrodas ieslēgtā stāvoklī, jo laiks, kas ir nepieciešams, lai ūdeņraža degvielas elements pārietu no gaidīšanas režīma darba režīmā, var sasniegt 5 s. Samazinātā mērogā eksperimenti pie līdzstrāvas kopnes nominālā sprieguma 40 V un degvielas elementa sprieguma 37 V parādīja iespēju sadalīt slodzes jaudu starp diviem avotiem atbilstoši pieejamai vēja enerģijai, kas savukārt liecina par izvēlēto vadības principa piemērotību dotajos apstākļos. Turpmākos pētījumos vai praktiskajā realizācijā enerģijas uzkrājējus sistēmā jāizvēlas un jāpārbauda atkarībā no slodzes rakstura un jaudas diapazona.

Datormodelēšana un praktiskie eksperimenti liecina par vadības principu korektu darbību. Piedāvātā metode ļauj pilnībā izmantot vēja turbīnas ģenerēto enerģiju plašā ātrumu diapazonā, nepieciešamības gadījumā ņemot trūkstošo enerģiju no maiņstrāvas tīkla vai pārvadot neizmantoto enerģiju tīklā pie pastāvīga līdzstrāvas kopnes sprieguma.

5. VĒJA TURBĪNU EKONOMISKĀS EFEKTIVITĀTES NOVĒRTĒŠANA

Vēja turbīnas izmaksu atmaksāšanās un peļņas gūšanas iespējas

Vēja ietaises ikgadēja ekonomiskā efektivitāte tiek aprēķināta, izmantojot īpatnējo ikgadējas enerģijas ražošanas ekonomiskās efektivitātes rādītāju $C_{v,kop}^*$:

$$\begin{cases} C_{v,kop}^* = \alpha(1-\beta)T_{an}C_{kWh,tirgus} - k_a C_{kW}, & \beta \leq 1, \\ C_{v,kop}^* = \alpha(1-\beta)T_{an}C_{kWh,s.t.} - k_a C_{kW}, & \beta > 1, \end{cases} \quad (5.1.)$$

Ja $C_{v,kop}^* = 0$, ieguldījumi vēja turbīnas uzstādīšanā gada laikā, ieskaitot ekspluatācijas izdevumus, ir vienādi ar ienākumu no enerģijas pārdošanas sadales tīklā, tātad, ja $C_{v,kop}^* > 0$, tiek konstatēta peļņa no ieguldījumiem. $C_{v,kop}^* < 0$ ir iespējams trijos gadījumos:

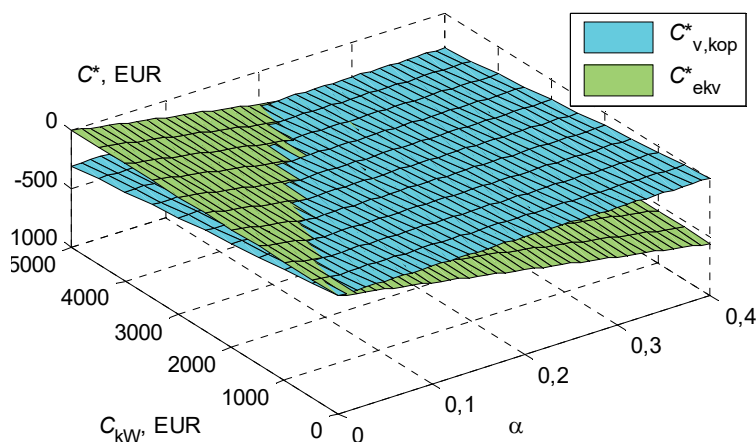
- ienākumi no enerģijas pārdošanas sadales tīklā ir mazāki nekā vēja turbīnas gada izmaksas ($P_{s.t.,vid} > 0$ W);
- enerģija netiek pārdota sadales tīklā ($P_{s.t.,vid} = 0$ W);
- vēja turbīnas saražotās enerģijas nepietiek, lai nodrošinātu slodzes pieprasījumu, un enerģija tiek pirktā no sadales tīkla ($P_{s.t.,vid} < 0$ W).

Īpatnējais ikgadējo ekvivalento izmaksu rādītājs ir atkarīgs no slodzes enerģijas izmaksām par sadales tīkla cenu:

$$C_{ekv}^* = -\alpha\beta T_{an} C_{kW,s.t.}, \text{ EUR}, \quad (5.2.)$$

kur reizinājums $\alpha\beta$ apzīmē vidējo slodzes jaudu $P_{sl,vid}$, reducētu uz vēja turbīnas nominālo jaudu, un zīme „-” norāda uz izdevumiem.

Vēja turbīnas saražotā enerģija būs lētāka par sadales tīkla enerģiju gadījumā, ja $C_{v,kop}^* > C_{ekv}^*$, un šis nosacījums ir atkarīgs no α un C_{kW} (5.1. attēls). Punktos, kuros virsma $C_{v,kop}^*$ atrodas augstāk par virsmu C_{ekv}^* , ikgadējas izmaksas par vēja turbīnas uzstādīšanu ir mazākas nekā izmaksas par atbilstošu enerģijas daudzumu, pirktu no sadales tīkla.



5.1. attēls. Īpatnēja ikgadēja enerģijas ražošanas ekonomiskās efektivitātes rādītāja salīdzināšana ar īpatnējo ekvivalento izmaksu rādītāju pie $\beta = 1$.

Minimālais vēja jaudas izmantošanas koeficients $\alpha_{\min}$ parāda, kad vēja turbīnas saražotā enerģija kļūst lētāka par sadales tīkla enerģiju. Ja slodzes patēriņš ir lielāks nekā vēja turbīna spēj saražot ($\beta > 1$), enerģijas deficīts tiek kompensēts, iegādājoties enerģiju no sadales tīkla, šajā gadījumā:

$$\alpha_{\min} = \frac{k_a C_{kW}}{T_{an} C_{kWh,s,t.}}. \quad (5.3.)$$

Ja slodzes patēriņš ir mazāks par vēja turbīnas saražotās enerģijas daudzumu ($\beta < 1$) un enerģijas pārpalikums netiek pārvadīts sadales tīklā, tiek definēta minimālā slodze $(\alpha\beta)_{\min}$, zem kuras vēja turbīnas izmantošana nav ekonomiski izdevīga:

$$(\alpha\beta)_{\min} = \frac{k_a C_{kW}}{T_{an} C_{kWh,s,t.}}. \quad (5.4.)$$

Ja slodzes patēriņš ir mazāks par vēja turbīnas saražotās enerģijas daudzumu ($\beta < 1$) un enerģijas pārpalikums tiek pārvadīts sadales tīklā, vēja turbīnas izmantošana var kalpot tādiem mērķiem kā lētākas enerģijas iegūšana, salīdzinājumā ar iegādi no sadales tīkla, vai ieguldījumu atmaksāšanās un peļņas gūšana.

Minimālais vēja jaudas izmantošanas koeficients $\alpha_{\min}$, kas nepieciešams ekonomiskā efekta sasniegšanai, ir vienāds:

$$\alpha_{\min} = \frac{k_a C_{kW}}{(1-\beta)T_{an} C_{kWh,tirgus} + \beta T_{an} C_{kW,s,t.}}. \quad (5.5.)$$

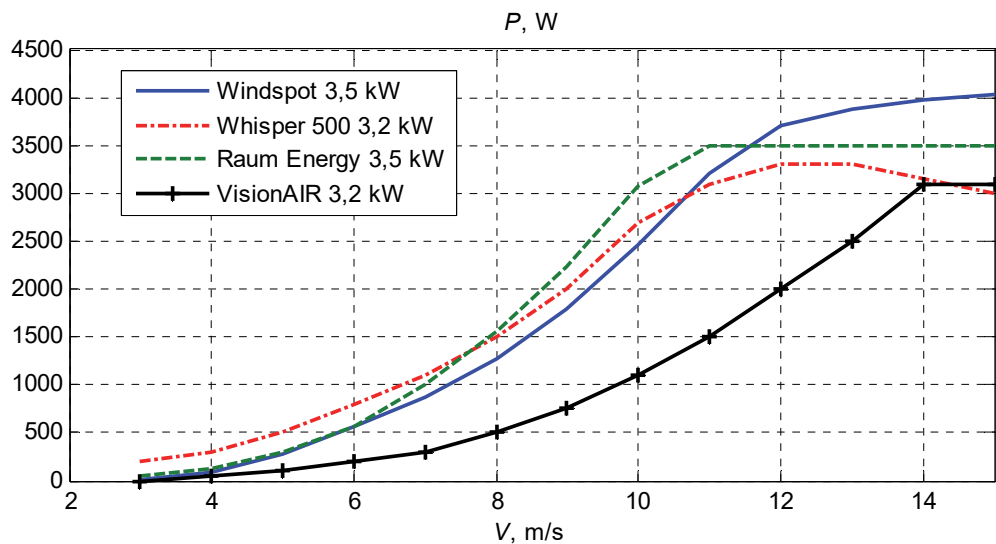
Ja $C_{v,kop}^* \geq 0$, tiek konstatēta peļņa no ieguldījumiem vēja turbīnas uzstādīšanā. Šajā gadījumā tiek noteikta vēja turbīnas jaudas sadalījuma koeficienta maksimālā vērtība $\beta_{\max}$, līdz kurai izpildās peļņas nosacījums:

$$\beta_{\max} = 1 - \frac{k_a C_{kW}}{\alpha T_{an} C_{kWh,tirgus}}. \quad (5.6.)$$

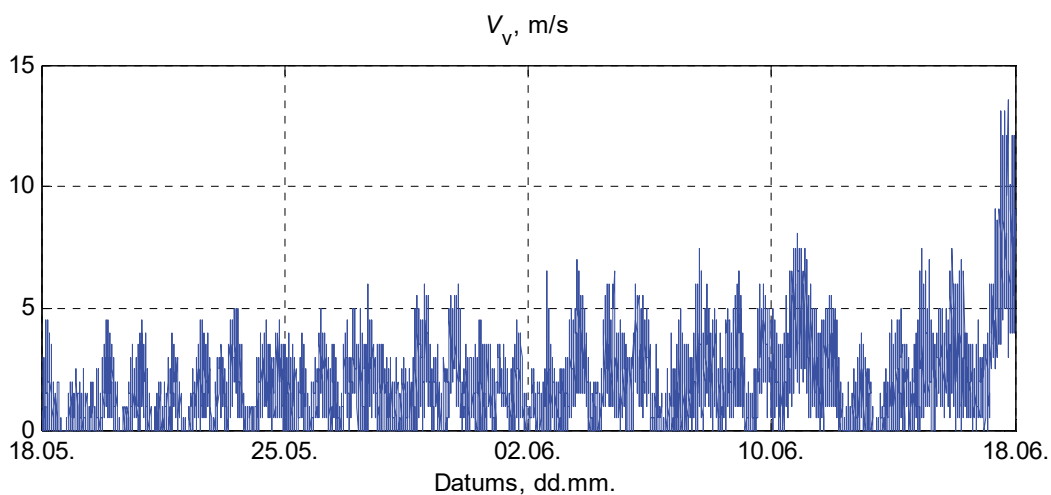
Saražotās enerģijas cenas aprēķins

Vēja turbīnu vidēja saražotā teorētiskā jauda tiek aprēķināta, balstoties uz jaudas līknēm (5.2. attēls) un faktiskā vēja ātruma grafika (5.3. attēls), kas tiek nomērīts noteiktā laika periodā.

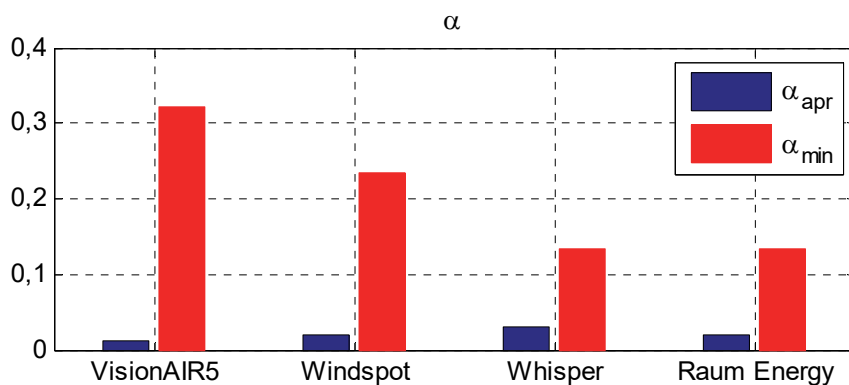
No teorētiskas vēja turbīnu vidējās jaudas un turbīnu cenām tika aprēķināti vēja turbīnas jaudas izmantošanas koeficients dotajos apstākļos un minimālais nepieciešamais vēja turbīnas jaudas izmantošanas koeficients (5.4. attēls). Starpība starp enerģijas, kas iegūta no vēja turbīnām, cenu un sadales tīkla enerģijas cenu parādīta 5.5. attēlā.



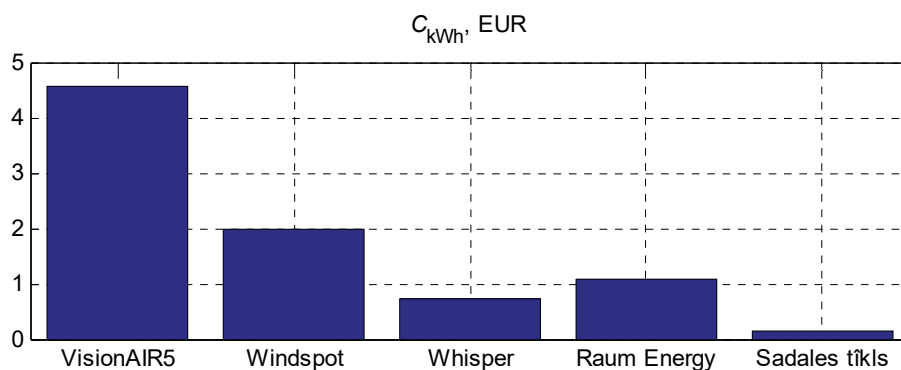
5.2. attēls. Dažādu 3,2 kW un 3,5 kW vēja turbīnu jaudas līknes.



5.3. attēls. Vēja ātrums virs RTU EEF ēkas laika periodā no 18.05.2016. plkst. 12 līdz 18.06.2016. plkst. 11.59.



5.4. attēls. Dažādu vēja turbīnu teorētiskais aprēķinātais vēja jaudas izmantošanas koeficients α_{apr} saskaņā ar vēja ātrumu virs RTU EEF ēkas salīdzinājumā ar minimālo nepieciešamo vēja jaudas izmantošanas koeficientu α_{min} .



5.5. attēls. Dažādu vēja turbīnu saražotās enerģijas teorētiskās cenas par 1 kWh saskaņā ar vēja ātrumu virs RTU EEF ēkas salīdzinājumā ar sadales tīkla enerģijas cenu.

NETO norēķinu sistēmas analīze Latvijas Republikā

Elektroenerģijas cenu katrai Latvijas mājsaimniecībai veido trīs galvenās sastāvdaļas: sadales operatora pakalpojums, obligātā iepirkuma komponente (OIK) un maksa par elektroenerģiju. Katrai mājsaimniecībai ir jāmaksā par sadales operatora pakalpojumiem un OIK atbilstoši patērētam no tīkla enerģijas daudzumam (60 % no kopējās cenas). Maksājums par elektroenerģiju tiek aprēķināts pēc Neto principa. Kopējais ekvivalents enerģijas daudzums, par kuru ir jāveic maksājums, ir:

$$E_{ekv} = 0,6E_{s.t.,pat} + 0,4E_{neto} = E_{s.t.,pat} - 0,4E_{s.t.,nod}, \quad (5.7.)$$

kur E_{neto} – elektroenerģijas daudzums, par kuru ir jāveic maksājums, kWh;
 $E_{s.t.,pat}$ – patērētās no tīkla enerģijas daudzums, kWh;
 $E_{s.t.,nod}$ – nodotās tīklā enerģijas daudzums, kWh.

Secinājumi par nodaļu

Vēja turbīnas ekonomiskā efektivitāte tiek novērtēta, izmantojot enerģijas ražošanas ekonomiskās efektivitātes rādītāju, kas norāda uz peļņu no ieguldījumiem (pozitīvās vērtības), zaudējumiem (negatīvās vērtības) vai uz ieguldījumu un ienākumu vienlīdzību (vienāds ar 0).

Vēja turbīnu ekonomiskās efektivitātes aprēķins konkrētam objektam parādīja, ka apskatīto 3,2–3,5 kW vēja turbīnu enerģija būs 4,4–28,4 reizes dārgāka nekā enerģija, kas iepirkta no sadales tīkla.

Tika izanalizēta NETO norēķinu sistēmas lietošana Latvijas Republikā, kas tiek izmantota mikroģeneratoru pieslēgšanas gadījumā. Tīkla operatora noteikumi ievērojami apgrūtina vēja turbīnu ekonomiskās efektivitātes novērtēšanu. Lai aprakstītu vēja turbīnu ekonomisko efektivitāti dotajos apstākļos, tika ieviests radītājs E_{ekv} – kopējais ekvivalents enerģijas daudzums, par kuru ir jāveic maksājums. Pie vienāda vēja enerģijas ražošanas daudzuma ekvivalentās enerģijas vērtība var mainīties, un ir stohastisks lielums, jo ir atkarīga no vēja enerģijas daudzuma, kas tika patērēts ar slodzi nepastarpināti, t. i., bez uzkrāšanas sadales tīklā. Minimālā ekvivalentās enerģijas vērtība var tikt sasniegta pie maksimāli iespējamiem ģenerētiem un nepastarpināti patērētās vēja enerģijas daudzuma.

SECINĀJUMI

1. Atjaunojamo enerģijas resursu lietošanas stratēģisko mērķu sasniegšanai un atbilstošo normatīvo aktu izpildei, kā arī efektīvākai – salīdzinājumā ar esošo pieslēgumu shēmu – vēja enerģijas izmantošanai nelielās saimniecībās piedāvāts izmantot uz līdzstrāvu balstīto mikrotīklu ar nominālo spriegumu 600 V un sinhrono ģeneratoru ar pilnu energoelektronisko pārveidošanu kā bāzes avotu.
2. Sinhronā ģeneratora līdzstrāvas–līdzstrāvas pārveidotāja vadības sistēma balstās uz vēja ģeneratora optimālās strāvas uzdošanas un pārveidotāja aizpildījuma koeficienta pielāgošanas metodēm.
3. Ievērojot pastāvīgo magnētu sinhrono ģeneratoru īpašības, tie uzskatāmi par labāk izmantojamiem mazas jaudas mikrotīklos nekā sinhronie ģeneratori ar neatkarīgo ierosmi. Pētāmajam sinhronam ģeneratoram ar pastāvīgiem magnētiem minimālais ātrums, sākot ar kuru ģenerators var darboties ar 600 V līdzstrāvas kopni, ir 18,5 apgr./min.
4. Pētāmajam sinhronam ģeneratoram ar neatkarīgo ierosmi pie ātruma zemāka par 130 apgr./min nominālā ierosmes jauda pārsniegs ģeneratora attīstīto jaudu. Pie nominālās ierosmes strāvas ierosmes jauda ir vienāda ar 1140 W, kas ir 23 % no attīstītās jaudas pie ātruma 300 apgr./min un 57 % no attīstītās jaudas pie ātruma 160 apgr./min. Sinhrono ģeneratoru ar neatkarīgo ierosmi var izmantot vēja turbīnās, tam darbojoties kopā ar pašierosmes sistēmu, ja tiek veikti pasākumi sākotnējās pašierosmes veicināšanai, kā arī, ja to ierosmes nominālā jauda ir samērīga pret ģeneratora nominālo.
5. Uz vēja enerģiju balstītās elektroapgādes sistēmās automatizācijas uzdevums ir izpildīts, izmantojot uz līdzstrāvu balstīta mikrotīkla salāgošanai ar ārējo maiņstrāvas tīklu aktīvo taisngriezi, kura vadības sistēma balstās uz vēja ietaises līdzstrāvas–līdzstrāvas pārveidotāja maksimāli iespējamo ģenerēto strāvu, ko novērtē pēc ģeneratora tekošā sprieguma dalījuma ar pārveidošanas konstanti principa, un slodzes strāvas starpību, kas paredz operatīvu divvirzienu enerģijas pārvadi ar centralizēto elektroapgādes tīklu, tādā veidā nodrošinot gandrīz nulles enerģijas ēku koncepcijas izpildi.
6. Izveidotās mikrotīkla shēmas datormodelēšana uzrādīja pozitīvus rezultātus plašā ģeneratora vārpstas rotācijas diapazonā, pie tam nodrošinot ģeneratora pastāvīgu darbību ar nominālo strāvu, tā apstiprinot pieņemto vadības principu adekvātumu, kas ļauj šādu sistēmu ieteikt izmantot arī plašam patērētāju lokam.
7. Vēja turbīnas ekonomiskā efektivitāte tiek novērtēta, izmantojot enerģijas ražošanas ekonomiskās efektivitātes rādītājus un konkrēto turbīnu jaudas līknes. Vēja turbīnu ekonomiskās efektivitātes aprēķins konkrētam objektam parādīja, ka apskatīto 3,2–3,5 kW vēja turbīnu saražotā enerģija būs 4,4–28,4 reizes dārgāka nekā enerģija, kas iepirkta no sadales tīkla.

8. Vēja turbīnas ekonomiskā efektivitāte ir atkarīga no centralizētā elektroapgādes tīkla operatora noteikumiem un elektroenerģijas norēķinu sistēmas. Lai aprakstītu vēja turbīnu ekonomisko efektivitāti Latvijas Republikā, tika ieviests kopējās ekvivalentās enerģijas radītājs, kas norāda uz enerģijas daudzumu, par kuru ir jāveic maksājums atbilstoši NETO norēķinu sistēmai un elektroapgādes tīkla operatora noteikumiem. Pie vienāda vēja enerģijas ražošanas daudzuma ekvivalentās enerģijas vērtība var mainīties, un ir stohastisks lielums, jo ir atkarīga no vēja enerģijas daudzuma, kas tika patērēts ar slodzi nepastarpināti, t. i., bez uzkrāšanas sadales tīklā. Minimālā ekvivalentās enerģijas vērtība var tikt sasniegta pie maksimāli iespējamiem ģenerētas un nepastarpināti patērētās vēja enerģijas daudzuma.

LITERATŪRAS UN INFORMĀCIJAS AVOTI

- [1] Latvijas Republikas Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija, “Atjaunojamo energoresursu izmantošanas pamatnostādnes 2006.–2013. gadam (informatīva daļa),” Rīga, 2006. – 55 lpp.
- [2] Biomasas izmantošanas ilgtspējības kritēriju pielietošana un pasākumu izstrāde/ A. Adamovičs, V. Dubrovskis, I. Plūme u. c., Rīga: Valsts SIA Vides projekti, 2009. – 174 lpp.
- [3] Международное энергетическое агенство. *Возобновляемая энергия в России. От возможности к реальности.*, ОЭСР/МЭА, 2004. – 120 стр.
- [4] Renewable Microgrids: Profiles From Islands and Remote Communities Across the Globe/ K. Bunker, S. Doig, K. Hawley et al., 2015AKSFDHZXB.
- [5] The Microgrids Group at Berkeley Lab, “About Microgrids.” [Online]. Available: <https://building-microgrid.lbl.gov/about-microgrids-0>.
- [6] H. S. Kumar, “Smart microgrid.” 2015. – 32 p.
- [7] The Microgrids Group at Berkeley Lab, “Microgrid Definitions.” [Online]. Available: <https://building-microgrid.lbl.gov/about-microgrids-0>.
- [8] T. Roughan, “Workshop on Microgrid Technologies and Applications,” RPI Cent. Futur. Energy Syst. Overv., 2013. – 11 p.
- [18] S. Krohn, P.-E. Morthorst, S. Awerbuch, *The Economics of Wind Energy*, 2009. – 156 p.
- [19] 2013 Cost of Wind Energy Review/ C. Moné, A. Smith, B. Maples et al., National Renewable Energy Laboratory, 2015. – 94 p.
- [20] World Energy Perspective. Cost of Energy Technologies/ P. Gadonneix, Y. D. Kim, L. Birnbaum, et al., World Energy Council, 2013. – 48 p.
- [37] Characteristics of Wind Turbine Generators for Wind Power Plants/ E. H. Camm, M. R. Behnke, O. Bolado et al., University of Tennessee, 2009. – pp. 1–5.
- [64] G. Diļev, B. Ose-Zaļā, and E. Jakobson, “Self-Excitation of Low-Speed Inductor Generator,” *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, Jan. 2012, vol. 49, no. 4. – pp. 21–28.
- [65] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*. San Diego, California: Academic Press, 2001. – 895 p.
- [83] D. Connolly, “A Review of Energy Storage Technologies for the Integration of Fluctuating Renewable Energy,” no. August. University of Limerick, 2009. – pp. 1–46.
- [84] G. Zaleskis and I. Rankis, “Problem of an Estimation of the Wind Generators Economic Efficiency in Latvia,” in *Proceedings of the 20th International Conference ELECTRONICS 2016*, 2016. – pp. 16–21.
- [93] J. J. Gutierrez, J. Ruiz, P. Saiz, I. Azcarate, L. a Leturiondo, and A. Lazkano, “Power Quality in Grid-Connected Wind Turbines,” in *Wind Turbines*, D. I. Al-Bahadly, Ed. 2008. – pp. 547–570.
- [103] A. Sannino, G. Postiglione, and M. H. J. Bollen, “Feasibility of a DC network for commercial facilities,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2003, vol. 39, no. 5. – pp. 1499–1507.
- [106] G. Zaleskis, I. Steiks, A. Pumpurs, and O. Krievs, “DC-AC Converter for Load Supply in Autonomous Wind-Hydrogen Power System,” in *2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2015. – pp. 169–173.
- [113] AREUS – Innovative hardware and software for sustainable industrial robotics/ M. Pellicciari, A. Avotins, K. Bengtsson et al., *IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng.*, 2015. – pp. 1325–1332.
- [120] G. Zaleskis and I. Rankis, “Capacitor Activated Self-Excitation System of Synchronous Generator,” *Electron. Electr. Eng.*, 2012. – pp. 53–56.

- [121] G. Zaleskis and I. Rankis, "Self-Excitation System of Synchronous Generator with Buck Converter," in *54th International Scientific Conference of Riga Technical University*, 2013. – pp. 3.1–3.4.
- [122] G. Zaleskis, I. Rankis, and M. Prieditis, "Self-Excitation System for Synchronous Generator," *Electr. Control Commun. Eng.*, Jan. 2013, vol. 4, Nr. 1, – pp. 32–37.
- [123] G. Zaleskis, M. Gavrilovs, and I. Rankis, "Improvement of Self-Excitation Process in Synchronous Generator," in *55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, 2014. – pp. 22–25.
- [124] G. Zaļeskijs, I. Raņķis, "Sinhronā ģeneratora pašierosināšanas sistēma," Latvijas patents uz izgudrojumu Nr. LV 14496, 2012.
- [125] G. Zaļeskijs, I. Raņķis, "Sinhronā ģeneratora pašierosināšanas sistēma ar pazeminošo līdzstrāvas pārveidotāju," Latvijas patents uz izgudrojumu Nr. LV 14951, 2015.
- [126] Simulation of the Light Railway Traction Drive with Energy Storage System, V. Brazis, G. Zaleskis, L. Latkovskis et al., *Proceedings of the 52st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University*, 2011. – pp. 1–7.
- [131] Latvijas Nacionālā standartizācijas institūcija „Latvijas Standarts”, "LVS EN 60038:2012 'CENELEC standartspriegumi.'" 2012.
- [135] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2006, vol. 53, Nr. 2. – pp. 486–494.
- [136] A. M. Eltamaly, A. I. Alolah, H. M. Farh, "Maximum Power Extraction from Utility-Interfaced Wind Turbines," in *New Developments in Renewable Energy*, H. Arman and I. Yuksel, Eds. InTech, 2013. – pp. 159–192.
- [137] Q. Wang and L. Chang, "An Intelligent Maximum Power Extraction Algorithm for Inverter-Based Variable Speed Wind Turbine Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2004, vol. 19, Nr. 5. – pp. 1242–1249.
- [138] P. Suskis and I. Rankis, "Performance of a Voltage Step-Up/Step-Down Transformerless DC/DC Converter: Analytical Model," *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, 2012, vol. 49, Nr. 4. – pp. 29–40.
- [139] P. Suskis and I. Rankis, "Buck-boost DC-DC converter for wind and hydrogen based autonomous energy supply system," *Proc. Bienn. Balt. Electron. Conf. BEC*, 2012. – pp. 215–218.
- [140] P. Suskis, "DC/DC Voltage H-Bridge Converter for Autonomous Hydrogen System with Fuzzy Logic," in *54th International Scientific Conference of Riga Technical University*, 2013. – pp. 1–4.
- [141] F. De Stasi, "Working with Boost Converters," Texas Instruments Inc., 2015. – 11 p.
- [145] G. Zaleskis and I. Rankis, "An Overview on the Synchronous Generator Self-Excitation Converter Possible Configurations," *14th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical Engineering * Doctoral School of Energy and Geotechnology II"*, 2014. – pp. 78–81.
- [147] G. Zaleskis, V. Brazis, and L. Latkovskis, "Estimation of Traction Drive Test Bench with Energy Storage System Operation in Regenerative Braking Mode," *Electr. Control Commun. Eng.*, 2012, vol. 1. – pp. 40–45.
- [148] G. Zaleskis, J. Kiploks, V. Brazis, "Hybrid Vehicle for Military Operations," *11th International Symposium „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and „Doctoral School of Energy and Geotechnology II”*, 2012. – pp. 84–87.
- [149] G. Zaleskis and I. Steiks, "Alternative Energetics DC Microgrid With Hydrogen Energy Storage System," *Electr. Control Commun. Eng.*, 2016, vol. 11. – pp. 21–26.