

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

MANTAS ZELBA

TINKLINIŲ GALIOS KEITIKLIŲ SU
PRIJUNGTAIS ATSINAUJINANČIAISIAIS
ŠALTINIAIS INTEGRAVIMO Į UŽDARĄJĮ
ELEKTROS MIKROTINKLĄ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (T 006)

2024, Kaunas

Disertacija rengta 2018–2023 metais Kauno technologijos universiteto Elektros ir elektronikos fakultete, Elektros energetikos sistemų katedroje.

Doktorantūros teisė Kauno technologijos universitetui suteikta kartu su Lietuvos energetikos institutu.

Mokslinis vadovas:

doc. dr. Tomas DEVEIKIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006).

Redagavo: anglų kalbos redaktorė Dovilė Blaudžiūnienė (leidykla „Technologija“), lietuvių kalbos redaktorė Rozita Znamenskaitė (leidykla „Technologija“).

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

dr. Sigitas RIMKEVIČIUS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006) – **pirmininkas**;

prof. dr. Algirdas BAŠKYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija, T 001);

vyr. m. d., dr. Algis DŽIUGYS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006);

prof. habil. dr. Antans Saulus SAUHATS (Rygos technikos universitetas, Latvija, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006);

doc. dr. Gytis SVINKŪNAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006).

Disertacija bus ginama viešame Energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2024 m. vasario 22 d. 10 val. Kauno technologijos universiteto Rektorato salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73–402, LT-44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. (+370) 608 28 527; el. paštas doktorantura@ktu.lt

Disertacija išsiųsta 2024 m. sausio 22 d.

Su disertacija galima susipažinti interneto svetainėje <http://ktu.edu>, Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (Gedimino g. 50, LT-44239 Kaunas, Lietuva) ir Lietuvos energetikos instituto bibliotekoje (Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas, Lietuva).

© M. Zelba, 2024

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MANTAS ZELBA

**RESEARCH OF INTEGRATION OF GRID-TIED
INVERTERS WITH CONNECTED
RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO AN
OFF-GRID SYSTEM**

Doctoral dissertation
Technological sciences, Energetics and Power Engineering (T 006)

2024, Kaunas

This doctoral dissertation was prepared at Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electrical Power Systems during the period of 2018–2023.

The doctoral right has been granted to Kaunas University of Technology together with Lithuanian Energy Institute.

Scientific Supervisor:

Assoc. Prof. Dr. Tomas DEVEIKIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering, T 006).

Edited by: English language editor Dovilė Blaudžiūnienė (Publishing House *Technologija*), Lithuanian language editor Rozita Znamenskaitė (Publishing House *Technologija*).

Dissertation Defense Board of Energetics and Power Engineering Science Field:

Dr. Sigitas RIMKEVIČIUS (Lithuanian Energy Institute, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering, T 006) – **chairperson**;

Prof. Dr. Algirdas BAŠKYS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering, T 001);

Chief Researcher Dr. Algis DŽIUGYS (Lithuanian Energy Institute, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering, T 006);

Prof. Dr. Hab. Antans Saulus SAUHATS (Riga Technical University, Latvia, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering, T 006);

Assoc. Prof. Dr. Gytis SVINKŪNAS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering, T 006).

The public defense of the dissertation will be held at 10 a.m. on 22 February, 2024 at the public meeting of Dissertation Defense Board of Energetics and Power Engineering Science Field in Rectorate Hall at Kaunas University of Technology.

Address: K. Donelaičio 73-402, LT-44249 Kaunas, Lithuania.

Phone: (+370) 608 28 527; e-mail doktorantura@ktu.lt

The doctoral dissertation was sent out on 22 January, 2024.

The doctoral dissertation is available on the internet <http://ktu.edu> and at the libraries of Kaunas University of Technology (Gedimino 50, LT-44239 Kaunas, Lithuania) and Lithuanian Energy Institute (Breslaujos 3, LT-44403 Kaunas, Lithuania).

© M. Zelba, 2024

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	6
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	7
SANTRUMPŲ IR TERMINŲ SĄRAŠAS	9
ĮVADAS.....	10
I. UŽDARŲJŲ MIKROTINKLŲ TIPŲ, PERTEKLINĖS GALIOS JUOSE ATSIRADIMO PRIEŽASČIŲ IR JOS VALDYMO METODŲ APŽVALGA	13
1.1. UždaryjŲ elektros mikrotinklŲ tipŲ apžvalga	13
1.2. Perteklinės galios uždaryjame elektros mikrotinkle atsiradimo apžvalga	15
1.3. Perteklinės galios sunaudojimo metodŲ apžvalga	16
1.4. Vidutinės galios sunaudojimo valdymo metodŲ apžvalga	20
1.5. Skyriaus apibendrinimas.....	25
1.6. Autoriaus indėlis į nagrinėjamą problematiką.....	27
II. DINAMINĖS VIDUTINĖS GALIOS APKROVOS METODO PRISTATYMAS	28
2.1. Apkrovos valdymo metodo algoritmas.....	28
2.2. DVGA prototipinio įrenginio aprašymas ir principinė schema	33
2.3. DVGA prototipinio įrenginio skaitinis modelis	37
2.4. Skyriaus apibendrinimas.....	40
III. PROTOTIPINIO ĮRENGINIO MODELIAVIMAS IR EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	41
3.1. Eksperimentinės uždarojo elektros mikrotinklo sistemos struktūra	41
3.2. DVGA prototipinio įrenginio, integruoto į uždaryjį elektros mikrotinklą, skaitinis modelis	47
3.3. DVGA prototipinio įrenginio realiame mikrotinkle eksperimentinis tyrimas...	61
3.4. DVGA modelio tikslinimas	68
3.5. DVGA prototipinio įrenginio praktinis pritaikymas ir taikymo ribos	68
3.6. Skyriaus apibendrinimas.....	69
3.7. Autoriaus indėlis kuriant eksperimentinį prototipą	71
IŠVADOS.....	73
SUMMARY	74
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	87
GYVENIMO APRAŠYMAS	95
PADĖKA.....	97

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Uždarąjo elektros mikrotinklo perteklinės galios sunaudojimo metodai...	17
2 lentelė. Uždarąjo elektros mikrotinklo eksperimentinės sistemos įrangos sąrašas.	41
3 lentelė. Vidutinės galios valdymo metodų įtampos ir srovės šuolių palyginimas..	56
4 lentelė. <i>THD</i> leistinosios vertės pagal LST EN 50160.....	58
5 lentelė. <i>THD</i> išmatuotos vertės sumodeliuotoje uždaro elektros mikrotinklo sistemoje be DVGA prototipinio įrenginio.....	59
6 lentelė. Vidutinės galios valdymo metodų <i>THD</i> verčių palyginimas.....	60
7 lentelė. Eksperimento su DVGA prototipiniu įrenginiu ir su fiksuoto dydžio apkrova palyginimas.....	67

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Uždaro elektros mikrotinklo principinės schemos pavyzdys, kai vartotojai naudoja KS elektros energiją.....	13
2 pav. Uždaro elektros mikrotinklo principinės schemos pavyzdys, kai vartotojai naudoja NS elektros energiją.....	14
3 pav. Periodo valdymo metodas.....	20
4 pav. Valdymo ciklo ir įjungimo laiko sąvokų vaizdinis paaiškinimas, melsvu grafiku vaizduojama įjungta apkrova.....	21
5 pav. Pavėluoto įjungimo valdymo metodas.....	22
6 pav. PWM KS grandinėje valdymo metodas.....	23
7 pav. PWM NS grandinėje valdymo metodas.....	24
8 pav. DVGA metodo valdymo algoritmas.....	29
9 pav. Uždarojo elektros mikrotinklo įrenginių generacijos selektyvumas.....	31
10 pav. DVGA prototipinio įrenginio principinė schema.....	34
11 pav. Stačiakampių signalų generatoriaus veikimo principas.....	35
12 pav. DVGA prototipinio įrenginio nuotrauka: kairėje vaizdas iš lauko; dešinėje vaizdas iš vidaus.....	36
13 pav. Periodo valdymo metodo modelio struktūra.....	37
14 pav. Pavėluoto įjungimo valdymo metodo modelio struktūra.....	37
15 pav. PWM KS grandinėje valdymo metodo modelio struktūra.....	38
16 pav. PWM NS grandinėje valdymo metodo modelio struktūra.....	38
17 pav. Uždarojo elektros mikrotinklo sistemos skaitinio modelio struktūra.....	39
18 pav. Analizuojamo uždarojo elektros mikrotinklo schema.....	42
19 pav. Eksperimentinės sistemos vartojimo ir galimos generacijos kreivės.....	43
20 pav. Tinklinio galios keitiklio su AEŠ įtaka uždaram elektros mikrotinklui.....	45
21 pav. Tinklinio galios keitiklio pakartotinio išsijungimo ir prisijungimo proceso galios kreivė.....	46
22 pav. Eksperimentinės uždarojo elektros mikrotinklo sistemos su DVGA prototipiniu įrenginiu schema periodo valdymo, pavėluoto įjungimo ir PWM KS grandinėje vidutinės galios valdymo metodų atvejais.....	47
23 pav. Eksperimentinės uždarojo elektros mikrotinklo sistemos su DVGA prototipiniu įrenginiu schema PWM NS grandinėje vidutinės galios valdymo metodo atveju.....	48
24 pav. Periodo valdymo metodo įtampos ir srovės pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje DVGA prototipinio įrenginio prijungimo mazge.....	50
25 pav. Periodo valdymo metodo įtampos ir srovės pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje apkrovos prijungimo mazge.....	51
26 pav. Pavėluoto įjungimo metodo įtampos ir srovės pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje DVGA prototipinio įrenginio prijungimo mazge.....	52
27 pav. Pavėluoto įjungimo metodo įtampos ir srovės pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje apkrovos prijungimo mazge.....	52

28 pav. PWM KS grandinėje metodo įtampos ir srovės pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje DVGA prototipinio įrenginio prijungimo mazge.....	53
29 pav. PWM KS grandinėje metodo įtampos ir srovės pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje apkrovos prijungimo mazge.....	54
30 pav. PWM NS grandinėje metodo įtampos ir srovės pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje DVGA prototipinio įrenginio prijungimo mazge.....	55
31 pav. PWM NS grandinėje metodo įtampos ir srovės pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje apkrovos prijungimo mazge.....	56
32 pav. DVGA eksperimentinio prototipo darbas uždarajame elektros mikrotinkle.	62
33 pav. DVGA eksperimentinio prototipo darbas uždarajame elektros mikrotinkle paros laikotarpiu.....	64
34 pav. Akumuliatorių įkrovos lygio pokytis eksperimento metu.....	64
35 pav. Uždarojo elektros mikrotinklo darbo su fiksuoto dydžio apkrova eksperimentas.....	66

SANTRUMPŲ IR TERMINŲ SĄRAŠAS

Santrumpos:

AEŠ – atsinaujinantieji energijos šaltiniai;
DVGA – dinaminė vidutinės galios apkrova;
EES – elektros energetikos sistema;
FV – fotovoltinis;
KS – kintamoji srovė (angl. *alternating current*);
NS – nuolatinė srovė (angl. *direct current*);
PCB – spausdinta elektros schemos plokštė (angl. *printed circuit board*);
PWM – impulsų pločio valdymas (angl. *pulse width modulation*);
STC – FV modulių galios matavimo sąlygos (angl. *standard test conditions*);
SOC – akumuliatorių įkrovos lygis, matuojamas procentais (angl. *state of charge*);
THD – netiesinių iškreipimų suminis koeficientas (angl. *total harmonic distortion*);
VAP – vidutinis apkrovos procentas (angl. *duty cycle*);
VRLA – rūgštiniai švino akumuliatoriai (angl. *valve-regulated-lead-acid*).

Terminai:

Baterijų keitiklis – dvikryptis (angl. *bidirectional*) KS/NS keitiklis, galintis keisti elektros srovę abiem kryptimis, ir iš KS į NS, ir atvirkščiai.

FV modulis – FV plokštė su sulaminuotais FV elementais viduje, kuri saulės šviesos energiją verčia nuolatinės srovės elektros energija (angl. *PV panel*).

Nepriklausomasis galios keitiklis – tos pačios energijos rūšies parametrus keičiantis įrenginys, skirtas dirbti mikrotinkle, neprijungtame prie elektros tinklo (angl. *off-grid type inverter*).

Tinklinis galios keitiklis – tos pačios energijos rūšies parametrus keičiantis įrenginys, jungiamas prie centralizuoto elektros tinklo (angl. *grid-tied inverter*).

Uždarasis elektros mikrotinklas – sąlygiškai mažos galios elektros tinklas, veikiantis nuo EES izoliuotu režimu. Toks mažos galios elektros tinklas neturi susijusių elektros linijų jungčių su EES.

IVADAS

Tyrimo aktualumas

Nuolat besikeičiant geopolitinei, energetinei ir ekonominei situacijai vis daugiau asmenų siekia tapti nepriklausomojo elektros mikrotinklo operatoriais ir savininkais. Įvairūs aplinkos veiksniai kaip geopolitinė ar pandeminė situacija, išteklių krizės ar gamtos stichijos dėl centralizuotos elektros tinklų struktūros pastebimai keičia atitinkamų veiksnių įtaką tiekiamos elektros energijos kokybei, patikimumui ir kainos stabilumui [1]. Todėl centralizuotą EES tinklo struktūrą siekiama pakeisti į decentralizuotą, taip padidinant nepriklausomybę, patikimumą [2], kainos stabilumą su papildoma nauda sumažinant elektros energijos perdavimo nuostolius. Decentralizuotos sistemos kūrimui viena iš išiečių yra mikrotinklai. Tai lokalūs, maži elektros tinklai, kuriuose yra visa centralizuoto elektros tinklo struktūra, tik mažesniu masteliu. Mikrotinklų struktūrų esama labai įvairių, o jų pagrindiniai komponentai dažniausiai yra atsinaujinantieji ir rezerviniai generavimo šaltiniai, elektros energijos kaupimo ir išmaniųjų tinklų technologijų sprendimai. Dėl santykinai didelio AEŠ kiekio mikrotinklų sprendiniuose decentralizacijos sprendimas mažina ir aplinkosaugines problemas, susijusias su anglies dioksido emisijos mažinimu gaminant elektros energiją.

Vienas tokių mikrotinklų struktūros pavyzdžių yra uždarusis elektros mikrotinklas, t. y. prie EES neprijungta sistema. Tokioje sistemoje turi būti užtikrinti pakankami generavimo ir rezervinio generavimo pajėgumai, todėl natūralu, kad skaičiuojamoji generuojančių šaltinių galia viršija skaičiuojamąją vartojimo galią. Tokiose sistemose svarbu ne tik išlaikyti pakankamą generuojančių šaltinių įrengtąją galią, bet ir užtikrinti nuolatinį generavimo ir vartojimo balansą. Atliekant įvairių su AEŠ susijusių sistemų apžvalgą pastebėta, jog ne visi AEŠ galios keitikliai gali dirbti uždaryjame elektros mikrotinkle, vienas tokių pavyzdžių – tinkliniai galios keitikliai. Šie keitikliai su AEŠ generuoja maksimaliai tiek, kiek tuo metu yra atsinaujinančiosios energijos iš saulės, vėjo, vandens ar kitų šaltinių. Kadangi tinklinių galios keitiklių elektros energijos gamyba vyksta ne pagal sistemos generavimo ir vartojimo galių balansą, kai AEŠ galios trūksta, trūkumą gamina rezervinis energijos šaltinis. Tačiau, kai AEŠ generuoja perteklių, perteklinė galia sistemą veda iš galių balanso ir lemia atitinkamus padarinius uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje.

Uždarojo elektros mikrotinklo stabilumas priklauso nuo paties tinklo didumo, o mikrotinklo pavadinimas išduoda, kad sistemos mažos; todėl ir sistemos stabilumas, ir inercija yra atitinkamai maži. Maža sistemos inercija lemia, kad sistema yra jautri galios pokyčiams. Nagrinėjamo uždarojo elektros mikrotinklo atveju teorinis (sistemoje, sudarytoje tik iš keitiklių) arba kituose pavyzdžiuose fiziškai besisukantis pagrindinis sistemos elektros variklis dėl perteklinės galios imamas sukti greičiau nei leidžia uždarojo elektros mikrotinklo sistemos vardinis greitis (dažnis); todėl atsiradus perteklinei galiai, jei ji nėra sunaudojama, perteklinė galia sąlygoja dažnio padidėjimą. Nagrinėjamoje eksperimentinėje sistemoje, sudarytoje tik iš keitiklių, keitiklių reakcija į perteklinę galią programiškai nulemta

taip, kad imituoja realios besisukančios elektros mašinos reakciją į perteklinę galią. Uždarėjo elektros mikrotinklo elektros varikliai dėl perteklinės galios ima sukintis greičiau nei leidžia vardinis sistemos dažnis, apšukos didėja taip greitai, koks perteklinės galios dydis, ir taip ilgai, kol perteklinė galia nebegeneruojama. Dažnis didėja tol, kol pasiekiamos ribinės sistemoje veikiančių ir elektros variklių, ir vartotojų (arba abiejų kartu) vertės ir įrenginiai ima atsijunginėti dėl netinkamų elektros kokybės parametrų. Norint užtikrinti mikrotinklo stabilų darbą, būtina perteklinę galią atitinkamai sunaudoti.

Perteklinės galios valdymui taip pat yra daug sprendimo metodų, tačiau visi sprendiniai turi savo privalumų ir trūkumų. Vieni sprendiniai sunkiai pritaikomi, kiti – technologškai sudėtingi ir brangūs, treči perteklinės galios problemą sprendžia tik laikinai, o paskiausieji, sunaudodami perteklinę galią, daro įtaką sistemos kaupikliuose sukauptam energijos kiekiui. Todėl atrastas poreikis sukurti metodui, kuris išpildytų perteklinės galios sunaudojimo valdymo funkciją su mažiau trūkumų nei esami perteklinės galios sunaudojimo metodai. Uždarųjų elektros mikrotinklų daugėja, todėl didėja ir poreikis jau iš anksčiau turimus tinklinius galios keitiklius panaudoti ir pritaikyti naujai paskirčiai – darbui uždarėjo elektros mikrotinklo sistemoje. Kadangi tokių sistemų daugėja, didėja ir perteklinės galios sunaudojimo valdymo aktualumas, tuo metu išskyla ir **tiriamoji problema** – atlikus mokslinę literatūros analizę pasigesta perteklinės galios, kurią sukelia nevaldomi atsinaujinantieji energijos šaltiniai su tinkliniais galios keitikliais uždarame elektros mikrotinkle, sunaudojimo valdymo metodų.

Mokslinės literatūros šaltiniuose pateikiama įvairių metodų perteklinės galios uždarėjo elektros mikrotinklo sistemoje sunaudojimui. Tačiau perteklinės galios sunaudojimui būtų racionalu ir optimalu siekti tokių savybių: patikimumo, ekonominio patrauklumo, technologinio elementarumo ir lengvo pritaikomumo. Metodų aibė plati, nuo tokių technologiniu aspektu nesudėtingų sprendinių kaip fiksuoto dydžio apkrova, įsijungianti fiksuotam laikui po perteklinės energijos aptikimo, iki sudėtingų, pavyzdžiui, vandens talpos, veikiančios hidroakumuliacinės elektrinės principu.

Tyrimo tikslas – sukurti metodą, sudarantį sąlygas perteklinės galios uždarame elektros mikrotinkle sunaudojimo valdymui nepaveikiant sukauptos elektros energijos kiekio sistemoje, kur perteklinę galią sukelia nevaldomi atsinaujinantieji energijos šaltiniai su tinkliniais galios keitikliais.

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti **darbo uždaviniai**:

1. Sukurti metodą ir valdymo algoritmą, įgalinantį patikimai valdyti atsinaujinančiųjų energijos šaltinių generuojamą perteklinę galią nepaveikiant sistemoje sukaupto elektros energijos kiekio.
2. Prototipiniam įrenginiui parinkti optimalų vidutinės galios valdymo metodą.
3. Sukurti metodo naudą verifikuojantį fizinį prototipinį modelį, patikimai suvaldantį atsinaujinančiųjų energijos šaltinių sukuriamą perteklinę galią, ir įdiegti jį eksperimentiniame uždarame elektros mikrotinkle.
4. Uždarėjo elektros mikrotinklo sistemoje iširti integruoto prototipinio įrenginio sukeltus pereinamuosius procesus.

5. Ištirti sukurto prototipinio įrenginio veikimo įtaką sukauptai elektros energijai realiame uždarame elektros mikrotinkle.

Mokslinis naujumas ir praktinė vertė

Sukurta ir ištestuotas metodas, dinamiškai valdantis sunaudojamą nuolat kintančią perteklinę galią uždarame elektros mikrotinkle su tinkliniais galios keitikliais ir atsinaujinančiais energijos šaltiniais, neigiamai nepaveikiant akumuliuotos energijos kiekio sistemoje. Pasiūlytas valdymo metodas išplečia uždarytą elektros mikrotinklų su nevaldomais atsinaujinančiais energijos šaltiniais režimų valdymo ir efektyvumo charakteristikas.

Rezultatų apibūdinimas

Disertacijos rengimo metu mokslinių tyrimų rezultatai publikuoti dviejuose *Sustainability (ISI Web of Science)* referuojamuose leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą. Taip pat mokslinių tyrimų rezultatai pristatyti dviejose tarptautinėse užsienio konferencijose, vykusiose Tartu (Estija) ir Stambule (Turkija). Tartu konferencijoje pristatyti mikrotinklų tipai ir galimos problemos juos plėtojant. Stambulo konferencijoje pristatyta mokslinio tyrimo problematika – perteklinė galia uždaruosiuose elektros mikrotinkluose, kurią sukelia tinkliniai galios keitikliai su atsinaujinančiais energijos šaltiniais. *Sustainability* žurnale, specialiaame leidime „Smart Grid and Power System Protection“ pristatyti vidutinės galios valdymo metodai, skirti perteklinės galios sunaudojimo valdymui uždaruosiuose elektros mikrotinkluose. Galiausiai *Sustainability* žurnale, specialiaame leidime „Microgrid and Energy System Management“ pristatytas metodas su eksperimentiniu prototipu, skirtu perteklinės galios sunaudojimo valdymui uždarame elektros mikrotinkle.

Ginamieji disertacijos teiginiai:

1. Sukurtas metodas ir valdymo algoritmas užtikrina patikimą atsinaujinančiųjų energijos šaltinių generuojamą perteklinės galios suvaldymą nepaveikiant uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje sukaupto elektros energijos kiekio.
2. Tinkamiausias vidutinės galios valdymo metodas prototipinio modelio valdymui yra periodo valdymo vidutinės galios metodas.
3. Sukurtas fizinis prototipinis modelis, verifikuojantis metodą, kuris patikimai suvaldo perteklinę galią uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje.
4. Į uždarytą elektros mikrotinklą integruoto prototipinio įrenginio sukelti pereinamieji procesai neturi žymesnės įtakos elektros energijos kokybės parametrams.
5. Sukurtas dinaminis vidutinės galios apkrovos prototipinis įrenginys mažina akumuliatorių eikvojimą ir ilgina jų eksploatacijos laiką.

I. UŽDARŪJŲ MIKROTINKLŲ TIPŲ, PERTEKLINĖS GALIOS JUOSE ATSIKIRADIMO PRIEŽASČIŲ IR JOS VALDYMO METODŲ APŽVALGA

Perteklinės galios ir vidutinės galios valdymo metodų apžvalga pradedama nuo elektros mikrotinklų tipų ir perteklinės galios atsiradimo juose problemos mokslinės literatūros apžvalgos. Mokslinės literatūros apžvalga tęsiama perteklinės galios sunaudojimo metodų pristatymu. Tolesniame poskyryje pateikiama vidutinės galios valdymo metodų literatūros apžvalga ir paskiausiai apibendrinami mokslinių tyrimų rezultatai.

1.1. Uždarųjų elektros mikrotinklų tipų apžvalga

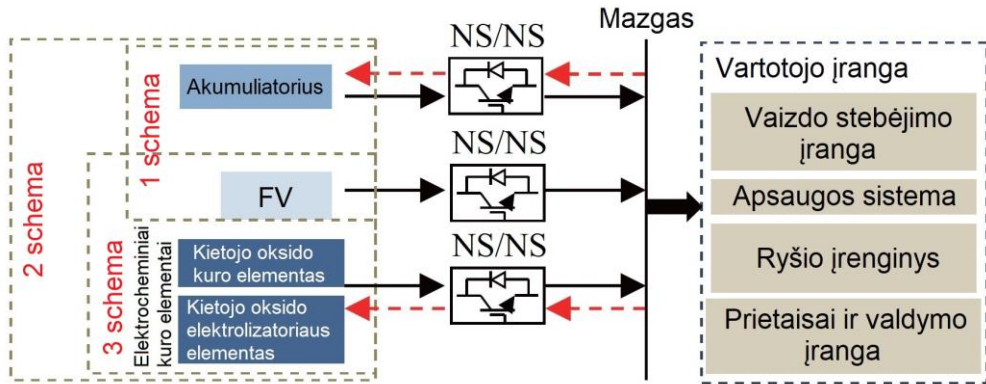
Uždarasis elektros mikrotinklas – tai energetiškai nepriklausomas vienetas, kuris veikia nepriklausomai nuo EES. Dažniausiu atveju elektros energija gaminama ir vartojama toje pačioje vietoje, elektros energijos gamybai pasitelkiant AEŠ, kaip saulė, vėjas, vanduo ir kt. Vienas svarbiausių išskirtinimų, kad beveik visais atvejais tokios sistemos turi elektros energijos kaupiklius, o generuojantys šaltiniai ir vartojimas suplanuotas [3] ir optimaliai sumodeliuotas [4]. Yra ne vienas būdas, kaip uždaruosius elektros mikrotinklus skaidyti į tipus pagal dydį, pagal vietovę, pagal generuojančius šaltinius, pagal vartotojo naudojamą srovės rūšį ir t. t., tačiau šio darbo kontekste uždarieji elektros mikrotinklai skaidomi pagal vartotojo naudojamą srovės rūšį ir kaupiklių tipą.

Uždarieji elektros mikrotinklai pagal vartotojo naudojamą srovės rūšį skaidomi į naudojančius KS ir NS elektros energiją. KS elektros energijos uždarieji elektros mikrotinklai lengviau pritaikomi buityje, mat pagal regione esamą elektros tinklo standartą prekiaujama ir elektros įrenginiais, todėl įrenginius lengviau pritaikyti naudojimui uždarajame elektros mikrotinkle. Uždarojo elektros mikrotinklo principinės schemos, kai vartotojai yra KS elektros rūšies naudotojai, pavyzdys pateiktas 1 pav.



1 pav. Uždarojo elektros mikrotinklo principinės schemos pavyzdys, kai vartotojai naudoja KS elektros energiją (pagal [5] šaltinį)

Atliekant literatūros analizę nustatyta, kad uždarieji elektros mikrotinklai, kai vartotojai naudoja NS elektros energiją, yra daugiau koncepciniai arba mažos galios. Tokio tinklo pagrindinė idėja ta, kad reikia mažinti keitiklių kiekį, mat uždaryjame elektros mikrotinkle elektros varikliai dažniausiai yra NS rūšies, o butyje esantys vartotojai taip pat yra NS naudotojai, tad toks uždarojo elektros mikrotinklo tipas turėtų turėti mažesnius galios nuostolius. Nepaisant to, šiuo metu rinka nėra prisitaikiusi tokiam mikrotinklo tipui, nes uždarojo elektros mikrotinklo savininkui, operatoriui ar naudotojui būtų sudėtinga parinkti suderinamus elektros prietaisus. Uždarojo elektros mikrotinklo principinės schemos, kai vartotojai yra NS elektros rūšies naudotojai, pavyzdys pateiktas 2 pav.



2 pav. Uždarojo elektros mikrotinklo principinės schemos pavyzdys, kai vartotojai naudoja NS elektros energiją (pagal [6] šaltinį)

Kitas uždaryjū elektros mikrotinklų skaidymo būdas yra išskirstyti į tipus pagal naudojamą elektros energijos kaupiklių sistemą. Kadangi AEŠ energiją generuoja tada, kai tam yra susidariusios palankios aplinkos sąlygos, o ne tada, kai to reikia vartotojui, tai lemia, kad tokiuose uždarojo elektros mikrotinklo sistemos vienas pagrindinių komponentų yra elektros energijos kaupiklis. Įprastai uždaruosiuose elektros mikrotinkluose siekiama kuo daugiau reikalingos elektros energijos pasigaminti iš AEŠ, todėl tam, kad būtų išlaikytas vartojimo ir generacijos balansas naudojami elektros energijos kaupikliai. Elektros energijos kaupiklių naudojama įvairių tipų, tokių kaip vandenilio kuro elementai [7, 8] su elektrolizatoriais [9], akumulatoriai [10–13], energijos kaupimas magnetiniame lauke [14] ir superkondensatoriai [15], vanadžio redokso [16] elektrocheminiai [17] kaupikliai, kitų tipų kaupikliai [18] ir jų mišrios kombinacijos [19]. Pagrindinė visų kaupiklių ir akumuliatorių paskirtis uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje – kaupti elektros energiją, kai generacija didesnė nei vartojimas, ir atiduoti sukauptą elektros energiją, kai vartojimas yra didesnis nei galima kitų įrenginių generacija. Nepaisant to, akumulatoriai ir kaupikliai gali būti įkraunami ir iškraunami taip pat dėl ekonominių priežasčių, jei kažkuris generavimo šaltinis pigiau generuoja elektros energiją lyginant su kitais.

Uždaruosius elektros mikrotinklus pasirinkta skaidyti į tipus pagal vartotojų naudojamą elektros energijos rūšį ir kaupiklių tipą todėl, kad tai yra esminiai kriterijai kuriamam DVGA prototipiniam įrenginiui. Atlikus uždaryjū elektros

mikrotinklų tipų apžvalgos analizę nustatyta, kad yra du pagrindiniai jų tipai: kai vartotojai naudoja KS ir kai vartotojai naudoja NS elektros energiją. Uždarųjų elektros mikrotinklų klasifikacijų pagal kaupiklio tipą esama daugiau, bet pagrindinis kriterijus, kodėl taip suklasifikuoti mikrotinklai, yra akumulatoriaus prijungimo mazgas. DVGA prototipinio įrenginio kūrimui svarbu, kaip kaupiklis prijungiamas prie uždarojo elektros mikrotinklo, kadangi tai lemia ir paties prototipiniam įrenginiui tinkamiausio vidutinės apkrovos galios valdymo tipo parinkimą.

1.2. Perteklinės galios uždaražame elektros mikrotinkle atsiradimo apžvalga

Kiekvienoje EES, tarp jų ir uždaruosiuose elektros mikrotinkluose, būtina palaikyti naudojimo ir generavimo galių balansą, kadangi elektros energija pagal energijos tvermės dėsnį iš niekur neatsiranda ir niekur neišnyksta, gaminama elektros energija turi būti tuo pačiu laiko momentu naudojama, ir atvirkščiai. Todėl kiekvienoje sistemoje siekiama palaikyti naudojimo ir generavimo galių balansą, vis dėlto balansas nuolat svyruoja tarp galios pertekliaus ir trūkumo. Galios trūkumas EES yra kompensuojamas papildomu generavimu arba, jei tokio nepakanka, įjungiami rezerviniai generavimo šaltiniai. Galios perteklius didelėse EES sumažinamas arba panaikinamas prognozuojant ir valdant generavimo šaltinius, tačiau jei sistema sąlygiškai maža ir joje yra nevaldomų elektros šaltinių, tada perteklinės galios valdymas tampa aktualesne problema nei galios trūkumas.

Atlikus perteklinės galios uždaražame elektros mikrotinkle atsiradimo mokslinę apžvalgą nustatyta, kad perteklinės galios atsiradimą gali lemti kelios priežastys. Pirmoji ir esminė priežastis, turinti įtakos ir kitoms priežastims, yra uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje esantis nevaldomas šaltinis. Nevaldomo šaltinio pavyzdys – tinklinis galios keitiklis su AEŠ, generuojantis tiek elektros energijos, kiek yra AEŠ pirminės energijos rūšies – saulės, vėjo, vandens ar kt., kai paneigiami galios nuostoliai keitikliuose, linijose ir kt. Tinkliniai galios keitikliai pirminės saulės energijos atveju dažniausiai yra keitikliai, keičiantys NS elektros energiją į KS elektros energiją. Tinklinių galios keitiklių valdymo algoritmų esama įvairių: proporcinio integralo (angl. *proportional integral*), proporcinio integralo išvestinės (angl. *proportional integral derivative*), proporcinio rezonanso (angl. *proportional resonant*), proporcinio integralo rezonanso (angl. *proportional integral resonance*), modelio nuspėjimo (angl. *model predictive controller*) ir kt. valdymo algoritmai [20–22]. Tačiau visų tinklinių galios keitiklių valdymo algoritmas yra pagrįstas iš principo taip, kad visą NS grandinėje gaunamą elektros energiją iš pirminės energijos rūšies konvertuotų į KS elektros energiją. Todėl, kai tinklinis galios keitiklis yra prijungtas prie EES elektros tinklo, keitiklis visą įmanomą galią tiekia į elektros tinklą. Tačiau, jei toks keitiklis yra prijungtas prie uždarojo elektros mikrotinklo, generuojamos ir naudojamos galios balansas drastiškai pasikeičia, ir perteklinė galia tampa pagrindine tokios sistemos problema.

Antroji perteklinės galios atsiradimo priežastis yra neoptimalus kaupiklių ir AEŠ santykis uždaražame elektros mikrotinklo sistemoje [23, 24]. Perteklinę galią gali sunaudoti kaupikliai, kai jų yra pakankamas kiekis, tačiau jei kaupiklių ir nevaldomų AEŠ santykis neoptimalus [25], perteklinės galios problemos atsiradimo

dažnumas [26] tiesiogiai priklauso nuo kaupiklių ir AEŠ galių santykio [27]. Visais kitais atvejais ir atvejais, kai generuojama galia neviršija vartojimo galios, perteklinės galios problemos nėra.

Trečioji perteklinės galios atsiradimo priežastis yra nesuderinama įranga uždaroje elektros mikrotinklo sistemoje. Uždarajam elektros mikrotinklui parenkant ar pridodant naują generuojančią įrangą jau prie esamos uždarojo elektros mikrotinklo sistemos, svarbus aspektas yra jos suderinamumas. Atvejais, kai keitiksiai ar generuojantys šaltiniai nesugeba aptikti perteklinės galios uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje ir gamintojo programiškai nėra numatyta komunikacija su kitais generuojančiais įrenginiais perteklinės galios aptikimui, tokie generuojantys šaltiniai sukels perteklinės galios atsiradimo problemą, nors ir yra techninė galimybė valdyti generuojamą galią.

Nors identišku uždarųjų elektros mikrotinklų sistemų yra labai mažai, tačiau perteklinės galios problemos atsiradimo priežastis išlieka vienoda visoms skirtingoms uždarojo elektros mikrotinklo sistemoms; tai sistemoje esantis nevaldomas šaltinis. Perteklinės galios atsiradimo dažnumą uždarojo elektros mikrotinklo sistemose lemia pora veiksnių.

1. Uždarojo elektros mikrotinklo sistemos nevaldomos perteklinės galios ir minimalios sistemos apkrovos dydžio santykis. Nevaldomas šaltinis gali generuoti elektros energiją sistemoje, tačiau ji gali netrukdyti sistemos darbui, jei nevaldomo šaltinio galios dydis neviršija sistemos minimalios apkrovos dydžio. Perteklinės galios atsiradimo dažnumą nulemia nevaldomo šaltinio galios ir minimalios apkrovos dydžių santykis: kuo perteklinė galia didesnė nei minimali apkrova, tuo dažniau sistemoje atsiranda perteklinės galios problema.
2. Minimalios apkrovos dydžio arba nevaldomo šaltinio galios prognozės netikslumas. Pasikeitus prognozuojamai arba planuojamai minimaliai apkrovos galiai, pasikeitimas lemia nevaldomo šaltinio ir apkrovos galios santykį. Perteklinės galios problemos atsiradimo dažnumas didėja, atitinkamai mažėjant uždarojo elektros mikrotinklo sistemos minimaliai apkrovai. Atitinkamai pasikeitus prognozuojamai nevaldomo šaltinio galiai, paveikiamas nevaldomo šaltinio ir minimalios apkrovos galių santykis sistemoje, o tai vėl didina tikimybę atsirasti perteklinės galios problemai. Perteklinės galios problemos atsiradimo dažnumas didėja, atitinkamai didėjant uždarojo elektros mikrotinklo sistemos nevaldomo šaltinio galiai.

Perteklinė galia uždaroje elektros mikrotinklo sistemoje sąlygoja naudojimo ir generavimo galių disbalansą, o tai lemia elektros energijos kokybę sistemoje, todėl kitame poskyryje apžvelgiami perteklinės galios valdymo metodai.

1.3. Perteklinės galios sunaudojimo metodų apžvalga

Norint uždaruojame elektros mikrotinkle išspręsti galios balanso tarp naudojimo ir elektros gamybos problemą, reikia perteklinę galią sistemoje sunaudoti su papildoma apkrova, nes galios perteklius kelia galių balanso problemą. Atlikus perteklinės galios sunaudojimo metodų mokslinės literatūros apžvalgą rasti keli metodai, kaip perteklinę galią uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje sunaudoti. Pavyzdžiui, fiksuoto dydžio apkrova, elektromobilių krovimas (angl. *grid-to-*

vehicle, G2V), vandenilio gamyba, akumulatoriai, naudojimo planavimas, hidroakumuliaciniai sprendiniai ir t. t. Tačiau atrasta, kad dalis metodų padeda problemą išspręsti laikinai, t. y. padidinamas sukaupiamos elektros energijos kiekis, bet pati problema nedingsta. Kita dalis metodų yra labai sudėtingi technologiškai, tad jų pritaikymas gali būti itin komplikuoatas arba kitais atvejais neįmanomas. Dar kiti metodai turi įtakos vartotojo komfortui arba jiems reikalingos finansinės investicijos sunkiai ekonomiškai pagrindžiamos. Paskiausieji metodai valdant perteklinę galią paveikia mikrotinklo sukauptos energijos kiekį.

Dėl skirtumų tarp perteklinės galios sunaudojimo metodų, atliekant mokslinę perteklinės galios sunaudojimo metodų apžvalgą metodai palyginami tarpusavyje. Atliekant apžvalgą nustatyta, kad visada galima seną, netinkamą ar kitą perteklinės galios problemą sukeliančią įrangą pakeisti naujai įsigyta įranga, kuri nekeltų perteklinės galios problemos uždaroje elektros mikrotinklo sistemoje. Todėl perteklinės galios sunaudojimo metodų palyginimas ekonominio patrauklumo aspektu svarbus dėl tos priežasties, kad perteklinės galios sunaudojimo metodas turi būti pigesnė alternatyva nei perteklinę galią sukeliančios įrangos pakeitimas nauja įranga. Metodai, kaip sunaudoti perteklinę galią uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje, išsamiau apžvelgti 1 lentelėje.

1 lentelė. Uždarojo elektros mikrotinklo perteklinės galios sunaudojimo metodai

Perteklinės galios sunaudojimo metodas	Literatūros šaltinis	Trūkumai
Šilumos / vėsos kaupimas	[28–31]	Perteklinė galia sunaudojama esant fiksuotai apkrovos vertei, o tai turi įtakos mikrotinklo sukauptos energijos kiekiui.
Hidroakumuliaciniai sprendiniai	[32–35]	Sudėtingas technologinis sprendinys lemia mažą ekonominį patrauklumą.
Naudojimo planavimas	[36–42]	Perteklinė galia naudojama paties naudotojo komforto sąskaita. Taip pat reikia pritaikyti programinę įrangą, kuri prognozuotų perteklinę galią ir atitinkamai suplanuotų naudojimą.
Elektromobilių krovimas, vandenilio kuro elementai su elektrolizatoriumi, kitos kaupiklių technologijos	[43–48]	Šiais metodais padidinamas akumuluojamos energijos kiekis ir tik laikinai sprendžiama pačios perteklinės galios problema.
Fiksuoto dydžio apkrova	[49–51]	Perteklinė galia sunaudojama esant fiksuotai apkrovos vertei, arba fiksuotais apkrovos lygiais, o tai paveikia mikrotinklo sukauptos energijos kiekį.
Sistemos įrenginių valdymo algoritmas	[52–56]	Sudėtingai pritaikomas sprendinys įvairiems mikrotinklo sistemos tipams.

1 lentelėje pateikti perteklinės galios sunaudojimo metodai su kiekvienu iš jų trūkumais uždarojo elektros mikrotinklo sistemai. Kiekvienas iš metodų išanalizuoti smulkiau.

1. Šilumos / vėsos kaupimas ir fiksuoto dydžio apkrova. Abu metodai labai panašūs, todėl analizuojami kartu. Metodais užtikrinamas perteklinės galios sunaudojimas bet kuriuo metu ir sprendžiama pati problema. Šilumos arba vėsos kaupimas sunaudojant perteklinę galią gali padėti gaminti ir kaupti šaltį arba šilumą [28], piko metu [29, 30] gali pašalinti energijos pertekliaus problemas. Antra vertus, tai taip pat gali turėti įtakos vartotojo komfortui [33], jei šiluma / vėsa gaminama šilumos siurblio arba kondicionieriaus be atitinkamos šilumos / vėsos talpos, todėl tokiam metodui gali būti būdingas komplikuotas įrengimas ir pritaikomumas. Nepaisant to, jei šiluma / vėsa kaupiama talpykloje, šilumos / vėsos galia turėtų būti valdoma tam tikrais žingsniais, dinamiškai, pagal perteklinės galios dydį. Panašus metodas perteklinės galios sunaudojimui yra fiksuoto dydžio apkrova [49]; šio metodo atveju universalumas yra didelis dėl įrenginio paprastumo [50]. Tačiau fiksuotos apkrovos metodas neigiamai veikia sukauptos elektros energijos kiekį mikrotinklo sistemoje [51]. Perteklinė galia gali būti valdoma nustatytais žingsniais, tai sumažintų neigiamą įtaką mikrotinklo sukauptam elektros energijos kiekiui, bet įtakos nepanaikintų. Fiksuoto dydžio apkrovos metodas veikia uždaro elektros mikrotinklo sistemos sukauptą elektros energijos kiekį, tam paaiškinti pateikiamas supaprastintas pavyzdys. Situacijoje, kai perteklinė galia yra 0,1 kW ir turima fiksuoto dydžio apkrova 2 kW, įjungus perteklinės galios sunaudojimo funkciją skirtumas tarp 2 kW ir 0,1 kW turės būti subalansuotas su energija iš akumuliatorių. Tol, kol bus sunaudota perteklinė galia, tai turės neigiamą poveikį sistemos akumuliuotam elektros energijos kiekiui.
2. Hidroakumuliaciniai sprendimai yra neuniversalus perteklinės galios sprendimo metodas [33], tačiau šiuo sprendimu būtų galima lanksčiai valdyti apkrovą, tai leistų nepaveikti sistemoje sukaupto elektros energijos kiekio. O viršutiniam baseinui prisipildžius ir toliau esant poreikiui sunaudoti perteklinę galią vanduo gravitacijos būdu būtų nuleistas į žemutinį baseiną be naudingo atliekamo darbo. Apžvelgus visus galimus sprendimus nustatyta, kad hidroakumuliacinis sprendimas geriausiai pritaikomas EES [32]. Komplikuotas tokių sistemų pritaikymas būtų mažoms mikrotinklų sistemoms [34, 35], kaip uždarieji elektros mikrotinklai dėl didelės ir sunkiai ekonomiškai pagrįžiamos finansinės investicijos.
3. Naudojimo planavimo metodas yra universalus būdas sunaudoti perteklinę elektros galią sistemoje [36, 42], tačiau perteklinė galia turi būti prognozuojama [37], kad būtų galima adekvačiai paruošti apkrovų įjungimą atitinkamam perteklinės galios atsiradimui. Naudojimo planavimo metodas turi įtakos paties naudotojo komfortui [40, 41], kadangi naudotojas turi naudoti elektros energiją tuo metu, kai yra suprognuota perteklinė galia sistemoje, o ne tada, kai jam to reikia. Nepaisant naudotojo diskomforto, perteklinės galios prognozavimas ir įrenginių atitinkamas valdymas, tikėtina, turės individualų valdymo algoritmą [38, 39], todėl toks metodas sunkiai pritaikomas praktiškai kaip universalus sprendinys.

4. Vandenilio kuro elementai su elektrolizatoriumi ir kitos kaupiklių technologijos. Elektrolizatorius su pertekline elektros energija gamina vandenilį ir deguonį, o kuro elementai iš vandenilio ir deguonies atvirkštiniu cheminiu procesu gamina elektros energiją. Šio metodo atveju perteklinės galios problema sprendžiama tik laikinai, t. y. tik padidinamas galimos sukaupti elektros energijos kiekis. Sprendžiama pasekmė, o ne problemos priežastis, todėl kaupikliui prisipildžius perteklinės galios problema neišsprendžiama. Nepaisant to, vandenilio kuro elementai turi mažą ciklo efektyvumą [46] ir jų pritaikomumas kol kas dar sudėtingas [43, 45] galimai dėl dar sąlygiškai mažo kiekio technologinių sprendimų rinkoje.
5. Elektromobilių įkrovimas tik padidina sistemos galimą sukaupti elektros energijos kiekį, perteklinės galios problemą tik atideda porai arba kelioms valandoms į ateitį. Toks metodas nesudėtingai pritaikomas, jei uždaryjame elektros mikrotinkle norima valdyti perteklinę galią su fiksuota elektromobilio įkrovimo galia [44]. Taip pat elektromobilio įkrovimo metodas nesudėtingai pritaikomas perteklinės galios sunaudojimui, jei įkrovimo stotelė įrengiama mikrotinklo sistemoje, kuri yra prijungta prie elektros tinklo [47, 48]. Tačiau norint pritaikyti elektromobilių įkrovimo metodą uždaryjame elektros mikrotinkle, esami dinaminės galios krovimo sprendimai nebetiks, nes esami sprendiniai elektromobilio įkrovimo galią valdo pagal sumontuotą elektros energijos skaitiklį, pagal kurį neviršijama bendra naudojimo galia. Todėl sunaudoti perteklinę galią dinamiškai uždaryjame elektros mikrotinkle nepaveikiant sistemoje sukaupto elektros energijos kiekio, metodas tampa kompliktuotas ir sunkiai pritaikomas praktiškai.
6. Sistemos įrenginių valdymo algoritmas. Uždaryjame elektros mikrotinkle sukūrus valdymo algoritmą, skirtą valdyti visus perteklinę galią galinčius sukelti šaltinius (tarp jų ir keitiklius), tai būtų optimalus sprendinys, kadangi visais atvejais būtų užtikrintas perteklinės galios negaminimas [52] ir toks valdymas nepaveiktų sistemos sukauptos elektros energijos kiekio akumuliatoriuose [55, 56]. Tačiau kiekvienos individualios mikrotinklo sistemos valdymo algoritmas turėtų būti skirtingas ir individualus [53, 54], todėl galiausiai toks metodas būtų sudėtingai pritaikomas praktiškai, kaip universalus sprendinys įvairiems mikrotinklams su skirtingais įrenginiais.

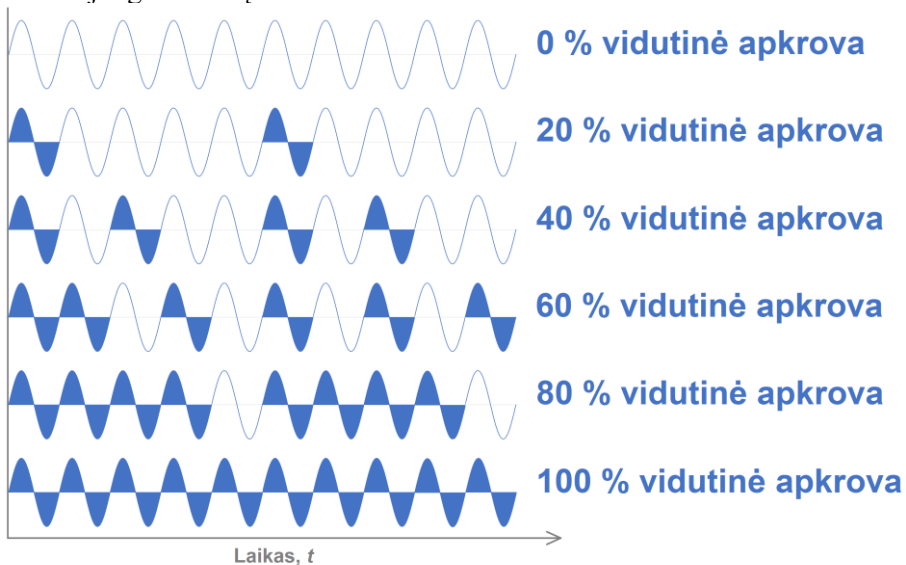
Atlikus perteklinės galios sunaudojimo metodų apžvalgą nerastas metodas, kuris padėtų nuolat kintančią perteklinę galią uždaroje elektros mikrotinklo sistemoje sunaudoti nepaveikiant akumuluotos energijos kiekio sistemoje, patikimumo, ekonominio patrauklumo, naudotojo komforto ir sistemos kompleksiskumo. Todėl pristatomas naujas vidutinės galios sunaudojimo valdymo metodas – dinaminis vidutinės galios apkrovos (DVGA) valdymo metodas perteklinei galiai uždaryjame elektros mikrotinkle sunaudoti. Pristatomo metodo, skirto perteklinei galiai uždaryjame elektros mikrotinkle sunaudoti, pagrindinė funkcija – dinamiškai valdyti sunaudojamą perteklinę galią tokiu pačiu dydžiu, kaip kinta ir pati perteklinė galia atitinkamu momentu.

1.4. Vidutinės galios sunaudojimo valdymo metodų apžvalga

DVGA prototipinis įrenginys perteklinės galios sunaudojimui uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje, kaip pristatyta 2.4 poskyryje, pirmiausia matuoja sistemos dažnį, pagal tai nustato perteklinę galią sistemoje ir keičia vidutinę apkrovos galią atitinkamu momentu pagal tai, kokia perteklinė galia sistemoje yra. DVGA prototipinio įrenginio idėja – turėti didesnės arba lygios galios apkrovą maksimaliai nevaldomo šaltinio galiai ir ją trumpame laiko intervale komutuoti atitinkamai keičiant vidutinę galią pagal nustatytą perteklinės galios dydį uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje. Veikimo ir matavimo principas pristatomas III skyriuje, o šiame skyriuje atlikta vidutinės galios valdymo metodų apžvalga, kad tolimesniuose modelio skaitinės moduliacijos tyrimuose būtų parinktas optimalus vidutinės galios valdymo metodas DVGA eksperimentiniam prototipui.

Atliekant vidutinės galios valdymo metodų mokslinės literatūros apžvalgą rasti ir atrinkti keturi vidutinės galios valdymo metodai: periodo valdymo (angl. *burst*), pavėluoto įjungimo (angl. *phase-delay*) valdymo, PWM KS grandinėje ir PWM NS grandinėje. Šiame skyriuje vidutinės galios valdymo metodai pristatomi iš DVGA prototipinio įrenginio poreikio perspektyvos.

Periodo valdymo (angl. *burst*) metodas vidutinę galią valdo KS grandinėje komutuodamas apkrovą, kai įtampos sinusoidė kerta 0 V ribą, kaip pavaizduota 3 pav. Mėlynos dalys 3 pav. vaizduoja įjungtos apkrovos laiką, likusios dalys – apkrovos išjungimo laiką.



3 pav. Periodo valdymo metodas

Nagrinėjama mikrotinklo sistema yra 50 Hz dažnio, tai reiškia, kad sinusoidė turi 50 periodų per vieną sekundę, vienas periodas turi du pusperiodžius, vieną teigiamą ir vieną neigiamą, tad sinusoidė per sekundę kerta 0 V ribą 100 kartų. Toks valdymo metodas atitinkamai turės ir valdymo ciklo laiką, 4 pav. vaizdžiai paaikškintos valdymo ciklo ir apkrovos įjungimo laiko sąvokos.



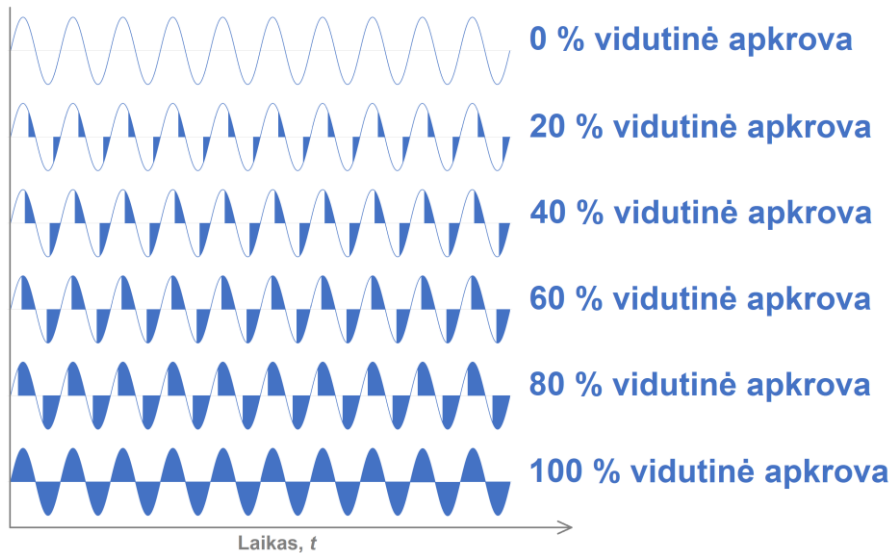
4 pav. Valdymo ciklo ir įjungimo laiko sąvokų vaizdinis paaiškinimas, melsvu grafiku vaizduojama įjungta apkrova

Atitinkamai kiekvienam vidutinės galios valdymo metodui reikia parinkti optimalias ir tinkamas valdymo ciklo ir apkrovos įjungimo laiko vertes. Valdymo ciklo ir apkrovos įjungimo laiko vertės turi užtikrinti perteklinės galios sunaudojimą taip, kad kuo mažiau būtų paveikiamas sukauptos elektros energijos kiekis ir parinktos laiko vertės nereikalautų sudėtingų inžinerinių sprendinių vidutinės galios valdymui. Pavyzdžiui, jei vidutinės galios keitimo žingsnių skaičius būtų parinktas 100 vienetų, taikant periodo valdymo vidutinės galios valdymo metodą būtų gauta, jog vienas valdymo ciklas minimaliai turėtų trukti vieną sekundę. Antra vertus, jei tiek vidutinės galios keitimo žingsnių nereikia, valdymo ciklas atitinkamai gali trumpėti. Mažas vidutinės galios keitimo žingsnių skaičius lemia didesnę paklaidą sunaudojant perteklinę galią mikrotinkle. Kadangi periodo valdymo vidutinės galios valdymo metodo valdymo ciklas trunka sąlygiškai ilgai (gali trukti ir vieną sekundę kaip pateiktame pavyzdyje), ir turint vidutinės galios poreikį 50 % įjungiami periodai ne visi iš eilės, o įjungtų periodų kiekis išskaidomas per visą valdymo ciklo plotį tam, kad vidutinės galios įtaka uždarojo elektros mikrotinklo sistemos dažniui būtų išskaidyta per visą valdymo ciklo laiko imtį.

Periodo valdymo metodas, lyginant su kitais metodais, turi sąlygiškai nereikšmingus pereinamuosius procesus, kadangi įjungimas ir išjungimas atliekamas esant 0 V įtampai, kartu tai lemia ir mažus komutavimo nuostolius [57]. Maži komutavimo nuostoliai lemia mažą šilumos kiekį, kuris išsiskirs komutavimo metu, todėl DVGA eksperimentinis prototipas potencialiai turės mažesnę poreikį aušinimo

komponentams. Periodo valdymo metodo pagrindu veikiantis DVGA eksperimentinis prototipas turėtų būti prijungtas prie KS grandinės uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje perteklinės galios valdymui. Dažnio matavimas taip pat atliekamas KS grandinėje, todėl toks įrenginys turėtų supaprastintą ir kompaktišką prijungimo prie KS grandinės mazgo sprendinį.

Pavėluoto įjungimo valdymo metodas įjungia kiekvieną pusperiodį su vėlinimu atitinkamai pagal tai, kokia vidutinė galia yra reikalinga. Tokio valdymo metodo valdymo periodas yra pusė periodo, t. y. 10 ms, o pagrindinis komponentas – simetrinis triodinis tiristorius (angl. TRIAC) [58]. Kuo įjungimo vėlinimas didesnis, tuo vidutinė galia mažesnė, ir atitinkamai atvirkščiai [59], kaip pavaizduota 5 pav. Labai panašus vidutinės galios valdymo metodas yra paankstinto išjungimo metodas, t. y. apkrova įjungiama sinusoidei kirtus 0 V, ir atitinkamai kokia vidutinė galia reikalinga, tiek paankstintai apkrova pusperiodžio cikle išjungiama. Pavėluoto įjungimo ir paankstinto išjungimo metodai yra panašūs vienas į kitą, bet kartu ir oponuojantys; III skyriuje atliekamose skaitinėse moduliacijose padaryta prielaida, kad šie du metodai turės panašius pereinamuosius procesus uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje, todėl skaitinės moduliacijos atliktos su pavėluoto įjungimo vidutinės galios valdymo metodu.

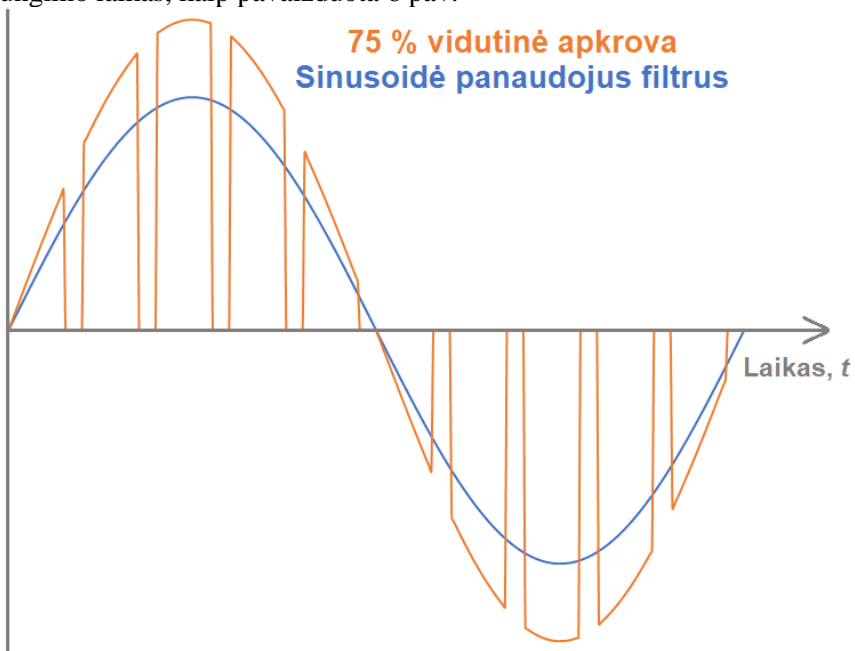


5 pav. Pavėluoto įjungimo valdymo metodas

Pavėluoto įjungimo valdymo metodo privalumas tas, kad vidutinė apkrova yra paskirstyta tolygiai tarp visų sinusoidės periodų. Kadangi apkrova gali būti įjungiama sinusoidės pikinės įtampos metu, toks vidutinės galios valdymo metodas turi sąlygiškai didelius įjungimo nuostolius, kurie gali siekti 85 % visų prietaiso nuostolių [60]. Dideli komutavimo nuostoliai lemia didesnę poreikį aušinimui ir reikšmingesnius pereinamuosius procesus mikrotinklo sistemoje, įskaitant įtampos ir srovės harmonikas [61]. Jei mikrotinklo sistemoje valdantysis generavimo šaltinis yra taip pat keitiklis (pavyzdžiui, baterijų keitiklis), pavėluoto įjungimo valdymo metu, kai įjungiama apkrova sinusoidės įtampai esant didelei, sukeliamas

pereinamasis procesas [62], kurio metu baterijų keitikliai reaguoja į sistemoje pasikeitusį galių balansą, todėl tą pasikeitimą kompensuoja pradėdami generuoti energiją ir imdami ją iš kaupiklių. Toks pereinamasis procesas gali sukelti įtampos [63] ir srovės stiprio pikus [64], viršijančius leistinas ribas, nurodytas LST EN 50549 standarte.

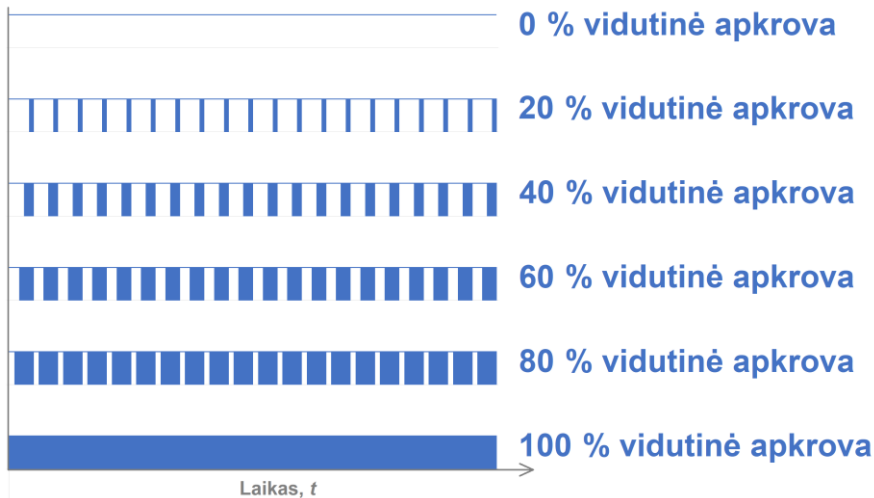
PWM KS grandinėje valdymo metodas yra plačiai taikomas galios keitiklių valdymo metodas, dėl to šis valdymo metodas įtrauktas į apžvalgą kaip vienas galimų vidutinės galios valdymo metodų. Tokio valdymo metodo valdymo ciklo trukmė dažniausiai yra trumpas laikotarpis, o valdymo ciklas matuojamas kHz eilėje, nes ilgas valdymo periodas lemia reikšmingas harmonikas ir pereinamuosius procesus sistemoje [65]. Pagal reikiamą vidutinę galią įjungimo ir išjungimo laikas keičiamas; kuo didesnė vidutinė galia, tuo įjungimo laikas ilgesnis nei išjungimo laikas, kaip pavaizduota 6 pav.



6 pav. PWM KS grandinėje valdymo metodas

Greitas ir dažnas, kHz eilės [66], komutavimas trifazėje sistemoje [67] kelia pereinamuosius procesus, kurių metu atsiranda įtampos ir srovės stiprio [68] staigūs šuoliai, prastinantys elektros energijos kokybę. Norint sumažinti PWM KS grandinėje valdymo metodo sukeltus pereinamuosius procesus mikrotinklo sistemoje, kurie neigiamai veikia elektros energijos kokybę, turi būti naudojami filtrai [69], taikomos tokios technikos kaip dirbtinio intelekto filtro valdymas [70] ar komutavimo laiko valdymas (angl. *soft-switching*) [71]. Tačiau, atsižvelgiant į individualius uždaryjū elektros mikrotinklų tipus, kiekvienu atveju filtrus reikėtų parinkti individualiai pagal apkrovos dydį arba naudoti ekonomiškai mažiau patrauklią aktyvaus filtro parinktį [72, 73].

Ketvirtasis vidutinės galios valdymo metodas yra PWM NS grandinėje. Šis metodas yra labai panašus į PWM KS grandinėje valdymo metodą, tačiau skiriasi prijungimo vieta, kuri lemia esminį skirtumą tarp šių dviejų valdymo metodų. PWM NS grandinėje turi priskirtą valdymo periodą, kurio metu atitinkamai pagal reikiamą vidutinę galią valdomas įjungimo ir išjungimo laikas, kaip pavaizduota 7 pav.



7 pav. PWM NS grandinėje valdymo metodas

Pagrindinis skirtumas tarp PWM NS grandinėje ir PWM KS grandinėje yra pats pajungimo taškas, nuo kurio priklauso valdymo metodo schema ir DVGA prototipinį įrenginį sudarantys komponentai. PWM KS grandinėje trifazės sistemos atveju turėtų komponentus, priskirtus kiekvienai fazei, tad DVGA įrenginys būtų iš trijų lygiagrečių komponentų sistemų. PWM NS grandinėje valdyti perteklinę galią reikia tik NS grandinėje, dėl to elektros komponentai turėtų būti galingesni; tačiau tokiu atveju reikia tik vienos galios elektronikos grandinės DVGA prototipiniame įrenginyje. PWM NS grandinėje metodas turėtų turėti skirtingą galios elektronikos grandinę kiekvienam įtampos lygiui, t. y. galios elektronikos grandinė turėtų būti pritaikyta skirtingoms įtampos pakopoms. Kadangi kaupiklių ar akumuliatorių įtampos lygiai skiriasi, įtampos gali svyruoti nuo 12 V iki 48 V NS, gali siekti 400 V NS ar net daugiau, priklauso nuo sistemos. Kiekvienoje įtampos pakopoje atitinkamai pagal reikiamą galią keistųsi ir srovės, tai lemtų skirtingų komponentų galios elektronikos grandinėje parinkimą kiekvienai skirtingai įtampos pakopai. PWM NS grandinėje iš pirmo žvilgsnio gali pasirodyti kaip tinkamiausias sprendimas DVGA prototipiniam įrenginiui dėl to, kad visi pereinamieji procesai dėl greitų įjungimų ir išjungimų turėtų likti NS grandinėje ir neturėtų paveikti elektros energijos kokybinių parametrų KS grandinėje. Tačiau greitas apkrovos komutavimas NS grandinėje sąlygoja akumuliatorių senėjimą ir degradaciją, tai priklauso nuo valdymo periodo [74]. Atliekant mokslinę literatūros apžvalgą rasta sprendimų [75], kurių dėka būtų galima sekti ir numatyti akumuliatorių senėjimą, nulemtą PWM metodo taikymo NS grandinėje.

Atliekant mokslinę literatūros analizę vidutinės galios valdymo metodų srityje, rasta ir daugiau metodų, pavyzdžiui, įtampa valdoma kintamoji varža. Tačiau kintamoji varža, valdoma įtampos signalu, rasta tik mažos galios, W (ne kW) eilėje, kurios prietaisai skirti valdymo grandinėms. Taip pat būtų galima pritaikyti autotransformatorius su fiksuota varža, kur vidutinė galia būtų gaunama keičiant įtampą, tačiau autotransformatorius, palyginus su kitiems metodams naudojamais prietaisais, būtų didesnių gabaritų ir svorio. Pateikti papildomi inžineriniai pavyzdžiai, kaip būtų galima užtikrinti dinaminę vidutinę galią, ir neatmetama, kad inžinerinių sprendinių gali būti ir daugiau; tačiau, nepaisant inžinerinio sprendinio, visiems sprendiniams reikia atitinkamai atlikti vidutinės galios valdymą, o tai ir yra perteklinės galios valdymo metodo uždaražame elektros mikrotinkle tyrimo tikslas. Inžinerinis sprendinys verifikuoja vidutinės galios valdymo metodą ir atitinkamai pristatyti keturi vidutinės galios valdymo inžineriniai sprendiniai, kurie leido ekonominiu ir laiko išteklių aspektais optimaliausiai parinkti vidutinės galios valdymo metodą perteklinės galios sunaudojimui. Todėl šiame poskyryje atrinkti ir pristatyti keturi vidutinės galios valdymo inžineriniai sprendiniai, siekiant parinkti tinkamiausią vidutinės galios valdymo metodą DVGA prototipiniam įrenginiui, įgalinančiam dinaminį perteklinės galios sunaudojimą. Tinkamiausias vidutinės galios valdymo metodas prototipiniam įrenginiui parenkamas atliekant skaitines moduliacijas, kuriose įvertinama prototipinio įrenginio įtaka elektros energijos kokybei uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje. Tolesniame poskyryje pristatomas mokslinės literatūros apžvalgos apibendrinimas.

1.5. Skyriaus apibendrinimas

Atlikus mokslinę literatūros apžvalgą rasta įvairių uždarujų elektros mikrotinklų tipų, tačiau išskirti tik tie tipai, kurie tiesiogiai susiję su mokslinio darbo tyrimo tema ir prototipiniu DVGA įrenginiu. Nustatyta, kad yra du pagrindiniai uždarujų elektros mikrotinklų tipai: KS ir NS. KS tipo uždaruosiuose elektros mikrotinkluose vartotojai naudoja KS elektros energiją, o NS tipo mikrotinkluose – NS elektros energiją. Iš turimų duomenų nustatyta, kad labiau paplitę yra KS tipo uždarieji elektros mikrotinklai.

Uždarojo elektros mikrotinklo sistema pati turi užtikrinti naudojimo ir generavimo balansą; tais atvejais, kai visi įrenginiai mikrotinklo sistemoje yra suderinti tarpusavyje, naudojimo ir generavimo balansas nustatomas valdančiojo generavimo šaltinio ir tokiu atveju mikrotinklo sistema veikia esant naudojimo ir generacijos galių pusiausvyrai. Tačiau, jei vienas iš esamų generavimo šaltinių yra nesuderintas, uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje gali iškilti perteklinės galios problema. Jei tokia perteklinė galia yra sukeliama AES, tada perteklinė galia dar ir sunkiai prognozuojama; tad yra sudėtinga pasiruošti perteklinei galiai iš anksto. Perteklinė galia verčia realų arba virtualų besisukantį šaltinio rotorų sukis greičiau, greitėjantis virtualaus rotoriaus sukimasis lemia uždaražame elektros mikrotinkle didėjančią sistemos dažnį. Uždarojo elektros mikrotinklo sistemos gebėjimas išlaikyti vienodą besisukantį rotoriaus greitį, sistemos dažnį, esant galios balanso pokyčiams, vadinamas sistemos inercija. Kadangi sistema yra mikroskopinio dydžio, tai ir sistemos inercija yra atitinkamo dydžio [76, 77]. Dažnis didėja taip greitai, koks yra

perteklinės galios santykinis dydis lyginant su sistemos galia [78–80], ir dažnio didėjimas trunka tol, kol perteklinė galia mikrotinkle generuojama.

Nustatyta, kad perteklinę galią uždaražame elektros mikrotinkle lemia pagrindiniai trys veiksniai: tinkliniai galios keitikliai, neoptimalus AES bei kaupiklių galių santykis ir įrangų nesuderinamumai darbui vienoje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje. Perteklinė galia didina uždarojo elektros mikrotinklo sistemos dažnį, dažnis veikia elektros energijos kokybės parametrus sistemoje ir lemia, kad dėl elektros energijos kokybės parametrų, kurių vertės yra nenustatytose normose, įrenginiai atsijunginėja. Perteklinė galia ir jos lemiamas didėjantis uždarojo elektros mikrotinklo sistemos dažnis sąlygoja sistemos atitinkamai mažėjantį stabilumą ir patikimumą [81, 82]; todėl uždaražame elektros mikrotinkle būtina valdyti perteklinę galią, kad mikrotinklo stabilumas ir patikimumas būtų padidintas, todėl atlikta perteklinės galios valdymo metodų apžvalga.

Perteklinė galia pagal išsikeltą darbo tikslą turi būti valdoma nepaveikiant uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje sukauptos elektros energijos kiekio. Jei valdymas netikslus (arba valdymo nėra visai), perteklinės galios sunaudojimo valdymas turi įtakos sukauptam elektros energijos kiekiui sistemoje. Tol, kol perteklinės galios valdymas bus atliekamas nedidamiškai pagal perteklinės galios dydį, tai turės neigiamą poveikį sistemos akumuliuotam elektros energijos kiekiui. Todėl atitinkamai atlikta perteklinės galios sunaudojimo metodų apžvalga. Atliekant mokslinę apžvalgą rasti septyni pagrindiniai metodai: šilumos / vėsos kaupimas, hidroakumuliaciniai sprendimai, elektromobilių įkrovimo, vandenilio kuro elementų, naudojimo planavimo, fiksuoto dydžio apkrovos, sistemos įrenginių valdymo algoritmo. Tačiau nė vienas iš analizuotų metodų neužtikrina tikslo pasiekimo – sunaudoti perteklinę galią uždaražame elektros mikrotinkle nepaveikiant akumuliuotos energijos kiekio sistemoje, patikimumo, ekonominio patrauklumo, naudotojo komforto ir sistemos kompleksiško. Todėl atrastas poreikis sukurti prototipinį įrenginį, kuris atitinkamai valdytų perteklinės galios sunaudojimą. Be išanalizuotų septynių perteklinės galios valdymo metodų, yra ir daugiau sprendinių, pavyzdžiui, įvairių tipų ir paskirčių kaupiklių; tačiau visi kaupikliai tik didina galimos sukaupti elektros energijos kiekį sistemoje, bet nesprenžia pačios perteklinės problemos, tik ją atitinkamai nukelia į ateitį pagal kaupiklio dydį.

Atrastas poreikis sukurti prototipinį įrenginį, kuris perteklinę galią valdytų tokiu pačiu mastu, kaip ir pati perteklinė galia tuo metu kinta uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje. Todėl kitame skyriuje pristatomas dinaminės vidutinės galios apkrovos (DVGA) prototipinis įrenginys, kurio vidutinė galia atitinkamai keičiasi pagal tai, kaip keičiasi ir perteklinė galia uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje. DVGA prototipinio įrenginio vidutinės galios valdymui atlikta apžvalga ir pristatyti keturi valdymo metodai: pavėluoto išjungimo, periodo valdymo, PWM KS grandinėje ir PWM NS grandinėje. Kiekvienas iš pristatytų vidutinės galios valdymo metodų III skyriuje realizuotas uždaro elektros mikrotinklo skaitiniame modelyje, atitinkamai kiekvieną vidutinės galios valdymo metodą palyginant tarpusavyje ir parenkant tinkamiausią metodą DVGA prototipiniam įrenginiui uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje. Vidutinės galios valdymo metodų apžvalgoje pristatyti metodai užtikrina pakankamą metodų kiekį, kad DVGA

prototipiniam įrenginiui būtų parinktas tinkamiausias metodas, užtikrinantis perteklinės galios sunaudojimą mikrotinkle nepaveikiant akumuluotos energijos kiekio sistemoje, patikimumo, ekonominio patrauklumo, naudotojo komforto ir sistemos kompleksškumo. Kitame skyriuje pristatoma uždarojo elektros mikrotinklo sistema, DVGA prototipinis įrenginys ir jo valdymo algoritmas.

1.6. Autoriaus indėlis į nagrinėjamą problematiką

Autorius įrengiamoje mokslinėje Atsinaujinančiųjų energijos šaltinių laboratorijoje KTU Elektros energetikos sistemų katedroje praktiškai susidūrė su perteklinės galios problema uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje. Iš pradžių buvo atliekama rinkos, o vėliau – ir literatūros šaltinių analizė, kaip nevaldomo šaltinio galią elektros mikrotinklo sistemoje suvaldyti nepaveikiant sistemoje sukaupto elektros energijos kiekio. Sistemos sukauptas elektros energijos kiekis buvo svarbus faktorius, nes įrengiamoje laboratorijoje buvo stengiamasi sąnaudas optimizuoti, dėl to ir akumuliatorių talpa laboratorijoje parinkta optimaliai maža. Dėl optimaliai mažos talpos akumuliatorių, jų įkrovos lygis tapo dar opesne problema valdant perteklinę galią mikrotinklo sistemoje. Susiklosčiusi situacija sąlygojo problemą, kurią autorius identifiko iš praktinės patirties.

Autoriaus indėlis – problemos suformulavimas, perteklinės galios valdymo rinkos bei literatūros šaltinių analizė, vidutinės galios valdymo metodų analizė ir naujo metodo perteklinei galiai suvaldyti sukūrimas. Visuose etapuose autorius buvo konsultuojamas mokslinio vadovo, padėjusio problemą atrasti ir suvokti, o tada atitinkamai rasti naują metodą problemai spręsti. Autoriaus pristatomas metodas skiriasi nuo kitų literatūros apžvalgoje pristatytų perteklinės galios sunaudojimo metodų tuo, kad perteklinė galia sunaudojama įvertinant šiuos faktorius: perteklinė galia patikimai sunaudojama nepaveikiant sukauptos elektros energijos kiekio sistemoje, metodas neturi įtakos naudotojo komfortui ir yra universaliai pritaikomas.

II. DINAMINĖS VIDUTINĖS GALIOS APKROVOS METODO PRISTATYMAS

Šiame skyriuje pristatomas DVGA metodas, sukurtas jo valdymo algoritmas, principinė schema, analizuojami uždarojo elektros mikrotinklo sistemos ir DVGA prototipinio įrenginio skaitiniai modeliai, aptariamas prototipinio įrenginio praktinis pritaikymas ir pateikiamas skyriaus apibendrinimas.

2.1. Apkrovos valdymo metodo algoritmas

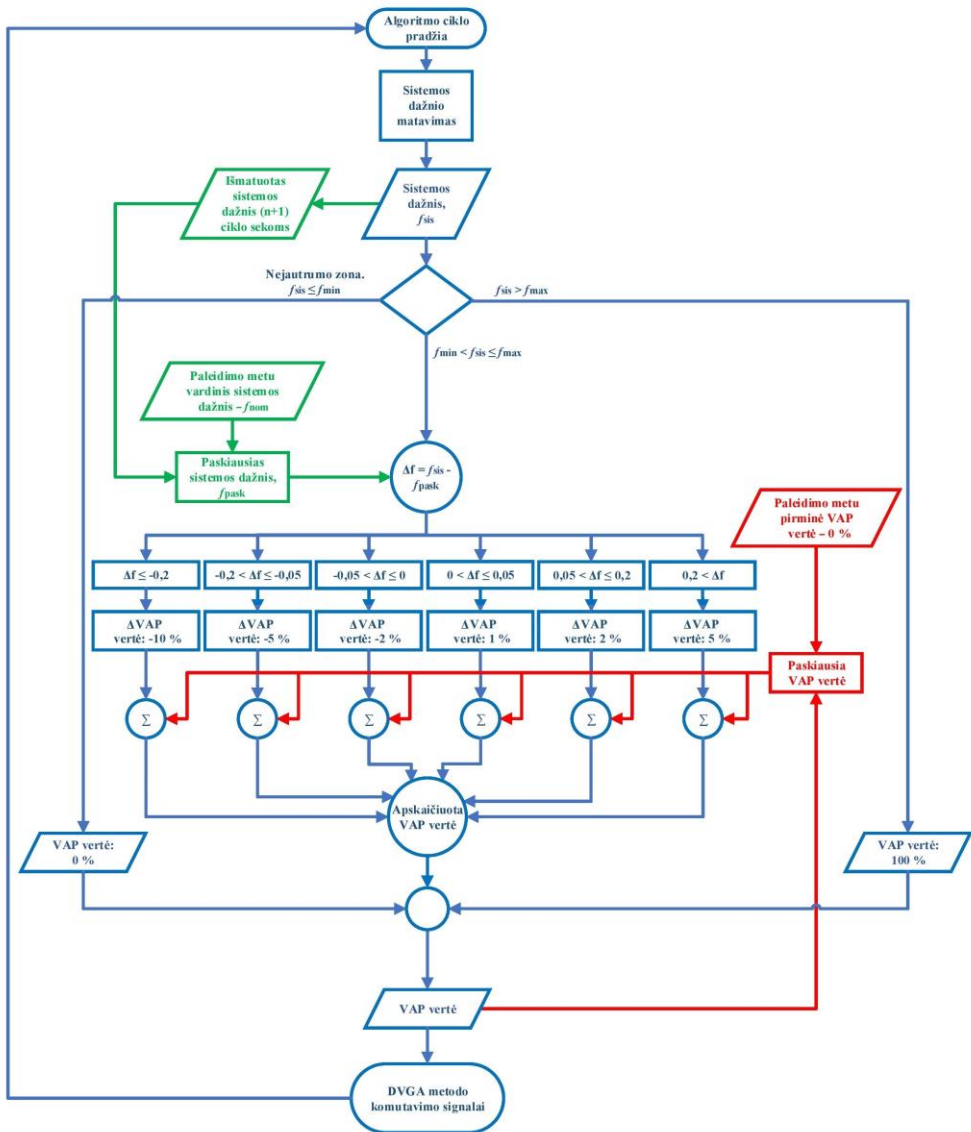
DVGA metodo pagrindinė paskirtis – valdyti sunaudojamą perteklinę galią uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje nepaveikiant sistemoje sukauptos elektros energijos kiekio. Jau nustatyta, kad, jei norime sunaudoti perteklinę galią nepaveikdami sistemoje sukauptos elektros energijos kiekio, reikia perteklinę galią naudoti tokiu pačiu dydžiu, koks atitinkamu momentu yra perteklinės galios dydis. Tokiam kintamam naudojimui valdyti šiame skyriuje pristatomas DVGA metodo valdymo algoritmas.

Perteklinė galia uždaramame elektros mikrotinkle reikšminga sistemos dažniui, todėl sistemos dažnis naudojamas kaip indikacija perteklinės galios aptikimui. DVGA metodo pagrindinė užduotis – stebėti sistemos dažnį ir keisti sunaudojamą vidutinę apkrovos galią atitinkamai taip, kaip keičiasi dažnis. Sistemos dažniui didėjant, vidutinė galia turi būti padidinta; tada vėl matuojamas dažnis ir atitinkamai keičiami komutavimo signalai, kad sunaudojama vidutinė galia pasikeistų. Sistemos dažniui mažėjant, atitinkamai komutavimo signalai keičiami, kad sunaudojama vidutinė apkrovos galia sumažėtų.

Atrinktiems keturiems vidutinės galios valdymo metodams algoritmo valdymas yra vienodas, kadangi pagrindinis dydis yra vidutinės apkrovos procento (VAP) (angl. *duty cycle*) vertė. Kiekvieno vidutinės galios metodo valdymas VAP vertę pritaiko suformuojant apkrovos komutavimo signalus. Metodui aprašyti vartojamos šios dažnio sąvokos ir vertės:

1. f_{nom} – sistemos vardinis dažnis.
2. f_{min} – DVGA metodo neįtampios zonos dažnio riba.
3. f_{max} – DVGA metodo maksimalios apkrovos dažnio riba.
4. f_{sis} – išmatuotas sistemos dažnis algoritmo cikle.
5. f_{pask} – išmatuotas arba priimtas sistemos dažnis $n - 1$ algoritmo cikle.

8 pav. pateikta DVGA metodo valdymo algoritmo seka, užtikrinanti perteklinės galios aptikimą, VAP vertės nustatymą ir sunaudojamos vidutinės galios pakeitimą, keičiant komutavimo signalus.



8 pav. DVGA metodo valdymo algoritmas

DVGA metodo valdymo algoritmo loginės signalo priėmimo sekos paaiškinimas:

1. Išmatuojamas sistemos dažnis – f_{sis} .
2. f_{sis} matavimas išsaugojamas kitam algoritmo ciklui ir matavimo vertė priskiriama vienai iš grupių:
 - a) $f_{sis} \leq f_{min}$ – DVGA metodo nejautrumo zona, tai reiškia, kad sistemoje perteklinė galia neaptikta ir DVGA metodo komutavimo signalai lemia, jog apkrova, skirta perteklinės galios sunaudojimui, būtų nejungta;

- b) $f_{\text{sis}} > f_{\text{max}}$ – DVGA metodo veikimo zona, kai apkrova visiškai įjungta, tai reiškia, kad perteklinės galios kitimo greitis yra didžiausias galimas, todėl komutavimo signalai lemia, jog apkrova, skirta perteklinės galios sunaudojimui, būtų visiškai įjungta;
- c) $f_{\text{min}} < f_{\text{sis}} \leq f_{\text{max}}$ – DVGA metodo vidutinės apkrovos galios keitimo zona. Jei tarp dviejų algoritmo ciklų sistemos dažnis didėja, tada atitinkamu žingsniu padidinama VAP vertė, jei sistemos dažnis mažėja, atitinkamai mažinama ir VAP vertė.
3. Pagal apskaičiuotą VAP vertę atitinkamai kiekvienam vidutinės galios valdymo metodui siunčiami komutavimo valdymo signalai.
4. Tolesniam algoritmo procesui išsaugomos „Apskaičiuota VAP vertė“ ir „Išmatuotas sistemos dažnis“ vertės, kurios taikomos $n = 2$ ir didesnėms algoritmo ciklo sekoms.

Trifazėje sistemoje visos trys fazės tarpusavyje susijusios, todėl, esant skirtingam apkrovimui tarp fazių, jei perteklinė galia būtų generuojama skirtingais dydžiais kiekvienoje iš fazių, asimetrija būtų subalansuota valdančiajame mikrotinklo generavimo šaltinyje. Jei valdantysis generavimo šaltinis yra fiziškai besisukantis elektros variklis, tokiu atveju galių disbalansas subalansuojamas valdančiojo generavimo šaltinio apvijose. Jei valdantysis generavimo šaltinis yra baterijų keitikliai, tada galių disbalansas tarp fazių atitinkamai subalansuojamas baterijų keitiklių kaupiklyje, pavyzdžiui, akumuliatoriuje. Trifazė sistema, kurios visos trys fazės būtų nepriklausomos viena nuo kitos, reikalautų sprendimo, kad metodas būtų pritaikytas kiekvienai fazei atskirai.

VAP vertės dydis skaičiuojamas pagal sistemos dažnio pokytį tarp dviejų vienas po kito einančių algoritmo ciklų. Jei DVGA prototipinis įrenginys naujai įjungiamas darbui, valdymo algoritmo paskiausias sistemos dažnis f_{pask} priskiriamas f_{nom} , visuose tolesniuose algoritmo cikluose f_{pask} nustatomas pagal $(n - 1)$ algoritmo ciklo sistemos dažnio vertę.

Kitame algoritmo ciklo etape apskaičiuojamas dažnio pokytis:

$$\Delta f = f_{\text{sis}(n)} - f_{\text{sis}(n-1)}; \quad (1)$$

- čia Δf – apskaičiuotas dažnio pokytis n -tojo algoritmo cikle, Hz;
 $f_{\text{sis}(n)}$ – n -tojo algoritmo ciklo išmatuotas sistemos dažnis, Hz;
 $f_{\text{sis}(n-1)}$ – $n - 1$ algoritmo ciklo išmatuotas sistemos dažnis, Hz.

Pagal apskaičiuotą dažnio pokytį atitinkamai priskiriama tarpinė VAP vertė, ji priklauso nuo dažnio pokyčio dydžio. Tada ΔVAP vertė susumuojama su paskiausia VAP verte. Jei tai tik pirmasis algoritmo ciklas, tada paskiausia VAP vertė laikoma 0 %, antrojo, trečiojo ir t. t. algoritmo cikluose kaip paskiausia VAP vertė taikoma paskutinio praėjusio ciklo apskaičiuota VAP vertė.

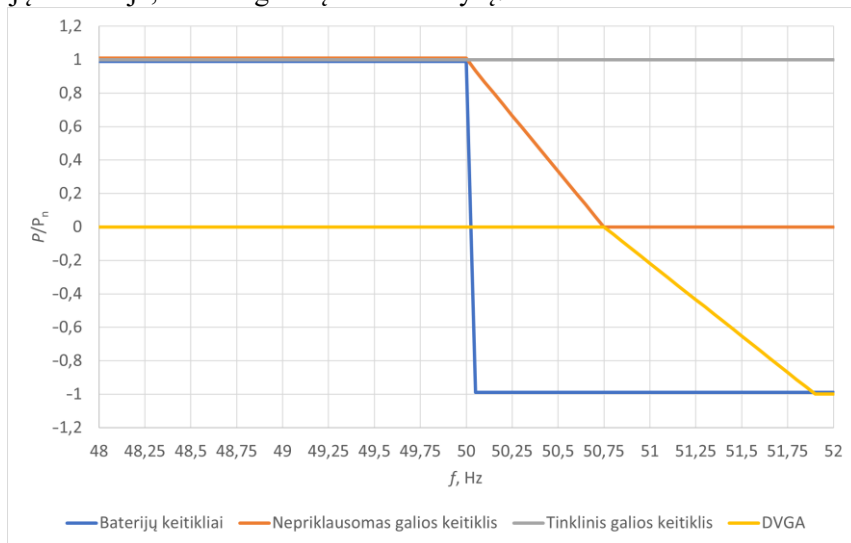
$$VAP_{(n)} = VAP_{(n-1)} + \Delta VAP; \quad (2)$$

- čia $VAP_{(n)}$ – apskaičiuojama VAP vertė n -tojo algoritmo cikle, %;
 ΔVAP – n -tojo algoritmo ciklo parinkta tarpinė VAP vertė, %;
 $VAP_{(n-1)}$ – $n - 1$ algoritmo ciklo apskaičiuota VAP vertė, %.

Apskaičiuota VAP vertė taikoma atitinkamo vidutinės apkrovos galios valdymo metodo įjungimo ir išjungimo laikui apskaičiuoti, t. y. kiekvienu metodo atveju, kada apkrova turi būti įjungta ir kada išjungta. Valdymo algoritmo ciklo pabaigoje išsaugomos dažnio matavimo ir VAP vertės tolesniam algoritmo ciklui. Kadangi uždarojo elektros mikrotinklo sistema sudaryta iš skirtingų įrenginių, turint tikslą, kad visi įrenginiai dirbtų jiems priskirtuose parametru rėžiuose, metodo aprašyme pateiktoms dažnio sąvokoms priskiriamos ir paaiškinamos dažnio vertės:

1. f_{nom} – sistemos vardinis dažnis. Priskirtas sistemos vardinis dažnis yra 50 Hz.
2. f_{min} – DVGA metodo neįėjimo zonos dažnio riba. Kadangi eksperimentinėje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje turima ne tik nevaldomų generuojančių šaltinių, bet ir įrenginių, kurie savo generuojamą galią valdo pagal poreikį sistemoje, f_{min} vertė eksperimentiškai nustatyta 50,75 Hz, dažnio reikšmių skirtumas tarp f_{nom} ir f_{min} skirtas generuojantiems šaltiniams pagal poreikį valdyti generuojamą galią uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje.
3. f_{max} – DVGA metodo maksimalios apkrovos dažnio riba. Tai eksperimentiškai nustatyta 51,9 Hz vertė, kurią pasiekus DVGA metodo apkrovos valdymas būtų toks, jog apkrova perteklinės galios sunaudojimui būtų ištiesai įjungta. Dažnio reikšmių skirtumas tarp f_{min} ir f_{max} yra DVGA metodo dinaminės vidutinės galios valdymui skirtas dažnio diapazonas.
4. f_{sis} – išmatuotas sistemos dažnis algoritmo cikle.
5. f_{pask} – išmatuotas arba priimtas sistemos dažnis $n - 1$ algoritmo cikle.

Dažnio reikšmės parinktos taip, kad būtų užtikrintas atitinkamų įrenginių darbo selektyvumas uždaryjame elektros mikrotinkle, priklausantis nuo sistemos dažnio. Kadangi mikrotinklo sistema yra sąlygiškai maža, ji turi atitinkamai mažą sistemos inerciją, tad mažas galios pokytis gali reikšmingai nulemti sistemos dažnį. Todėl eksperimentiškai parinktos reikšmės pavaizduotos selektyvumo kreivėje 9 pav.; tai užtikrina pakankamą laiko kiekį įrenginiams sureaguoti į besikeičiančią situaciją sistemoje, atsižvelgiant į sistemos dydį.



9 pav. Uždarojo elektros mikrotinklo įrenginių generacijos selektyvumas

Uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje baterijų keitikliai dirba nuo 48 Hz iki 52 Hz dažnio diapazone. Iki 50 Hz baterijų keitikliai generuoja elektros energiją pagal vartotojų poreikį ir esant poreikiui gali pasiekti vardinę galią. Virš 50 Hz baterijų keitikliai mažina generaciją, kad mažintų sistemos dažnį esant pakankamai generacijai iš atsinaujinančiųjų šaltinių. Todėl baterijų keitikliai 50–52 Hz diapazone įsijungia tik tuo atveju, jei kyla staigus pereinamasis procesas. Pavyzdžiui, kai atsijungia tinklinis galios keitiklis dėl per didelio dažnio ir staigiai pasikeitus galių balansui mikrotinklo sistemoje reikia galių balansą išlaikyti, kol kiti šaltiniai sureaguos į pasikeitusią galių balanso situaciją. Nepriklausomas galios keitiklis iki 50 Hz dažnio diapazone gali generuoti vardinę galią, o dažnio diapazone nuo 50 Hz iki 50,75 Hz sumažina galią iki 0 tam, kad būtų amortizuotas perteklinės galios kiekis. Nepriklausomas galios keitiklis nuo 50,75 Hz iki 52 Hz negeneruoja, laukia kol sistemos dažnis sumažės iki 50,75 Hz. Tinklinis galios keitiklis savo generuojamos galios nevaldo ir savo vardinę galią gali pasiekti viso dažnio diapazono ribose, nuo 48 Hz iki 52 Hz. DVGA prototipinis įrenginys dažnio diapazone nuo 48 Hz iki 50,75 Hz veikia laukimo režimu, nevaldo apkrovos galios ir laukia, kol dažnis pakils virš 50,75 Hz; nuo 50,75 Hz iki 51,9 Hz DVGA įrenginys valdo apkrovos vidutinę galią, t.y. keičia vartojamą vidutinę galią mikrotinklo sistemoje pagal valdymo algoritmą ir virš 51,9 Hz DVGA prototipinis įrenginys apkrovą įjungia maksimalia vardine galia. Toks uždarojo elektros mikrotinklo įrenginių galios selektyvumas užtikrina, kad:

1. Uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje neaptinkant perteklinės galios, elektros energija nebūtų beprasmiškai eikvojama iš sukauptos elektros energijos ir AĖŠ generuotą maksimumą.
2. Mikrotinklo sistemoje atsiradus perteklinei galiai, perteklinė galia pirmiausia būtų sumažinama įrenginiuose, kurie sugeba reaguoti į atsiradusią perteklinę galią ir geba lanksčiai valdyti generuojamą galią.
3. Nepaisant antrojo punkto perteklinei galiai ir toliau didėjant įsijungtų DVGA prototipinis įrenginys, valdantis sunaudojamą perteklinę galią uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje.

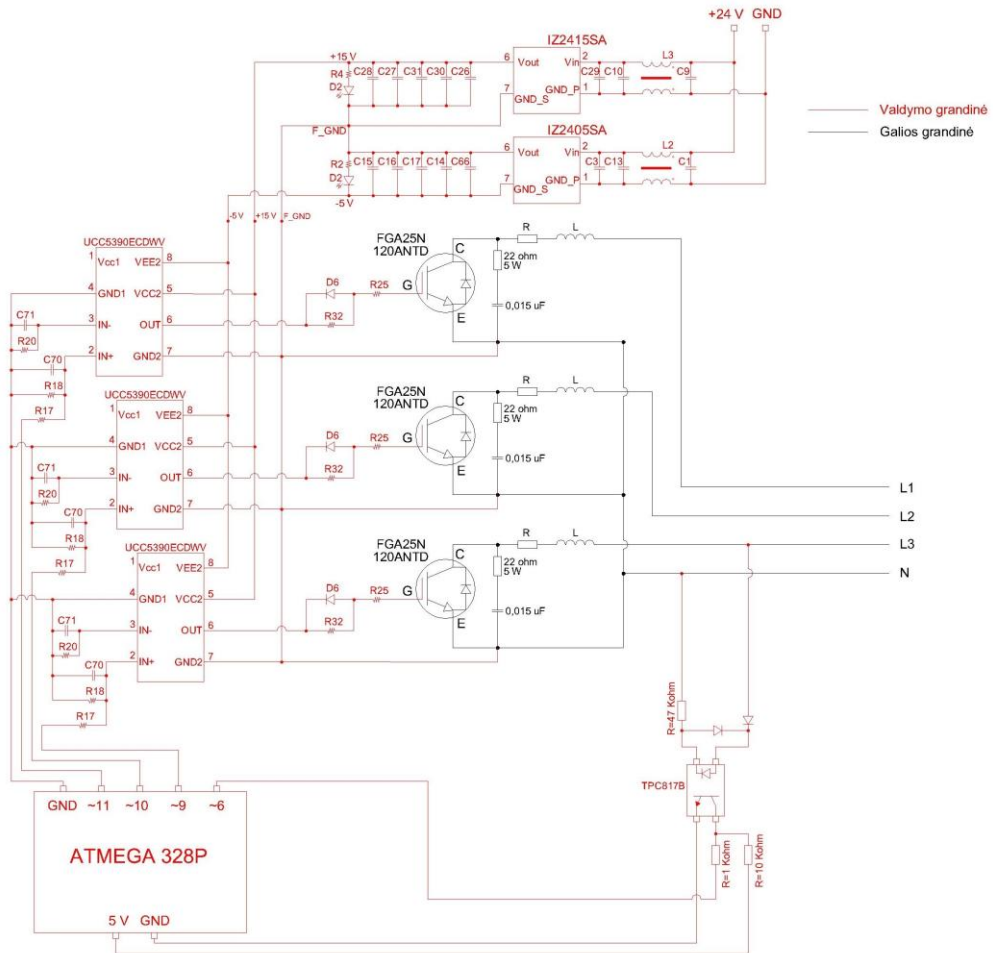
DVGA perteklinės galios metodas įgalinant valdymo algoritmą pagal kintantį sistemos dažnį apskaičiuoja ir parenka VAP vertę, kurią reikia pritaikyti kiekvienam iš pristatytų vidutinės galios valdymo metodų. Periodo valdymo metodas įjungia tik tam tikrus periodus sinusoidėje, todėl atitinkamai pagal VAP vertę parenkamas reikiamas kiekis periodų, kuriais turi būti įjungta apkrova, ir pagal tai suformuluojami įjungimo ir išjungimo komandų signalai. Pavėluoto įjungimo valdymo metodas kiekvieną pusperiodį apkrovą įjungia pavėluotai, pagal tai, kokia vidutinė galia reikalinga. PWM KS grandinėje vidutinės galios valdymo metodui priskiriamas laikas, kai apkrova turi būti įjungta ir išjungta atitinkamai pagal VAP vertę. PWM KS grandinėje valdymo ciklo laikas priklauso nuo įrangos greitaveikos; kuo įranga gali greičiau įjungti ir išjungti apkrovą, tuo mažesnė galima valdymo ciklo periodo trukmė. DVGA prototipinio įrenginio valdymo algoritmas pritaikytas ir PWM NS grandinėje vidutinės galios valdymo metodui, tik šiuo atveju apkrova įjungiamą ir išjungiamą NS grandinėje.

DVGA prototipinio įrenginio valdymo algoritmas sukurtas taip, kad būtų užtikrintas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje dirbančių įrenginių selektyvumas valdant perteklinę galią mikrotinklo sistemoje. Perteklinės galios valdymo algoritmas suprojektuotais žingsniais keičia vidutinę apkrovos galią, kad būtų pasiektas tikslas valdyti perteklinę galią, kurią sukelia nevaldomi AĖŠ su tinkliniais galios keitikliais, uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje nepaveikiant sistemoje sukauptos elektros energijos kiekio. Tolesniame poskyryje pristatomas uždarojo elektros mikrotinklo sistemos skaitinis modelis kartu su DVGA prototipinio įrenginio modeliu.

2.2. DVGA prototipinio įrenginio aprašymas ir principinė schema

Uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje perteklinė galia veikia visą sistemos darbą, tačiau perteklinė galia aptinkama ten, kur tiesiogiai elektriškai prijungtas yra ir perteklinę galią generuojantis šaltinis. Todėl perteklinės galios aptikimas numatytas NS grandinėje, matuojant sistemos dažnį.

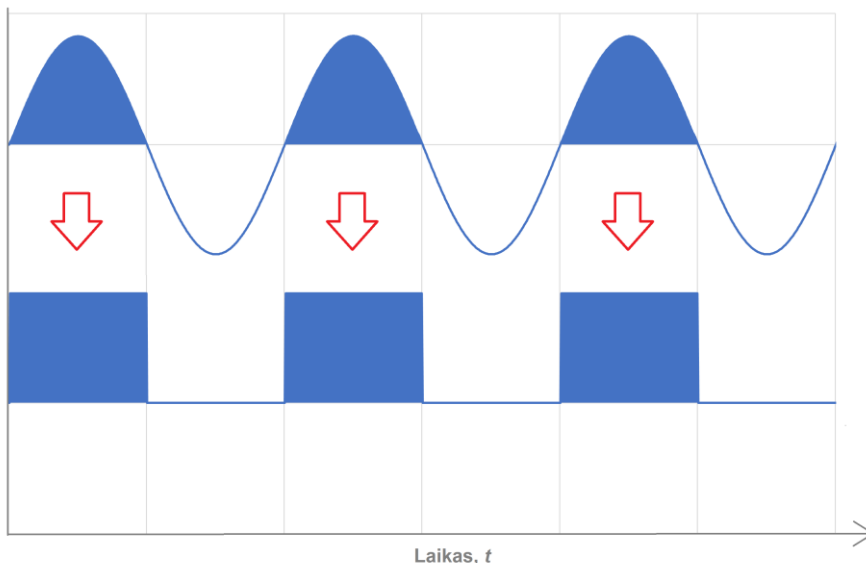
Atrastam poreikiui dinamiškai sunaudoti perteklinę galią uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje kuriamas DVGA prototipinis įrenginys, sistemoje sunaudojantis perteklinę galią nepaveikiant sistemos sukaupto elektros energijos kiekio. DVGA prototipinį įrenginį sudaro penkios dalys: stačiakampių signalų generatorius, pagrindinis valdiklis, galios grandinės valdiklis, galios grandinė ir maitinimo grandinė. Visos penkios dalys, kaip ir pats prototipinis įrenginys, sukurtos iš pagrindų pagal poreikį pasigaminant ir PCB plokštes. Įrenginys yra prototipinis, todėl ne visi komponentai pritaikyti kaip galutinio produkto sprendimas; taigi prototipinis įrenginys yra negalutinis produktas ir neskirtas rinkai ar pardavimams. Prototipinio įrenginio pagrindinė paskirtis yra tyrimas realioje eksperimentinėje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje tam, kad būtų išsiaiškintos prototipinio įrenginio pritaikymo galimybės, veikimo ypatumai ir įtaka uždarojo elektros mikrotinklo elektros energijos kokybei. Tad dėl prototipinio įrenginio paskirties, įrenginys nebuvo tobulinamas kaip galutinis pardavimui skirtas produktas; norint tobulinti įrenginį kaip parduodamą produktą, reikėtų prototipinį įrenginį pagerinti ir pritaikyti rinkai. Penkios prototipinio įrenginio dalys yra neatsiejamos viena nuo kitos, įrenginio principinė schema pateikta 10 pav. Visi 1.4 poskyryje pristatyti vidutinės galios valdymo metodai turi visas penkias prototipinio įrenginio sudedamąsias dalis.



10 pav. DVGA prototipinio įrenginio principinė schema

Pirmoji DVGA prototipinio įrenginio dalis – stačiakampių signalų generatorius. Šios dalies paskirtis yra sinusoidės keitimas į stačiakampius signalus. Pagrindiniai šios dalies komponentai – diodai, fototranzistorius ir rezistoriai. Rezistoriai parinkti atitinkamai taip, kad fototranzistorius veiktų optimaliai, t. y. kad sugeneruoti stačiakampiai būtų kuo tikslesni, kad stačiakampio signalo įjungimo ir išjungimo momentai sutaptų su sinusoidės 0 V kirtimu. Principinis procesas, vykstantis šioje DVGA prototipinio įrenginio dalyje, pavaizduotas 11 pav. Diodai praleidžia tik vieną – teigiamą sinusoidės pusperiodį, fototranzistorius suveikia ir tuo metu, kai įtampa teigiama, formuojamas 5 V dydžio signalas. Neigiamojo pusperiodžio atveju sinusoidė nepraleidžiama, fototranzistorius nesuveikia, ir signalas tolesnei DVGA prototipinio įrenginio pagrindinio valdiklio daliai neperduodamas. Keičiant rezistorius keičiasi stačiakampio signalo įsijungimo bei išsijungimo trukmė ir paties stačiakampio signalo statusas. Stačiakampių signalų generatoriaus dalies komponentai tarpusavyje suderinti, kad būtų gautas kuo tikslesnis ir taisyklingesnis stačiakampio formos signalas. Nuo stačiakampio signalo

formos priklauso dažnio matavimo tikslumas ir vidutinės galios valdymo metodu veikimo tikslumas.



11 pav. Stačiakampių signalų generatoriaus veikimo principas

Sugeneruoti stačiakampiai signalai perduodami į pagrindinį valdiklį. Pagrindinį DVGA prototipinio įrenginio valdiklį sudaro valdiklis „Atmega 328 P“. Pagrindinis valdiklis skaičiuoja mikrotinklo sistemos dažnį, jame suprogramuotas valdymo algoritmas, pagal kurį atitinkamai perduodami signalai galios grandinės valdikliui. Galios grandinės valdiklis pagal gautus signalus įjungia arba išjungia jungiklį. Uždarąjo elektros mikrotinklo dažnis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_{(n)} = 1 / T = 1 / (t_{ON} + t_{OFF}); \quad (3)$$

čia $f_{(n)}$ – sistemos dažnis n -tojo algoritmo cikle, Hz;

T – sinusoidės periodo laikas, s;

t_{ON} – įjungto stačiakampio signalo laikas, s;

t_{OFF} – išjungto stačiakampio signalo laikas, s.

Apskaičiuotas dažnis taikomas algoritmo cikluose, ir atitinkamai pagal vidutinės apkrovos galios valdymo metodą parenkamos įjungimo ir išjungimo komandos galios grandinės valdikliui.

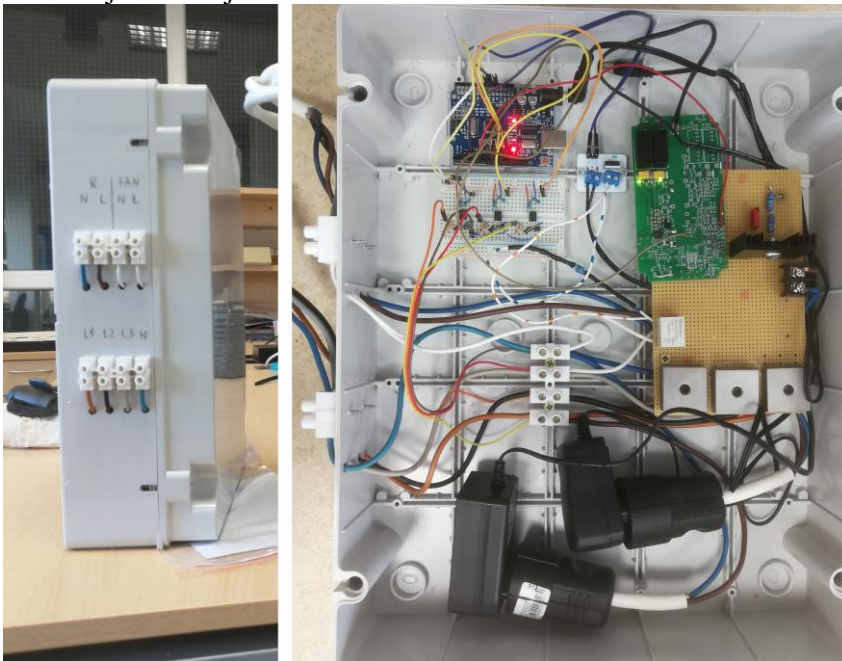
Galios grandinės valdiklio paskirtis – suformuotus įjungimo ir išjungimo komandų signalus iš pagrindinio valdiklio konvertuoti atitinkamai į +15 V arba –5 V jungiklio atžvilgiu. Pagrindinis šios dalies komponentas yra vieno kanalo izoliuotas valdiklis (modelis UCC5390ECDWV), kuris valdo tranzistoriaus (galios grandinės jungiklio) valdymo elektroda. Tranzistoriaus įjungimui vieno kanalo izoliuotas valdiklis gauna 5 V signalą iš pagrindinio valdiklio, tą signalą sustiprina iki +15 V įjungdamas maitinimo grandinės +15 V dalį į tranzistoriaus valdymo elektroda. 5 V signalui pasibaigus, vieno kanalo izoliuotas valdiklis tranzistorių išjungia, tam, kad

išjungimas būtų kuo staigesnis, vieno kanalo izoliuotas valdiklis tranzistoriaus valdymo elektrodui prijungia -5 V įtampą nuo maitinimo grandinės dalies.

Maitinimo grandinės dalies paskirtis yra tiekti $+15\text{ V}$ ir -5 V įtampą vieno kanalo izoliuotam valdikliui. Maitinimo grandinė pirmiausia iš 230 V KS keičia į 24 V NS , tada 24 V įtampa keičiama į 15 V ir 5 V įtampas vienu metu. 15 V minusas sujungiamas su galios grandinės 0 V , tad plusas yra $+15\text{ V}$, o 5 V dalies plusas prijungiamas taip pat prie galios grandinės 0 V , todėl plusas prilyginamas 0 V potencialui, o minusas prijungiamas prie -5 V įtampos.

Galios grandinės dalies paskirtis yra pagal vieno kanalo izoliuoto valdiklio atsiųstą valdymo signalą įjungti ir išjungti apkrovą. Pagrindiniai komponentai, sudarantys galios grandinės dalį, yra tranzistoriai (modelis FGA25N120ANTD), kondensatoriai, varžai ir ritė. Šioje dalyje atliekama pagrindinė prototipinio įrenginio užduotis – vidutinės galios keitimas pagal atitinkamą vidutinės galios valdymo metodą.

Prototipinis DVGA įrenginys ir jo modelis, pristatytas 2.3 poskyryje, nėra identišškai vienodi, kadangi preciziškai pavaizduoti natūraliai vykstančius procesus labai sudėtinga; nepaisant to, esamų komponentų charakteristikos skiriasi tarp jo modelio ir realaus komponento. Todėl modelis yra kiek paprastesnė realaus prototipinio įrenginio versija, kurios paskirtis yra ištirti skirtingus vidutinės apkrovos galios valdymo metodus uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje ir atitinkamai parinkti tinkamiausią metodą prototipinio įrenginio darbui eksperimentinėje sistemoje.

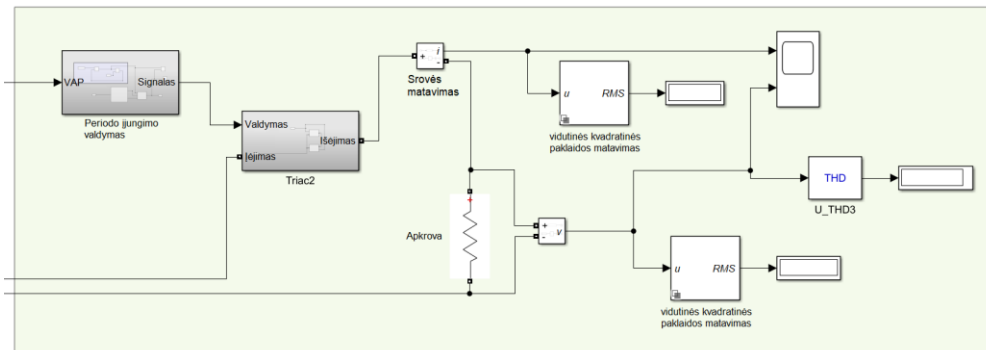


12 pav. DVGA prototipinio įrenginio nuotrauka: kairėje vaizdas iš lauko; dešinėje vaizdas iš vidaus

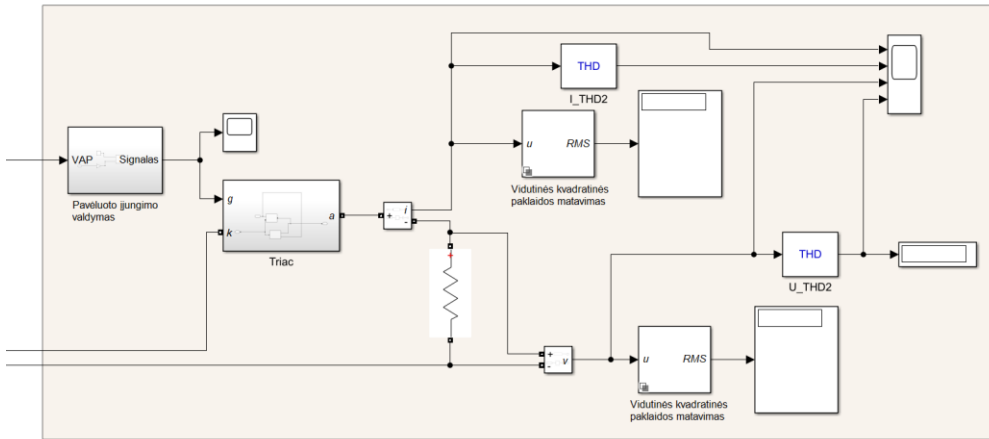
Pristatyta DVGA prototipinio įrenginio schema ir jo sudedamosios dalys, taip pat prototipinio įrenginio nuotrauka pateikta 12 pav. DVGA prototipinio įrenginio struktūra užtikrina lankstų įrenginio paskirties išpildymą visų vidutinės galios valdymo metodų poreikiui – valdyti perteklinę uždarojo elektros mikrotinklo galią, kurią sukelia tinkliniai galios keitikliai su AES, neigiamai nepaveikiant mikrotinklo sistemoje sukaupto elektros energijos kiekio. Šiame darbe pristatytų tyrimų metu kaip DVGA metodo apkrova, kuri ir sunaudoja perteklinę galią sistemoje, naudotas oro šildytuvas – radiatorius. Tačiau metodui pritaikyti tiktų įvairios apkrovos pagal mikrotinklo sistemos poreikį, pavyzdžiui, akumuliacinės talpos šilumos ar šalčio kaupimui arba kiti įrenginiai, kuriuos būtų galima apkrauti pagal valdymo poreikį. Tolesniame poskyryje pristatomas DVGA prototipinio įrenginio valdymo algoritmas.

2.3. DVGA prototipinio įrenginio skaitinis modelis

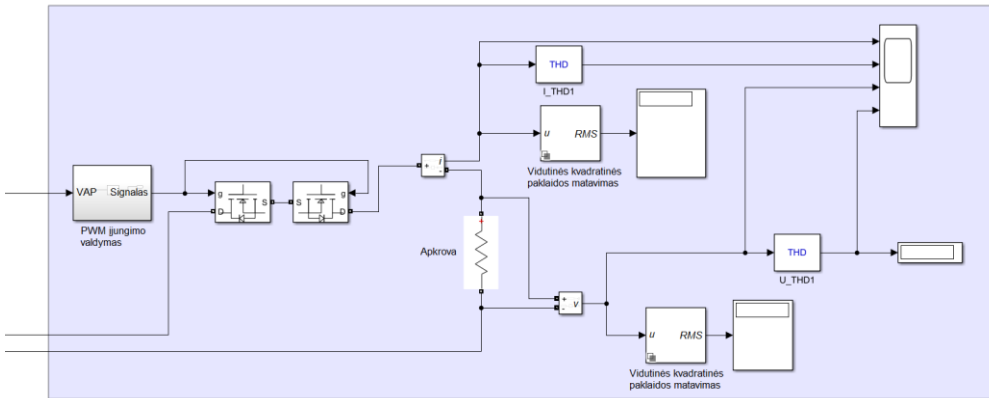
Sukurtas skaitinis DVGA prototipinio įrenginio modelis kartu su uždarojo elektros mikrotinklo sistemos skaitiniu modeliu tam, kad metodo bei prototipinio įrenginio, verifikuojančio metodo veikimą, funkcionalumas būtų ištirtas skaitinėje aplinkoje, kad būtų parinktas tinkamiausias vidutinės galios valdymo metodas ir kad prototipinį įrenginį būtų galima pritaikyti įvairių uždarojo elektros mikrotinklo sistemų modeliams. Sukurti keturi modeliai su *MatLab Simulink* programa (programos gamintojas „The MathWorks, Inc.“, naudota programos versija R2022b), kurie yra identiški, tik skiriasi vidutinės galios valdymo metodo dalys. Valdymo metodų modelių struktūra pateikta 13–16 pav., kiekviena šių struktūrų integruota į uždarojo elektros mikrotinklo sistemos skaitinį modelį ir atlikta kiekvieno valdymo metodo modeliavimo analizė.



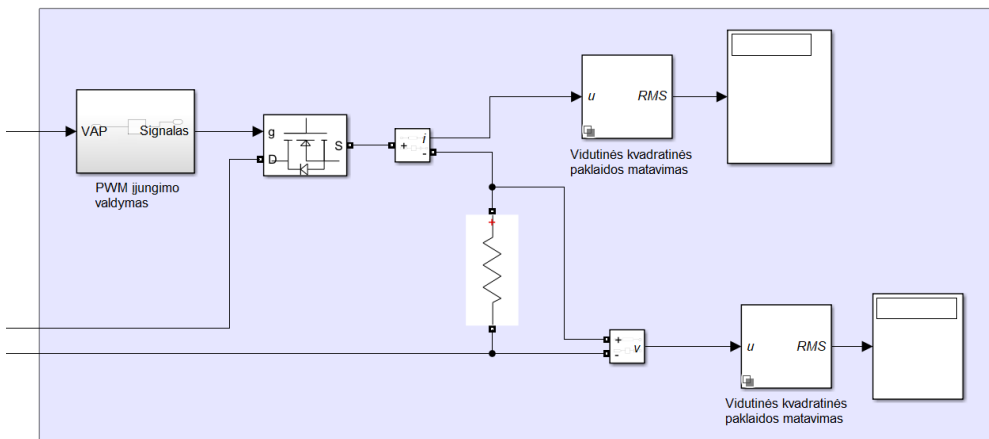
13 pav. Periodo valdymo metodo modelio struktūra



14 pav. Pavėluoto įjungimo valdymo metodo modelio struktūra

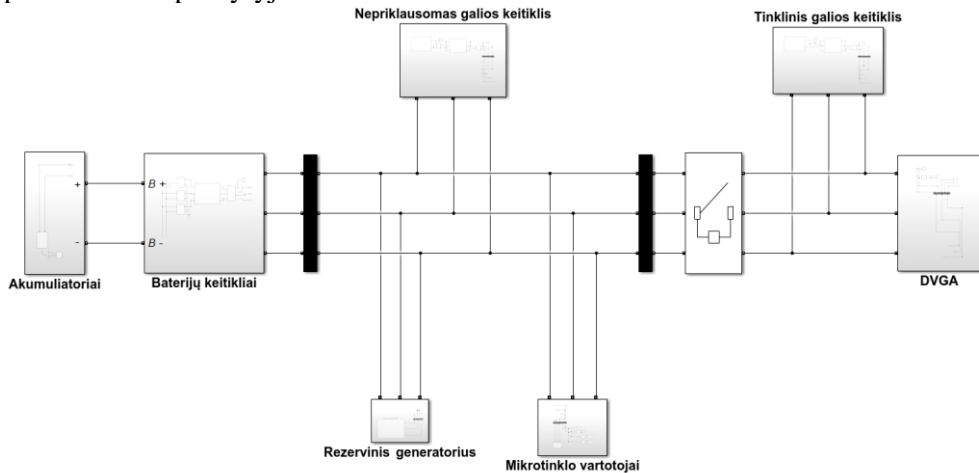


15 pav. PWM KS grandinėje valdymo metodo modelio struktūra



16 pav. PWM NS grandinėje valdymo metodo modelio struktūra

Kiekvienas metodas integruotas į uždarojo elektros mikrotinklo sistemos skaitinį modelį, kurio struktūra pateikta 17 pav. Struktūrą, kaip ir realią eksperimentinę uždarojo elektros mikrotinklo sistemą sudaro baterijos, baterijų keitikliai, rezervinis generatorius, nepriklausomas galios keitiklis su AEŠ, tinklinis galios keitiklis su AEŠ, uždarojo mikrotinklo apkrovos ir DVGA prototipinis įrenginys. Plačiau eksperimentinė uždarojo elektros mikrotinklo struktūra ir sandara paaiškinta 3.1 poskyryje.



17 pav. Uždarojo elektros mikrotinklo sistemos skaitinio modelio struktūra

Pagal vidutinės galios valdymo metodą taip pat keičiasi ir valdymo ciklo trukmė. Kadangi mikrotinklo sistema turi mažą inerciją, dažnis kinta greitai, DVGA prototipinio įrenginio greitaveika turi būti pakankamai didelė, kad spėtų keisti vidutinę apkrovos galią pagal kintantį dažnį. Tik periodo valdymo vidutinės galios valdymo metodo atveju vidutinės galios žingsnių kiekis turi įtakos valdymo periodo trukmei. Parinkus, pavyzdžiui, 100 žingsnių, kad vidutinę galią būtų galima keisti kas 1 procentą, reikėtų 2 sekundžių valdymo periodui, nes mažiausias žingsnis būtų vienas sinusoidės periodas, trunkantis 2 ms, o šimtas tokių periodų sudarytų 2 sekundes. Atsižvelgus į uždarojo elektros mikrotinklo sistemos dydį priimta prielaida, kad valdymo periodo trukmė negali viršyti 0,5 sekundės tam, jog būtų suspėta prisitaikyti prie besikeičiančios apkrovos ir generacijos uždarajame elektros mikrotinkle. Pritaikius prielaidą, kad valdymo periodas negali būti ilgesnis nei 0,5 s, visi valdymo metodai yra greiti, išskyrus periodo valdymo metodą. Periodo valdymo metodas įjungia arba išjungia sinusoidės periodus, pusėje sekundės yra 25 sinusoidės periodai, todėl mažiausias galimas periodo valdymo metodo galios keitimo žingsnis yra 4 %. Likusių trijų vidutinės galios valdymo metodų apkrovos valdymo ciklas yra mažesnis nei 0,01 s (pusė sinusoidės periodo), todėl galimas minimalus VAP vertės žingsnis yra mažesnis nei 1 % vardinės apkrovos ir priklauso tik nuo paties jungiklio arba jo valdymo greitaveikos galimybių.

Vidutinės galios valdymo žingsnio dydis lemia, kaip tiksliai gali būti valdoma perteklinė galia uždaroje elektros mikrotinklo sistemoje. Turint tik vieną ar kelis žingsnius, vidutinės apkrovos vertė labai retai bus lygi perteklinės galios vertei,

todėl galios skirtumas bus kompensuotas galia, paimama iš kaupiklio, o tai jau lemia sukauptos elektros energijos kiekio pokytį sistemoje. Kadangi prototipinio valdiklio algoritmo keičiama VAP vertė yra vieno procento tikslumu, todėl priimta, kad vidutinės apkrovos galios keitimas procento tikslumu yra optimalus. Periodo valdymo metodo atveju, apkrova keičiama 4 % vidutinės apkrovos galios žingsniu. Likę trys vidutinės galios valdymo metodai (pavėluoto įjungimo, PWM KS grandinėje ir PWM NS grandinėje) padeda vidutinę apkrovos galią valdyti mažesniu nei 1 % žingsniu, bet visų metodų vidutinės galios apkrovos žingsnis apribotas ir suvienodintas ties 1 %.

Pagal esamą skaitinio modelio struktūrą ir valdymo algoritmą sukurtas eksperimentinis prototipinis DVGA įrenginys, kurį integravus eksperimentinėje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje rezultatai patikrinami realiame mikrotinkle. Tolesniame skyriuje apžvelgiama, kur ir kokiomis sąlygomis DVGA prototipinis įrenginys gali būti pritaikomas.

2.4. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje pristatyta DVGA prototipinio įrenginio struktūra ir schema. Kartu su DVGA prototipiniu įrenginiu taikoma apkrova perteklinei galiai sunaudoti, o patį prototipinį įrenginį sudaro penkios dalys, kurios, nepaisant skirtingų vidutinės galios valdymo metodų, išlieka tos pačios: stačiakampių signalų generatorius, pagrindinis valdiklis, galios grandinės valdiklis, galios grandinė ir maitinimo grandinė. Prototipinio įrenginio struktūra užtikrina technines galimybes vidutinės galios sunaudojimo valdymui atitinkamu 1 % tikslumu. Vieno procento tikslumu keičiama vidutinės galios apkrova perteklinės galios sunaudojimui užtikrina, kad mikrotinklo sistemoje sukauptas elektros energijos kiekis kaupikliuose nebūtų paveiktas.

Prototipinio įrenginio valdymo algoritmas sukurtas taip, kad nepaisant, kokios galios apkrova būtų taikoma perteklinės galios sunaudojimui, vidutinės galios valdymo algoritmas užtikrins sunaudojamą perteklinę galią uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje nepertraukiamai. Parinkta apkrova vidutinės galios valdymui negali būti mažesnė nei maksimali galima perteklinė galia uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje.

Pristatyti vidutinės galios valdymo metodų skaitiniai modeliai ir uždarojo elektros mikrotinklo skaitinis modelis. Tolesniame skyriuje atliekamos skaitinių modelių moduliacijos ir tyrimas, kad pagal sukurtus modelius būtų parinktas tinkamiausias vidutinės galios valdymo metodas DVGA prototipiniam įrenginiui.

III. PROTOTIPINIO ĮRENGINIO MODELIAVIMAS IR EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Šiame skyriuje pristatomas eksperimentinės uždarojo elektros mikrotinklo sistemos su joje esančiu šaltiniu, generuojančiu perteklinę galią, tyrimas. Išanalizuoti perteklinės galios komutacijos sukelti pereinamieji procesai eksperimentinėje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje. Sumodeliuotoje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje realizuotas DVGA prototipinio įrenginio modelis, analizuoti skirtingi prototipinio įrenginio valdymo metodai palyginti tarpusavyje, parinktas tinkamiausias vidutinės galios valdymo metodas realiam prototipiniam įrenginiui. Ankstesniame skyriuje pristatytas prototipinis DVGA įrenginys ištestuotas eksperimentinėje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje ir tyrimo rezultatai atitinkamai pateikiami šio skyriaus eksperimentinio tyrimo dalyje. Tiek modeliavimo, tiek realių tyrimų rezultatai apibendrinami ir aprašomas autoriaus indėlis į atliktą darbą.

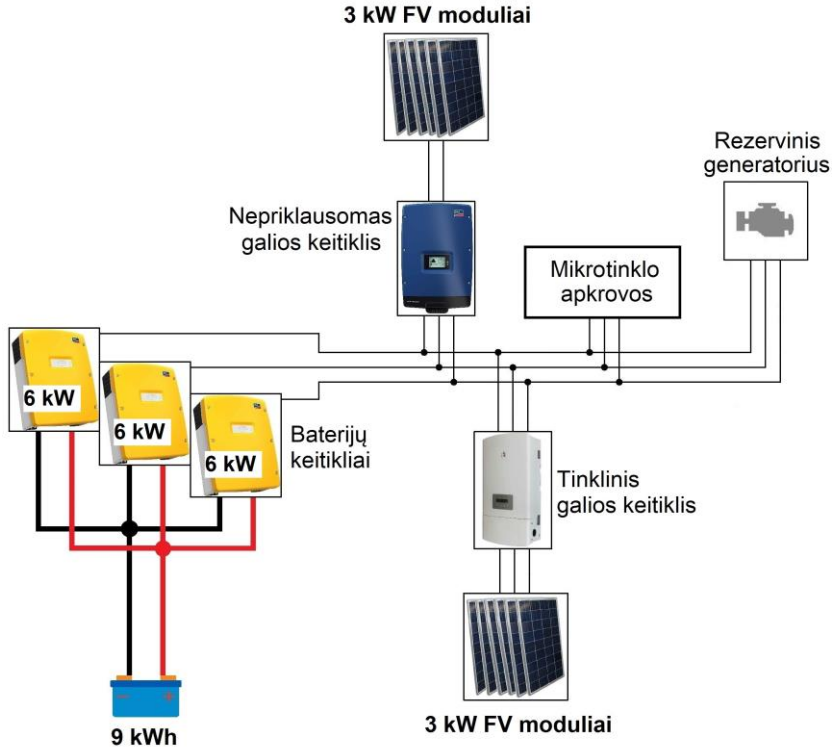
3.1. Eksperimentinės uždarojo elektros mikrotinklo sistemos struktūra

Uždarojo elektros mikrotinklo sistemos pagrindinius komponentus, neminint elektros perdavimo linijų, sudaro šaltiniai ir naudotojai. Stengiamasi, kad tokios mažos ir nepriklausomos sistemos turėtų kuo daugiau AEŠ. Kadangi AEŠ generuoja tada, kai tam yra susidariusios palankios aplinkos sąlygos, o ne tada, kai to reikia naudotojui, uždarojo elektros mikrotinklo sistema, labai tikėtina, turės ir akumulatorius arba kaupiklius tam, kad būtų išlaikytas naudojimo ir generacijos balansas. Uždarajame elektros mikrotinkle elektros energijos siuntimui į kaupiklį arba akumulatorius, ir atvirkščiai, dažniausiai reikia atlikti NS keitimą į KS ir atvirkščiai; todėl taip pat labai tikėtina, kad mikrotinklo sistemoje bus naudojami baterijų keitikliai. Šiame tyrime analizuojama uždarojo elektros mikrotinklo sistema, kaip pavaizduota 18 pav., o jos įrenginiai smulkiau aprašyti 2 lentelėje.

2 lentelė. Uždarojo elektros mikrotinklo eksperimentinės sistemos įrangos sąrašas

Įrangos pavadinimas	Kiekis, vnt.	Aprašymas
„SMA Sunny Island 6.0H“	3	Baterijų keitikliai. Kiekvieno jų vardinė galia 6 kW. Keitikliai gali dirbti arba tik kaip baterijų keitikliai, įkraunantys arba iškraunantys akumulatorius pagal gautą komandą, arba visi trys keitikliai gali sudaryti valdantįjį generavimo šaltinį uždarajame elektros mikrotinkle. Šiame tyrime tokie keitikliai naudojami kaip sistemos valdantieji generavimo šaltiniai.
Akumulatoriai	24	VRLA akumulatoriai. Kiekvienas 2 V vardinės įtampos ir 190 Ah vardinės talpos. Bendra akumuliatorių vardinė talpa – 9,12 kWh.
„Sunny Tripower 6000TL-30“	1	Trijų fazių nepriklausomas galios keitiklis. Vardinė galia 6 kW. Keitkliui prijungta 12 vnt. FV modulių, kurių bendra STC galia – 2,88 kWp.
GCI-5K-2G-H	1	Hibridinis vėjo ir saulės tinklinis galios keitiklis.

		Keitikliui prijungta tik 12 vnt. FV modulių, kurių bendra STC galia – 2,88 kWp.
FV moduliai	24	„ViaSolis PRIME 240-250“, kiekvieno modulio galia 240 Wp, suminė galia – 5,76 kWp.
Rezervinis generatorius	1	Trifazis skystu kuru varomas vidaus degimo variklis su starteriu ir elektros varikliu.



18 pav. Analizuojamo uždarojo elektros mikrotinklo schema

Eksperimentinės uždarojo elektros mikrotinklo sistemos vardinė galia 18 kW. Galia, kaip ir pati eksperimentinė uždarojo elektros mikrotinklo sistema, nėra didelė, tačiau esant panašios struktūros mikrotinklui sprendiniai ir rezultatai turėtų būti proporcingai tapatūs. Eksperimentinė mikrotinklo sistema tiekia elektros energiją AĖS laboratorijai Kauno technologijos universitete, kurioje ir atlikti susiję tyrimai.

Visi dydžiai lentelėse ir grafikuose pateikiami santykiniais galios vienetais (s. v.), apskaičiuojamais pagal formulę:

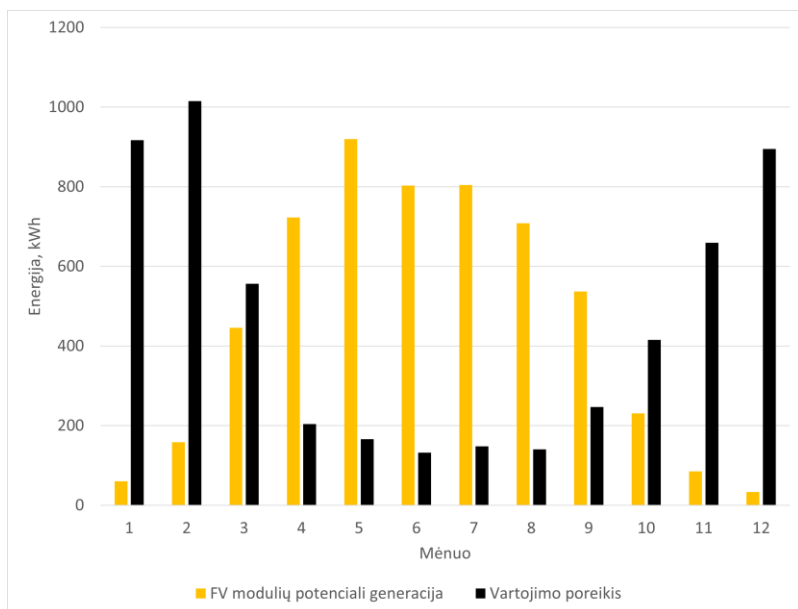
$$P_{s. v.} = P/P_n; \quad (4)$$

čia $P_{s. v.}$ – santykinis vienetas;

P – galia;

P_n – vardinė sistemos galia, 18 kW.

Dėl geografinės vietovės ir paties naudotojo įpročių smarkiai prasilenkia naudojimo ir galimos generacijos kreivės metų laikotarpiu, kaip pavaizduota 19 pav.



19 pav. Eksperimentinės sistemos naudojimo ir galimos generacijos kreivės

Žiemos mėnesiais naudojimas žymiai didesnis, apie 10 kartų, nei galimas pagaminti elektros energijos kiekis iš AEŠ. Todėl žiemos mėnesiais su pertekline elektros energija sistemoje nesusiduriama. Atitinkamai, vasaros metu situacija pasikeičia priešingai, potencialus elektros energijos kiekis yra apie 5 kartus didesnis nei jos naudojimas. Taip yra dėl eksperimentinės sistemos geografinės platumos. Taip pat vartojimas dėl elektros prietaisų naudojimo įpročių didžiausias nuo rugsėjo iki gegužės mėnesių imtinai, ir šildymo sistemos poreikiai tik dar labiau paryškina žiemos mėnesių vartojimo augimą.

Pusė visų FV modulių sujungta į nuoseklią grandinę ir prijungta prie tinklinio galios keitiklio, tad pusė galimos pagaminti elektros energijos iš AEŠ lemia perteklinės galios atsiradimą eksperimentinėje sistemoje. Kita pusė FV modulių sujungta į nuoseklią grandinę ir prijungta prie nepriklausomo galios keitiklio. Vasaros metu situacija opiausia perteklinės galios atsiradimo aspektu, o perteklinės galios atsiradimą dar papildomai sąlygoja akumuliatorių talpa. Realus akumuliatorių panaudojimas mažesnis nei 9,12 kWh todėl, kad VRLA akumuliatorius pagal specifikaciją rekomenduojama iškrauti ne daugiau nei iki 40 % SOC ribos. Taigi reali panaudojama akumuliatorių energija yra:

$$E_{\text{naudojama}} = V_{\text{nom}} \times C_{10} \times 0,6 = 48 \times 132 \times 0,6 = 3,8 \text{ kWh}; \quad (5)$$

čia $E_{\text{naudojama}}$ – reali naudojama akumuliatorių energija, kWh;

V_{nom} – vardinė akumuliatorių įtampa;

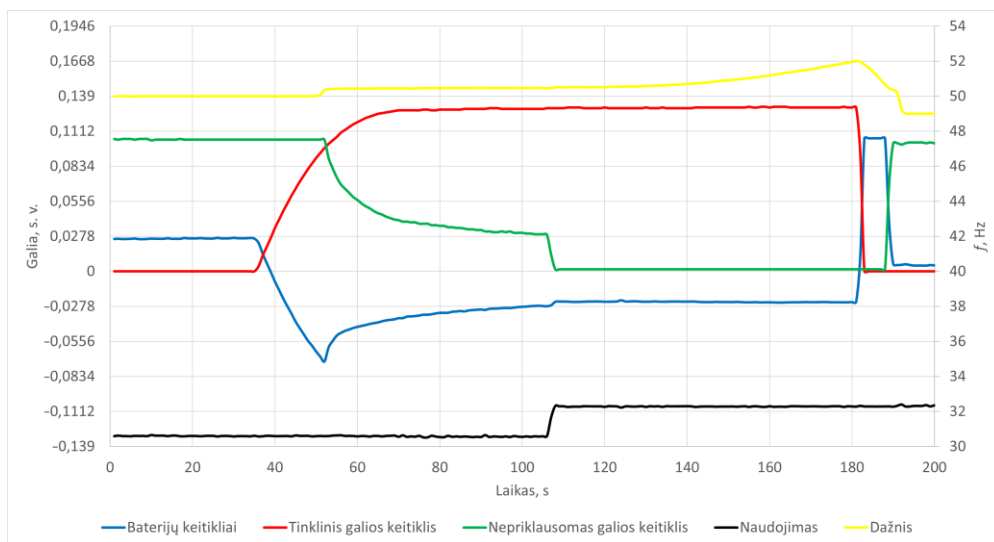
C_{10} – akumuliatorių vardinė talpa iškraunant akumuliatorius per 10 valandų, Ah.

Eksperimentinės sistemos apskaičiuota panaudojama akumuliatorių talpa yra 3,8 kWh; lyginant su sistemos galia, tai santykinai maža galia. Maža akumuliatorių panaudojama talpa lemia didesnę tikimybę perteklinės galios atsiradimui uždaroje

mikrotinklo sistemoje. Nepaisant to, akumuliatorių energijos talpa yra veikiamą greitesnio įkrovimo / iškrovimo nei C_{10} [83], todėl akumuliatorių reali talpa tik dar mažesnė realiomis sąlygomis [84]. Kiek akumuliatorių talpa sumažėja dėl greitesnio iškrovimo nei C_{10} , galima apskaičiuoti [85], ir dėl to sumažėjusi akumuliatorių talpa perteklinės galios problemą tik dar labiau paryškina. Normaliu režimu, be tinklinio galios keitiklio sistemoje, sistemos akumuliatorių talpos pakanka elektros energijos naudojimo ir generacijos pikams kompensuoti; tačiau dirbant tinkliniam galios keitikliui perteklinės galios problema, ypač vasaros mėnesiais, yra labai aktuali eksperimentiniame uždara jame elektros mikrotinkle, todėl ir DVGA prototipinio įrenginio testavimui tai priimta kaip tinkamas objektas. Todėl pagal literatūros apžvalgoje išskaidytus uždaru jū elektros mikrotinklo sistemų tipus, eksperimentinė sistema yra KS vartotojų ir akumuliatorių kaupiklių tipo. Eksperimentinės sistemos perteklinės galios problemos priežastys yra dvi: a) neoptimalus elektros energijos kaupiklių ir nevaldomo šaltinio galios santykis sistemoje ir b) esminė problema – tinklinis galios keitiklis, kuris nevaldo generuojamos galios iš AEŠ pagal uždarojo elektros mikrotinklo sistemos poreikį.

Eksperimentinėje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje atliktas perteklinės galios sukeltas pereinamojo proceso tyrimas. Analizuojamą mikrotinklo sistemą sudaro komponentai, pavaizduoti 18 pav. ir išvardyti 2 lentelėje. Baterijų keitiklių yra trys vienetai, po vieną ant kiekvienos iš trijų uždarojo elektros mikrotinklo fazių; jie palaiko sistemoje naudojimo ir generacijos balansą, ir tai yra esminiai mikrotinklo komponentai, mikrotinklą valdantys šaltiniai. Prie baterijų keitiklių prijungti akumuliatoriai, akumuliatoriuose kaupiama elektros energija, kai sistemoje yra perteklinės elektros energijos, ir akumuliatoriai iškraunami, kai naudojimas yra didesnis nei AEŠ galima generacija. Rezervinis generatorius įsijungia tada, kai akumuliatoriai išsikrauna ir AEŠ negeneruoja reikiamos galios, tokiu atveju rezervinis generatorius veikia tol, kol akumuliatoriai pakraunami iki nustatytos akumuliatorių įkrovos vertės. Nepriklausomas galios keitiklis reaguoja į sistemoje esantį galios poreikį ir pagal AEŠ galimybes generuoja tiek, kiek mikrotinklui atitinkamu momentu reikia. Tinklinis galios keitiklis su AEŠ mikrotinklo sistemoje generuoja tiek, kiek AEŠ geba generuoti. Todėl susiklosčius situacijoms, kai naudojimas mažas, akumuliatoriai įkrauti ir tinkliniam galios keitikliui toliau generuojant elektros energiją mikrotinkle, sistemoje aptinkama perteklinė galia.

Perteklinės galios atsiradimas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje atsiranda tik tam tikromis paminėtomis sąlygomis. Todėl 20 pav. pateikiama 200 sekundžių laikotarpio galių ir dažnio kreivės, pabrėžiančios analizuojamą problemą tuo atveju, kai perteklinės galios problema aptinkama.

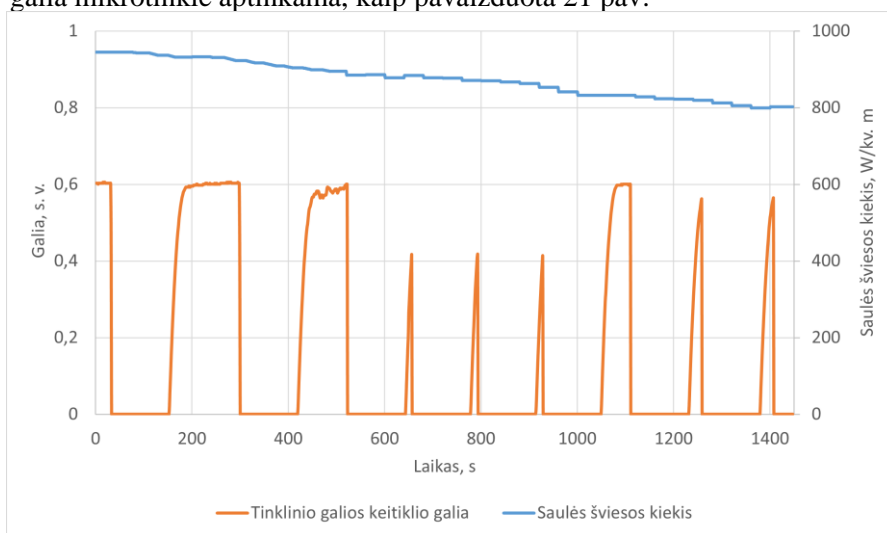


20 pav. Tinklinio galios keitiklio su AES įtaka uždaram elektros mikrotinklui

Pagrindiniai įvykiai, kaip pavaizduota 20 pav., analizuojami išsamiau:

1. Laiko intervalas nuo 0 iki 35 sekundės. Per šį laikotarpį sekamas normalus darbo režimas eksperimentinėje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje, akumuliatoriai įkrauti iki 79 % SOC. Tinklinis galios keitiklis jungiasi, todėl generacijos nėra. Nepriklausomas galios keitiklis generuoja tiek, kiek AES tuo metu gali generuoti. Baterijų keitikliai naudoja akumuliatorių energiją ir generuoja trūkumą, kurio reikia balansui tarp naudojimo ir generacijos palaikyti.
2. Laiko intervalas nuo 36 iki 52 sekundės. Per šį laikotarpį tinklinis galios keitiklis pasileidžia ir didina generuojamą galią. Nepriklausomas galios keitiklis generuoja tiek, kiek AES tuo metu gali generuoti. Baterijų keitikliai palaiko naudojimo ir generacijos balansą, todėl mažina generaciją, o vėliau ir ima krauti baterijas su pertekline elektros energija.
3. Laiko intervalas nuo 53 iki 106 sekundės. Akumuliatoriai beveik visiškai įkrauti ir nebegali priimti tokios didelės krovimo galios, todėl baterijų keitikliai mažina akumuliatorių įkrovimo galią. Tinklinis galios keitiklis pasiekia generacijos maksimumą ir generuoja tiek, kiek AES tuo metu gali generuoti. Nepriklausomas galios keitiklis reaguoja į galių balanso pokytį eksperimentinėje sistemoje ir, mažindamas generuojamą galią, užtikrina, kad dar kurį laiką perteklinė galia nesukelia dažnio didėjimo sistemoje.
4. Laiko intervalas nuo 107 iki 181 sekundės. 107-ąją sekundę naudojimas sumažėja, atitinkamai nepriklausomas galios keitiklis susimažina generaciją iki nulio. Baterijų keitikliai krauna akumuliatorius tiek, kiek akumuliatoriai geba priimti galios. Tinklinis galios keitiklis nereaguoja į perteklinės galios generavimą sistemoje ir generuoja tiek, kiek AES tuo metu gali generuoti. Mikrotinklo dažnis ima didėti ir didėja tol, kol pasiekama sistemos nustatyta maksimali dažnio vertė.

5. Laiko intervalas nuo 182 iki 191 sekundės. Dėl per didelio mikrotinklo sistemos dažnio tinklinis galios keitiklis pasiekia savo darbo parametrų didžiausią vertę ir dėl netinkamų sistemos parametrų atsijungia. Baterijų keitikliai reaguoja į pokyčius sistemoje ir ima iškrauti akumulatorius, generuoti tiek, kiek reikia apkrovoms, kad išlaikytų naudojimo ir generacijos balansą. Sistemos dažnis turi inerciją ir su uždelsimu mažėja. Nepriklausomas galios keitiklis pasiruošęs generuoti, tačiau dažnis dar nepasiekė ribos, nuo kurios keitiklis pakartotinai įsijungia ir pradeda generuoti galią.
6. Laiko intervalas nuo 192 iki 200 sekundės. Dažnis nukrenta iki ribos, kai nepriklausomas galios keitiklis ima generuoti. Atitinkamai baterijų keitikliai sumažina imamą energiją iš akumuliatorių, palaikydami sistemoje galių balansą. Tinklinis galios keitiklis negeneruoja dėl sistemos parametrų neatitikimo.
7. Laiko intervalas po 200 sekundės. Uždarojo elektros mikrotinklo sistemos dažnis normos ribose, nepriklausomas galios keitiklis generuoja tiek, kiek AĖŠ tuo metu gali generuoti. Baterijų keitikliai palaiko galių balansą, generavimo galios trūkumą gamindami su energija iš akumuliatorių. Praėjus tinklinio galios keitiklio laikui, po kurio keitiklis pakartotinai matuojasi tinklo parametrus prisijungimui, keitiklis vėl pasileidžia ir procesas kartojasi tol, kol perteklinė galia mikrotinkle aptinkama, kaip pavaizduota 21 pav.



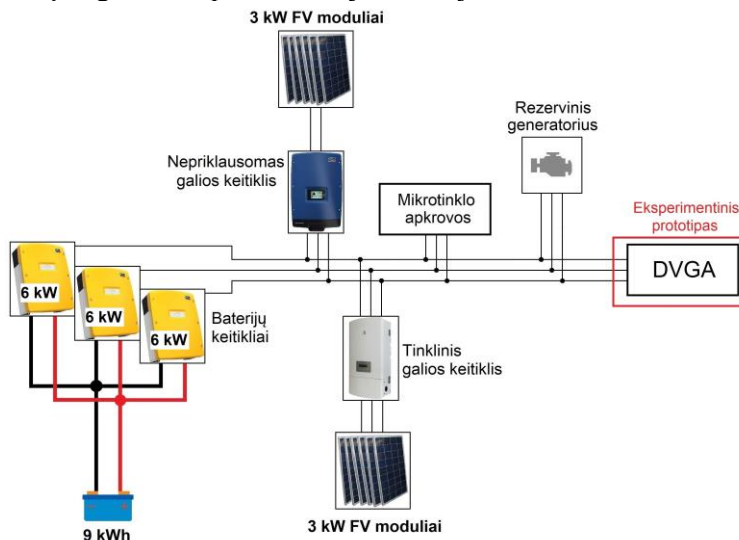
21 pav. Tinklinio galios keitiklio pakartotinio išsijungimo ir prisijungimo proceso galios kreivė

Tinklinio galios keitiklio pastovus pakartotinis išsijungimas ir prisijungimas sukelia pereinamuosius procesus, turinčius įtakos elektros energijos kokybei mikrotinklo sistemoje. Tinklinio galios keitiklio laiko intervalas generuojant elektros energiją priklauso nuo perteklinės galios dydžio ir nuo apkrovos dydžio tuo metu, kai tinklinis galios keitiklis nedirbo, t. y. kiek daug akumuliatorių buvo spėta iškrauti.

Dėl sunkiai prognozuojamos AEŠ generacijos naudojimo ir generavimo galių balanse kyla problemų ne tik mažose sistemose, tokia pati analogiška problema sprendžiama ir elektros tinklų operatorių, o problemos dydis priklauso nuo AEŠ santykinio dydžio, lyginant su visos sistemos galios dydžiu. EES elektros tinklų operatoriai pradeda susidurti su AEŠ perteklinės galios problema, tačiau perteklinės galios problema blogiausiu atveju išsprendžiama AEŠ elektrines pristabdant, kai generacija per didelė [86, 87]. Mažų mikrotinklų sistemų elektrinių valdymas skiriasi pagal įrenginių gamintoją ar pasirinktą mikrotinklo struktūrą, tad suderinti įrangą bendram darbui užtikrinant naudojimo ir generavimo balansą gali tapti ekonomiškai neefektyvu. Todėl kitame skyriuje atlikta DVGA prototipinio įrenginio, integruoto į uždarąjį elektros mikrotinklą, skaitinio modelio moduliacija.

3.2. DVGA prototipinio įrenginio, integruoto į uždarąjį elektros mikrotinklą, skaitinis modelis

Šiame poskyryje DVGA prototipinis įrenginys integruotas į sumodeliuoto uždarojo elektros mikrotinklo sistemą. Atliktos skaitinio modelio moduliacijos, po kurių nustatytas elektros energijos kokybės parametru pokytis tarp sistemos su DVGA prototipiniu įrenginiu ir sistemos be prototipinio įrenginio. Vertinami tokie parametrai kaip įtampos ir srovės šuoliai, harmonikų vertės. Pagal vidutinės galios valdymo metodą skiriasi ir principinė eksperimentinės uždarojo elektros mikrotinklo sistemos schema. Periodo valdymo, pavėluoto įjungimo ir PWM KS grandinėje vidutinės galios valdymo metodų atvejais principinė schema pavaizduota 22 pav., PWM NS grandinėje vidutinės galios valdymo metodo atveju principinė schema pavaizduota 23 pav. Pagal šiame skyriuje atliktus skaitinius modeliavimus ir jų rezultatus parenkamas tinkamiausias vidutinės galios valdymo metodas DVGA prototipiniam įrenginiui eksperimentinėje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje.



22 pav. Eksperimentinės uždarojo elektros mikrotinklo sistemos su DVGA prototipiniu įrenginiu schema periodo valdymo, pavėluoto įjungimo ir PWM KS grandinėje vidutinės galios valdymo metodų atvejais

programavimo ar paleidimo darbų, t. y. kad įrenginys būtų lengvai paleidžiamas, turėtų „savaiminio diegimo“ (angl. *plug and play*) funkciją. Trečia, DVGA įrenginiui parinktas vidutinės galios valdymo metodas turėtų užtikrinti, kad mikrotinklo sistemai nesukeliamas arba sukeliamas minimalus poveikis, turintis įtakos elektros energijos kokybei. Tik atsižvelgiant į minėtus tris aspektus parinktas vidutinės galios valdymo metodas DVGA prototipiniam įrenginiui gali lemti patrauklumą rinkoje.

Gaminant realius modelius su skirtingais kintamos vidutinės galios valdymo metodais reikia daug laiko ir finansinių išteklių. Turint ribotą kiekį laiko, nuspręsta uždarojo elektros mikrotinklo sistemą sumodeliuoti kartu su DVGA prototipiniu įrenginiu ir įvertinus skaitinio modeliavimo rezultatus parinkti tinkamiausią vidutinės galios valdymo metodą. Eksperimentinei uždarojo elektros mikrotinklo sistemai ir perteklinės galios valdymo paskirčiai parinktas tinkamiausias vidutinės galios valdymo metodas, kurio pagrindu sukurtas realus DVGA prototipinis įrenginys.

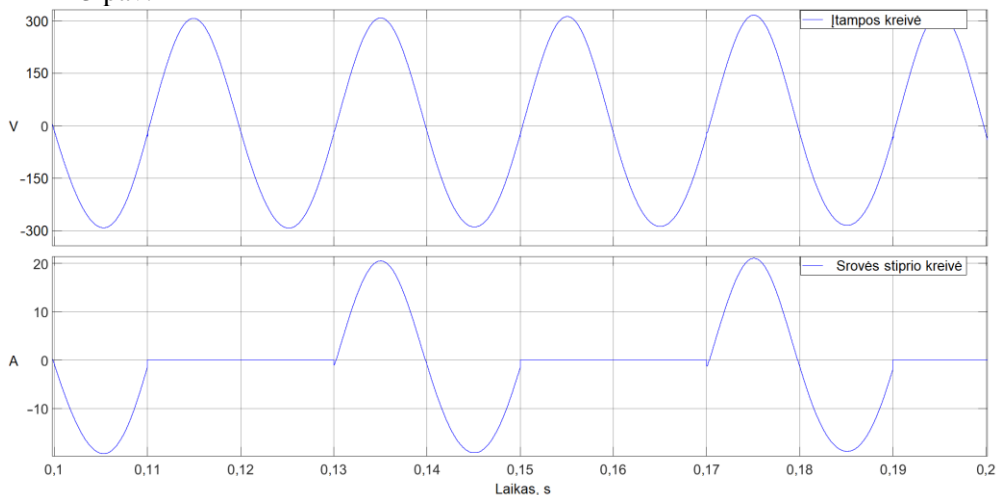
Modeliuojant uždarojo mikrotinklo sistemą ir DVGA įrenginį atsižvelgiama į elektros energijos kokybės parametrus, pagal kuriuos priimamas labiausiai sistemai tinkantis vidutinės galios valdymo metodas. Elektros kokybės parametrai lyginami pagal standartą LST EN 50160 [88]. Standartas pritaikytas visuomeniniam elektros energijos tiekimui, tačiau priimtas kaip elektros energijos siekiamybė uždarojo elektros mikrotinklo sistemai. Pagal standartą pasirinkta stebėti šiuos parametrus elektros energijos kokybės užtikrinimui:

1. Staigus įtampos šuolis (angl. *voltage spike*) – staigus įtampos pokytis, viršijantis sinusoidės efektingą vertę arba krentantis jos atžvilgiu.
2. Staigus srovės šuolis (angl. *current spike*) – staigus srovės stiprio pokytis, viršijantis sinusoidės efektingą vertę arba krentantis jos atžvilgiu.
3. *THD* – tai matavimo dydis, įvertinantis sinusoidės formos iškraipymo lygį.

Staigus įtampos šuolis arba kitaip – staigus kitimas trumpu sinusoidės laikotarpiu, matuojamas mili-, mikro- ar net nanosekundžių eilėje. Staigus įtampos šuolis gali atsirasti dėl įvairių priežasčių – žaibo išlydžių, EES tinklo svyravimų įrangos išjungimo arba įjungimo momentais, sugedusios įrangos arba keitiklių. Trečioji priežastis, komutuojančių keitiklių lemiami staigūs įtampos šuoliai, yra lemiami tiek generuojančių keitiklių, tiek DVGA prototipinio įrenginio, staigus apkrovos ar generuojančios galios komutavimas gali sukelti pereinamuosius procesus, kurių pradžia – staigus įtampos pokytis. Staigūs įtampos pokyčiai gali viršyti įrenginių vardines įtampas, o tai gali lemti įrenginių izoliacijos pramušimą ar net jautresnių komponentų negrįžtamą gedimą. Pasikartojantys įtampos šuoliai mažina elektronikos komponentų ilgaamžiškumą ir patikimumą [89], todėl uždarojo mikrotinklo sistemoje svarbu neigiamos įtakos išvengti. Įtampos šuolių amplitudė ir trukmė gali skirtis, nuo to priklauso ir neigiamas poveikis elektronikos komponentams sistemoje, todėl tolesniuose 24–31 pav. pateikiami įtampos šuoliai uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje. Gauti skaitinės moduliacijos rezultatai atitinkamai išanalizuoti. Į įtampos šuolius atitinkamai reaguoja ir kiti prietaisai sumodeliuotoje mikrotinklo sistemoje, todėl kai kuriais atvejais pastebimi ir srovės šuoliai ar svyravimai, priklausomi nuo įtampos šuolio dydžio.

Staugus srovės stiprio šuolis yra panašiai kaip ir įtampos šuolis, trumpu sinusoidės laikotarpiu žymus srovės padidėjimas arba sumažėjimas. Taip pat, staigus srovės šuolis, kaip ir įtampos šuolis, matuojamas mili-, mikro- ar net nanosekundžių eilėje. Srovės šuolius gali sukelti žaibo išlydžiai, staigus įrenginių įjungimas, trumpieji jungimai, taip pat keitikliai. Kadangi uždarojo mikrotinklo sistema sudaryta vien iš keitiklių ir papildomai į sistemą integruojamas DVGA prototipinis įrenginys, sumodeliuota sistema, kurioje įvertinti srovės šuoliai be ir su DVGA prototipiniu įrenginiu, kad būtų sumodeliuoti pereinamieji procesai. Simuliuotas trijų fazių modelis, tačiau laikyta, jog visos trys fazės simetriškos. Skaitinių moduliacijų sinusoidžių kreivės pateikiamos vienos fazės, kad pavaizduoti signalai nesimaišytų ir nepersipintų tarpusavyje, kadangi likusios dvi fazės yra tik perstumtos laike; dėl šios priežasties pereinamieji procesai aiškiau matomi pateiktuose grafikuose. Skaitinės įtampos ir srovės stiprio šuolių moduliacijos atliktos tik su aktyvia DVGA metodo apkrova, kadangi priimama, jog DVGA metodo atveju taikoma apkrova perteklinės galios sunaudojimui yra labai artima aktyviajai apkrovai. Šiomis skaitinėmis moduliacijomis siekiama įvertinti tik papildomai atsirandančių komutacijų dėl DVGA metodo perteklinės galios sunaudojimo sukeltus įtampos ir srovės stiprio šuolius.

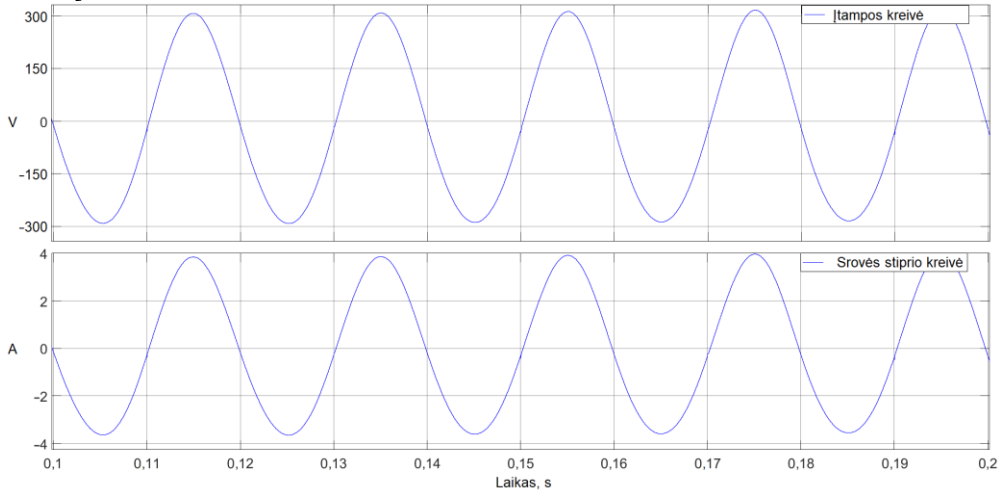
Uždarojo elektros mikrotinklo sistemos skaitinis modelis sukurtas pagal 3.1 poskyryje aprašytą metodiką, o principinės uždarojo elektros mikrotinklo sistemos su integruotu DVGA prototipiniu įrenginiu modelio schemas pavaizduotos 22 ir 23 pav.



24 pav. Periodo valdymo metodo įtampos ir srovės stiprio pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje DVGA prototipinio įrenginio prijungimo mazge

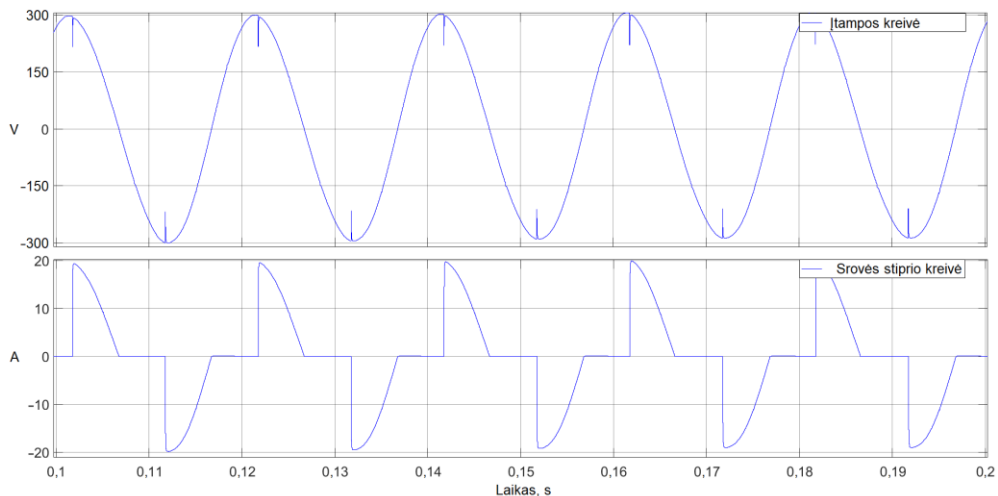
Periodo valdymo metodas turi mažus komutavimo nuostolius [90], nes įjungimas ir išjungimas vyksta, kai įtampos yra arti 0 V reikšmės. Atitinkami rezultatai gauti ir simuliuojant, 24 pav. komutacija vykdoma arti 0 V, todėl ir pereinamasis procesas nežymus. Skaitiniame modelyje pavaizduotos įtampos ir srovės sinusoidės DVGA prototipinio įrenginio prijungimo mazge. Tačiau toks vidutinės galios valdymo metodas kai kurių tipų mikrotinkluose gali sukelti žmogui

girdimą triukšmą [91] tais atvejais, jei vidutinės galios valdymo periodas mažas. Taip pat, nors įjungimas ir išjungimas vyksta netoli 0 V, nuolatiniai įjungimai ir išjungimai pagal sistemos sandarą gali sukelti sinusoidės išskraipymus [92] sinusoidei kertant 0 V vertę. Skaitinio modelio rezultatuose pastebima, jog pereinamasis įtampos ir pereinamasis srovės procesai kiek nesutampa, nes įtampos ir srovės sinusoidės yra atitinkamai kiek persitūmusios laike. Kuo srovės ir įtampos kreivių nesutapimas didesnis, tuo ryškesnis ir pereinamasis procesas sinusoidės kreivėje.



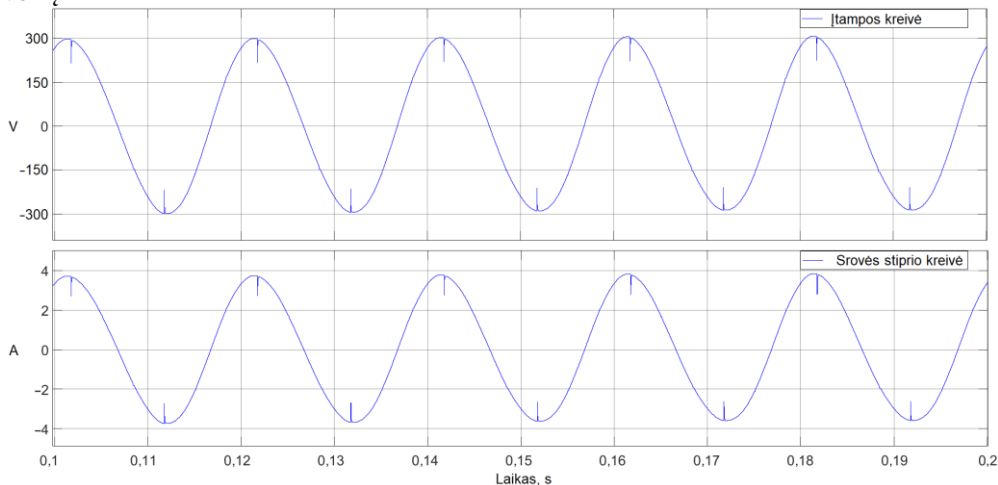
25 pav. Periodo valdymo metodo įtampos ir srovės stiprio pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje apkrovos prijungimo mazge

Įtampos sinusoidė 24 pav. DVGA prototipinio įrenginio prijungimo mazge yra identiška 25 pav. įtampos sinusoidei ties uždarojo elektros mikrotinklo apkrova todėl, kad įtampos stebėjimas iš esmės vyksta tame pačiame sistemos mazge, todėl įtampos sinusoidės kreivės sutampa. Įtampos sinusoidėje galima išvengti minimalius pereinamuosius procesus, kurie taip pat lemia apkrovos srovės pokytį šiuo pereinamuoju metu, bet poveikis labai nežymus ir plika akimi sunkiai pastebimas. Periodo valdymo vidutinės apkrovos galios valdymo metodu apkrovos prijungimo mazge didžiausias fiksuotas įtampos šuolis siekė 1,4 % įtampos efektinės vertės esant 20; 40; 60 ir 80 % *VAP* vertėms; didžiausias fiksuotas srovės šuolis siekė 2,2 % srovės efektinės vertės esant taip pat 20; 40; 60 ir 80 % *VAP* vertėms.



26 pav. Pavėluoto įjungimo metodo įtampos ir srovės stiprio pereinamasis procesas uždarąjo elektros mikrotinklo sistemoje DVGA prototipinio įrenginio prijungimo mazge

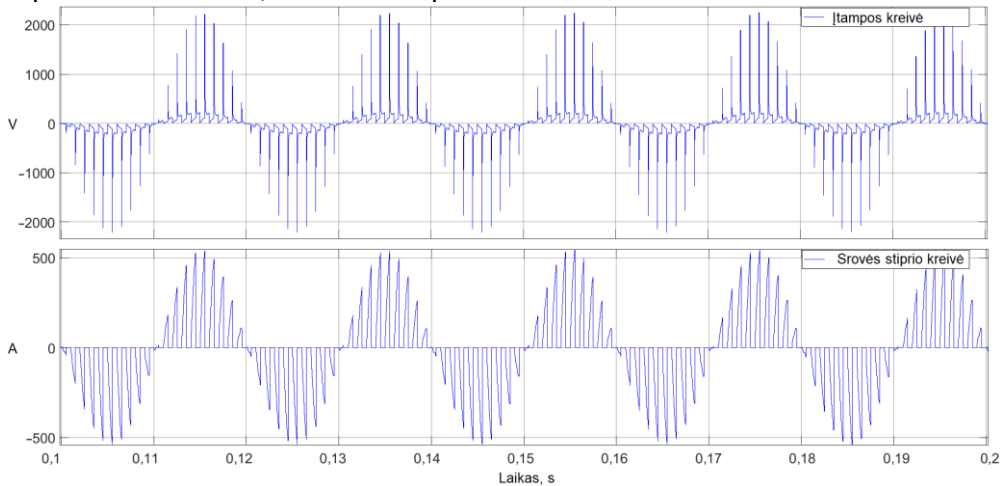
Pavėluoto įjungimo metodas turi žymiai didesnės amplitudės pereinamąjį procesą, lyginant su periodo valdymo metodu, kaip matoma skaitinės moduliacijos rezultatuose 26 pav. Pavėluoto įjungimo metodas gali sukelti įtampos ir srovės stiprio harmonikas, dėl to gali atsirasti nulinio laido šilimas, taip pat įtampos ir srovės šuoliai įjungimo ir išjungimo metu. Analizuojamos sistemos atveju pastebimi įtampos šuoliai, kuriuos sukelia sumodeliuotas įsijungiantis DVGA prototipinis įrenginys uždaramame elektros mikrotinkle. Įtampos šuoliai atitinkamai veikia visos likusios sistemos įrenginių darbą. DVGA prototipinio įrenginio išjungimo metu pereinamieji procesai nepastebimi, kadangi išjungimas vyksta sinusoidei kertant 0 V vertę.



27 pav. Pavėluoto įjungimo metodo įtampos ir srovės stiprio pereinamasis procesas uždarąjo elektros mikrotinklo sistemoje apkrovos prijungimo mazge

Kadangi mikrotinklo sistemos modelio pokyčiai neatliekami, o keičiami tik vidutinės galios valdymo metodai, situacija analogiška prieš tai aprašytam periodo valdymo vidutinės galios valdymo metodui. 27 pav. pavaizduotos įtampos ir srovės stiprio sinusoidės apkrovos mazge, kur įtampos sinusoidė yra identiška 26 pav. įtampos sinusoidėi DVGA prototipinio įrenginio prijungimo mazge. Dėl DVGA prototipinio įrenginio sukeltų įtampos šuolių mikrotinkle apkrova atitinkamai paveikiama įtampos šuolių, todėl apkrovos prijungimo mazge fiksuojamas srovės stiprio sinusoidės pereinamasis procesas. Pavėluoto įjungimo vidutinės apkrovos galios valdymo metodu apkrovos prijungimo mazge didžiausias fiksuotas įtampos šuolis

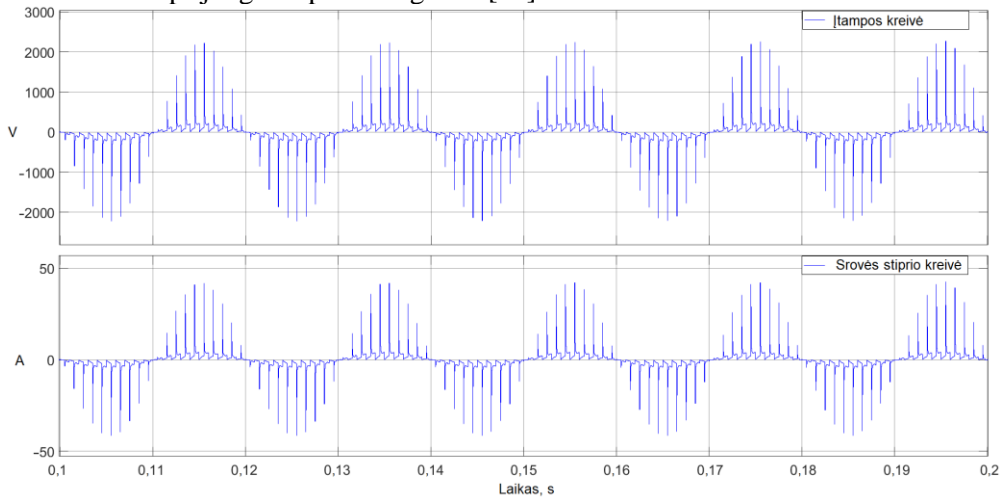
siekė 16,3 % įtampos efektinės vertės esant 60 % *VAP* vertei; didžiausias fiksuotas srovės stiprio šuolis siekė 27,3 % srovės stiprio efektinės vertės esant 60 % *VAP* vertei.



28 pav. PWM KS grandinėje metodo įtampos ir srovės stiprio pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje DVGA prototipinio įrenginio prijungimo mazge

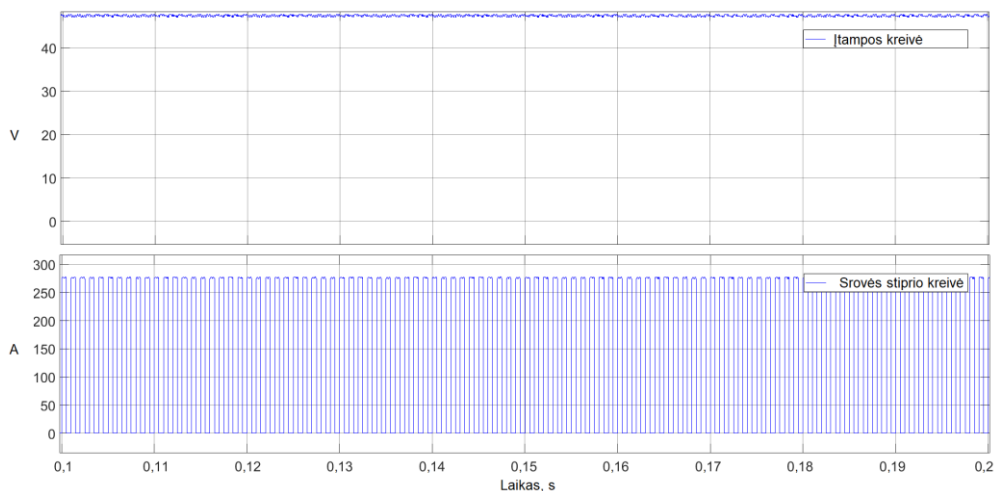
PWM KS grandinėje įtampos bei srovės stiprio sinusoidės ir pereinamieji procesai DVGA prototipinio įrenginio prijungimo mazge pavaizduoti 28 pav. Tarp simuliuotos mikrotinklo sistemos ir DVGA prototipinio įrenginio pastebimas nesuderinamas darbas, kadangi įtampos šuoliai siekia daugiau nei 2000 V. Dėl nuolatinio greito komutavimo turi būti naudojami filtrai. Nenaudojant filtrų, įtampos šuoliai sąlygoja ir DVGA prototipinio įrenginio srovės šuolius. Dėl ištisinio komutavimo užfiksuoti pavojingi ir žalingi įtampos šuoliai visiems likusiems įrenginiams uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje. Nepaisant įtampos ir srovės stiprio šuolių, kuriuos būtų galima išspręsti panaudojant filtrus, naudinga papildoma parinktis prototipiniam DVGA įrenginiui būtų dinamiškai valdyti prototipinio įrenginio vidutinės galios valdymo periodo ciklo laiką. Dinaminis vidutinės galios valdymo periodo ciklo laikas atitinkamai būtų keičiamas pagal prijungtos DVGA prototipinio įrenginio apkrovos galią. Kitaip tariant, tolimesnių tyrimų perspektyvoje būtų galima valdyti ne tik įjungimo laiką pagal tai, kokios galios apkrova taikoma vidutinei galiai gauti, bet ir automatiškai valdyti valdymo periodo ciklą, kur

vidutinės galios valdymo efektyvumas priklauso nuo valdymo periodo ciklo trukmės ir atitinkamai prijungtos apkrovos galios [93].



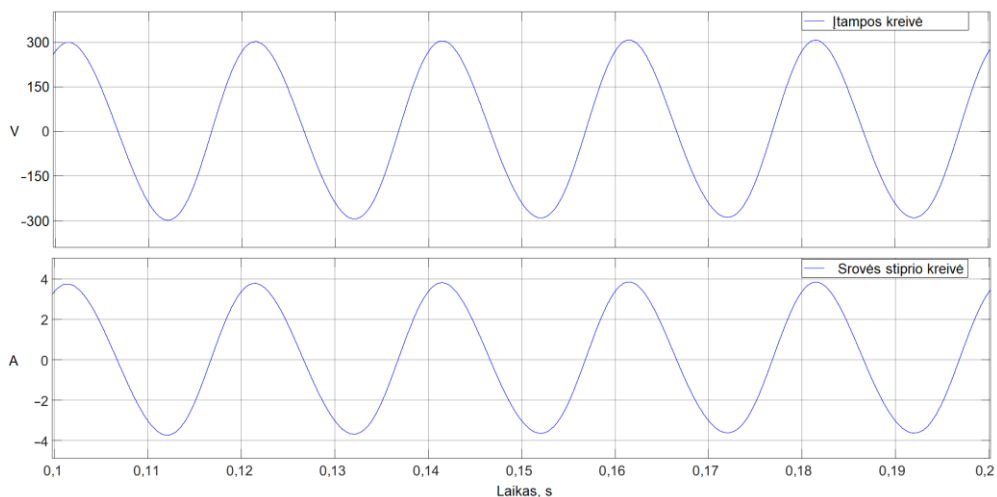
29 pav. PWM KS grandinėje metodo įtampos ir srovės stiprio pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje apkrovos prijungimo mazge

Atlikta PWM KS grandinėje skaitinė moduliacija bei jos rezultatai rodo, kad staigus komutavimas sukelia žymius įtampos šuolius sistemoje, ne išimtis – ir uždarojo elektros mikrotinklo apkrovos mazge. 29 pav. pavaizduotos įtampos ir srovės stiprio sinusoidės apkrovų prijungimo mazge. Iš atliktų skaitinių moduliacijų kol kas stebimi didžiausi įtampos ir srovės stiprio šuoliai apkrovos mazge, kurie sistemoje negalimi dėl negrįžtamo kitų įrenginių uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje sugadinimo tikimybės. Dažniausiai tokie pereinamieji procesai su žymiais įtampos šuoliais yra lemiami pereinamojo nuolatinio greito komutavimo ir kitų galios keitiklių tarpusavio sąveikos sistemoje [94, 95]. Įtampos šuoliai gali lemti izoliacijos pramušimą, srovės šuoliai – atitinkamai sudeginti laidininkus ir, be viso to, sistema patiria didesnius galios nuostolius [96]. PWM KS grandinėje vidutinės apkrovos galios valdymo metodu apkrovos prijungimo mazge didžiausias fiksuotas įtampos šuolis siekė 784 % įtampos efektinės vertės esant 80 % *VAP* vertei; didžiausias fiksuotas srovės stiprio šuolis siekė 1311 % srovės stiprio efektinės vertės esant 80 % *VAP* vertei.



30 pav. PWM NS grandinėje metodo įtampos ir srovės stiprio pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje DVGa prototipinio įrenginio prijungimo mazge

Paskutinis sumodeliuotas vidutinės galios valdymo metodas sumodeliuotoje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje yra PWM NS grandinėje metodas. DVGa prototipinio įrenginio prijungimo mazge srovės stiprio ir įtampos pereinamieji procesai pavaizduoti 30 pav. Akumuliatorių vardinė įtampa yra 48 V NS, atitinkamai vardiniame įtampos lygyje įtampos pereinamieji procesai ir stebimi. Efektinė srovės stiprio amplitudė, palyginus su kitų vidutinės galios valdymo skaitinių moduliacijų rezultatais, daugiau nei 10 kartų didesnė; taip yra todėl, kad akumuliatorių įtampa apie 4 kartus mažesnė nei kitų vidutinės galios valdymo metodų atvejais; ir nepaisant to, kiti vidutinės galios valdymo metodai turi tris fazes, o akumuliatorių atveju turima tik viena akumuliatorių sistema, tad yra tik viena vidutinės galios valdymo grandinė. Iš skaitinės moduliacijos rezultatuose pateiktų srovės stiprio ir įtampos kreivių galima daryti išvadą, kad pereinamieji procesai tolygūs, nėra įtampos ar srovės šuolių. Nepaisant teigiamų rezultatų, dėl nuolatinio greito ir pastovaus komutavimo gali būti paveiktas akumuliatorių ilgaamžiškumas [97]. Todėl atitinkamai reikia naudoti filtrus, kad nuolatinio komutavimo pereinamieji procesai būtų sumažinti ir įtaka akumuliatorių degradacijai minimizuota.



31 pav. PWM NS grandinėje metodo įtampos ir srovės stiprio pereinamasis procesas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje apkrovos prijungimo mazge

Uždarojo elektros mikrotinklo sistemos skaitiniame modelyje atlikus įtampos ir srovės kitimo laike stebėjimus, 31 pav., PWM NS grandinėje vidutinės galios valdymo metodo atveju gautos sinusoidės, kuriose nepastebima jokių pereinamųjų procesų. Įtampos ir srovės stiprio sinusoidėse nepastebima jokių įtampos ar srovės stiprio šuolių. Taip yra todėl, kad vidutinės galios valdymas atliekamas akumuliatorių prijungimo prie baterijų keitiklių mazge. Visa perteklinė galia uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje sunaudojama DVGA prototipinio įrenginio, tačiau ši galia perduodama per baterijų keitiklius, todėl pereinamieji procesai lieka NS akumuliatorių pusėje. PWM NS grandinėje vidutinės apkrovos galios valdymo metodu apkrovos prijungimo mazge didžiausias fiksuotas įtampos šuolis siekė 0 % įtampos efektinės vertės esant bet kuriai *VAP* vertei; didžiausias fiksuotas srovės stiprio šuolis siekė taip pat 0 % srovės stiprio efektinės vertės esant bet kuriai *VAP* vertei.

3 lentelė. Vidutinės galios valdymo metodų įtampos ir srovės stiprio šuolių palyginimas

Vidutinės galios valdymo metodas ir <i>VAP</i> vertė	Įtampos šuolis, %	Srovės stiprio šuolis, %
Visų metodų, kai <i>VAP</i> = 0 %	0,0	0,0
Periodo valdymo, <i>VAP</i> = 20 %	1,4	2,2
Periodo valdymo, <i>VAP</i> = 40 %	1,4	2,2
Periodo valdymo, <i>VAP</i> = 60 %	1,4	2,2
Periodo valdymo, <i>VAP</i> = 80 %	1,4	2,2
Periodo valdymo, <i>VAP</i> = 100 %	0,0	0,0
Pavėluoto įjungimo, <i>VAP</i> = 20 %	10,9	16,8
Pavėluoto įjungimo, <i>VAP</i> = 40 %	16,0	26,5
Pavėluoto įjungimo, <i>VAP</i> = 60 %	16,3	27,3
Pavėluoto įjungimo, <i>VAP</i> = 80 %	9,5	15,6

Pavėluoto įjungimo, $VAP = 100\%$	1,4	2,3
PWM KS grandinėje, $VAP = 20\%$	338	568
PWM KS grandinėje, $VAP = 40\%$	554	892
PWM KS grandinėje, $VAP = 60\%$	689	1122
PWM KS grandinėje, $VAP = 80\%$	784	1311
PWM KS grandinėje, $VAP = 100\%$	1,7	2,7
PWM NS grandinėje, $VAP = 20\%$	0,0	0,0
PWM NS grandinėje, $VAP = 40\%$	0,0	0,0
PWM NS grandinėje, $VAP = 60\%$	0,0	0,0
PWM NS grandinėje, $VAP = 80\%$	0,0	0,0
PWM NS grandinėje, $VAP = 100\%$	0,0	0,0

Mažiausi įtampos ir srovės stiprio šuoliai stebint skaitinio modeliavimo rezultatus prie uždarojo elektros mikrotinklo sistemos apkrovų prijungimo mazgo gauti PWM NS grandinėje vidutinės galios valdymo metodu. PWM NS grandinėje vidutinės galios valdymo metodas su visomis VAP vertėmis turėjo 0 % dydžio įtampos ir srovės stiprio šuolius. Nedaug nuo PWM NS grandinėje vidutinės galios valdymo metodo skiriasi ir periodo valdymo vidutinės galios valdymo metodas. Periodo valdymo metodo skaitinių moduliacijų metu nustatyta, kad su visomis VAP vertėmis, išskyrus 0 ir 100 %, gauta, jog įtampos šuoliai siekia 1,4 % įtampos efektinės vertės; srovės stiprio šuoliai atitinkamai siekia 2,2 % srovės stiprio efektinės vertės. Periodo valdymo metodo įtampos šuoliai gaunami apkrovos įjungimo ir išjungimo momentu, nes nepataikoma lygiai ties 0 V apkrovos įjungti, todėl gaunami minimalūs įtampos ir srovės šuoliai. Pagal poreikį, realiam DVGA prototipiniam įrenginiui su periodo valdymo vidutinės galios valdymo metodu būtų galima įjungimo procesą optimizuoti parenkant tikslesnę įrangą, kuri tiksliau apkrovas įjungtų ties 0 V. Pavėluoto įjungimo vidutinės galios valdymo metodas sukelia didesnius pereinamuosius procesus sistemoje nei PWM NS grandinėje arba periodo valdymo metodai. Pavėluoto įjungimo metodo pereinamieji procesai priklauso nuo sinusoidės įtampos tuo metu, kai apkrova perteklinei galiai sunaudoti įjungiamą. Todėl nustatyta, kad pavėluoto įjungimo metodo didžiausi pereinamieji procesai gaunami, kai VAP vertė yra 50 %. Pavėluoto įjungimo metodo atveju nustatyta, kad įtampos šuolis gali siekti 16,3 % įtampos efektinės vertės ir 27,3 % efektinės vertės gali siekti srovės stiprio šuolis. Prasčiausias iš visų atliktų skaitinių moduliacijų rezultatas pasiekiamas PWM KS grandinėje valdymo metodo atveju, kadangi įtampos šuoliai gali siekti 2700 V, o tai yra apie 784 % įtampos vardinės efektinės vertės, panašiai reaguoja ir uždarojo elektros mikrotinklo apkrova, apkrauta atitinkama įtampa, apkrovos srovės stiprio šuoliai siekia net 1131 % vardinės efektinės vertės.

Vidutinė kintama galia pasiekiamą atitinkamai įjungiant arba išjungiant tam tikram laikui apkrovą, dėl to sistemoje atsiranda pereinamieji procesai, kurie lemia bendrą poveikį pradinės sinusoidės formai ir THD vertei. Gauta vertė parodo procentinį sinusoidės iškraipymo dydį pagrindinės harmonikos atžvilgiu. THD vertės matavimo vienetai yra procentai, o pati vertė apskaičiuojama šaknies iš visų aukštesniųjų harmonikų efektyvių reikšmių kvadratų sumų vertę padalijus iš pagrindinės harmonikos efektyvią vertės [98].

$$THD = U_H / U_F; \quad (6)$$

$$U_H = (U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2)^{0,5}; \quad (7)$$

čia U_H – šaknis visų įtampos harmonikų vidutinių kvadratinių verčių sumos, V;

U_F – pirmosios sinusoidės įtampos efektinė vertė, V;

U_n – n -tosios įtampos efektinė vertė, V.

Vidutinės galios valdymo metodų skaitinių modeliavimų tikslas – turėti kuo mažesnę THD vertės skirtumą lyginant uždarojo elektros mikrotinklo sistemos THD vertę prieš pajungiant DVGA prototipinį įrenginį su verte integravus DVGA prototipinį įrenginį. Mažesnė THD vertė lemia, kad DVGA prototipinis įrenginys mažiau iškraipys sinusoidę, todėl geriausias vidutinės galios valdymo metodas bus priimtas tas, kurio THD vertė bus mažiausia toje pačioje simuliuojamoje sistemoje. Dažniausiai matuojamos yra nelyginės harmonikos, kurių vertės pagal LST EN 50160 standartą negali viršyti 4 lentelėje pateiktų verčių iš standarto.

4 lentelė. THD leistinosios vertės pagal LST EN 50160 [88]

Nelyginės harmonikos		Lyginės harmonikos	
Eilė, h	Santykinė amplitudė, u_h	Eilė, h	Santykinė amplitudė, u_h
3	5,0 %	2	2,0 %
5	6,0 %	4	1,0 %
7	5,0 %	6 ... 24	0,5 %
9	1,5 %		
11	3,5 %		
13	3,0 %		
15	0,5 %		
17	2,0 %		
19	1,5 %		
21	0,5 %		
23	1,5 %		
25	1,5 %		
Pastaba: Aukštesnių kaip 25 eilės harmonikų vertės nenurodytos, nes jos paprastai yra mažos, bet dėl rezonanso efektų dažniausiai nenuspėjamos.			

Harmonikos eilė nusako trikdžio komponentės dažnį, pirmos eilės harmonika yra pirminė sinusoidė, antros eilės harmonika – dvigubai didesnio dažnio, nei pagrindinės sinusoidės dažnis, todėl standarte rekomenduojama matuoti harmonikas nuo 100 Hz iki 1,25 kHz. Sinusoidės forma priklauso nuo generuojančių šaltinių tipo ir nuo pačių naudotojų, nagrinėjamos uždarojo elektros mikrotinklo sistemos atveju visi generuojantys šaltiniai yra keitikliai, ir tai lemia didesnes harmonikų vertes. Todėl, atitinkamai skaitiniame modelyje įgalinant virtualius matuoklius išmatuotos THD vertės kiekvienai fazei ir harmonikai be prijungto DVGA prototipinio įrenginio, matavimų duomenys pateikiami 5 lentelėje.

5 lentelė. THD išmatuotos vertės sumodeliuotoje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje be DVGA prototipinio įrenginio

Nelyginės harmonikos				Lyginės harmonikos			
Eilė, h	Santykinė amplitudė, u_h			Eilė, h	Santykinė amplitudė, u_h		
	L1, %	L2, %	L3, %		L1, %	L2, %	L3, %
3	0,4	0,2	0,3	2	6,2	8,1	6,7
5	<0,1	<0,1	<0,1	4	0,2	0,1	0,2
7	<0,1	<0,1	<0,1	6	<0,1	<0,1	<0,1
9	<0,1	<0,1	<0,1	8	<0,1	<0,1	<0,1
11	<0,1	<0,1	<0,1	10	<0,1	<0,1	<0,1
13	<0,1	<0,1	<0,1	12	<0,1	<0,1	<0,1
15	<0,1	<0,1	<0,1	14	<0,1	<0,1	<0,1
17	<0,1	<0,1	<0,1	16	<0,1	<0,1	<0,1
19	<0,1	<0,1	<0,1	18	<0,1	<0,1	<0,1
21	<0,1	<0,1	<0,1	20	<0,1	<0,1	<0,1
23	<0,1	<0,1	<0,1	22	<0,1	<0,1	<0,1
25	<0,1	<0,1	<0,1	24	<0,1	<0,1	<0,1

Uždarojo elektros mikrotinklo antrosios eilės harmonikos neatitinka standarto reikalavimų, nes apytiksliai 3–4 kartus viršija leistiną antrosios eilės harmonikų normą. Visų kitų eilių harmonikos atitinka standarte numatytas vertes. Harmonikos sumuojamos, todėl jau pati savaime sistema, dar be DVGA prototipinio įrenginio, netenkina standarto rekomendacijų. LST EN 50160 standarte nurodoma, jog bendra įtampos harmonikų suma negali viršyti 8 %; atitinkamai gauta, kad visose trijose fazėse vidutinė THD vertė yra 7,5 %.

Prie sumodeliuotos uždarojo elektros mikrotinklo sistemos perteklinės galios valdymui pridėtas DVGA eksperimentinio prototipo modelis. Prototipas simuliuotas keturiais vidutinės galios valdymo metodais kiekvienam metodui keičiant vidutinės galios valdymo VAP vertę. Skaitiniai modeliai sukurti taip, kad atspindėtų ir palygintų sistemos komponentus, artimesnius fiziniams komponentams, todėl į skaitinį modelį įtrauktos ir apkrovų reaktyviosios galios komponentės. DVGA metodo perteklinės galios sunaudojimui taikoma apkrova yra labai artima idealiai vien tik aktyviajai apkrovai, todėl priimta, kad apkrovos galios faktorius yra lygus 0,97. Uždarojo elektros mikrotinklo skaitinio modelio apkrovos galimas keletas variantų, vienu atveju apkrova priimta galios faktoriui esant 1, kitu atveju – galios faktoriui esant 0,9 ir paskiausiu atveju mikrotinklo apkrovos galios faktoriaus vertė prilyginta 0,8. Skaitinių moduliacijų metu virtualiai apskaičiuotos vienos fazės įtampų ir srovių THD vertės, nes likusios dvi fazės simuliuotos simetriškomis. THD vertės apskaičiuotos mikrotinklo apkrovų prijungimo mazge. Nuo įtampų THD vertės priklauso ir mikrotinklo apkrovų srovių THD vertė, bet įtampų vertės gautos didesnės, todėl 6 lentelėje pateikiami gauti rezultatai tik įtampų vertėms.

6 lentelė. Vidutinės galios valdymo metodų *THD* verčių palyginimas

Vidutinės galios valdymo metodas ir <i>VAP</i> vertė	Apkrovos $\cos\varphi = 1,0$	Apkrovos $\cos\varphi = 0,9$	Apkrovos $\cos\varphi = 0,8$
	Įtampos <i>THD</i> , %		
Visų metodų, kai <i>VAP</i> = 0 %	6,7	6,9	6,9
Periodo valdymo, <i>VAP</i> = 20 %	6,8	7,0	7,0
Periodo valdymo, <i>VAP</i> = 40 %	6,8	7,0	7,0
Periodo valdymo, <i>VAP</i> = 60 %	6,8	7,0	7,0
Periodo valdymo, <i>VAP</i> = 80 %	6,8	7,0	7,0
Periodo valdymo, <i>VAP</i> = 100 %	6,7	6,9	7,0
Pavėluoto įjungimo, <i>VAP</i> = 20 %	8,3	8,4	8,4
Pavėluoto įjungimo, <i>VAP</i> = 40 %	8,4	8,5	8,5
Pavėluoto įjungimo, <i>VAP</i> = 60 %	8,4	8,5	8,6
Pavėluoto įjungimo, <i>VAP</i> = 80 %	8,4	8,5	8,5
Pavėluoto įjungimo, <i>VAP</i> = 100 %	8,3	8,5	8,5
PWM KS grandinėje, <i>VAP</i> = 20 %	80	82	82
PWM KS grandinėje, <i>VAP</i> = 40 %	129	135	135
PWM KS grandinėje, <i>VAP</i> = 60 %	165	172	172
PWM KS grandinėje, <i>VAP</i> = 80 %	190	199	199
PWM KS grandinėje, <i>VAP</i> = 100 %	6,7	6,9	6,9
PWM NS grandinėje, <i>VAP</i> = 20 %	6,7	6,9	6,9
PWM NS grandinėje, <i>VAP</i> = 40 %	6,7	6,9	6,9
PWM NS grandinėje, <i>VAP</i> = 60 %	6,7	6,9	6,9
PWM NS grandinėje, <i>VAP</i> = 80 %	6,7	6,9	6,9
PWM NS grandinėje, <i>VAP</i> = 100 %	6,7	6,9	6,9

Atlikus skaitines moduliacijas ir virtualiai išmatavus *THD* vertes nustatyta, jog prasčiausias rezultatas gaunamas PWM KS grandinėje vidutinės galios valdymo metodo atveju. Gauti rezultatai, jog *THD* vertė siekia net 190 % (*VAP* vertė – 80 %) esant tik aktyviajai apkrovai ir atitinkamai pastebimas *THD* vertės padidėjimas, kai galios faktorius nelygus 1. Tikėtina, kad toks prastas rezultatas gaunamas dėl DVGA prototipinio įrenginio ir sistemos skaitinių modelių tarpusavio sąveikos. DVGA apkrovos įjungimo momentu atsiranda dideli įtampos, o kartu ir srovės stiprio šuoliai, kurie lemia pereinamuosius procesus ir galutinį prastą *THD* vertės rezultatą. Antrasis prasčiausias rezultatas gautas pavėluoto įjungimo vidutinės galios valdymo metodu. Tai yra antras prasčiausias rezultatas, bet žymiai geresnis nei PWM KS grandinėje metodo atveju. Pastebimas tik nedidelis, 1,6–1,8 % *THD* vertės padidėjimas įvairių apkrovų tipams lyginant su sumodeliuota uždarojo elektros mikrotinklo sistema be DVGA prototipinio įrenginio. Tokį rezultatą lemia vykstantis pereinamasis procesas įjungimo metu, kadangi įjungimo metu įtampos būna didesnės nei 0 V ir įtaka mikrotinklui tuo didesnė, kuo didesnei įtampai esant apkrova įjungžiama. PWM NS grandinėje vidutinės galios valdymo metodo skaitinės moduliacijos metu gauta, kad *THD* vertė apytiksliai lygi *THD* vertei be DVGA prototipinio įrenginio. PWM NS grandinėje ir sistemoje be DVGA prototipinio įrenginio *THD* vertės gautos apytiksliai lygios skirtingų galios faktoriaus apkrovų tipams. PWM NS grandinėje metodo atveju apkrova įjungžiama ir išjungžiama

akumuliatorių prijungimo mazge ant „+“ ir „-“ polių, tad visi pereinamieji procesai panaikinami pačių akumuliatorių ir baterijų keitiklių; todėl DVGA prototipinio įrenginio prijungimo atveju nesukeliami pereinamieji procesai, lemiantys žalą KS grandinėje esantiems elektros komponentams. Toks sprendinys galėtų lemti DVGA komercinio įrenginio mažesnę savikainą dėl mažesnio kiekio reikalingų komponentų paties įrenginio gamybai. Vidutinės galios valdymo periodo valdymo metodas, panašiai kaip ir PWM NS grandinėje metodas, turi tik labai nežymiai padidėjusią *THD* vertę; skirtingų apkrovų atvejais, lyginant su sistema be DVGA prototipinio įrenginio, *THD* vertė padidėja tik apytikriai 0,1 % dydžiu.

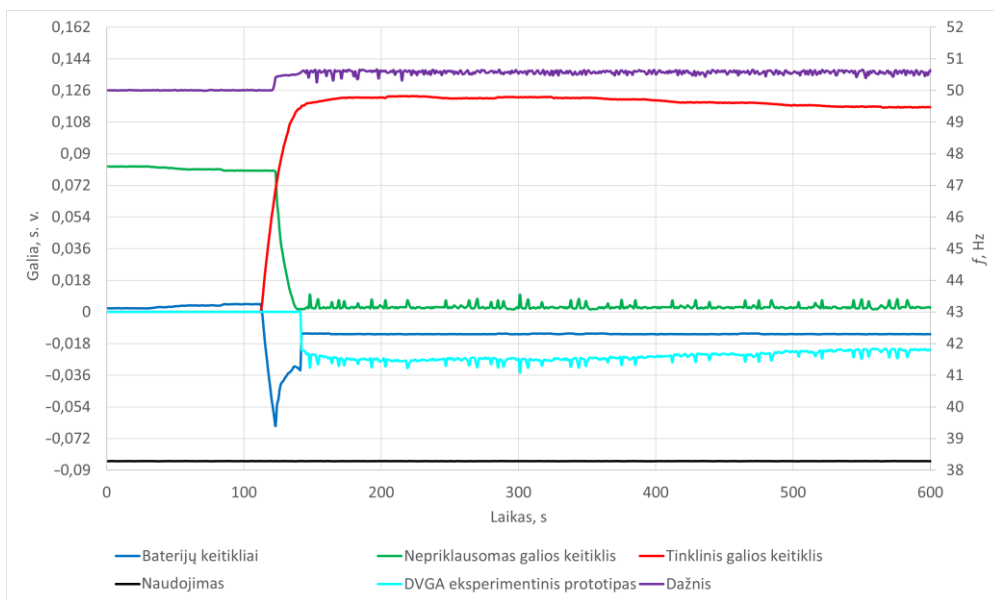
Pereinamuosius procesus, kurie yra didžiausi PWM KS grandinėje vidutinės galios valdymo metodo atveju, galima sušvelninti su filtrais, tokiu atveju sukelti pereinamieji procesai būtų atitinkamai sumažinti. Tačiau filtrus kiekvienai skirtingai uždarojo elektros mikrotinklo sistemai reikėtų parinkti individualiai pagal apkrovos dydį arba naudoti ekonomiškai mažiau patrauklią aktyvaus filtro parinktį. Todėl statiniai filtrai sumažintų DVGA prototipinio įrenginio pritaikymo lankstumą įvairių mikrotinklų sistemų tipams. Aktyvūs filtrai padidintų įrenginio kainą, todėl sumažintų rinkos susidomėjimą įrenginio ekonominiu aspektu.

Esant tik aktyviajai uždarojo elektros mikrotinklo apkrovai *THD* vertė apytiksliai mažesnė tik 0,2 % lyginant su verte, kai apkrovos galios faktorius lygus 0,9 ir 0,8. Praktiškai, realioje sistemoje apkrovos galios faktoriui pasikeitus iš 0,9 į 0,8, pereinamieji procesai turėtų dar suintensyvėti, bet skaitinio modelio sistemoje galima teigti, kad pereinamieji procesai nesuintensyvėjo, nes *THD* vertė daugiau nebedidėja. Skaitinis modelis neidealiai atspindi pereinamuosius procesus, vykstančius realioje eksperimentinėje sistemoje; todėl daroma prielaida, kad tai yra priežastis, kodėl *THD* vertė daugiau nebedidėja.

3.3. DVGA prototipinio įrenginio realiame mikrotinkle eksperimentinis tyrimas

Atliekant tyrimus, laiko taupymo sumetimais mikrotinklo skaitinis modelis ir realus prototipinis DVGA įrenginys buvo kuriami lygiagrečiai, tuo pačiu metu. Todėl pagamintas eksperimentinis DVGA prototipas yra pagal PWM KS grandinėje vidutinės galios valdymo metodą, nors atliktų skaitinės moduliacijos tyrimų metu nustatyta, jog tinkamiausias tokiai sistemai vidutinės galios valdymo metodas yra periodo valdymo metodas. Kuriant realų prototipą, buvo priimta prielaida, kuris vidutinės galios valdymo metodas sistemai turėtų būti tinkamiausias, bet skaitinės moduliacijos tyrimų pabaigoje nustatyta, jog padaryta prielaida buvo netiksli.

Eksperimentinis DVGA prototipas ištestuotas realiame uždaražame elektros mikrotinkle, kurio principinė schema pateikta 22 ir 23 pav. Tiriama situacija iš esmės nesikeičia, sistemoje nustatoma perteklinė galia, kuri kelia galių disbalanso problemą uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje, o problemos sprendiniui pasitelkiamas DVGA prototipinis įrenginys. 32 pav. pavaizduotas 30 minučių laikotarpis, kuriame išskirtas tinklinio galios keitiklio įsijungimo momentas, DVGA prototipinio įrenginio pasileidimas ir perteklinės galios sunaudojimas.



32 pav. DVGA eksperimentinio prototipo darbas uždarajame elektros mikrotinkle

Duomenys, pateikti 32 pav., yra trijų sekundžių intervalu, t. y. kas tris sekundes, sinchronizuotai atliekami įrenginių galios matavimai, ir iš viso atlikta 600 matavimų, todėl matavimų laikotarpis siekia 30 minučių. Pagrindinių įvykių analizė yra:

1. Laiko intervalas nuo 0 iki 113 matavimo. Naudojimas visą stebėjimo laikotarpį (30 minučių) palaikytas stabilus – 0,085 s. v. Akumulatoriai tyrimo pradinio laiko momentu yra įkrauti iki 80 % įkrovos. Tinklinis galios keitiklis įsijungia savaime, kol vyksta įsijungimo procesas, keitiklis negeneruoja galios. Nepriklausomas galios keitiklis generuoja maksimaliai pagal esamą apšvitos kiekį, tačiau šiek tiek nepakankamai lyginant su naudojimu, todėl trūkumą kompensuoja baterijų keitikliai, naudodami akumuliatoriuose sukauptą elektros energiją. Saulės šviesos kiekis šiek tiek krenta, todėl nepriklausomo galios keitiklio galia taip pat šiek tiek mažėja, o atitinkamai generuojamą galią keičia baterijų keitikliai, kad sistemoje būtų išlaikytas galių balansas. Sistemos dažnis stabilus ir yra vardinės vertės – 50 Hz.
2. Laiko intervalas nuo 114 iki 123 matavimo. Tinklinis galios keitiklis pradeda darbą ir didina galią. Nepriklausomas galios keitiklis vis dar generuoja maksimaliai pagal esamą šviesos kiekį, todėl, kad su pertekline galia baterijų keitikliai įkrauna akumuliatorius, kurie buvo iškrauti matavimo laikotarpiu nuo 0 iki 113. Ties 123 matavimu akumuliatorių įkrovos lygis grįžta prie 80 %. Sistemos dažnis vis dar stabilus ir yra vardinės vertės – 50 Hz.
3. Laiko intervalas nuo 124 iki 141 matavimo. Tinklinis galios keitiklis ir toliau didina generuojamą galią ir maždaug ties 141 matavimu jau beveik pasiekia maksimalią generuojamą galią. Baterijų keitikliai pereina į lėtesnį akumuliatorių krovimo ciklą pagal akumuliatorių gamintojo instrukcijas. Dėl perteklinės galios sistemos dažnis per tris matavimus, 9 sekundes, pakyla iki

nustatytosios (50,75 Hz) nepriklausomo galios keitiklio vertės, kurią pasiekęs nepriklausomas galios keitiklis nustoja generuoti perteklinę galią, amortizuodamas perteklinę galią sistemoje.

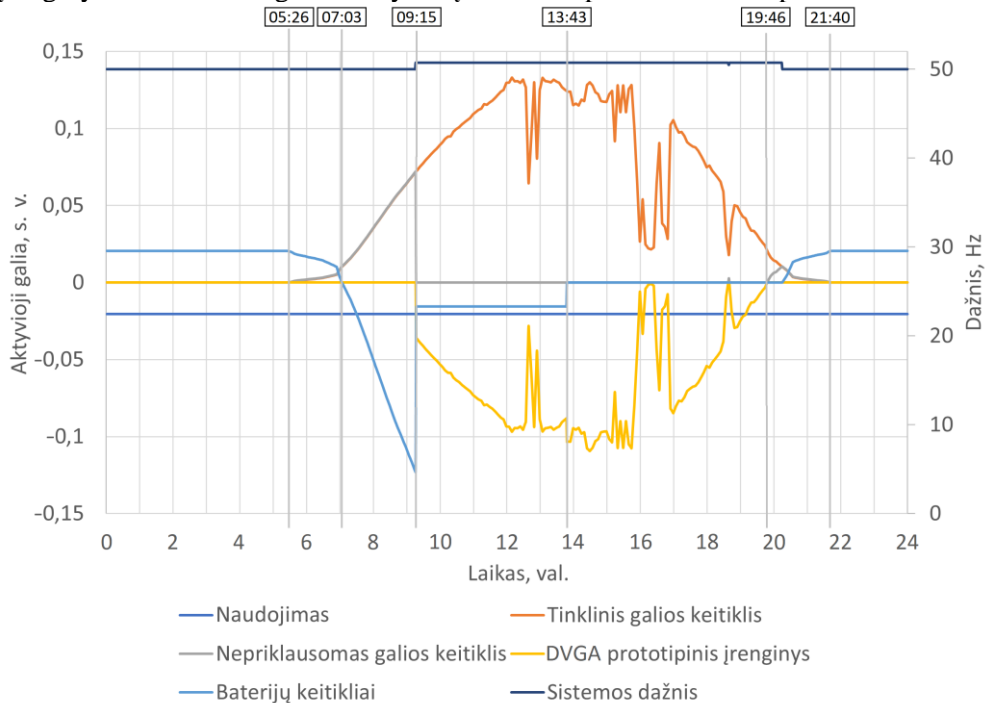
4. Laiko intervalas nuo 142 iki 600 matavimo. Tinklinis galios keitiklis generuoja maksimaliai pagal krentantį šviesos srautą į FV modulius. Nepriklausomas galios keitiklis nieko negeneruoja, nes sistemos dažnis didesnis, nei nustatyta keitiklio ribinė dažnio vertė. Baterijų keitikliai krauna akumulatorius lėtu režimu (angl. *float charge*). DVGA prototipinis įrenginys 142 tyrimo matavimą pradeda sunaudoti perteklinę galią uždarojo mikrotinklo sistemoje. Sistemos dažnis svyruoja apie 50,75 Hz. Perteklinės galios mikrotinklo sistemoje nebėra, nes DVGA prototipinis įrenginys ją sunaudoja, matavimų intervale DVGA naudojama vidutinė galia kinta pagal sistemoje esantį perteklinės galios dydį.

Veikiant DVGA prototipiniam įrenginiui dažnis šiek tiek svyruoja dėl vidutinės galios valdymo ir kitų įrenginių tarpusavio sąveikos, rezonansinių reiškinių, bet pati prototipinio įrenginio paskirtis išpildoma – aktyvioji perteklinė galia eksperimentinėje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje sunaudojama nepaveikiant sistemoje sukaupto elektros energijos kiekio akumulatoriuose. Sukauptos elektros energijos kiekis ne tik kad nėra veikiamas, bet lėtesniu akumuliatorių krovimo režimu sukaupta elektros energija akumulatoriuose dar ir didinama.

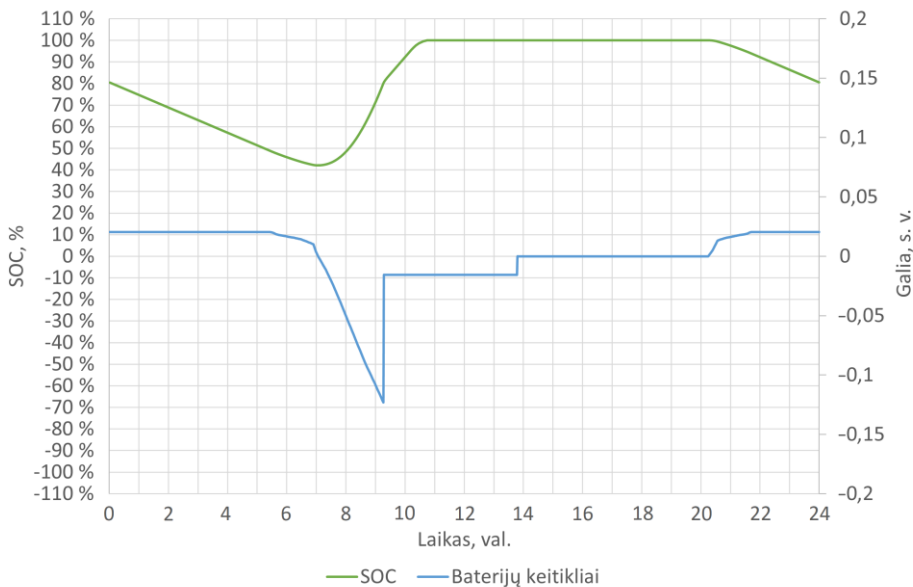
Trumpuoju tyrimo laikotarpiu iš atliktų testų ir pateiktų matavimo kreivių galima daryti išvadą, kad DVGA prototipinis įrenginys perteklinę galią mikrotinklo sistemoje sunaudoja ne tik nepaveikdamas akumuliotos energijos kiekio, bet dar ir sukurdamas sąlygas papildomai didinti sistemos sukauptą elektros energijos kiekį akumulatoriuose. Taip yra dėl to, kad kraunant akumulatorius perteklinė galia neatsiranda, kol nepasiekiami 80 % SOC, pasiekus 80 % pereinama į lėtesnio krovimo režimą, o tai lemia galių balanso pokytį sistemoje ir dėl to pradeda aptikti perteklinė galia sistemoje. Be DVGA prototipinio įrenginio, tinklinis galios keitiklis atsijunginėtų tol, kol perteklinė galia nebebūtų aptinkama, todėl ir akumulatoriuose sukauptas elektros energijos kiekis nebus didesnis nei 80 % SOC. Su DVGA prototipiniu įrenginiu perteklinė galia sunaudojama, tinklinis galios keitiklis neatsijunginėja ir akumuliatoriai toliau įkraunami, didinant sukauptą elektros energijos kiekį net ir tais atvejais, kai aptinkama perteklinė galia sistemoje.

Taip pat atliktas tyrimas DVGA prototipinio įrenginio veikimo ilgalaikėje perspektyvoje. Visą veikimo laikotarpį galima išskaidyti į atitinkamus periodus. DVGA prototipinis įrenginys reikalingas tik tais atvejais, kai uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje aptinkama perteklinė galia. Eksperimentinis uždarojo elektros mikrotinklas sudarytas iš nesunkiai nuspėjamų AEEŠ, šiuo atveju FV modulių elektrinės generacija nesunkiai prognozuojama. FV moduliai nesugebės gaminti elektros energijos nakties metu, kadangi šviesos kiekis bus nepakankamas generacijai. Todėl natūralu, kad perteklinė galia gali atsirasti tik dienos metu. Todėl ir veikimo laikotarpis priimtas kaip išskaidytas į atitinkamus paros periodus. Vienas tokių DVGA prototipinio įrenginio veikimo, sudėtingiausio periodo, testų atliktas vieną parą, kad būtų pavaizduotas DVGA prototipinio įrenginio veikimo darbo režimas priskirtu laiko periodu – per parą. Eksperimentiniam tyrimui parinktas

sudėtingiausias periodas – kai perteklinės galios daugiausia, tada, kai prototipinis įrenginys turi dirbti daugiausia. Tyrimų rezultatai pateikti 33 ir 34 pav.



33 pav. DVGA eksperimentinio prototipo darbas uždarajame elektros mikrotinkle paros laikotarpiu



34 pav. Akumuliatorių įkrovos lygio pokytis eksperimento metu

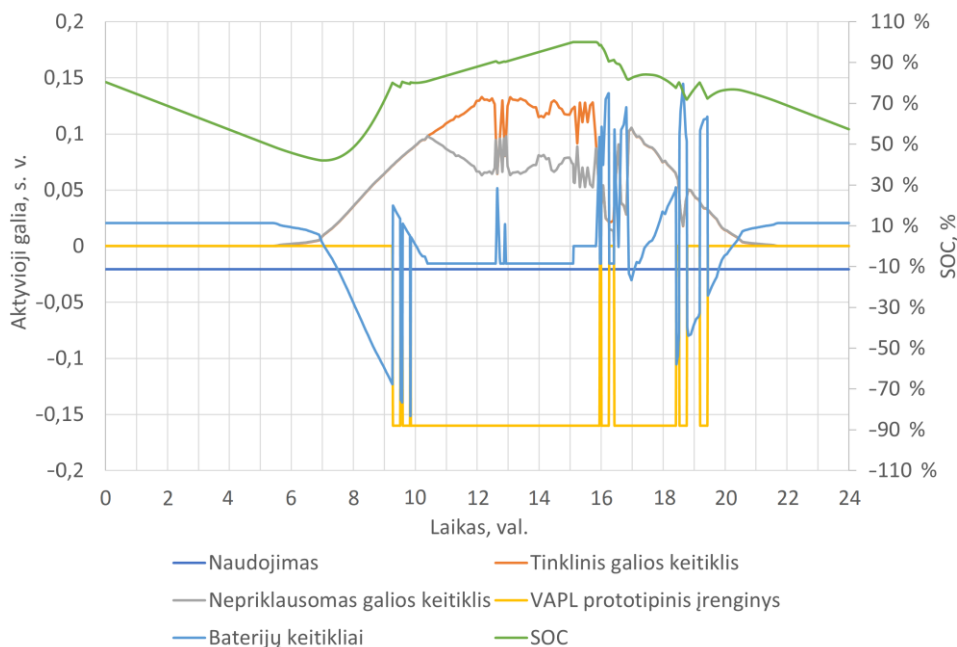
DVGA prototipinio įrenginio parinkto periodo laikotarpio tyrimui pasirinkta saulėta diena, kada prognozuojama didžiausia generacija iš AEŠ. Eksperimentiniame uždaraime elektros mikrotinkle atitinkamai sukuriant sudėtingiausią prototipinio darbo režimą parinkta stabili apkrova 0,021 s. v., trunkanti visą parą. Atlikta eksperimentinio tyrimo stebėjimų apžvalga.

1. Laiko intervalas nuo 0 val. 00 min. iki 5 val. 26 min. Akumuliatorių SOC yra 80 %. Saulė nešviečia, todėl tinklinis galios keitiklis ir nepriklausomas galios keitiklis nieko negeneruoja. Visą naudojimo poreikį gamina baterijų keitikliai iškraudami akumulatorius. Todėl laikotarpio pabaigoje akumuliatorių SOC sumažėja iki 49 %. Visą laikotarpį uždarojo elektros mikrotinklo sistemos dažnis yra 50,0 Hz.
2. Laiko intervalas nuo 5 val. 27 min. iki 7 val. 03 min. Šviesos kiekis padidėja tiek, kad tinklinis ir nepriklausomas galios keitikliai pradeda generuoti elektros energiją, ir iki laikotarpio pabaigos abu keitikliai vienodai didina generuojamą galią. Akumuliatorių SOC lygis dar mažėja, kadangi generuojamos galios nepakanka naudojimo poreikiui, todėl baterijų keitikliai generuoja trūkstamą elektros galią. Iki laikotarpio pabaigos SOC lygis nukrenta iki 42 %. Sistemos dažnis stabilus ir yra 50,0 Hz vertės.
3. Laiko intervalas nuo 7 val. 04 min. iki 9 val. 15 min. Saulei kylant, šviesos kiekis, krentantis į FV modulių paviršių, didėja, todėl tinklinio ir nepriklausomo keitiklių generuojamos galios atitinkamai didėja. Suminė generacija viršija naudojimą, todėl baterijų keitikliai krauna akumulatorius su pertekline elektros energija. Iki laikotarpio pabaigos akumuliatoriai įkraunami iki 80 % SOC. Sistemos dažnis vis dar stabilus ir yra 50,0 Hz vertės.
4. Laiko intervalas nuo 9 val. 16 min. iki 13 val. 43 min. Laikotarpio pradžioje akumuliatoriai pasiekė 80 %, baterijų keitikliai perėjo į lėtesnį akumuliatorių įkrovos režimą, todėl žymiai, nuo 0,123 s. v. iki 0,061 s. v. sumažėjo baterijų keitiklių naudojama galia. Sumažėjus galios poreikiui, sistemos dažnis padidėja iki 50,75 Hz vertės, nepriklausomas galios keitiklis sumažina generuojamą galią iki 0 s. v. Vyksta aprašytas pereinamasis procesas, pateiktas 32 pav. Tinklinis galios keitiklis ir toliau generuoja tiek, kiek didėja saulės šviesos kiekis, krintantis į FV modulių paviršių. Visa perteklinė galia uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje sunaudojama DVGA prototipinio įrenginio. Iki laikotarpio pabaigos baterijų keitikliai akumulatorius įkrauna iki 100 % SOC.
5. Laiko intervalas nuo 13 val. 44 min. iki 19 val. 46 min. Sistemoje visą laikotarpį su maža išimtimi 18 val. 37 min. aptinkama perteklinė galia. Tinklinis galios keitiklis generuoja pagal krintantį saulės šviesos kiekį į FV modulių paviršių. Nepriklausomas galios keitiklis nieko negeneruoja, išskyrus trumpą išimtį 18 val. 37 min., kada sumažėjusios tinklinio galios keitiklio generacijos nebepakako naudojimo poreikiui patenkinti. Baterijų keitikliai visą laikotarpį nieko negeneravo, ir akumuliatorių nebeįkraudavo, nes jų įkrovos lygis buvo pasiektas 100 % SOC.
6. Laiko intervalas nuo 19 val. 47 min. iki 21 val. 40 min. Uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje stebimas pereinamasis procesas, kurio metu perteklinė galia nebeaptinkama, saulės šviesos kiekis mažėja, todėl tinklinio galios

keitiklio generuojama galia mažėja. Nepriklausomas galios keitiklis trūkumą kompensuoja, kol pakanka saulės šviesos kiekio. Esant neapakanamam saulės šviesos kiekiui, trūkstamą generacijos galią naudojimui generuoja baterijų keitikliai. Sistemos dažnis sumažėja iki 50,0 Hz.

- Laiko intervalas nuo 21 val. 41 min. iki 23 val. 59 min. Saulė nešviečia, todėl tinklinis galios keitiklis ir nepriklausomas galios keitiklis elektros energijos negeneruoja. Visą naudojimo poreikį gamina baterijų keitikliai, iškraudami akumulatorius. Todėl laikotarpio pabaigoje akumuliatorių SOC sumažėja iki 80 %. Visą laikotarpį uždarojo elektros mikrotinklo sistemos dažnis yra 50,0 Hz. DVGA prototipinis įrenginys perteklinės galios neaptinka, todėl elektros energijos nenaudoja.

Pagal atlikto eksperimentinio tyrimo rezultatus galima teigti, kad DVGA prototipinis įrenginys, keisdamas vidutinę apkrovos galią, sunaudojo perteklinę galią uždarojo mikrotinklo sistemoje. Eksperimento metu buvo iš viso pagaminta 21,21 kWh elektros energijos, iš kurios 12,33 kWh sudarė perteklinė elektros energija. Visą perteklinę elektros energiją sunaudojo DVGA prototipinis įrenginys. Eksperimento metu akumuliatorių SOC lygis nebuvo paveiktas neigiamai, priešingai, dėl sunaudojamos perteklinės galios baterijų keitikliai akumulatorius saulei šviečiant įkrovė iki 100 % SOC lygio. Panaudojus esamus apkrovos ir saulės šviesos kiekio duomenis atitinkamai atliktas mikrotinklo eksperimentas – simuliacija, kaip pavaizduota 35 pav., kai vietoj DVGA prototipinio įrenginio naudojimo taikomas fiksuoto dydžio apkrovos perteklinės galios valdymo metodas.



35 pav. Uždarojo elektros mikrotinklo darbo su fiksuoto dydžio apkrova eksperimentas

DVGA perteklinės galios sunaudojimo metodas palygintas su fiksuoto dydžio apkrovos perteklinės galios valdymo metodu, kadangi fiksuoto dydžio apkrovos

metodas yra dažniausiai pasitaikantis perteklinės galios sunaudojimo metodas. Fiksuoto dydžio apkrovos metodas yra patikimas, universalus skirtingoms sistemoms, lengvai pritaikomas, neturintis įtakos naudotojo komfortui ir ekonomiškai patrauklus metodas, todėl būtent su šiuo metodu ir lyginamas pristatomas DVGA perteklinės galios sunaudojimo metodas. Fiksuoto dydžio apkrovos perteklinės galios valdymo metodas veikimo principu labai panašus į DVGA prototipinio įrenginio naudojimą, tik vietoj dinaminės vidutinės apkrovos galios naudojama nustatyto dydžio apkrova, kuri lygi didžiausiai galimai perteklinei galiai sistemoje arba už ją didesnė. Pagal eksperimentinio tyrimo duomenis, 35 pav., eksperimento metu iš viso pagaminta 34,34 kWh elektros energijos, iš kurių 26,93 kWh elektros energijos buvo sunaudota kaip perteklinė. Eksperimento su DVGA prototipiniu įrenginiu ir su fiksuoto dydžio apkrova duomenys palyginami 7 lentelėje.

7 lentelė. Eksperimento su DVGA prototipiniu įrenginiu ir su fiksuoto dydžio apkrova palyginimas

Parametras	Mikrotinklas su DVGA prototipiniu įrenginiu	Mikrotinklas su fiksuoto dydžio apkrova
SOC tyrimo pradžioje, %	80	80
SOC tyrimo pabaigoje, %	80	57
Naudojimas, kWh	8,88	8,88
Tinklinio galios keitiklio generacija, kWh	19,32	19,32
Nepriklausomo galios keitiklio generacija, kWh	1,84	15,02
Iš viso sugeneruota, kWh	21,16	34,34
Snaudota kaip perteklinė galia, kWh	12,28	26,93
Baterijų keitiklių krovimas, kWh	3,68	5,15
Baterijų keitiklių generacija, kWh	3,68	6,62

Iš palyginimo rezultatų, apibendrintų 7 lentelėje, galima daryti porą išvadų.

Pirmoji, esant toms pačioms apkrovos ir generacijos sąlygoms, uždarojo elektros mikrotinklo sistema su DVGA prototipiniu įrenginiu perteklinės galios nebeaptinkant turi didesnę sukauptą elektros energijos kiekį akumuliatoriuose. Atlikto tyrimo režimu tyrimo pabaigoje mikrotinklas su DVGA prototipiniu įrenginiu turėjo likutinę akumuliatorių įkrovą 80 % SOC. Tyrimo pabaigoje mikrotinkle be DVGA prototipinio įrenginio akumuliatorių įkrova siekė 57 % SOC. Skirtumas tarp atliktų eksperimentų akumuliatorių įkrovos likutinių verčių tyrimams pasibaigus siekia 23 %, tai reiškia, kad mikrotinklas su DVGA prototipiniu įrenginiu teigiamai paveikė sukauptą elektros energijos kiekį sistemoje.

Antroji, DVGA prototipinis įrenginys užtikrina mažesnę akumuliatorių naudojimą, o tai lemia mažesnę jų degradaciją. DVGA prototipinio įrenginio atveju, akumuliatoriai 40 % mažiau energijos įkrauti ir 80 % mažiau energijos iškrauti.

Nepaisant to, tyrimas buvo atliktas AEŠ generacijai esant netoli vardinės galios, o apkrovos dydis parinktas taip pat didžiausios galimos perteklinės galios dydžiui. Todėl pagal atlikto tyrimo scenarijų perteklinės galios pikas ir perteklinę galią sunaudojanti apkrova yra apylygės. Esant mažesnei AEŠ generacijai, sukauptas elektros energijos kiekis kaupikliuose paveikiamas dar labiau, ir įtakos dydis priklauso nuo atitinkamos perteklinės galios dydžio uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje.

3.4. DVGA modelio tikslinimas

Prototipinis DVGA įrenginys tyrimų metu padarius prielaidą sukurtas su PWM KS grandinėje vidutinės galios valdymo metodu, skirtu vidutinei apkrovos galiai valdyti. Atlikus modelio skaitines moduliacijas nustatyta, kad pasirinktas vidutinės galios valdymo metodas yra mažiausiai tinkamas vidutinės galios valdymo metodas, kurio pagrindu prototipinis įrenginys eksperimentinėje sistemoje dinamiškai valdo apkrovą. Eksperimentinių tyrimų metu uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje stebėti panašūs pereinamieji procesai kaip ir skaitinių moduliacijų atveju – įtampų šuoliai. Prototipiniame įrenginyje, kad būtų sumažinta žalinga įtaka kitiems įrenginiams uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje, pakoreguota DVGA įrenginio valdymo grandinė, kad apkrova būtų prijungiama prie sistemos per ilgesnį laiką; tai leido sušvelninti pereinamuosius procesus eksperimentinių tyrimų metu.

Atsižvelgiant į gautus skaitinės moduliacijos ir eksperimentinių tyrimų rezultatus, DVGA prototipinio įrenginio vidutinės galios valdymo metodas patikslinamas ir pakeičiamas periodo valdymo metodu. Periodo valdymo vidutinės galios valdymo metodas DVGA prototipiniam įrenginiui, kaip nustatyta, yra tinkamiausias iš keturių simuliuotų ir analizuotų vidutinės galios valdymo metodų.

3.5. DVGA prototipinio įrenginio praktinis pritaikymas ir taikymo ribos

DVGA prototipinis įrenginys skirtas sistemoms, kuriose susiduriama su perteklinės galios generacija. Yra įvairių būdų, kaip perteklinę galią sunaudoti, tačiau prototipinis įrenginys sunaudoja perteklinę galią nemažindamas sistemoje sukaupto elektros energijos kiekio, todėl turint sistemą su perteklinės galios problema DVGA įrenginys gali būti pritaikomas problemai spręsti.

Pirmiausia, DVGA prototipinis įrenginys gali būti pritaikomas sistemose, kurios pagal pirminį etapą yra prijungtos prie EES; tokiu atveju įrengti tinkliniai galios keitikliai su AEŠ ir antruoju etapu sistema keičiama į uždarojo elektros mikrotinklo sistemą. Tokią sistemą norint pakeisti į uždarojo mikrotinklo sistemą, tinklinis galios keitiklis gali nebetikti. Norint išvengti naujo keitiklio įsigijimo ir norint pritaikyti jau pirmuoju etapu įrengtą tinklinį galios keitiklį, būtų galima pritaikyti DVGA prototipinį įrenginį. Pritaikius DVGA prototipinį įrenginį turėtų būti sutaupomą išlaidų, nes DVGA prototipo siekiamybė – kad jis būtų ekonomiškai patrauklus įrenginys, nereikalaujantis papildomo programavimo ar papildomų išteklių įrengimui. Nepaisant to, turimų įrenginių panaudojimas tobulinamoje sistemoje skatina tvarumą ir aplinkosaugą, nes mažinama elektronikos komponentų atliekų.

Antra, DVGA prototipinis įrenginys gali būti pritaikomas sistemose, kuriose yra įvairių gamintojų įrangos, nekomunikuojančios tarpusavyje, arba tokios komunikacijos derinimui reikalingi dideli išteklių. To pavyzdys būtų gatvelė individualių namų ūkių, kurie turėtų bendrą elektros mikrotinklą ir dirbtų izoliuotai nuo EES režimu, kiekvienas iš gyventojų siektų įsirengti savo generuojantį šaltinį. Jei kiekvieno gyventojų generuojantis šaltinis yra skirtingas, tikėtina, kad tokia gatvelė turės perteklinės galios problemą, kai AEŠ generacijos pasiūla bus didesnė nei naudojimas. Vengiant didelių visos įrangos tarpusavyje derinimo išteklių, DVGA prototipinis įrenginys būtų galimas pritaikyti kaip paprastesnė alternatyva perteklinės galios problemos sprendimui uždaroje elektros mikrotinklo sistemoje.

EES bei uždarytų elektros mikrotinklų sistemos yra visos individualiai skirtingos, tačiau visos kartu ir panašios, todėl prototipinis įrenginys turėtų panašiai funkcionuoti visose proporcingose sistemose. Nepaisant sistemų panašumų, DVGA prototipinį įrenginį, pritaikomą kitokioje sistemoje, reikėtų įvertinti individualiai, patikrinant, ar DVGA atliks savo funkciją pagal paskirtį. Ypatingas dėmesys turėtų būti skirtas kelis kartus mažesnėms ir kelis kartus didesnėms sistemoms nei tiriamoji šiame darbe. Be to, sistemos, kurių pagrindinis valdantysis generavimo šaltinis yra ne keitiklis, o fiziškai besisukantis elektros variklis, turėtų būti atskirai ištestuotos su DVGA prototipiniu įrenginiu prieš pritaikant jį atitinkamoje sistemoje.

DVGA metodas, skirtas perteklinės galios sunaudojimo valdymui, taikomas uždaroje elektros mikrotinklo sistemoje, kurio pritaikymo ribos yra:

1. Uždarojo elektros mikrotinklo sistema, kurios vartotojai naudoja kintamosios srovės elektros energiją, pagal schemą, pavaizduotą 1 pav.
2. Metodas tinkamas labiausiai paplitusioms 50 Hz ir 60 Hz dažnio sistemoms.
3. Metodas pritaikomas sistemose iki 400 V įtampos lygio su galimybe pritaikyti ir didesnėms įtampoms, tik atitinkamai turėtų keistis techninis vidutinės galios apkrovos sprendimas.
4. Metodo pritaikymas galimas uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje, kurių vardinė galia yra nuo kilovatų (kW) eilės iki dešimčių megavatų (MW) eilės.

3.6. Skyriaus apibendrinimas

Sumodeliuota uždarojo elektros mikrotinklo sistema, kurioje ištestuoti keturi vidutinės apkrovos galios valdymo metodai. Laikoma, kad pagal gautus rezultatus sumodeliuotai sistemai geriausias metodas iš keturių testuotų yra periodo valdymo metodas. Simuliuojant periodo valdymo metodu įtampos ir srovės šuoliai įjungimo metu siekė atitinkamai 1,4 % ir 2,2 % efektyvių verčių matuojant juos prie uždarojo elektros mikrotinklo apkrovų prijungimo mazgo; *THD* vertės šiuo metodu su įvairiomis galios faktoriaus apkrovomis siekė ~6,8–7,0 %. Taip pat tinkamas metodas perteklinės galios valdymui, kaip nustatyta, yra ir PWM NS grandinėje, nes gautieji skaitinių moduliacijų rezultatai labai mažai skiriasi nuo periodo valdymo metodo; atitinkamai įtampos ir srovės šuoliai yra 0,0 %, o *THD* vertės šiuo metodu siekė ~6,7–6,9 % esant įvairioms galios faktoriaus apkrovoms mikrotinkle. Nepaisant PWM NS grandinėje metodo privalumų, kaip pagrindiniai trūkumai yra identifikuoti:

1. Įrenginio pritaikomumas – uždarojo elektros mikrotinklo kaupikliai dažniausiu atveju yra akumulatoriai. Akumuliatorių vardinė įtampa gali skirtis nuo 12 V iki 48 V ar net 400 V NS ir dar daugiau. Kiekvienam vardinių įtampų lygių skirtumui tektų kurti atskirą DVGA prototipinį įrenginį, nors paties įrenginio galia ir nesikeistų. Taip yra todėl, kad skirtingas įtampų lygis lems skirtingas srovės valdomos apkrovos dalyje.
2. Įrenginio kompleksiskumas – testuojamos sistemos atveju vardinė akumuliatorių įtampa yra 48 V, tad norint pasiekti tą pačią apkrovą reikalinga daugiau nei 14 kartų didesnė srovė, lyginant su KS grandinėje prijungtų įtaisų metodais. Dėl didesnės srovės didėja reikiamas laidininkų skerspjūvio plotas, atitinkamai didėja ir jų kaina bei gabaritai. Be to, kiekvienam skirtingam akumuliatorių vardinės įtampos lygiui reikia skirtingo dizaino DVGA įrenginio, nes keisis srovės stipris. Taip pat, DVGA prototipiniam įrenginiui dar reikia prisijungti prie KS grandinės tam, kad būtų išmatuotas sistemos dažnis, kuris yra perteklinės galios indikatorius, o pagal sistemos dažnį valdomas ir pats prototipinis įrenginys, todėl PWM NS grandinėje metodo kompleksiskumas didesnis, jei sistemos kaupiklių vieta skiriasi nuo KS grandinės vietos.

Pavėluoto įjungimo vidutinės galios valdymo metodas sukelia kiek didesnius įtampos ir srovės šuolius, kurie atitinkamai siekia iki 16,3 % ir 27,3 % efektyvių verčių, matuojant įtampos ir srovės šuolius uždarojo elektros mikrotinklo apkrovų prijungimo mazge. Pereinamieji procesai lemia ir *THD* vertės padidėjimą iki ~8,3–8,6 % esant įvairioms galios faktoriaus apkrovoms mikrotinkle. PWM KS grandinėje metodas turi netiesioginį ryšį su kitais sistemoje sumodeliuotais keitikliais, todėl įtampos ir srovės šuoliai yra apie 48 kartus didesni nei dirbant pavėluoto įjungimo metodu. Realus eksperimentinis prototipas taip pat buvo pagamintas PWM KS grandinėje metodo principu, ir sutapimas tai, kad realiame uždaražame elektros mikrotinkle sąveika taip pat pastebėta panaši, tik ne tokios didelės amplitudės. Realiame eksperimentiniame prototipe įtampos šuolių problema išspręsta pakeičiant varžus tranzistoriaus valdymo grandinėje ir taip prailginant tranzistoriaus įsijungimo laiką; tai lėmė tranzistoriaus kaitimą, tačiau mikrotinklo sistema jau sugebėjo prisitaikyti prie greitai komutuojančio tranzistoriaus. Nustatyta, kad įtampos šuoliai uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje atsiranda dėl DVGA prototipinio įrenginio greitaveikos; dėl prijungiamos apkrovos per 1,7 ns žymiai pasikeičia galių ir srovių balansas sistemoje, dėl to baterijų keitikliai stengiantis balansą atstatyti sukuria įtampos šuolius. Padaryta prielaida, kad dėl tos pačios priežasties gauti dideli įtampos bei srovės šuoliai ir simuliuojamoje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje. Iš gautų rezultatų nustatyta, kad periodo valdymo metodas iš testuotų keturių vidutinės galios valdymo metodų tinka labiausiai perteklinės galios sunaudojimo valdymui uždaražame elektros mikrotinkle nepaveikiant sistemos patikimumo, prototipinio įrenginio ekonominio patrauklumo ir sistemos kompleksiskumo.

Vidutinės apkrovos galios valdymo metodo algoritmas sukurtas taip, kad prijungtos apkrovos galia mažai veikia arba visai neveikia įrenginio pritaikymo pagal individualų sistemos dizainą, kadangi algoritmas keičia *VAP* vertę pagal dažnio pokytį sistemoje, o ne pagal vardinę apkrovos galią. Svarbu tik neviršyti

paties prototipinio įrenginio maksimalios galios, kuriai jis sukurtas, ir prie DVGA prototipinio įrenginio prijungti ne mažesnės galios apkrovą, nei galima maksimali nevaldomo šaltinio galia sistemoje.

Pagal atliktus eksperimentinius tyrimus realioje uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje nustatyta, kad DVGA prototipinis įrenginys valdo perteklinę galią mikrotinklo sistemoje neigiamai nepaveikdamas sistemoje sukaupto elektros energijos kiekio. Nors sistemos sukauptas elektros energijos kiekis nepaveikiamas neigiamai, priešingai, sukauptas elektros energijos kiekis padidinamas. Uždarojo elektros mikrotinklo sistema, veikdama su DVGA prototipiniu įrenginiu, perteklinei galiai pasibaigus turėjo 23 % daugiau sukauptos elektros energijos kiekio akumuliatoriuose nei esant analogiškai situacijai be DVGA prototipinio įrenginio. Testų metu buvo atrasta, kad papildoma vertė naudojant DVGA prototipinį įrenginį yra mažesnis akumuliatorių naudojimas. Akumuliatorių garantiniai laikotarpiai taikomi pagal laiką arba įkrovimo ciklą skaičių, priklauso nuo to, kuris parametras greičiau pasiekia garantijos ribą. Naudojant DVGA prototipinį įrenginį 40 % mažiau elektros energijos reikėjo įkrauti į akumuliatorius ir 80 % mažiau jie buvo iškrauti; todėl galima teigti, kad DVGA prototipinis įrenginys tausoja akumuliatorius mažindamas jų įkrovimo / iškrovimo intensyvumą. Dėl veikiančio DVGA prototipinio įrenginio nėra fiksuojama sistemos atsijungimų ar priverstinių naudotojo apkrovos galios pokyčių, todėl galima teigti, kad naudotojo komfortui veikiantis DVGA prototipinis įrenginys įtakos neturi.

3.7. Autoriaus indėlis kuriant eksperimentinį prototipą

Kuriant eksperimentinį prototipą, pirmiausia buvo įrengiama laboratorija, kurioje ir buvo atrasta tyrimo problematika – nevaldomi tinkliniai galios keitikliai, sukeltys perteklinės galios problemą uždarajame elektros mikrotinkle. Autorius dalyvavo kuriant bei projektuojant uždarojo elektros mikrotinklo laboratoriją ir derinant sistemą. Naudojant skirtingų gamintojų įrangą paaiškėjo perteklinės galios problema, kurią rado ir suformulavo darbo autorius kartu su moksliniu vadovu. Perteklinės galios problemai ieškota rinkoje esančių sprendinių, vėliau gilintasi į mokslinę literatūrą; tačiau laboratorijoje turint mažą akumuliatorių energijos talpą, lyginant su sistemos galia, nerasta sprendinių, kaip perteklinę galią valdyti uždarajame elektros mikrotinkle nepaveikiant sukauptos elektros energijos kiekio.

Pasitarus su moksliniu vadovu disertacijos temą nuspręsta sieti su perteklinės galios problematika uždarajame elektros mikrotinkle. Todėl lygiagrečiai imtas kurti ir eksperimentinis prototipinis įrenginys, ir sistemos skaitinis modelis kartu su DVGA prototipiniu įrenginiu. Atliktų tyrimų ir eksperimentų pagrindu parašyti ir išspausdinti du autoriaus moksliniai straipsniai. Atliekami tyrimai ir problematika autoriaus pristatyti dviejose mokslinėse tarptautinėse užsienio konferencijose. Prototipinio įrenginio gamybos sąnaudos daugiausia finansuotos KTU Elektros energetikos sistemų katedros, tačiau visas gamybinis ir kūrybinis darbas atliktas autoriaus su atitinkamų sričių specialistų bei mokslinio vadovo konsultacijomis.

Darbo autoriaus suprojektuoto ir sukurto prototipinio įrenginio naujumas, originalumas ir išskirtinumas – naujas vidutinės galios valdymo algoritmas ir

prototipinis įrenginys, atliekantis perteklinės galios sunaudojimo valdymo funkciją, nepaveikiant sistemoje sukaupto elektros energijos kiekio.

IŠVADOS

1. Sukurto DVGA metodo valdymo algoritmas užtikrina patikimą perteklinės galios sunaudojimo valdymą uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje; dėka prototipinio įrenginio eksperimentinė sistema geba išlaikyti 23 % daugiau sukauptos elektros energijos kiekio akumulatoriuose nei esant analogiškai situacijai be DVGA prototipinio įrenginio.
2. Kaip tinkamiausias nustatytas vidutinės galios periodo valdymo metodas, nes mažiausiai iš visų pristatytų metodų neigiamai veikia elektros energijos kokybę. Sistemoje be DVGA metodo prototipinio įrenginio harmonikų vertė siekia 6,7–6,9 % esant įvairioms galios faktoriaus apkrovoms mikrotinkle, su DVGA metodo prototipiniu įrenginiu harmonikų vertė atitinkamai siekė 6,8–7,0 %, kai leistinos harmonikos turi neviršyti 8 %.
3. Nustatyta, kad fizinis prototipinis modelis, verifikuojantis DVGA metodą, sudėtingiausio priimto režimo testų metu patikimai valdė perteklinę galią uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje, sistemos dažnis buvo 49,9–50,8 Hz ribose, o jį taikant mikrotinkle elektriniai parametrai atitiko elektros energijos kokybės reikalavimus.
4. Iširta, kad uždarojo elektros mikrotinklo sistemoje atsiranda pereinamieji procesai valdomą DVGA metodo apkrovą komutuojant, nes komutacija atliekama kintančioje įtampoje ir srovėje. Tačiau komutacija atliekama arti 0 V, todėl apkrovos įjungimo metu sukeliama tik nedideli įtampos ir srovės stiprio šuoliai, kurie atitinkamai yra 1,4 % ir 2,2 % efektinių verčių.
5. Tyrimų metu gauta, kad perteklinės galios aptikimo uždarojo elektros mikrotinklo laikotarpiu 40 % mažiau elektros energijos reikėjo įkrauti į akumulatorius ir 80 % mažiau akumulatoriai iškraunami taikant DVGA metodą, sumažinamas akumuliatorių iškrovimo ciklų skaičius ir todėl prailginamas akumuliatorių eksploatacijos laikas.

SUMMARY

Due to the various economic, geopolitical, and environmental reasons renewable energy source integration is rising every year and the renewable energy sources are assigned to drive the world's energy supply. Renewable energy sources are being integrated into electrical power systems in various types and sizes, and due to the fluctuating cost of energy supply, renewable energy sources help to stabilize the energy supply cost while increasing grid stability, independency, and CO₂ neutrality. The fastest and the most cost-effective solution to install renewable energy sources in an already existing electrical system is a grid-tied system because of the minimum amount of equipment required for the installation. After installation, during operation of the grid-tied system, the owner of a system realizes that the independency is not reached, because when the utility grid is off, the renewable energy source supply will be also switched off, even though renewable energy is available at the time. The described situation leads to the need to upgrade the system from a grid-tied with renewable energy sources to an off-grid system.

While upgrading from a grid-tied system to an off-grid system, there will likely be a need to keep the grid-tied type inverter for the off-grid system operation to reduce the investment cost related to upgrading. Therefore, it is a single example within a broader collection of examples of a need to use grid-tied inverters in an off-grid system. Due to the non-stable generation of renewable energy sources, it is common sense to have more power of generating units compared to consumer power. In such a case, when the renewable energy sources are not available, other generating sources could generate the required power to keep generating and consuming power balance in the system. However, due to the reason that renewable energy sources are non-stable, and their generating power might be higher than the need of consuming, there might occur moments, when the generating power will be higher than consumption. Therefore, each generating unit must be able to control the generating power according to the need in the off-grid system, and there are some grid-tied inverters not able to be set up to control their generating power according to the system balance, therefore, the power balance might lead to the excess power occurrence in the off-grid system. An experimental micro off-grid system example is presented with the excess power issue and the excess power transient process is analyzed. This paper finds and presents a new method to control excess power without affecting the stored energy level in the micro off-grid system with grid-tied inverters and renewable energy sources while creating, modeling, and testing a new method in an experimental micro off-grid system.

Scientific problem of this dissertation is a missing method to control excess power without affecting the stored energy level in the micro off-grid system with non-controllable grid-tied type inverter and renewable energy sources.

The **aim of the work** is to present, model and analyze, and validate a new method dedicated to control dynamically changing excess power which is created by the renewable energy sources connected to a grid-tied inverter without affecting the stored energy level in a micro off-grid system.

Tasks of the work:

1. To create a method and control algorithm that enables reliable management of excess power generated by renewable energy sources without affecting the amount of electricity stored in the system.
2. To select the optimal average power control method for the prototype device.
3. To create a real prototype device integrated in an experimental off-grid microgrid system verifying the method's ability to control excess power generated by renewable energy sources reliably.
4. To explore the transient processes caused by an integrated prototype device in an off-grid microgrid system.
5. To analyze the influence of the developed prototype device on the stored electrical energy in a real off-grid microgrid system.

Scientific novelty of the work is a method with a control algorithm that dynamically controls the consumed constantly changing excess power in a micro off-grid system with grid-tied type inverters and renewable energy sources, without affecting the amount of stored energy in the system. As a result, grid-tied type inverters with renewable energy sources can be integrated in an off-grid system with the presented method.

Statements presented for defense.

1. The developed method and control algorithm ensure reliable control of excess power generated by renewable energy sources without affecting the amount of electricity stored in the off-grid microgrid system.
2. The most suitable burst control average power control method was selected for the average power control of the prototype device.
3. The developed prototype device verifies a method reliably controlling excess power in an off-grid microgrid system
4. The transient processes caused by the prototype device integrated into the off-grid microgrid system do not affect the power quality parameters.
5. The developed dynamic average power load prototype device reduces battery usage and extends battery life.

Methodology of the research.

The power balance issue in the micro off-grid system with grid-tied inverters and renewable energy sources is mainly a non-controllable generating power which might lead to excess power in the system. There are three main reasons for excess power appearance in such the micro off-grid system. First and the main reason is the existence of a non-controllable generating unit in the micro off-grid system. If all generating units are available for dynamic change in power generation in response to the need in the system, then this case is not a subject of this work. However, if a non-controllable generating unit is in the system, there is a chance that the system will have excess power at some point. The second reason for the excess power appearance is not optimal battery and renewable energy source proportion [23,24]. Excess power generated by a non-controllable generating power might be used to charge the micro off-grid system batteries, however, if the penetration level of non-controllable generating units is too high [25-27], batteries will be charged too fast, and the excess power will be detected as often as the level of penetration. The

third reason for the excess power appearance in the off-grid system is incompatible generating units working together in a system. Separate generating units might work in their own systems but might not work in balance in the same system. Additionally, different brands of generating units might cause the incompatibility of different units to work together in a system in power balance.

There are a few methods to control the excess power in a system, but they all have some downsides, therefore, the need for a new method to control excess power in a micro off-grid system was found. A new method to control excess power in a micro off-grid system must ensure the dynamically changing excess power consumption control without affecting the system’s stored energy level, reliability of the system, consumer comfort, and system complexity. The currently existing methods to control excess power in the micro off-grid systems are presented below.

Table 1. Excess power control methods

Excess power control method	Reference	Downside
Thermal storage	[28-31]	Excess power is controlled in fixed power, therefore, fixed power causes the stored energy level of a system.
Pump storage	[32-35]	Complex technological solution leads to low economic attractiveness.
Scheduling	[36-42]	Excess power is utilized at the cost of consumer comfort. Software needs to be applied to predict excess power and schedule consumption accordingly.
V2G/G2V; fuel cell	[43-48]	Methods expand the amount of stored energy, and only temporarily solve the issue of excess power itself.
Dump load	[49-51]	Excess power is consumed at a fixed load, or at fixed load levels, which affects the amount of energy stored in the microgrid.
Inverter/system control via communication	[52-56]	A highly complicated solution for various types and designs of micro grid systems.

Because of the downsides of excess power consumption control methods, there arose a need to dynamically control the excess power consumption at a rate the excess power is changing in the system. Such a method is found and found to be useful to control excess power without affecting stored energy in the micro off-grid system. The method is named DVGA (dynamical average power load) method. In the paper, for the dynamic load implementation, there four average power control methods were presented, and the best suited one was selected for the validation of the DVGA method.

The first method to control average power is burst average power control method, where the average power is achieved by switching the load on and off within an AC sinewave period. The higher the average power is required, the more periods are switched on. The second method is phase-delay average power control method, and the average power is achieved by switching the load on every half of a

period with a switch on delay. The shorter the delay, the higher average power is achieved. The third method to control average power is PWM (pulse width modulation) on an AC bus, and the average power is achieved similarly to the phase-delay method, only the period of switching is shorter, therefore the sinewave is cut into a number of periods and the switch on and off times of each period are changed according to the need of average power. The fourth presented method is PWM on a DC bus average power control method. This method has a lot in common with PWM on an AC bus, and the main difference is that the average power load is connected to a DC, for example a battery, bus. Four average power control methods are modelled in the MatLab Simulink software to select the best suited average power control method to validate the DVGA method. Dynamic average power control is implemented using the algorithm which is presented in Fig. 1.

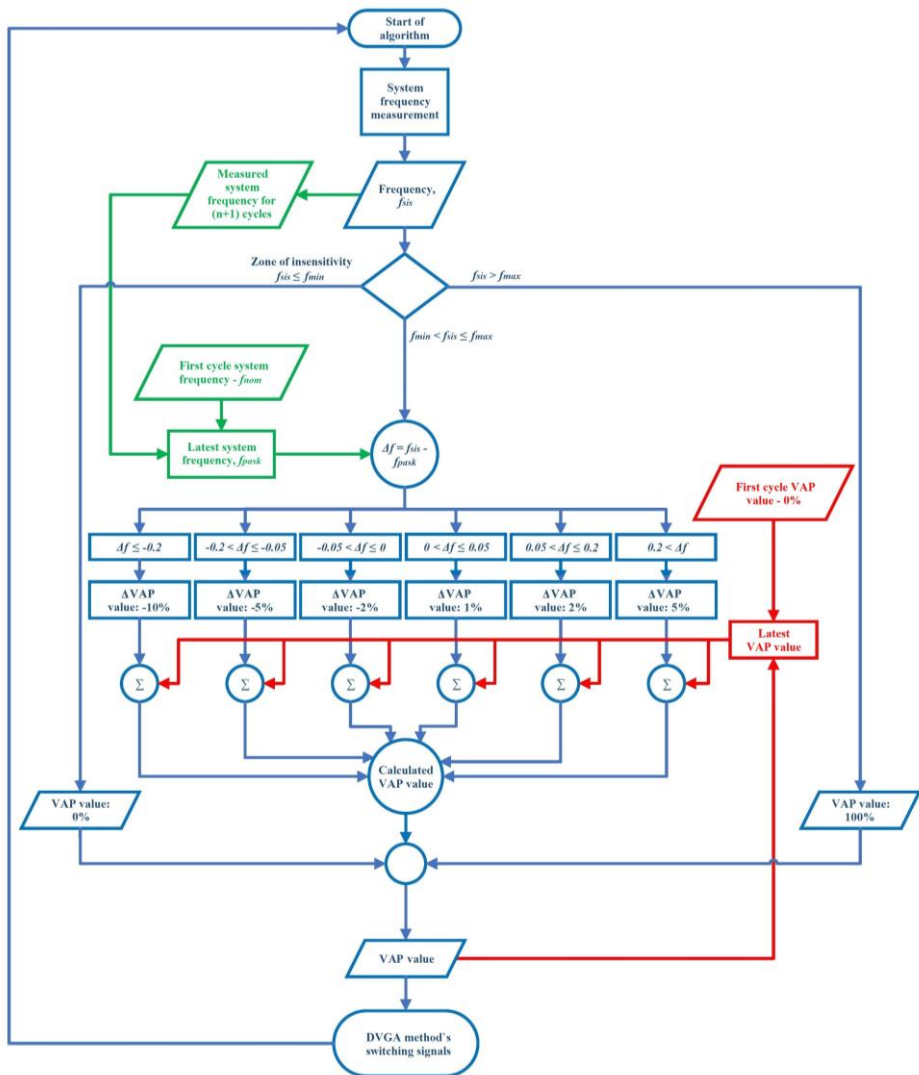


Fig. 1. DVGA method control algorithm

The main purpose of the DVGA method is to control the consumption at a rate at which excess power is changing in a system. Control algorithm principle is based on the frequency because frequency in the excess power case is the indication. And the algorithm computes the average load power (VAP) value, which is needed to create switching signals for DVGA method. In the control algorithm scheme, there are frequency values assigned, and these values are explained as follows:

1. f_{nom} – nominal system frequency.
2. f_{min} – insensitivity zone of DVGA method.
3. f_{max} – DVGA methods maximum frequency limit.
4. f_{sis} – measured system frequency in the algorithm's cycle.
5. f_{pask} – measured system frequency in the n-1 algorithm's cycle.

Furthermore, explanation of the DVGA method control algorithm sequence is as follows:

1. At the very start of the algorithm, system frequency is measured and the f_{sis} value is assigned.
2. Measured system frequency f_{sis} is saved for the n+1 algorithm cycles.
3. f_{sis} in the following steps of the algorithm is used to calculate the VAP value:
 - a. $f_{sis} \leq f_{min}$ – system frequency is lower than a set value of the DVGA methods start-up value, therefore, the load for excess power consumption is switched off.
 - b. $f_{sis} > f_{max}$ – system frequency is higher than the average power control zone, therefore, the load is fully switched on to consume excess power and restore power balance in the system.
 - c. $f_{min} < f_{sis} \leq f_{max}$ – average power control zone, where the n and $n-1$ cycles are compared and the average power is changed accordingly in steps to consume the excess power in a micro off-grid system.
4. The calculated VAP value is saved for the n+1 algorithm cycles.

Assigned frequency values must be optimally set up, according to the system design, generator specifications and the customer's needed selectivity of the DVGA method and other generating units. The DVGA method control algorithm is implemented into a real experimental prototype device for the validation of the method functionality. The experimental prototype device consists of: square wave generator, main controller, power circuit controller, supply circuit and power circuit.

The first part is the square wave generator. The purpose of this part is to convert the sinewave of micro off-grid system's AC bus to rectangular signals. The main components are diodes, a phototransistor, and resistors. All the components are designed to work in combination to obtain the most accurate rectangular signal. The shape of the square wave determines the accuracy of frequency measurement and the accuracy of operation of DVGA method. Square wave signals are sent to the main controller to calculate the frequency of the micro off-grid system. The main controller of the DVGA prototype device consists of the controller Atmega 328 P. The main controller calculates system frequency, and it has a programmed control algorithm shown in Fig. 1. The main controller generates and transmits signals to the power circuit. The power circuit controller switches the transistors on or off according to the transmitted signals. The supply circuit supplies the required voltage

for the power circuit controller to complete the physical transistor switching. The power circuit mainly consists of a transistor, where the switching is completed, and the average power is achieved. The wiring scheme of a DVGA experimental prototype is shown in Fig. 2.

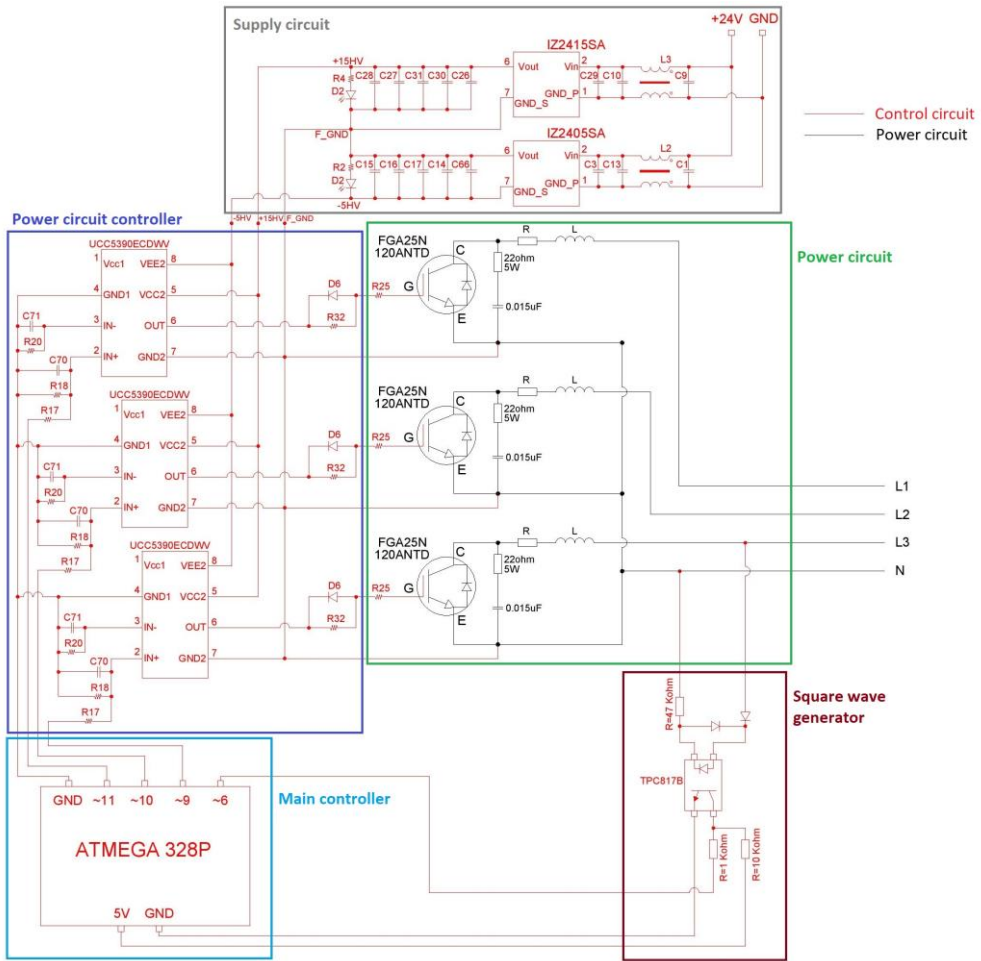


Fig. 2. DVGA experimental prototype wiring scheme

The DVGA method is validated with the experimental prototype device in an experimental micro off-grid system. A micro off-grid system, with a design shown in Fig. 3, is chosen to be the test subject. The experimental system consists of a few components. One of main components is battery inverters, three pieces each assigned to a separate phase in a three-phase system. Battery inverters are the main generating units in the system, they work as grid forming sources of electricity. Another component is VRLA batteries working as an electricity accumulator in the system. Also, the system includes micro off-grid loads – which are consumer’s appliances, a reserve generator and two inverters with renewable energy sources. One of the inverters is an off-grid type inverter, which produces power according to

the need in the system and it is not causing any issues to work in a power balance with other components. And the last component is a grid-tied type inverter which produces as much power as it is possible from renewable energy sources and does not control its power according to the system needs.

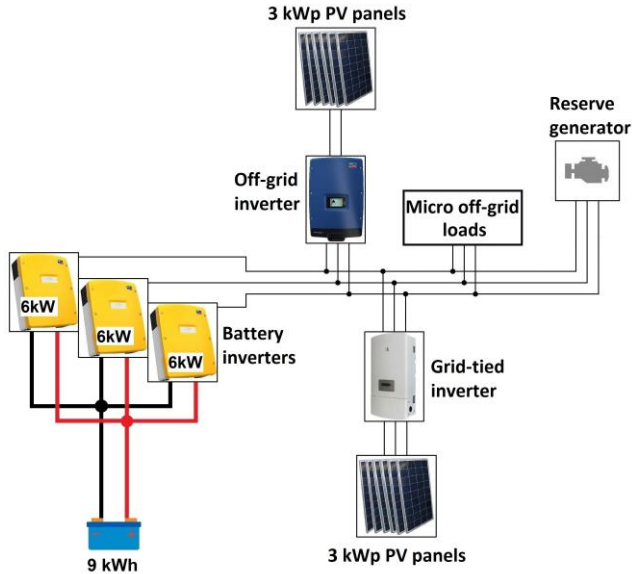


Fig. 3. Experimental micro off-grid system principal scheme

The grid-tied type inverter in such a system is why the DVGA method is required. The system design is selected to mirror the closest possible real-life design; most of the grid system designs will have grid forming components, power response electricity sources, reserve generators, consumers, and a part of electricity sources generating power without control. In such systems, excess power caused by a grid-tied inverter affects system stability. Issues caused by excess power of grid-tied inverters persist as long as the possible-to-produce power of grid-tied inverter is higher than a load of consumer. Therefore, a need for a new method to control excess power was found. Because the battery capacity of the system is low compared to system power, it is important to control excess power without affecting the battery SOC level. A new method to control excess power is found, presented, and validated in a real-life experimental system with an experimental prototype.

Main results.

DVGA experimental prototype device is modelled in a simulation environment, modelled systems, depending on the DVGA connection point to a system are as shown in Fig. 4 and Fig. 5. The simulation is completed by inspecting voltage and current spikes, during switching periods, and THD virtual measurement. Simulation target is to select the most appropriate average power control method for the DVGA method.

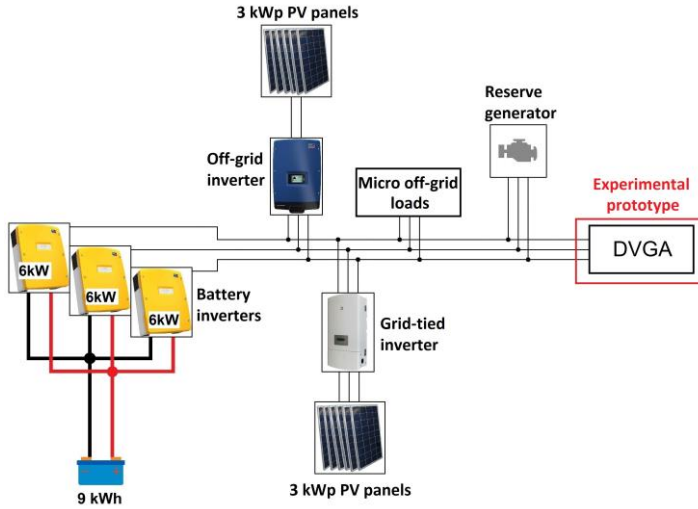


Fig. 4. Scheme of a system with a DVGA method while implementing burst, phase-angle, and PWM on an AC bus average power control methods

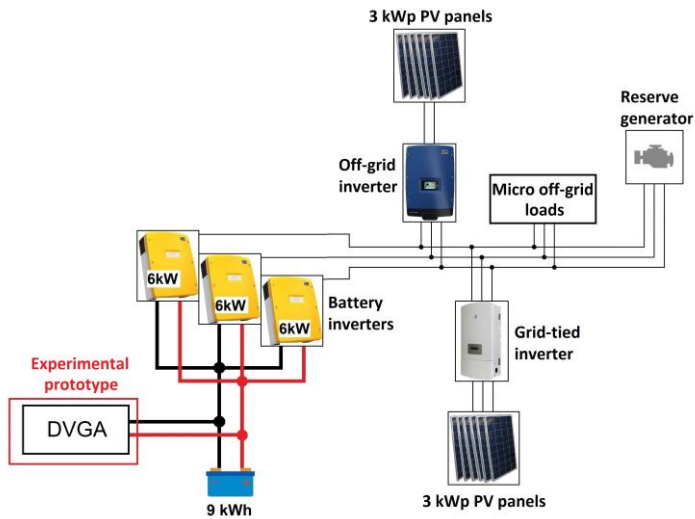


Fig. 5. Scheme of a system with a DVGA method while implementing PWM on a DC bus average power control method

The method for average power control is selected according to the simulation results of voltage and current spikes, and THD values in simulation environment. Voltage and current spikes results are presented in Table 2. The highest voltage and current spikes are seen while implementing PWM on an AC bus average power control method, this is due to the internal interaction of the average power control method and the other components in the system. Second largest voltage and current spikes are visible with the phase-delay average power control method, because switching is completed in a high voltage sinewave zone, and the higher the voltage is, the higher the voltage and current spikes are received. Relatively small voltage

and current spikes are achieved at burst control average power control method, since switching is completed in a near zero voltage of a sinewave. The best performance of voltage and current spikes result from the average power control method; there are no voltage and current spikes in an AC bus at the connection bus of consumer appliances, because the switching is completed on a DC bus and all the transient processes are smoothed in the operation of battery inverters.

Table 2. Average power control method voltage and current spike comparison

Average power control method VAP value	Voltage spike, %	Current spike, %
All methods when VAP=0%	0.0	0.0
Burst control, VAP=20%	1.4	2.2
Burst control, VAP=40%	1.4	2.2
Burst control, VAP=60%	1.4	2.2
Burst control, VAP=80%	1.4	2.2
Burst control, VAP=100%	0.0	0.0
Phase-delay, VAP=20%	10.9	16.8
Phase-delay, VAP=40%	16.0	26.5
Phase-delay, VAP=60%	16.3	27.3
Phase-delay, VAP=80%	9.5	15.6
Phase-delay, VAP=100%	1.4	2.3
PWM on an AC bus, VAP=20%	338	568
PWM on an AC bus, VAP=40%	554	892
PWM on an AC bus, VAP=60%	689	1 122
PWM on an AC bus, VAP=80%	784	1 311
PWM on an AC bus, VAP=100%	1.7	2.7
PWM on a DC bus, VAP=20%	0.0	0.0
PWM on a DC bus, VAP=40%	0.0	0.0
PWM on a DC bus, VAP=60%	0.0	0.0
PWM on a DC bus, VAP=80%	0.0	0.0
PWM on a DC bus, VAP=100%	0.0	0.0

The most suited average power control method for the DVGA method is also selected according to the THD value change in the system comparing the THD value before average power control method implementation and after. Average power control method causes transient processes, therefore, the THD value is also affected, and the results are considered while choosing the most suitable average power control method. The best two results of THD value are seen for the burst control and the PWM on a DC bus average power control methods. The results are compared in Table 3.

Table 3. THD value comparison of average power control methods

Average power control method and VAP value	Load $\cos\phi=1.0$	Load $\cos\phi=0.9$	Load $\cos\phi=0.8$
	Voltage THD, %		
All methods when VAP=0%	6.7	6.9	6.9
Burst control. VAP=20%	6.8	7.0	7.0

Burst control. VAP=40%	6.8	7.0	7.0
Burst control. VAP=60%	6.8	7.0	7.0
Burst control. VAP=80%	6.8	7.0	7.0
Burst control. VAP=100%	6.7	6.9	7.0
Phase-delay. VAP=20%	8.3	8.4	8.4
Phase-delay. VAP=40%	8.4	8.5	8.5
Phase-delay. VAP=60%	8.4	8.5	8.6
Phase-delay. VAP=80%	8.4	8.5	8.5
Phase-delay. VAP=100%	8.3	8.5	8.5
PWM on an AC bus. VAP=20%	80	82	82
PWM on an AC bus. VAP=40%	129	135	135
PWM on an AC bus. VAP=60%	165	172	172
PWM on an AC bus. VAP=80%	190	199	199
PWM on an AC bus. VAP=100%	6.7	6.9	6.9
PWM on a DC bus. VAP=20%	6.7	6.9	6.9
PWM on a DC bus. VAP=40%	6.7	6.9	6.9
PWM on a DC bus. VAP=60%	6.7	6.9	6.9
PWM on a DC bus. VAP=80%	6.7	6.9	6.9
PWM on a DC bus. VAP=100%	6.7	6.9	6.9

Considering the results of the simulation, the two best average power control methods to consume excess power are burst control and PWM on a DC bus methods. However, PWM on a DC bus is found to have more downsides related to the end prototype device, because the switching and the frequency measurement must be completed physically in different places. Therefore, it increases the complexity of the device; furthermore, fast switching affects battery lifetime, as the fast switching causes battery degradation [97]. The simulation of average power control methods comparing different methods is done with different load power factors, but not done in full scope as for commercialized products. There are more methods to control consumable average power; however, simulations are done only to select the most suited at a time average power control method to verify the performance of the DVGA method, without getting into deep detail of average power control method itself.

To validate the DVGA method, a prototype device was created and tested in a real-life experimental system shown in Fig. 3. As shown by the experimental results in Fig. 6 and Fig. 7, DVGA prototype device controlled the excess power in a system at the rate the excess power was changing. Nevertheless, batteries were able to be fully charged and the system worked stably, without power outages. There were some drawbacks, which are related to the technical issues of creating the prototype device, and not to the DVGA method itself.

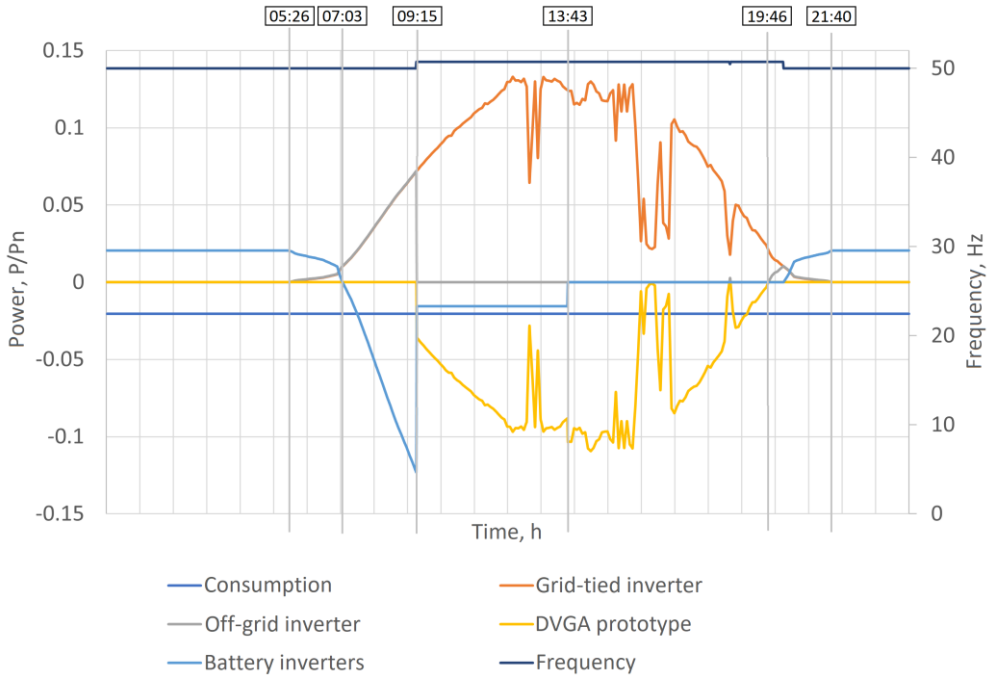


Fig. 6. DVGA prototype power consumption in an experimental off-grid system

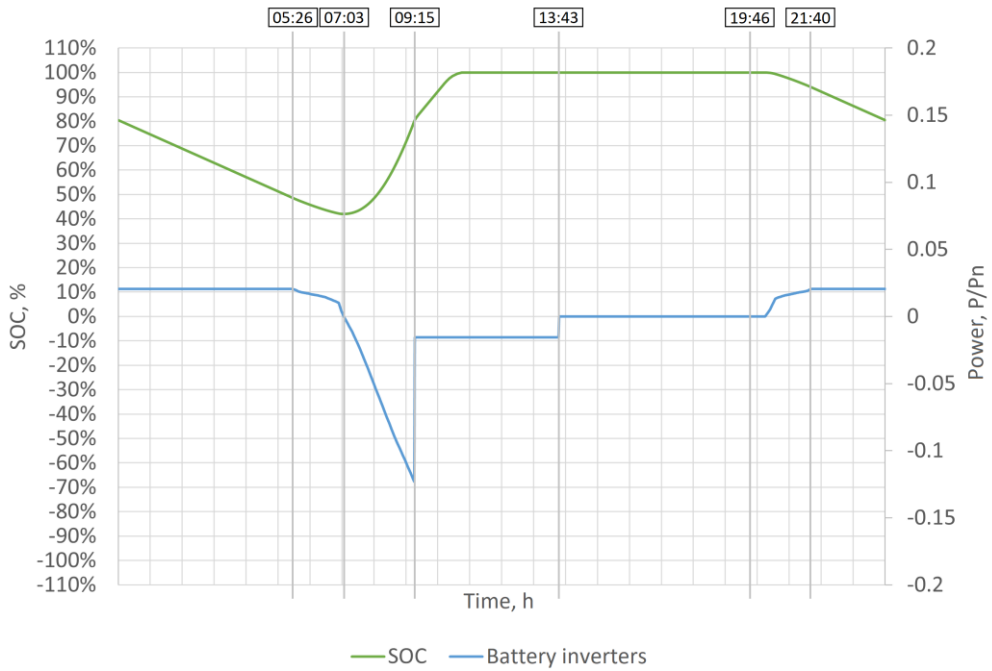


Fig. 7. Experimental test results of a system with the DVGA prototype

Furthermore, the test was expanded to compare the DVGA method to one of the presented excess power consumption methods – dump load method.

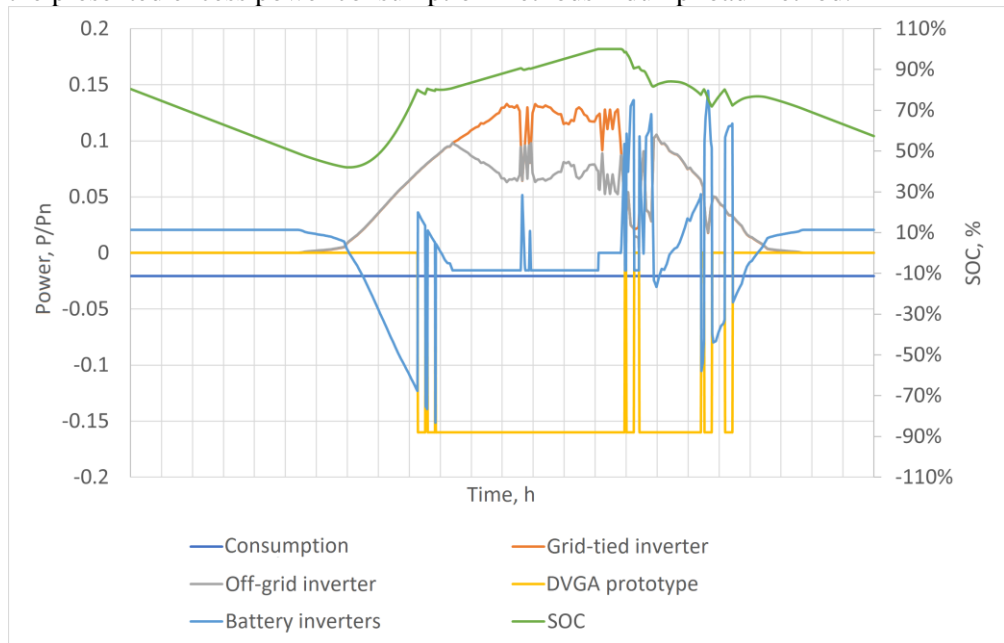


Fig. 8. Experimental test results of a system with dump load excess power consumption method

Experimental results with dump load excess power consumption method were completed, where the main results show that the excess power was consumed, but the battery SOC level was affected while consuming the excess power. Detailed comparison is presented in Table 4.

Table 4. DVGA and dump load method excess power consumption comparison

Parameter	DVGA method	Dump load method
SOC at the beginning of experiment, %	80	80
SOC at the end of experiment, %	80	57
Consumption, kWh	8.88	8.88
Grid-tied inverter yield, kWh	19.32	19.32
Off-grid inverter yield, kWh	1.84	15.02
Total yield, kWh	21.16	34.34
Consumed as excess power, kWh	12.28	26.93
Battery charging, kWh	3.68	5.15
Battery discharging, kWh	3.68	6.62

Under the same consumption and generation conditions, the micro off-grid system with the DVGA method affected a higher amount of stored electricity in the

batteries when the excess power is no longer detected. In the test mode, the difference reaches 23% of SOC values. Nevertheless, DVGA method device ensures lower battery usage, which leads to lower battery degradation. In the case of the DVGA method, batteries were charged 40% less energy and 80% less energy was discharged off the batteries.

Furthermore, the study was carried out with the renewable energy source generation close to the nominal power, and the excess power consumption value was chosen for the size of the maximum possible excess power. Therefore, while in the study, the excess power peak and the excess power consuming load are at approximately the same value, it is possible that in a different case study, the DVGA method would perform even better comparative results.

Conclusions

1. The DVGA method and control algorithm ensures reliable management of excess power consumption in an off-grid microgrid system, therefore, the experimental system is able to maintain 23% more stored electricity in the batteries than in the analogous situation without the DVGA prototype device.
2. The burst control average power control method is found to be the most suitable, as it has the least negative impact on the quality of electricity out of all the presented methods. In the system without the DVGA method prototype device, the harmonic value reaches 6.7–6.9% at various power factor loads in the microgrid; with the DVGA method prototype device, the harmonic value reached 6.8–7.0%, respectively, when the permissible harmonics must not exceed 8%.
3. It was found that the prototype DVGA device validating DVGA method reliably managed excess power in an off-grid microgrid system during the most complex accepted tests, the system frequency was in the range of 49.9 to 50.8 Hz and during tests power quality requirements were conformed.
4. It was found that transient processes appear in the off-grid microgrid system during the switching of the load controlled by the DVGA method, because the switching is performed in alternating voltage and current. However, the commutation is performed close to 0 V, therefore, only small voltage and current spikes are induced during load switching, which are 1.4 and 2.2% of the effective values, respectively.
5. During the period of excess power detection in an off-grid system, the research shows that 40% less electricity is charged to the batteries and 80% less batteries were discharged. Therefore, the implementation of DVGA method reduces the number of battery discharge cycles and extends the life-time of the batteries.

LITERATŪROS SARAŠAS

1. Homa Rashidizadeh-Kermani, Mostafa Vahedipour-Dahraie, Miadreza Shafie-khah, João P. S. Catalão, Joint Energy and Reserve Scheduling of a Wind Power Producer in a Peer-to-Peer Mechanism, *IEEE Systems Journal*, 2021, vol. 15(3), 4315-4324, [žiūrėta 2023-11-04]. Prieiga per doi: 10.1109/JSYST.2020.3026233.
2. Moradi Majid, Heydari Mojtaba, Zarei Seyed Fariborz, An overview on consensus-based distributed secondary control schemes in DC microgrids, *ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH*, 2023, vol. 225, 109870, [žiūrėta 2023-11-04]. Prieiga per doi: 10.1016/j.epsr.2023.109870.
3. Juan-Pablo Carvallo, Jay Taneja, Duncan Callaway, Daniel M. Kammen, Distributed Resources Shift Paradigms on Power System Design, Planning, and Operation: An Application of the GAP Model, *Proceedings of the IEEE 2019*, vol. 107(9), [žiūrėta 2023-07-08]. Prieiga per doi: 10.1109/JPROC.2019.2925759.
4. Philipp Blechinger, Catherina Cader, Paul Bertheau, Least-Cost Electrification Modeling and Planning—A Case Study for Five Nigerian Federal States, *Proceedings of the IEEE 2019*, vol. 107(9), [žiūrėta 2023-07-08]. Prieiga per doi: 10.1109/JPROC.2019.2924644.
5. GM Shafiullah, Tjedza Masola, Remember Samu, Rajvikram Madurai Elavarasan, Sharmina Begum, Umashankar Subramaniam, Mohd Fakhizan Romlie, Mohammad Chowdhury, M. T. Arif, Prospects of Hybrid Renewable Energy-Based Power System: A Case Study, Post Analysis of Chipendeke Micro-Hydro, Zimbabwe. *IEEE Access* 2021, vol. 9, 73433 – 73452, [žiūrėta 2023-07-08]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2021.3078713.
6. Chenxing Xu, Jian Wu, Hailin Feng, Andreas Ibrom, Qing Zeng, Jianfeng Zhang, Na Li, Qiang Hu, Operation of off-grid power supply system using IoT monitoring platform for oil and gas pipeline based on RESOC, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, vol. 6(1), 12 – 21, [žiūrėta 2023-07-08]. Prieiga per doi: 10.17775/CSEEPES.2019.01580.
7. Mitja Mori, Manuel Gutiérrez, Pedro Casero, Micro-grid design and life-cycle assessment of a mountain hut's stand-alone energy system with hydrogen used for seasonal storage, *INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY*, 2020, vol. 46(57), 29706-29723, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.155.
8. Londono Jonny Esteban, Mazza Andrea, Pons Enrico, Lok Harm, Bompard Ettore, Modelling and Control of a Grid-Connected RES-Hydrogen Hybrid Microgrid, *Energies*, vol. 14(6), 1540, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.3390/en14061540.
9. Caparros Mancera Julio Jose, Segura Manzano Francisca, Manuel Andujar Jose, Jose Vivas Francisco, Jose Calderon Antonio, An Optimized Balance of Plant for a Medium-Size PEM Electrolyzer: Design, Control and Physical Implementation, *Electronics*, vol. 9(5), 871, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.3390/electronics9050871.
10. Su An, Honglei Wang, Xufeng Yuan, Real-Time Optimal Operation Control of Micro Energy Grid Coupling With Electricity- Thermal -Gas Considering Prosumer Characteristics, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041709.
11. K. Venkatraman, B. Dastagiri Reddy, M.P. Selvan, S. Moorthi, N. Kumaresan, N. Ammasai Gounden, Online condition monitoring and power management system for

- standalone micro-grid using FPGAs, IET Generation Transmission & Distribution, 2016, vol. 10(15), [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0445.
12. Wei Jiang, Chen Yang, Zhong Liu, Ming Liang, Peipei Li, Guozheng Zhou, A Hierarchical Control Structure for Distributed Energy Storage System in DC Micro-Grid, IEEE Access, 2019, vol. 7, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2019.2939626.
 13. Mehdi Hosseinzadeh, Farzad Rajaei Salmasi, Power management of an isolated hybrid AC/DC micro-grid with fuzzy control of battery banks, Renewable Power Generation, IET, 2014, vol. 9(5), [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1049/iet-rpg.2014.0271.
 14. Meng Song, Jing Shi, Yang Liu, Yin Xu, Nannan Hu, Yuejin Tang, Li Ren, Jingdong Li, 100 kJ/50 kW HTS SMES for Micro-Grid, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, vol. 25(3), [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TASC.2014.2386345.
 15. Tarek Ibrahim, Tamas Kerekes, Dezso Sera, Sergiu Spataru, Daniel-Ioan Stroe, Sizing Of Hybrid Supercapacitors For Off-Grid PV Applications, 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2021, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/ECCE47101.2021.9595458.
 16. Jonaitis Audrius, Miliune Renata, Deveikis Tomas, Dynamic model of wind power balancing in hybrid power system, TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCES, vol. 25(1), 222-234, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.3906/elk-1410-163.
 17. Hadjidj Mohammed Salim, Bibi-Triki Nacereddine, Didi Faouzi, Analysis of the reliability of photovoltaic-micro-wind based hybrid power system with battery storage for optimized electricity generation at Tlemcen, north west Algeria, ARCHIVES OF THERMODYNAMICS, 2019, vol. 40(1), 161-185, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.24425/ather.2019.128296.
 18. Jonathan C. Mayo-Maldonado, Jesus E. Valdez-Resendiz, Julio C. Rosas-Caro, Power Balancing Approach for Modeling and Stabilization of DC Networks, IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, vol. 10(4), [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TSG.2018.2851589.
 19. Attemene N'guessan S., Agbli Krehi S., Fofana Siaka, Hissel Daniel, Optimal sizing of a wind, fuel cell, electrolyzer, battery and supercapacitor system for off-grid applications, INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY, 2020, vol. 45(8), 5512-5525, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.212.
 20. Sumaya Jahan; Shuvra Prokash Biswas; Safa Haq; Md. Rabiul Islam; M A Parvez Mahmud; Abbas Z. Kouzani, An Advanced Control Scheme for Voltage Source Inverter Based Grid-Tied PV Systems, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, vol. 31(8), [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TASC.2021.3094446.
 21. Roopa Viswadev, Arjun Mudlapur, Vanjari Venkata Ramana, B. Venkatesaperumal, Sukumar Mishra, A Novel AC Current Sensorless Hysteresis Control for Grid-Tie Inverters, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, vol. 67(11), [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TCSII.2019.2960289.
 22. Feng Xu, Mingzhe Zhu, Yongqiang Ye, The Stability of LCL-Type Grid-Tied Inverter Based on Repetitive Control and Grid Voltage Feed-Forward, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, vol. 11(2), [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/JESTPE.2022.3213408.

23. Cho Dongjin, Valenzuela Jorge, Optimization of residential off-grid PV-battery systems, *Solar Energy*, 2020, vol. 208, 766-777, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1016/j.solener.2020.08.023.
24. Miyazato Yasuaki, Tobaru Shota, Uchida Kosuke, Muarapaz Cirio Celestino, Howlader Abdul Motin, Senjyu Tomonobu, Multi-Objective Optimization for Equipment Capacity in Off-Grid Smart House, *Sustainability*, 2017, vol. 9(1), 117, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.3390/su9010117.
25. Oladigbolu, J.O., Ramli, M.A.M., Al-Turki, Y.A., Feasibility Study and Comparative Analysis of Hybrid Renewable Power System for off-Grid Rural Electrification in a Typical Remote Village Located in Nigeria. *IEEE Access* 2020, vol. 8, 171643–171663, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/Access.2020.3024676.
26. Ishraque, F., Shezan, S.A., Rashid, M.M., Bhadra, A.B., Hossain, A., Chakraborty, R.K., Ryan, M.J., Fahim, S.R., Sarker, S.K., Das, S.K. Techno-Economic and Power System Optimization of a Renewable Rich Islanded Microgrid Considering Different Dispatch Strategies. *IEEE Access* 2021, vol. 9, 77325–77340, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/Access.2021.3082538.
27. Muh, E., Tabet, F. Comparative analysis of hybrid renewable energy systems for off-grid applications in Southern Cameroons. *Renew. Energy* 2018, vol. 135, 41–54, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1016/j.renene.2018.11.105.
28. Lu, N.; Vanouni, M. Passive energy storage using distributed electric loads with thermal storage. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2013, vol. 1, 264–274, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1007/s40565-013-0033-z.
29. Tasdighi, M.; Ghasemi, H.; Rahimi-Kian, A. Residential Microgrid Scheduling Based on Smart Meters Data and Temperature Dependent Thermal Load Modeling. *IEEE Trans. Smart Grid* 2013, vol. 5, 349–357, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tsg.2013.2261829.
30. Tahir, M.F.; Haoyong, C.; Mehmood, K.; Ali, N.; Bhutto, J.A. Integrated Energy System Modeling of China for 2020 by In-corporating Demand Response, Heat Pump and Thermal Storage. *IEEE Access* 2019, vol. 7, 40095–40108, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/Access.2019.2905684.
31. Anvari-Moghaddam, A.; Monsef, H.; Rahimi-Kian, A. Optimal Smart Home Energy Management Considering Energy Saving and a Comfortable Lifestyle. *IEEE Trans. Smart Grid* 2014, vol. 6, 324–332, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tsg.2014.2349352.
32. Nirmal, M.C.M.; Sruthi, M.; Jayaprakash, P. Control of a Pumped Hydro Storage Power Plant Supported Solar PV Generation System for Grid-Side Energy Management. In *Proceedings of the 2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2021, 1–6, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/gucon50781.2021.9573546.
33. Abdalla, S.M.; Saad, S.M.; El Nailly, N.; Bukra, O.A. Seawater Pumped Hydro Energy Storage in Libya Part I: Location, Design and Calculations. In *Proceedings of the 2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA*, Tripoli, Libya, 2021, 181–186, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/mi-sta52233.2021.9464432.
34. Black, M.; Strbac, G. Value of Bulk Energy Storage for Managing Wind Power Fluctuations. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2007, vol. 22, 197–205, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tec.2006.889619.

35. Tahir, M.F.; Haoyong, C.; Khan, A.; Javed, M.S.; Lاراik, N.A.; Mehmood, K. Optimizing Size of Variable Renewable Energy Sources by Incorporating Energy Storage and Demand Response. *IEEE Access* 2019, vol. 7, 103115–103126, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/Access.2019.2929297.
36. Nayanatara, C.; Divya, S.; Mahalakshmi, E. Micro-Grid Management Strategy with the Integration of Renewable Energy Using IoT. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, Chennai, India, 2018, 160–165, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/iccpeic.2018.8525205.
37. Bao, Z.; Qiu, W.; Wu, L.; Zhai, F.; Xu, W.; Li, B.; Li, Z. Optimal Multi-Timescale Demand Side Scheduling Considering Dynamic Scenarios of Electricity Demand. *IEEE Trans. Smart Grid* 2018, vol. 10, 2428–2439, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tsg.2018.2797893.
38. Karapetyan, A.; Khonji, M.; Chau, S.C.-K.; Elbassioni, K.; Zeineldin, H.H.; El-Fouly, T.H.; Al-Durra, A. A Competitive Scheduling Algorithm for Online Demand Response in Islanded Microgrids. *IEEE Trans. Power Syst.* 2020, vol. 36, 3430–3440, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tpwrs.2020.3046144.
39. Koutsopoulos, I.; Tassioulas, L. Optimal Control Policies for Power Demand Scheduling in the Smart Grid. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2012, vol. 30, 1049–1060, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/jsac.2012.120704.
40. Qayyum, F.A.; Naeem, M.; Khwaja, A.S.; Anpalagan, A.; Guan, L.; Venkatesh, B. Appliance Scheduling Optimization in Smart Home Networks. *IEEE Access* 2015, vol. 3, 2176–2190, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/Access.2015.2496117.
41. Li, D.; Jayaweera, S.K. Distributed Smart-Home Decision-Making in a Hierarchical Interactive Smart Grid Architecture. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 2014, vol. 26, 75–84, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tpds.2014.2308204.
42. Latif, A.; Paul, M.; Das, D.C.; Hussain, S.M.S.; Ustun, T.S. Price Based Demand Response for Optimal Frequency Stabilization in ORC Solar Thermal Based Isolated Hybrid Microgrid under Salp Swarm Technique. *Electronics* 2020, vol. 9, 2209, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.3390/electronics9122209.
43. Sanjari, M.J.; Karami, H.; Gooi, H.B. Analytical Rule-Based Approach to Online Optimal Control of Smart Residential Energy System. *IEEE Trans. Ind. Informatics* 2017, vol. 13, 1586–1597, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tii.2017.2651879.
44. Huang, Q.; Jia, Q.-S.; Guan, X. Robust Scheduling of EV Charging Load With Uncertain Wind Power Integration. *IEEE Trans. Smart Grid* 2016, vol. 9, 1043–1054, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tsg.2016.2574799.
45. Patterson, M.; Macia, N.F.; Kannan, A.M. Hybrid Microgrid Model Based on Solar Photovoltaic Battery Fuel Cell System for Intermittent Load Applications. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2014, vol. 30, 359–366, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tec.2014.2352554.
46. Agbossou, K.; Kolhe, M.; Hamelin, J.; Bose, T. Performance of a Stand-Alone Renewable Energy System Based on Energy Storage as Hydrogen. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2004, vol. 19, 633–640, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tec.2004.827719.
47. Tushar, M.H.K.; Assi, C.; Maier, M.; Uddin, M.F. Smart Microgrids: Optimal Joint Scheduling for Electric Vehicles and Home Appliances. *IEEE Trans. Smart Grid* 2014, vol. 5, 239–250, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tsg.2013.2290894.
48. Singh, M.; Kumar, P.; Kar, I.; Kumar, N. A real-time smart charging station for EVs designed for V2G scenario and its coordination with renewable energy sources. In

- Proceedings of the 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, USA, 17–21 July 2016, 1–5, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/pesgm.2016.7741479.
49. Arun, S.L.; Selvan, M.P. Intelligent Residential Energy Management System for Dynamic Demand Response in Smart Buildings. *IEEE Syst. J.* 2017, vol. 12, 1329–1340, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/jsyst.2017.2647759.
 50. Arriaga, M.; Cañizares, C.A.; Kazerani, M. Renewable Energy Alternatives for Remote Communities in Northern Ontario, Canada. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2013, vol. 4, 661–670, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tste.2012.2234154.
 51. Nehrir, M.; Lameres, B.; Venkataramanan, G.; Gerez, V.; Alvarado, L. An approach to evaluate the general performance of stand-alone wind/photovoltaic generating systems. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2000, vol. 15, 433–439, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/60.900505.
 52. Ustun, T.S.; Hussain, S.M.S. Standardized Communication Model for Home Energy Management System. *IEEE Access* 2020, vol. 8, 180067–180075, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/Access.2020.3028108.
 53. Hirose, T.; Matsuo, H. Standalone Hybrid Wind-Solar Power Generation System Applying Dump Power Control Without Dump Load. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2011, vol. 59, 988–997, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tie.2011.2159692.
 54. Abbey, C.; Li, W.; Joos, G. An Online Control Algorithm for Application of a Hybrid ESS to a Wind–Diesel System. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, vol. 57, 3896–3904, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tie.2010.2051392.
 55. Manjarres, P.; Malik, O. Frequency regulation by fuzzy and binary control in a hybrid islanded microgrid. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2014, vol. 3, 429–439, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1007/s40565-014-0079-6.
 56. Mahmood, H.; Michaelson, D.; Jiang, J. A Power Management Strategy for PV/Battery Hybrid Systems in Islanded Microgrids. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2014, vol. 2, 870–882, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/jestpe.2014.2334051.
 57. Lee Byoung-Hee, Park Ki-Bum, Kim Chong-Eun, Moon Gun-Woo, No-Load Power Reduction Technique for AC/DC Adapters, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 2012, vol. 27(8), 3685–3694, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TPEL.2012.2185952.
 58. Jack R. Smith, Programming the PIC Microcontroller with MBASIC, 2005 Elsevier Inc., Chapter 23 - AC Power Control, 543 p. [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1016/B978-075067946-6/50025-0.
 59. S. Selvaperumal, N. Krishnamoorthy, G. Prabhakar, A novel source side power quality improved soft starting of three-phase induction motor using a symmetrical angle controller through pic microcontroller, *BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES-TECHNICAL SCIENCES*, 2021, vol. 69(2), e136746, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.24425/bpasts.2021.136746.
 60. He Liangzong, Zeng Tao, Zhang Jianhuan, The Regulation Characteristics of Bridge Modular Switched-Capacitor AC-AC Converter, *IEEE ACCESS*, 2019, vol. 7, 147683–147693, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937567.
 61. Zhang Youjun, Ruan Xinbo, Three-Phase AC-AC Converter With Controllable Phase and Amplitude, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2015, vol. 62(9), 5689–5699, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TIE.2015.2410761.
 62. Ambhorkar, K.; Rana, A.K.; Jain, P.; Tutakne, D.R. Single phase AC-AC converter with improved power factor for efficient control of fan motors. In Proceedings of the

- 2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE), Patiala, India, 23 October 2017. [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/IICPE.2016.8079507.
63. Kadota, M.; Shoji, H.; Hirose, H.; Hatakeyama, A.; Wada, K. A Turn-off Delay Controlled Bleeder Circuit for Single-Stage TRIAC Dimmable LED Driver with Small-Scale Implementation and Low Output Current Ripple. *IEEE Trans. Power Electron.* 2019, vol. 34, 10069–10081, [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TPEL.2019.2892093.
 64. Yun, S.J.; Yun, Y.K.; Kim, Y.S. A Low Flicker TRIAC Dimmable Direct AC LED Driver for Always-on LED Arrays. *IEEE Access* 2020, vol. 8, 198925–198934, [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2020.3034334
 65. Choi Hyeon-gyu, Ha Jung-Ik, Dynamic current control using synchronous pulse-width modulation for permanent magnet machines, *JOURNAL OF POWER ELECTRONICS*, vol. 20(2), 501-510, [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1007/s43236-020-00038-2.
 66. Campo, J.C.; Vaquero, J.; Perez, M.A.; Martinez, S. Dual-tap chopping stabilizer with mixed seminatural switching. Analysis and synthesis. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2005, vol. 20, 2315–2326, [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TPWRD.2005.848447.
 67. Yin, B.; Oruganti, R.; Panda, S.K.; Bhat, A.K.S. An Output-Power-Control Strategy for a Three-Phase PWM Rectifier under Unbalanced Supply Conditions. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008, vol. 55, 2140–2151, [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TIE.2008.918643.
 68. Weimin Wu, Yunjie Sun, Zhe Lin, Tianhao Tang, Frede Blaabjerg, Henry Shu-Hung Chung, A New LCL-Filter With In-Series Parallel Resonant Circuit for Single-Phase Grid-Tied Inverter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 61(9), 4640 – 4644, [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TIE.2013.2293703.
 69. Yuqi Wei, Quanming Luo, Homer Alan Mantooth, An LLC and LCL-T resonant tanks based topology for battery charger application, *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2021, vol. 6(4), 263 – 275, [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.24295/CPSSPEA.2021.00025.
 70. Xingang Fu, Shuhui Li, Ishan Jaithwa, Implement Optimal Vector Control for LCL-Filter-Based Grid-Connected Converters by Using Recurrent Neural Networks, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, vol. 62(7), 4443 – 4454, [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TIE.2015.2390140.
 71. Bal Gungor, Ozturk Nihat, A Novel Control Technique for Soft-switching Sinusoidal Pulse Width Modulation Inverter, *ELECTRIC POWER COMPONENTS AND SYSTEMS*, 2010, vol. 39(1), 31-45, PII 932403466, [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1080/15325008.2010.492452.
 72. Mahdih S. Sadabadi, Aboutaleb Haddadi, Houshang Karimi, Alireza Karimi, A Robust Active Damping Control Strategy for an LCL -Based Grid-Connected DG Unit, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64(10), 8055 – 8065, [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TIE.2017.2696501.
 73. Fangrui Liu, Bin Wu, Navid R. Zargari, Manish Pande, An Active Damping Method Using Inductor-Current Feedback Control for High-Power PWM Current-Source Rectifier, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, vol. 26(9), 2580 – 2587, [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TPEL.2011.2111423.
 74. Steinstraeter Matthias, Gandlgruber Josef, Everken Jan, Lienkamp Markus, Influence of pulse width modulated auxiliary consumers on battery aging in electric vehicles, *JOURNAL OF ENERGY STORAGE*, 2022, vol. 48, 104009, [žiūrēta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1016/j.est.2022.104009.

75. Ming Zhang, Yanshuo Liu, Dezhi Li, Xiaoli Cui, Licheng Wang, Liwei Li, Kai Wang, Electrochemical Impedance Spectroscopy: A New Chapter in the Fast and Accurate Estimation of the State of Health for Lithium-Ion Batteries, *Energies* 2023, vol. 16(4), 1599, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.3390/en16041599.
76. Dlzar Al Kez, Aoife M. Foley, S. M. Muyeen, D. John Morrow, Manipulation of Static and Dynamic Data Center Power Re-sponses to Support Grid Operations, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2020.3028548.
77. Boyuan Jis, Haitao Wu, Yunbin Li, Flexible On-grid and Microgrid Control Strategy of Photovoltaic Energy Storage System Based on VSG Technology, 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 25 February 2022, Taiyuan, China. [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/EI252483.2021.9712963.
78. Shrestha Ashish, Gonzalez-Longatt Francisco, Frequency Stability Issues and Research Opportunities in Converter Dominated Power System, *Energies*, 2021, vol. 14(14), [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.3390/en14144184.
79. Tigas K., Giannakidis G., Mantzaris J., Lalas D., Sakellariadis N., Nakos C., Vougiouklakis Y., Theofilidi M., Pyrgiotti E., Alexandridis A. T., Wide scale penetration of renewable electricity in the Greek energy system in view of the European decarbonization targets for 2050, *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, 2015, vol. 42, 158-169, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1016/j.rser.2014.10.007.
80. Guojian Li, Erfa Shang, Qianyu Wu, Chenyang Li, Jinping Kang, Frequency Characteristics of the Synchronous Motor-Generator Pair to Elevate the Upper Limit Penetration Rate of Renewable Energy Sources, *IEEE Access*, 2022, vol. 10, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2022.3228273.
81. Yap Kah Yung, Sarimuthu Charles R., Lim Joanne Mun-Yee, Virtual Inertia-Based Inverters for Mitigating Frequency Instability in Grid-Connected Renewable Energy System: A Review, *Applied sciences – Basel*, 2019, vol. 9(24), [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.3390/app9245300.
82. Xiong Liansong, Liu Xiaokang, Liu Yonghui, Zhuo Fang, Modeling and Stability Issues of Voltage-source Converter-dominated Power Systems: A Review, *CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS*, 2020, vol. 8(6), 1530-1549, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.03590.
83. A.H. Anbuky, P.E. Pascoe, VRLA battery state-of-charge estimation in telecommunication power systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, vol. 47(3), [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/41.847897.
84. C. M. T. Cruz, R. P. T. Bascopé, L. D. S. Bezerra, J. M. de Sousa, I. S. F. Gomes, F. C. Sampaio, F. A. Borges, R. L. Ramos, Comparison of VRLA-AGM batteries lifetime charging with different currents waveforms for use on low power UPS, 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 29 November 2015 - 02 December 2015, Fortaleza, Brazil. [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/COBEP.2015.7420201.
85. Chen, M., Rincon-Mora, G.A. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2006, vol. 21, 504–511, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/tec.2006.874229.
86. Rehman Zafar, Ba Hau Vu, Il-Yop Chung, A Deep Neural Network-Based Optimal Power Flow Approach for Identifying Network Congestion and Renewable Energy Generation Curtailment, *IEEE Access*, 2022, vol. 10, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2022.3204803.

87. Zongxiang Lu, Haibo Li, Ying Qiao, Probabilistic Flexibility Evaluation for Power System Planning Considering Its Association With Renewable Power Curtailment, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, vol. 33(3), [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TPWRS.2018.2810091.
88. Europos standarto EN 50160 taikymo vadovas (2013th–09–13. ed.). (2013). Lietuvos standartizacijos departamentas.
89. Sushita, K., Shanmugasundaram, N., Suriyan, K., Nagarajan, R., Venusamy, K., Impacts of residential energy storage system modeling on power system, *SUSTAINABLE ENVIRONMENT*, 2022, vol. 8(1), 2125905, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1080/27658511.2022.2125905.
90. Byoung-Hee, L.; Ki-Bum, P.; Chong-Eun, K.; Gun-Woo, M. No-Load Power Reduction Technique for AC/DC Adapters. *IEEE Trans. Power Electron.* 2012, vol. 27, 3685–3694, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TPEL.2012.2185952.
91. Zhang, L.; Born, R.; Zhao, X.; Gu, B.; Lai, J.-S.; Ma, H. A Parabolic Voltage Control Strategy for Burst-Mode Converters with Constant Burst Frequency and Eliminated Audible Noise. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, vol. 31, 8572–8580, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TPEL.2016.2535304.
92. Kim, J.W.; Choi, S.M.; Kim, K.T. Variable On-time Control of the Critical Conduction Mode Boost Power Factor Correction Converter to Improve Zero-crossing Distortion. In proceedings of the 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems, Kuala Lumpur, Malaysia, 18 April 2006. [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/PEDS.2005.1619933.
93. Martínez-Treviño, B.A.; El Aroudi, A.; Valderrama-Blavi, H.; Cid-Pastor, A.; Vidal-Idiarte, E.; Martínez-Salamero, L. PWM Nonlinear Control with Load Power Estimation for Output Voltage Regulation of a Boost Converter with Constant Power Load. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021, vol. 36, 2143–2153, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TPEL.2020.3008013.
94. Kuo-Yuan Lo, Yaow-Ming Chen, Design of a Seamless Grid-Connected Inverter for Microgrid Applications, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, vol. 11(1), 194 – 202, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TSG.2019.2919905.
95. Jun Zeng, Jialei Wu, Junfeng Liu, Huafang Guo, A Quasi-Resonant Switched-Capacitor Multilevel Inverter With Self-Voltage Balancing for Single-Phase High-Frequency AC Microgrids, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, vol. 13(5), 2669 – 2679, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TII.2017.2672733.
96. Im-Bo Kong, Wook-Sung Kim, Sang-Won Lee, A Novel High-Voltage-Gain Quasi-Resonant DC–DC Converter With Active-Clamp and Switched-Capacitor Techniques, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, vol. 38(6), 7810 – 7820, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TPEL.2023.3259012.
97. Li, W., Niimi, Y., Orino, Y., Hirata, S., Kurosawa, M.K. A Frequency Synchronization Method for a Self-Oscillating PWM Signal Generator. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, 2014, vol. 61, 244–248, [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/TCSII.2014.2304892.
98. Skibko Zbigniew, Holdynski Grzegorz, Borusiewicz Andrzej, Impact of Wind Power Plant Operation on Voltage Quality Parameters-Example from Poland, *Energies*, 2022, vol. 15(15), 5573, [žiūrėta 2023-11-04]. Prieiga per doi: 10.3390/en15155573.

GYVENIMO APRAŠYMAS

Mantas Zelba

mantas.zelba@ktu.edu

Išsilavinimas:

1997–2001	Pradinis, Mažeikių senamiesčio vidurinė mokykla
2001–2007	Pagrindinis, Mažeikių Merkelio Račkausko gimnazija
2007–2009	Vidurinis, Mažeikių Merkelio Račkausko gimnazija
2012–2016	Bakalauras, Kauno technologijos universitetas
2016–2018	Magistras, Kauno technologijos universitetas
2018–dabar	Daktaras, Kauno technologijos universitetas

Profesinė patirtis:

2009–2010	Operatorius, „Tulip Ltd.“
2010–2011	Pamainos vadovas, „Tulip Ltd.“
2011–2012	Transporto vadybininkas, UAB „Kūbas“
2016–2018	Vėjo ir saulės elektrinių parko operatorius, UAB „Renerga“
2018–2019	Vėjo ir saulės elektrinių parko inžinierius elektrikas, UAB „Renerga“
2020–dabar	Produktų vystymo vadovas, UAB „Via Solis“

Mokslinių interesų sritys:

Atsinaujinančiųjų išteklių energetika, elektros energetikos sistemos, elektronika.

Moksliniai straipsniai disertacijos tema:

1. Mantas Zelba; Tomas Deveikis; Justinas Barakauskas; Artūras Baronas; Saulius Gudžius; Audrius Jonaitis; Andreas Giannakis, A grid-tied inverter with renewable energy source integration in an off-grid system with a functional experimental prototype, Sustainability, vol. 14, iss. 20, 2022. DOI: 10.3390/su142013110.
2. Mantas Zelba, Tomas Deveikis, Saulius Gudžius, Audrius Jonaitis, Almantas Bandza, Review of Power Control Methods for a Variable Average Power Load Model Designed for a Microgrid with Non-Controllable Renewable Energy Sources, Sustainability, vol. 15, iss. 11, 2023. DOI: 10.3390/su15119100.

Mokslinės konferencijos:

1. Mantas Zelba; Artūras Baronas; Mindaugas Vaitkunas; Audrius Jonaitis, Challenges of developing a microgrid concept, 19th international symposium „Topical problems in the field of electrical and power

- engineering“. Doctoral school of energy and geotechnology III: Tartu, Estonia, January 14-17, 2020.
2. Zelba M., Deveikis T., Barakauskas J. Issues of renewable energy sources with grid-tied inverter connected to an off-grid system. 9th Eur. Conf. Ren. Energy Sys. 21-23 April 2021, Istanbul, Turkey.

PADĖKA

Dėkoju darbo moksliniam vadovui doc. dr. Tomui Deveikiui už koordinavimą, konsultavimą ir visokeriopą pagalbą studijų bei disertacijos rengimo metu.

Dėkoju KTU Elektros energetikos sistemų katedrai už suteiktus išteklius, pagalbą ir konsultacijas moksliniam tyrimui atlikti.

Didžiausia padėka šeimai, kuri reikiamu laiku buvo supratinga, palaikė ir motyvavo pabaigti pradėtą darbą. Dėkingas artimiesiems už palaikymą ir linkėjimus, kurių prirėkė šiuo gyvenimo etapu.

UDK 621.311.1+621.314](043.3)

SL344. 2024-xx-xx, xx leidyb. apsk. 1. Tiražas 14 egz. Užsakymas xxx.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas