



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Generavimo šaltinių charakteristikų įtakos mikrotinklo darbo režimams tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Rytis Anušauskas

Projekto autorius / autorė

Doc. Dr. Tomas Deveikis

Vadovas / Vadovė

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Generavimo šaltinių charakteristikų įtakos mikrotinklo darbo režimams tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Elektros energetikos sistemos (M3146Q51)

Rytis Anušauskas

Projekto autorius

Doc. dr. Tomas Deveikis

Vadovas

Asist. dr. Artūras Baronas

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Rytis Anušauskas

Generavimo šaltinių charakteristikų įtakos mikrotinklo darbo režimams tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Ryčio Anušausko, baigiamasis projektas tema „Generavimo šaltinių charakteristikų įtakos mikrotinklo darbo režimams tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Anušauskas Rytis. Generavimo šaltinių charakteristikų įtakos mikrotinklo darbo režimams tyrimas. Magistro krypties studijų baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Tomas Deveikis; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas.

Elektros energetikos sistemos (Krypties eksperto studijos)

Reikšminiai žodžiai: mikrotinklo sistema, energijos keitikliai, salos režimas, tinklo kokybės charakteristikos.

Kaunas, 2019. 65 p.

Santrauka

Sparčiai augantis elektros energijos poreikis iš atsinaujinačių šaltinių ir noras tapti nepriklausomais nuo centralizuoto elektros energijos tinklo paskatino mokslininkus kurti naujas koncepcijas, tokias kaip „mikrotinklas“. Mikrotinkle naudojami įvairūs energijos keitikliai, dėl kurių netiesinių elementų sandaros galimi energijos kokybės parametrų iškraipymai.

Darbe nagrinėjama kelių generavimo šaltinių su skirtingais keitikliais, veikiančių vienu metu, įtaka mikrotinklo sistemai. Bendrai darbe apžvelgiami energijos keitiklių tipai, mikrotinklo vystymosi tendencijas, specifiniai trūkumai ir privalumai. Darbe sudarytas mikrotinklo modelis naudojantis MATLAB/SIMULINK programine įranga. Šis modelis apima dalį realaus mikrotinklo projekto.

Atlikti tyrimai rodo, kad tokios sistemos charakteristikos atitinka žemos įtampos tinklo reikalavimus. Didžiausias įtampos ir srovės harmoninis iškraipymas 4%.. Nustatytos ribinės tinklo asimetrijos ir dinaminio stabilumo vertės.

Anušauskas, Rytis. Investigation of the Generation Source Characteristics Influence on Microwave Network Operation Modes. Master's Final Degree Project / supervisor doc. dr. Tomas Deveikis; Kaunas University of Technology, faculty of Electricity and Electronics

Electricity Systems (Direction Expert Studies)

Keywords: microgrid system, energy converters, island mode, characteristics of electricity grid quality.

Kaunas, 2019. 65 pages.

Summary

The rapidly growing demand for electricity from renewable sources and the desire to become independent from the centralized electricity grid, have prompted researchers to develop new concepts such as "Microgrid". On the microcogrid are used a various of power converters, which can cause distortions in energy quality parameters because of non-linear elements.

On this paper the is analyzed influence of several generating sources with different converters on the effect of the microgrid system. In general, the work reviews the types of energy converters, development trends, specific disadvantages and advantages. The work consists of a microgrid using the MATLAB / SIMULINK software. This model includes a part of a real microgrid project.

The studies carried out show that these system characteristics meet the requirements of the low voltage network. Maximum voltage and current harmonic distortion 4%. Detarminated limit values for grid asymmetry and dynamic stability.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga	14
1.1. Nepriklausomų mikrotinklų vystymasis.....	14
1.2. Mokslinių straipsnių apžvalga.....	14
1.3. Mikrotinklų sudarantys elementai	17
1.4. Keitiklių veikimo principai.....	19
1.5. Pagrindinės tinklo iškraipymų mažinimo priemonės	26
1.6. LC filtrai	28
1.7. Simetrinių dedamųjų metodas.....	29
2. Mikrotinklo modelio sudarymas	30
2.1. Baterijų ir įkroviklio modeliavimas.....	30
2.2. Saulės elektrinių modeliavimas	32
2.3. Trifazio inverterio modeliavimas	35
2.4. Dvikrypčių vienfazių keitiklių trifazėje sistemoje modeliavimas	39
2.5. Vėjo elektrinės modeliavimas	41
2.6. Matavimų blokas	43
2.7. Mikrotinklo sistemos modelis	44
3. Mikrotinklo salos režime tyrimas	46
3.1. Vienfazių keitiklių tyrimas	46
3.2. Mikrotinklo sistemos statinių procesų tyrimas.....	55
3.3. Sistemos pereinamųjų procesų tyrimas	58
Išvados	62
Literatūros sąrašas	63

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Trijų fazių daugiapakopio keitiklio raktų apibrėžtys	26
1.2 lentelė. Harmoninių srovių ribos generavimo šaltiniams	27
1.3 lentelė. Pagrindinės tinklo iškraipymų mažinimo priemonės	27
2.1 lentelė. Pagrindiniai baterijų parametrai	31
2.2 lentelė. Generator Charge Controller SF20-48 parametrai	31
2.3 lentelė. Saulės panelės „Solitek Prime“ parametrai	32
2.4 lentelė. Sunny Tripower 6000TL parametrai	37
2.5 lentelė. Sunny iseland 6.0H charakteristikos	39
2.6 lentelė. 1 kW vertikaliosios ašies vėjo elektrinės parametrai	42
3.1 lentelė. Vienfazio keitiklio tyrimo rezultatai	46
3.2 lentelė. Vienfazio keitiklio tyrimo rezultatai	47
3.3 lentelė. Sistemos parametrai esant minimaliai stabilaus režimo apkrovai.....	50
3.4 lentelė. Maksimali leistina apkrova	51
3.5 lentelė. Ribinės asimetrijos vertės prie minimalios apkrovos.....	52
3.6 lentelė. Asimetriško tinklo apkrovos.....	53
3.7 lentelė. THD ir simetrinės apkrovos	54
3.8 lentelė. THD ir nesimetrinės apkrovos.....	55
3.9 lentelė. Sistemos statiniai parametrai	56
3.10 lentelė. Sistemos statiniai parametrai	56

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Salos režimu veikiančio mikrotinklo chema	19
1.2 pav. Impulso pločio modulatoriaus schema	20
1.3 pav. DC-DC keitiklių tipai	20
1.4 pav. Dvikrypčio keitiklio sandara	21
1.5 pav. DC-DC keitikliai su transformatoriumi	22
1.6 pav. AC-DC keitiklio principinė schema	22
1.7 pav. Nešlio dažniu pagrįstas PWM moduliacijos būdas	24
1.8 pav. Dvikryptis DC-AC AC-DC keitiklis su DP-TPC	25
1.9 pav. Trijų fazių penkių lygių DC-AC keitiklio struktūra	26
2.1 pav. DC-DC keitiklio - įkroviklio MATLAB/SIMULINK modelis	30
2.2 pav. Baterijų įtampos priklausomybės nuo talpumo MATLAB/SIMULINK charakteristika	31
2.3 pav. Baterijų MATLAB/SIMULINK modelis	32
2.4 pav. Saulės elektrinės bloko struktūra	33
2.5 pav. Gamintojo pateikiama Solitek 240-250 voltamperinė charakteristika	33
2.6 pav. MATLAB/SIMULINK sistemoje gauta voltamperinė charakteristika	34
2.7 pav. Stacionariosios elektrinės galios charakteristika MATLAB modelyje	34
2.8 pav. Pasukamosios elektrinės galios charakteristika MATLAB modelyje	35
2.9 pav. Stacionariosios ir pasukamosios elektrinių charakteristikos MATLAB modelyje	35
2.10 pav. P&O algoritmo struktūra	36
2.11 pav. MPPT blokas MATLAB/Simulink modelyje	36
2.12 pav. MPPT modulyje esanti įtampos valdymo schema	37
2.13 pav. Trifazio inverterio MATLAB/SIMULINK modelis	38
2.14 pav. Trifazio inverterio PWM oscilograma	38
2.15 pav. Vienfazio inverterio MATLAB modelyje struktūra	40
2.16 pav. Vienfazio inverterio PWM oscilograma	40
2.17 pav. AC-DC keitiklių MATLAB modelyje struktūra	41
2.18 pav. Vėjo elektrinės galios charakteristika	42
2.19 pav. Vertikaliosios ašies vėjo elektrinės modelis MATLAB aplinkoje	43
2.20 pav. Sistemos dinaminių procesų matavimų blokas	44
2.21 pav. Mikrotinklo sistemos MATLAB/SIMULINK modelio struktūra	45
3.1 pav. Vienfazio inverterio įtampos priklausomybė nuo apkrovos	48
3.2 pav. Vienfazio inverterio įtampos THD priklausomybė nuo apkrovos	48
3.3 pav. Vienfazio inverterio efektyvumo priklausomybė nuo apkrovos	49
3.4 pav. Nestabilus sistemos darbas $S1=S2=S3=200W$	50
3.5 pav. Stabilios sistemos paleidimo procesas $S1=S2=S3=250W$	51
3.6 pav. Maksimalios leistinos apkrovos	52
3.7 pav. Tinklo asimetrija SOC 80%	54
3.8 pav. THD priklausomybės nuo nulinės sekos srovės charakteristika	55
3.9 pav. Galios pasiskirstymo kreivės	57
3.10 pav. Mikrotinklo salos režime naudingumo priklausomybė nuo apkrovos	57
3.11 pav. Sistemos THD priklausomybė nuo apkrovos	58
3.12 pav. PV1, PV2 apšvietos ir bendros galios kitimas laike	59
3.13 pav. Sistemos U, I ir srovės į baterijas oscilogramos keičiantis apšvietai	59
3.14 pav. Baterijų įkrovimo ciklas	60

3.15 pav. Vienfazio inverterio pereinamasis pasileidimo procesas	61
3.16 pav. Trifazio inverterio pereinamasis pasileidimo procesas	61

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

- IEEE – Elektros ir elektronikos institutas (*Angl. Institute of Electrical and Electronics Engineers*);
- ES – Europos Sąjunga;
- LF – Žemas dažnis (*Angl. Low frequency*);
- HF – Aukštas dažnis (*Angl. High frequency*);
- MPP – Maksimalios galios taškas (*Angl. maximum power point*);
- MPPT – maksimalios galios taško aptikimo įtaisas (*Angl. maximum power point tracking*);
- AC – kintamoji srovė (*Angl. alternating current*);
- DC – nuolatinė srovė (*Angl. direct current*);
- AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;
- PMSG – sinchroninis generatorius su nuolatiniais magnetais (*Angl. Permanent magnets synchronous generator*);
- SSS-MFGCI – elektros tinklo inverteris su nuosekliai sujungtais perjungiamaisiais šuntais. (*Angl. shunt series swiched multifunctional grid-connected inverter*);
- IGBT – bipoliarinis tranzistorius su izoliuota užtūra (*Angl. insulated-gate bipolar transistor*);
- MOSFET – metalo oksido puslaidininkinis elektrinio lauko poveikio tranzistorius (*Angl. metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*);
- AVS – automatinio valdymo sistema;
- VSI – įtampos šaltinio inverteris. (*Angl. Voltage source inverter*);
- CSI – srovės šaltinio inverteris (*Angl. Current source inverter*);
- FV – fotovoltinis;
- AHK – aktyvusis harmonikų kompensavimas;
- PG – paskirstytasis generatorius;
- SPWM – sinusoidinė impulso pločio moduliacija (*Angl. Sinusoidal Pulse Width Modulation*);
- THD – pilnas harmoninis iškreipymas (*Angl. Total harmonic distortion*);
- DP-TPC – dvikryptės konversijos keitiklis su perdavimo kontrolės sistema (*Angl. double phase - Transmission Control Protocol*)

Terminai:

Buck converter – įtampą žeminančiojo keitiklio topologija

Boost converter – įtampą aukštinančiojo keitiklio topologija

Buck/Boost converter – įtampą aukštinančiojo/žeminančiojo keitiklio topologija

P&O – maksimalios galios taško sekimo algoritmas (*Angl. Perturb and Observing*)

SOC – dydis, nurodantis kiek procentaliai įkrauta baterija (*Angl. state of charge*);

Mikrotinklas–kontroliuojama glaudi mažų generatorių, saugojimo įrenginių, naudojamų atsinaujinančios energetikos sistemų optimizavimui, rinkinys .

Salos režimas – decentralizuota mikrotinklo sistema, kurioje generavimo šaltinių energijos keitikliai neturi jungties su centralizuotu elektros tinklu ir energiją tiekia tiesiai apkrovoms arba į baterijas.

Išmanusis tinklas – išmanusis energijos sistemos valdymo būdas, visais lygiais naudojant ryšių technologijas, galios elektronines technologijas ir saugojimo technologijas, skirtas elektros energijos gamybai ir vartojimui subalansuoti

LC Filtras – elementas, sudarytas iš talpumo ir induktyvumo, skirtas sukurti ribinio dažnio pralaidumo juostą.

Įvadas

Galios elektronikos pažanga ir besivystančios technologijos, didėjantis energijos iš AEI poreikis paskatino mokslininkus ir elektros energijos perdavimo bei skirstymo įmones kurti naujas koncepcijas, pavyzdžiui: mikrotinklas, nanotinklas ir išmanusis tinklas. Šios koncepcijos buvo įdiegtos siekiant pagerinti elektros energijos gamybą, perdavimą, paskirstymą ir vartojimą.

Dėl galios keitiklių, skirtų atsinaujinančios elektros energijos panaudojimui, perdavimui ir skirstymui, pastaruoju metu kyla tinklo kokybinių rodiklių mažėjimo problema. Pagrindinė kokybinių parametrų mažėjimo priežastis yra energijos keitikliuose esantys netiesiniai puslaidininkiniai elementai, sukuriantys aukštesniojo laipsnio harmonikas. Taip pat mikrosalose, kuriose įtampos šaltiniai yra tik VSI, kurie skirtingai nei įprasti generatoriai neturi didelio inertiškumo, keičiantis apkrovoms tinkle, gali būti neišlaikomos leistinos efektinės įtampos vertės ir įtampos asimetrijos ribos. Nepriklausomose AEI sistemose naudojami keli generavimo šaltiniai ir keitikliai su skirtingomis kompensavimo ir filtravimo sistemomis, kurios veikdamos kartu tam tikruose režimuose taip pat gali sukelti neleistinus mikrotinklo iškraipymus, kurių pasekmė gali būti vartotojo naudojamų elektros įrenginių tarnavimo laiko sutrumpėjimas ar nestabilus ypač trifazių įrenginių darbas.

Šiuo metu yra kuriamos ir tobulinamos kompiuterinės programos SABER, SIMPLORER, PSPICE, MATLAB, leidžiančios sukurti virtualias elektros-elektronikos laboratorijas. apimančias kontrolės sistemas, elektromagnetinius prietaisus, puslaidininkinius elementus, elektrines mašinas ir skaitmeninį signalų apdorojimą. Naudojantis virtualiomis laboratorijomis ir turint reikiamus duomenis galima tirti generavimo šaltinių, keitiklių ir visos modeliuojamos sistemos statinius ir dinامينius pereinamuosius procesus, keičiant mikrotinklo parametrus, tokius kaip–vėjo greitis, apšvieta, apkrova, baterijų įkrovimo lygis. Taip pat gali būti keičiami energijos keitiklius sudarantys elementai ir skaitmeniniai-loginiai nustatymai. Privalumas kuriant virtualias sistemas, atmetama galimybė pakenkti realioje sistemoje esančiai įrangai.

Darbe bus modeliuojama mikrotinklo sistema su saulės elektrinėmis ir vertikalios ašies vėjo elektrine, bei vienfaziais DC/AC dvikrypčiais keitikliais. Ši sistema apima dalį Kauno technologijos universiteto laboratorijoje „Studentų g 48“ esančio realaus mikrotinklo sistemos.

Temos aktualumas: Dėl esamo aplinkos užterštumo, kuris glaudžiai susijęs su energijos gavyba deginant anglį, sparčiai auga AEI poreikiai. Dėl to sparčiai vystosi ir technika, leidžianti individualiai naudoti AEI tokius kaip vėjo ir saulės energija. Šie poreikiai privedė prie naujų sistemų tokių kaip mikrotinklas, kuriame naudojami energijos keitikliai. Dėl netiesinių elementų struktūros naudojamos energijos keitikliuose susiduriama su tinklo kokybės problemomis, tokiomis kaip įtampos šuoliai, asimetrija ir harmoniniai iškreipymai.

Magistro darbo tyrimo tikslas: ištirti generavimo šaltinių ir jiems skirtų energijos keitiklių daromą įtaką mikrotinklo sistemai salos režime, naudojantis MATLAB/SIMULINK SIMSCAPE modeliavimo paketu.

Magistro darbo uždaviniai:

- sumodeliuoti mikrotinklo sistemą MATLAB/SIMULINK aplinkoje su saulės elektrinėmis ir vertikalios ašies vėjo elektrine bei vienfaziais DC/AC dvikrypčiais keitikliais.
- nustatyti ribinius mikrotinklo įtampos ir asimetrijos taškus, esant skirtingoms apkrovoms.
- ištirti saulės ir vėjo energijos keitiklių bei dvikrypčių keitiklių tiekiamos elektros energijos kokybės charakteristikas pagal LST EN 50160:2015 standartą, modeliuojant statinius ir dinامينius pereinamuosius procesus.

Raktažodžiai: mikrotinklo sistema, energijos keitikliai, salos režimas, tinklo kokybės charakteristikos.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Nepriklausomų mikrotinklų vystymasis

Nors pagal AEI direktyvą vartotojai-gamintojai turėtų būti skatinami įsirenginėti privačias elektrines iš AEI ir turėti galimybę prisijungti prie tinklo, tačiau dažnai vartotojui dėl techninių kliūčių tai gali kainuoti per brangiai. Taip pat prisijungimo vietų skaičius dažnai yra ribotas, todėl energijos vartotojai-gamintojai gali ir neturėti galimybės prisijungti prie tinklo. Galimybės ir išlygos aiškiai aprašomos Vokietijos atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymo 8 straipsnyje¹

Dėl AEI kainų mažėjimo ir ribotų galimybių vartotojams-gamintojams prisijungti prie centralizuoto tinklo, išauga poreikis nepriklausomiems mikrotinklams, kurie veikia salos režime. Salos režime veikiantys mikrotinklai taip pat suteikia galimybę apsirūpinti elektros energija vartotojams, kurie yra atokiose vietovėse, kur centralizuotas tinklas nėra išvystytas. Elektros energetikos darnios plėtros pranešime rašoma apie „Global BOD Group“ valdybos pirmininko pasiūlymą Lietuvoje įteisinti mikrotinklus. Teigiama, kad mikrotinklų sistemos suteikia galimybes padidinti AEI naudojimą be valstybės paramos. „Pastarieji taip pat ženkliai prisideda prie elektros energetikos sistemos patikimumo ir stabilumo, kadangi kritiniu atveju sistemos yra pritaikytos dirbti ir autonominiu režimu“.[38]

1.2. Mokslinių straipsnių apžvalga

Šioje dalyje bus apžvelgti moksliniai straipsniai susiję su baigiamojo projekto darbo tematika. Kadangi straipsnių, kuriuose būtų aprašoma generavimo šaltinių su energijos keitikliais naudojimu mišriame mikrotinklų modeliavimas ir tyrimas lietuvių šaltiniuose nebuvo rasta, todėl buvo apžvelgiami straipsniai apie atskirus modeliuojamojo mikrotinklo elementus ir tinkle su energijos keitikliais išskylančias problemas užsienio publikacijose.

Straipsnyje „Influence of modulation technique on power quality issues for grid connected converter“ [1] teigiama, kad galios keitiklių, skirtų atsinaujinančios elektros energijos perdavimui, skirstymui ir naudojimui paklausa vis didėja, dėl to kyla problema, susijusi su tinklo kokybės parametrais, tokiais kaip įtampos šuoliai, asimetrija ir dažniniai iškraipymai. Todėl turi būti sukurtos naujos keitiklių valdymo struktūros, galinčios sušvelninti srovės ir įtampos harmonikas. Vienas iš labiausiai paplitusių energijos kokybės gerinimo būdų yra harmoninė kompensacija. Tačiau išvadose teigiama, kad net jeigu būtų pasiektas reikšmingas pagerėjimas, harmoninė kompensacija gali turėti labai skirtingą poveikį sistemoms kai sujungiami keli galios keitikliai su skirtingomis kompensavimo ir filtravimo sistemomis.

Straipsnyje „Multilevel grid-connected inverter performance under different modulation strategies“ [2] taip pat apžvelgiama elektros tinklo kokybės problema naudojant skirtingus keitiklius. Straipsnyje teigiama, kad geresnes tinklo charakteristikas galima pasiekti naudojant tarpines daugiapakopės DC

¹ Tinklų operatoriai nedelsiant ir pirmumo tvarka jungia prie tinklų įrenginius, elektros gamybai naudojančius atsinaujinančiųjų išteklių energiją ir kasyklų dujas, tokiaime tinklo taške, kuris tinkamas atsižvelgiant į įtampos lygį ir yra arčiausiai prie įrenginio buvimo vietos, nebent įrodoma, kad šiame ar kitame tinkle yra techniniu ar ekonominiu požiūriu tinkamesnis prisijungimo taškas; priimant sprendimą dėl ekonominiu požiūriu tinkamesnio prisijungimo taško, atsižvelgiama į tiesiogines prisijungimo sąnaudas. Tuo atveju, jei vienas ar daugiau įrenginių, kurių bendra įrengtoji galia neviršija 30 kW, įrengti vietovėje, kurioje jau yra tinklo jungtis, prijungimo prie tinklo taškas šioje vietovėje laikomas tinkamu prisijungimo tašku

grandis. Šiame dokumente taip pat nagrinėjami įvairūs daugiapakopių keitiklių moduliavimo būdai. Pateiktose išvadose rašoma, kad maksimaliai taikant DC grandis inverterio nuostolius galima sumažinti iki minimumo išlaikant elektros tinklo kokybės parametrus.

Straipsnyje „Grid interconnection of DC microgrid at distribution level using power electronic converter system-MATLAB/Simulink modeling and analysis“ [3] aprašomas mikrotinklo modelis, apimantis saulės energijos sistemą, nuolatinės srovės generatoriaus sistemą ir fiksuotos nuolatinės srovės apkrovos. Sistema prie AC tinklo prijungiama naudojant vienfazį keitiklį. Darbe pateikiamos modelį sudarančios schemos ir atskirų elementų parametrai. Išvadose teigiama, kad tokio tipo sistema atitinka įtampos ir srovės THD reikalavimus. Straipsnyje nėra išsamių modeliavimo naudingumo koeficiento rezultatų. Pateikiamos įtampos ir srovės THD vertės esant tik aktyviosioms apkrovoms yra identiškos ir keičiantis apkrovai nesiekia 2,5 %.

Straipsnyje „New Configuration of Multifunctional Grid-Connected Inverter to Improve Both Current-Based and Voltage-Based Power Quality“ [4] aprašoma problema, kylanti nuolat tobulinamuose mikrotinkluose, kur naudojama paskirstytoji generacija. Aprašomi aktyvieji galios kompensavimo filtrai MFGCI keitikliuose, kurie iš esmės turėtų kompensuoti dabartinės galios kokybės problemas: prastą galios koeficientą, apkrovos disbalansą, harmonikas, reaktyviosios galios poreikį ir nulinės seko sroves, įtampos šuolius, mirgėjimus. Tačiau MFGCI galimybės yra ribotos, ypač mažinant įtampos pagrindų kylančias energijos kokybės problemas. Tradiciniai MFGCI kompensatoriai paprastai yra prijungti lygiagrečiai elektros sistemai. Straipsnio išvadose teigiama, kad netinkamai sukonfigūruoti MFGCI gali tik padidinti tam tikrus energijos iškraipymus arba dėl pareikalaujamos aktyviosios ir reaktyviosios galios pačiame keitiklio kompensatoriuje, sumažinti sistemos naudingumą. Kadangi tinklo kompensavimas labai priklauso nuo apkrovų konkrečiame taško tinkle, bandomi kurti keitikliai su naujo tipo kompensavimo sistema SSS-MFGCI. Tokie kompensatoriai gali būti jungiami į sistemą nuosekliai arba lygiagrečiai naudojant dvikrypčius jungiklius, skirtus skirtingiems veikimo režimams, priklausomai nuo įvairių tinklo trikdžių.

Straipsnyje „Design and development of MPPT algorithm for high efficient DC-DC converter for solar energy system connected to grid“ [28] aprašomas saulės DC-DC (Buck-boost) keitiklis, leidžiantis maksimaliai išnaudoti saulės elektrinės galią, išėjime formuojant maksimalią įtampą. Ištirtos voltamperinės ir galios charakteristikos. Pateikiamas ir įgyvendinamas maksimalaus sekimo algoritmo kūrimas naudojant DSP (digital signal processor) procesorių, kuris suteikia maksimalų saulės sistemos efektyvumą. Didžiausias galios taškas galios įtampos diagramoje identifikuojamas algoritmu, vadinamu inkrementiniu laidumo metodu. Apskaičiuoti skirtingi darbo ciklai keičiant nešlio dažnį ir induktyvumą. Tinklo įtampa ir dažnis sinchronizuojami naudojant PLL (Phase locked loop) metodus. Straipsnyje nagrinėjamo keitiklio maksimalus naudingumo koeficientas yra 90 %..Darbe taip pat pateikiamas saulės elektrinės ir keitiklio matematinio modeliavimo metodika.

Straipsnyje „Implementation of perturb and observe method of maximum power of perturb and observe method of maximum power point tracking in SIMSCAPE/MATLAB“ [29] darbe pateikiama saulės fotoelektros technologija, kartu su didžiausio galios taško sekimo (MPPT) metodu. Straipsnyje rašoma, kad yra daugiau nei 30 galios sekimo metodų, tačiau daugelis iš jų neturi lankstumo, skaičiavimo algoritmai yra kompleksinėje formoje ir taip pat yra taikomi tik vieno tipo keitikliams. Teigiama, kad populiariausias galios sekimo algoritmas yra P&O (Perturb and Observe) dėl savo paprastos skaičiavimo metodikos. Šis algoritmas taip pat tinkamas keitikliuose, kuriuose yra

kintantys sistemos parametrai. P&O metodas įgyvendinamas MATLAB / Simulink su aukštinančiuoju keitikliu (boost converter).

Straipsnyje „A new three-phase inverter built by a low-frequency three-phase inverter in series with three high-frequency single-phase inverters“ [30] pasiūlytas naujos serijos keitiklis. Keitiklis susideda iš trifazio keitiklio ir trijų vienfazių keitiklių. Trifazis inverteris veikia pastoviu dažniu, kuris atsakingas už išėjimo galią. Ir trys vienfaziai keitikliai, veikiantys aukštu dažniu, kurie nustato kompensavimo sistemos veikimą ir pagerina sistemos dinaminį veikimą. Šiame darbe buvo analizuojamas naujas inverterio veikimo principas ir moduliavimas. Rezultatai parodė, kad tokio tipo inverteris gali formuoti aukštos kokybės įtampos ir srovės bangos formas, su minimaliais perjungimo nuostoliais. Teigiama, kad tai galėtų ženkliai padidinti sistemos efektyvumą. Tokia keitiklių sistema taip pat atitinka IEEE išėjimo įtampą ir THD reikalavimus. Jis tinka saulės, vėjo ir kitai AEI energijai. Šio keitiklio galia gali būti perduodama tiesiogiai vartotojams.

Straipsnyje „A compact single-phase bidirectional buck-boost-inverter topology“ [31] aprašomas vienos fazės dvikryptis aukštinantysis-žeminantysis keitiklis (buck-boost converter). Pateikti modeliavimo ir laboratoriniai rezultatai. Siūlomas inverteris susideda iš pagalbinių pusės tilto IGBT jungiklių, veikiančių 20 kHz ir pagrindinių pilno tilto IGBT modulių. Keitiklio papildomi jungikliai naudojami DC grandinėje įvedant kintamojo dažnio grandį tam, kad įtampa būtų padidinta nuo 60V iki 220V. Teigiama, kad tokio tipo keitiklis dėl HF transformacijos sumažina jo gabaritus ir perjungimo nuostolius išlaikydamas IEEE išėjimo įtampą ir THD reikalavimus.

Straipsnyje „Bidirectional dual inverter algorithm for grid tied microgrid systems“ [32] aprašyta dvikrypčio keitiklio sistema, apimanti AC-DC ir DC-AC konversiją ir taip pat sinchronizuoti su elektros tinklu. Keitiklis gali atiduoti galią į tinklą arba priimti maitinimą iš tinklo, priklausomai nuo jo veikimo režimų. Jo daugiakvadrantė veikimo sistema palaiko optimalų įkrovimo ir iškrovimo režimo lygį. Darbe pateikiamos modeliavimo struktūrinė schema ir naudojamų komponentų parametrai. Darbe taip pat palyginami aukštinančiojo-žeminančiojo (Buck-boost) ir dvigubo ‘Dual‘ keitikliai, kurių naudingumas atitinkamai yra 76 % ir 90 %.

Straipsnyje „Voltage unbalance and harmonics compensation for islanded microgrid inverters“ [33] aprašoma įtampos asimetrija, kuri atsiranda naudojant vienfazius generatorius/apkrovas, kas gali sutrikdyti sistemos stabilumą ir efektyvumą. Siekiant pagerinti įtampos kokybę buvo sukurta keletas komponentų, susijusių su įtampos balanso kompensavimu, tokių kaip: statinis reaktyviosios galios kompensatorius, aktyviosios ir reaktyvus galios filtrai. Visuose šiuose kompensavimo metoduose naudojami papildomi galios keitikliai, skirti išvirkšti neigiamos sekos reaktyviąją galią. Tačiau pagrindiniuose mikrotinklo keitikliuose įtampa dažniausiai kontroliuojama vertinant mažiausios įtampos neigiamąją reikšmę, dėl to toks galios kompensavimas mikrotinklams yra netinkamas.

Straipsnyje „Design and modelling of grid-connected PMSG-based wind energy conversion through diode rectifier, DC/DC and DC/AC converters,“ pateikiamas vėjo energijos panaudojimo projektavimo ir optimizavimo metodas, naudojant sinchroninį generatorių su nuolatiniais magnetais, diodų lygintuvą, aukštinantįjį DC/DC keitiklį ir tinklo VSI DC/AC keitiklį su LC filtru. Modeliavimo tikslas buvo atliekamas siekiant sukurti vėjo elektrinės sistemą gebančia maksimaliai išnaudoti vėjo energiją prie tam tikro vėjo greičio. Straipsnyje pateikiamo projektavimo procedūra apima tinkamo LC filtro parinkimą, siekiant apriboti bendrą srovės harmoninį iškraipymą į tinklą; VSI keitiklio tinkamo valdiklio parametru parinkimas; tinkamo darbinio taško DC/DC keitikliui nustatymas, visos

sistemos koordinavimas, optimizavimas ir švelnus pasileidimas. Darbe pateikiamos sistemos modeliavimo struktūrinės schemos, galios, srovės, įtampos, rotoriaus sukimosi greičio sinchroniniame generatoriuje ir keitiklio išėjime oscilogramos. Išvadose teigiama, kad bendra suprojektuota sistema gali veikti pagal projektavimo tikslą.

1.3. Mikrotinklų sudarantys elementai

Didėjant energijos poreikiams ir mažėjant saulės ir vėjo elektrinių kainai atsiranda galimybės kurti decentralizuotus tinklus–nepriklausomas sistemas, tuo pačiu ir didėja tokių sistemų paklausa. Tokios sistemos vadinamos mikrotinklais ir nanotinklais, kurie veikia salos režimu [7].

Mikrotinklai susideda iš mažos galios energijos vartotojų, kurie tuo pačiu yra ir gamintojai, galintys patys apsirūpinti elektros energija, nepriklausomai nuo centralizuoto skirstomojo elektros tinklo. Tokie tipiški pavyzdžiai gali būti vienkiemiai, kaimo vietovės ar studentų miesteliai.

Nanotinklai yra nedideli mikrotinklai, paprastai aptarnaujantys vieną pastatą arba vieną apkrovą. Nanotinklų prijungtose sistemose įdiegta galia neturi viršyti 100 kW, o nuotolinėms sistemoms, kurios nėra sujungtos su centralizuotu elektros tinklu, - 5 kW.[8]

Tipišką mikrotinklo konfigūraciją sudaro pastovios ir kintančios apkrovos, energijos kaupimo įrenginiai, tinklo jungtys ir vietinė paskirstyta gamyba, tokia kaip fotovoltinė, vėjo, hidroenergija, kombinuota šilumos ir elektros energija, kuro elementai arba kiti generatoriai. Šiuo metu fotovoltinės sistemos yra perspektyviausia AEI gamybos dalis, nes jos yra plačiai pritaikytos, leidžiama investuoti, prognozuoti ir saugiai gaminti energiją.

Decentralizuotose sistemose keitikliai neturi jungties su elektros tinklu ir energiją tiekia tiesiai apkrovoms arba į baterijas. Tokioje sistemoje gali būti naudojami paprastesni energijos keitikliai, kadangi nereikia kurti galimybės sinchronizuotis su tinklu. Tačiau atsiradus keliems generavimo šaltiniams sukuriama sava sistema, kuri turi sinchronizuotis tarpusavyje. Tokia sistema gali turėti kelias skirtingo tipo elektrines pavyzdžiui, saulės moduliai ir vėjo elektrinė. Taip pat tokia sistema privalo turėti baterijų blokus su inverteriais, kurie gali įsijungti, kai generuojama nepakankamai energijos iš saulės modulių ar vėjo elektrinės. Tokiu atveju generavimo šaltinių keitikliai privalo veikti sinchroniškai, užtikrindami galios srauto judėjimą į apkrovas, o ne tarp generavimo šaltinių.

Pagrindiniai mikrotinklų naudojimo privalumai yra:

- galimybė kurti nepriklausomų energijos vartotojų sistemas
- didesnė energijos kokybė ir patikimumas prisijungus prie centralizuoto tinklo;
- sumažinta didžiausia apkrovą centralizuotame tinkle;
- mažesnės energijos sąnaudos;
- sumažinti perdavimo ir paskirstymo nuostoliai dėl vietinės gamybos;
- papildomų paslaugų teikimas tinklui;
- spartesnis paskirstytų ir atsinaujinančių energijos šaltinių priėmimas;
- sumažintas iškastinio kuro naudojimas.

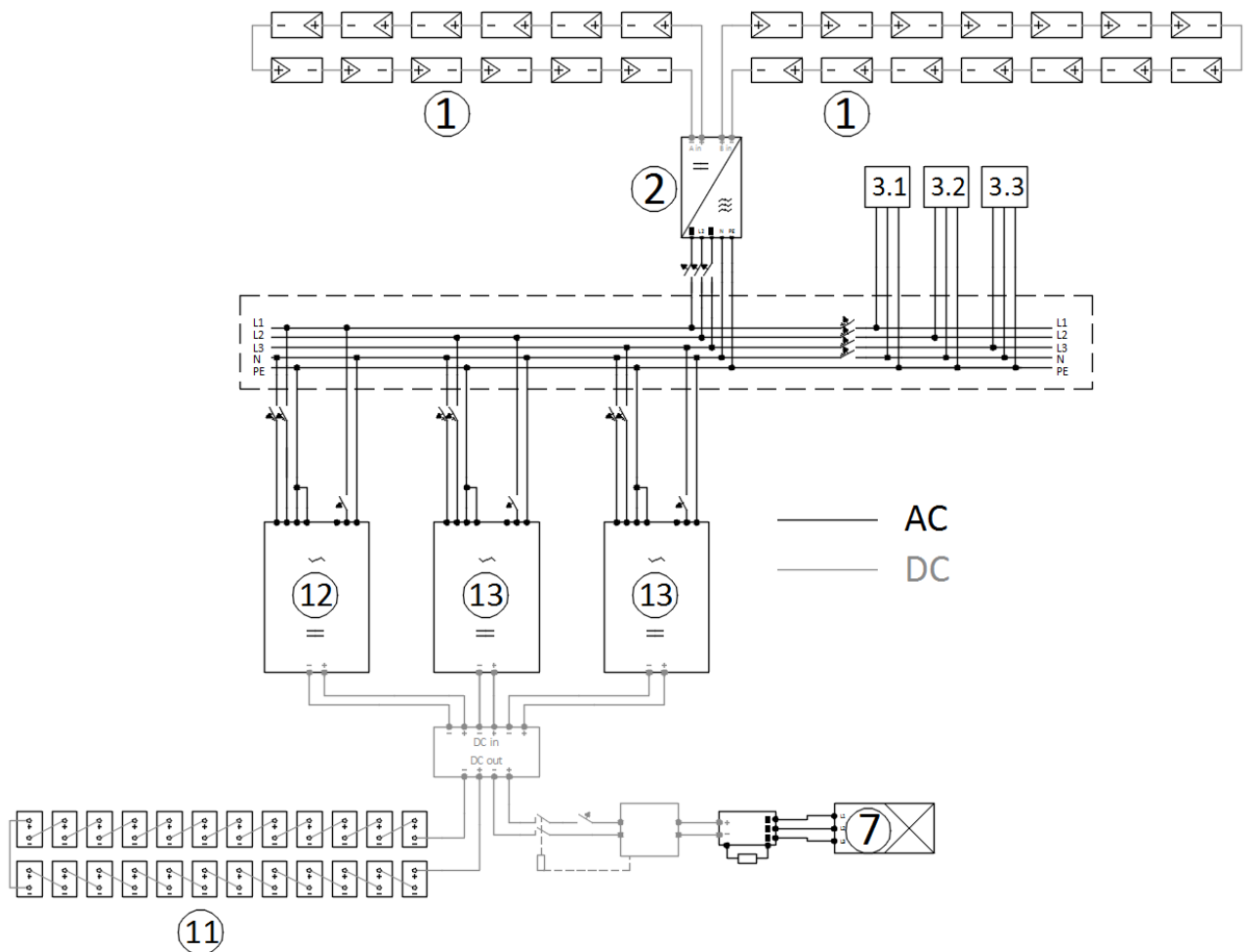
Viena iš svarbiausių problemų, susijusių su mikrotinklų valdymu, yra ta, kad paskirstytosios gamybos generuojama energija, gaunama iš saulės, yra nuolatinė. Vartotojui turi būti tiekiamas kintamoji AC įtampa, kurios kokybiniai parametrai nustatyti LST EN 50160:2015 reglamente. Tokiems parametrams užtikrinti yra naudojami įvairūs energijos keitikliai, kurių pagrindiniai segmentai yra netiesiniai puslaidininkiniai elementai. Dėl keitikliuose vykstančių komutacinių procesų gali sumažėti įtampos kokybė. Valdomiems ventiliams jungikliams komutuojant formuojama sinusinė įtampa nėra ideali, priklausomai nuo sąlygų gali būti gaunamos aukštesniojo laipsnio harmonikos.

Kita aktuali problema - tai energijos praradimas dėl netinkamo energijos gamybos vartojimo ir generacijos prognozavimo, kai akumulatorius yra pilnai įkrovas ir nėra apkrovos; taip pat sistemos sutrikdymas, kuomet energijos poreikis yra didesnis nei jį ilgą laiką gali užtikrinti generatorių ir baterijų sistema.

Decentralizuotose sistemose keitiklių skaitmeninę sistemą palaiko tos pačios sistemos energija, dažniausiai baterijos. Nesubalansavus tokio tinklo leidžiamų generacijos ir vartojimo ribinių verčių dėl išnaudotų energijos kaupiklių rezervo galima visos sistemos griūtis.

Mikrotinklo salos režime schema pateikta (1.1 pav.). Ji susideda iš šių mikrotinklo komponentų:

- 2 saulės elektrinės (1);
- trifazis inverteris (2);
- vertikaliosios ašies vėjo elektrinė su įtampos lygintuvu (7);
- apkrovos (3.1; 3.2; 3.3);
- baterijos (11);
- 3 dvikrypčiai, vienfaziai keitikliai, pagrindinis (12) ir papildomi (13);
- stebėjimo sistemos, kurios keičia saulės elektrinės, vėjo elektrinės nuolatinės srovės DC išėjimą su atitinkamais akumulatoriaus įkrovimo parametrais. Įkrovimo valdiklis paprastai yra aprūpintas išoriniu ryšio kanalu, per kurį informacija apie įkrovimo procesą yra dalijama su kitais įkrovimo valdikliais ir hibridiniais inverteriais, kad būtų galima koordinuoti įkrovimo procesą ir išvengti akumulatoriaus pažeidimo.



1.1 pav. Salos režimu veikiančio mikrotinklo chema

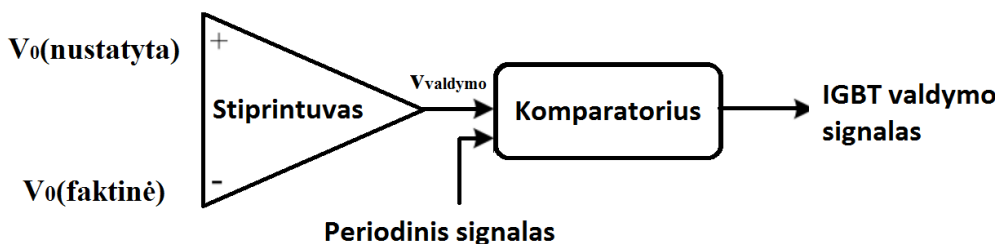
1.4. Keitiklių veikimo principai

Šioje dalyje aprašomi mikrotinklo sistemoje veikiančių vienfazių keitiklių veikimo principai. Šią sistemą sudaro trys vienfaziai dvikrypčiai keitikliai, skirti perduoti elektros energiją baterijoms, kai vartojimas mažesnis už generaciją ir atiduoti energiją į tinklą iš baterijų, kai vartojimas yra didesnis nei generacija. Toks keitiklis yra sudarytas apjungiant:

- DC/AC keitiklį, kuris skirtas baterijų nuolatinę įtampą keisti į kintamąją, kuri naudojama apkrovose;
- AC/DC keitiklį, kuris skirtas mikrotinklo sistemoje esančiai kintamajai įtampai keisti į nuolatinę ir perduoti energiją į baterijas, kuomet generacija yra didesnė nei apkrovos.
- DC/DC keitiklį su transformatoriumi, kurio paskirtis perjungti priklausomai nuo generacijos ir vartojimo aukščiau paminėtus keitiklius ir sumažinti nuolatinės įtampos grandinėje esančias pulsacijas ir palaikyti stabilesnę įtampą. Taip pat šiame keitiklyje yra tarpinė kintamosios srovės grandis, skirta pažeminti arba paaukštinti įtampą, naudojant įtampos transformatorių.

DC-DC keitikliuose svarbu užtikrinti įtampos lygį, esant skirtingoms apkrovoms. Įtampa yra reguliuojama perjunginėjant valdomus IGBT raktus. DC-DC keitiklio vidutinė įtampa išėjime formuojama, kontroliuojant IGBT raktų įjungtos ir išjungtos būsenos trukmę. Vienas iš išėjimo

Įtampos valdymo būdų yra IGBT raktų komutacija pastoviu dažniu (pastoviu periodu $T_s = t_{on} + t_{off}$) ir reguliuojant įjungtos raktų būsenos trukmę reikalingai išėjimo įtampai gauti. Šis metodas vadinamas impulso platumine moduliacija (angl. PWM- Pulse-Width Modulation) [35]. Išėjimo įtampa reguliuojama keičiant impulso įjungtos raktų būsenos trukmės ir pulsacijos periodo santykį. Dažniausiai raktų būsenos trukmė yra kontroliuojama lyginant išėjimo įtampą su įėjimo įtampa (1.2 pav.). Skirtumas tarp nustatytos ir esamos išėjimo įtampos verčių komparatoriuje yra apdorojamas atitinkamai lyginant su periodiniu signalu. Taip parenkami impulsų ilgiai valdomiems IGBT raktams. Periodinis signalas yra pastovaus dažnio, kuris gali svyruoti nuo kiloherco iki megaherco. Kai sustiprinto paklaidos signalo ($V_{valdymo}$) reikšmė yra didesnė nei periodinio signalo reikšmė, raktų valdymo signalas atidaro IGBT raktą. Priešingu atveju valdymo signalas uždaro IGBT raktą



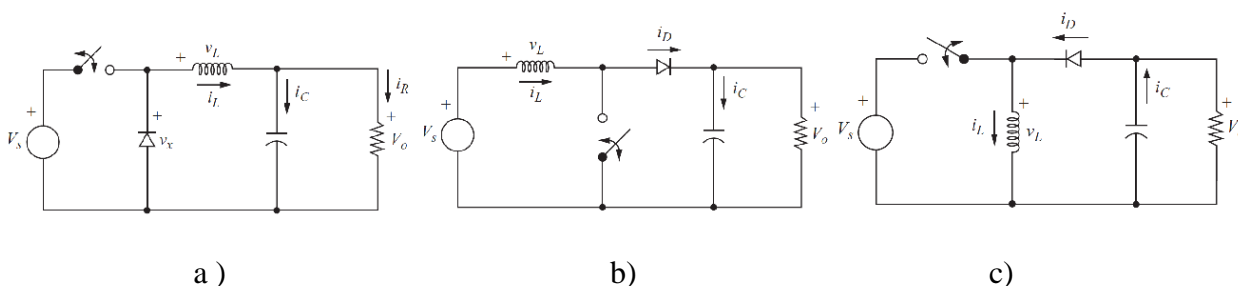
1.2 pav. Impulso pločio moduliatoriaus schema

Žeminantysis įtampos keitiklis (Buck converter)

Žeminančiojo keitiklio schema pateikiama (1.3 pav.). Keičiant raktų valdymo signalo impulso ilgį t_{on}/T_s yra keičiama išėjimo įtampa V_o . Vidutinė išėjimo įtampa V_o tiesiogiai priklauso nuo valdymo įtampos $V_{valdymo}$. Tokioje schemoje dalis energijos imama kaupti induktyvioje apkrovoje, iš kurios, raktui esant atviroje padėtyje, kuriamos atgalinės srovės, dėl to yra naudojamas diodas. Įtampos svyravimai išėjime panaikinami schemoje naudojant žemų dažnių LC filtrą.

Aukštinantysis įtampos keitiklis (Boost converter)

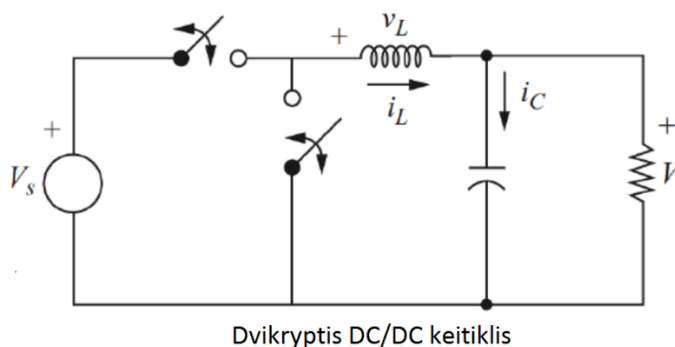
Aukštinančiojo keitiklio schema pateikiama (1.3 pav.). Aukštinančiojo keitiklio taikymo pagrindinė sritis yra energijos keitikliuose kintančiai įtampai stabilizuoti ir išlaikyti ją nustatytose ribose. Šiuose keitikliuose išėjime yra formuojama aukštesnė įtampa lyginant su įėjimo įtampa. Tranzistoriui esant įjungtoje padėtyje, link diodo ima tekėti atbulinė srovė, kurios diodas nepraleidžia, tokiu būdu izoliuojama išėjimo grandinė. Įėjime esanti įtampa verčia srovę tekėti į induktyviąją ritę. Tranzistoriui esant išjungtoje padėtyje, apkrova energiją gauna iš maitinimo šaltinio ir iš ritėje susikaupusio induktyvumo. Nusistovėjusiu režime, kondensatorius, esantis prie išėjimo, leidžia užtikrinti nekintančią išėjimo įtampą $v_o(t) \approx V_o$.



1.3 pav. DC-DC keitiklių tipai a- žeminantysis b-aukštinantysis c-aukštinantysis-žeminantysis [10]

Dvikryptis aukštinantysis-žeminantysis įtampas keitiklis (buck-boost converter).

Dvikrypčiai keitikliai naudojami valdyti ir optimizuoti įtampas bei sroves iš baterijų ir į jas. Žeminantysis įtampas keitiklis (Buck converter) ir aukštinantysis įtampas keitiklis (Boost converter) negali veikti dvejomis kryptimis. Taip yra todėl, kad jie suprojektuoti naudojant diodus, kurie užkerta kelią atvirkštinės srovės srautui. Dvikryptis nuolatinės įtampas keitiklis gali būti suprojektuotas derinant „Buck“ ir „Boost“ keitiklių galimybes, pakeičiant jų diodus jungikliais, kaip parodyta (1.4 pav.). Viršutinis jungiklis naudojamas perduoti energiją iš aukštos įtampos pusės į žemos įtampos pusę ir apatinį jungiklį, kuris naudojamas perduoti energiją iš žemos įtampos pusės į aukštos įtampos pusę.



1.4 pav. Dvikrypčio keitiklio sandara [10]

Siekiant sumažinti pulsacijas keitikliuose naudojami žemo dažnio filtrai grandinėje esantys už jungiklio. Išėjimo įtampa keičiama keičiant darbo ciklą. Žeminančiojo ir aukštinančiojo įtampas keitiklių išvestys apskaičiuojamos atitinkamai pagal 1-3 lygtis.

$$V_0 = v_{\text{valdymo}} D; \quad (1)$$

$$V_0 = \frac{v_{\text{valdymo}}}{D}; \quad (2)$$

$$V_0 = v_{\text{valdymo}} \left(\frac{D}{1-D} \right); \quad (3)$$

čia V_0 - valdymo skirtumas tarp nustatytos ir faktinės įtampas. D - impulso skvarba, kuri apskaičiuojama pagal formulę :

$$D = \frac{t_{\text{on}}}{T_s}. \quad (4)$$

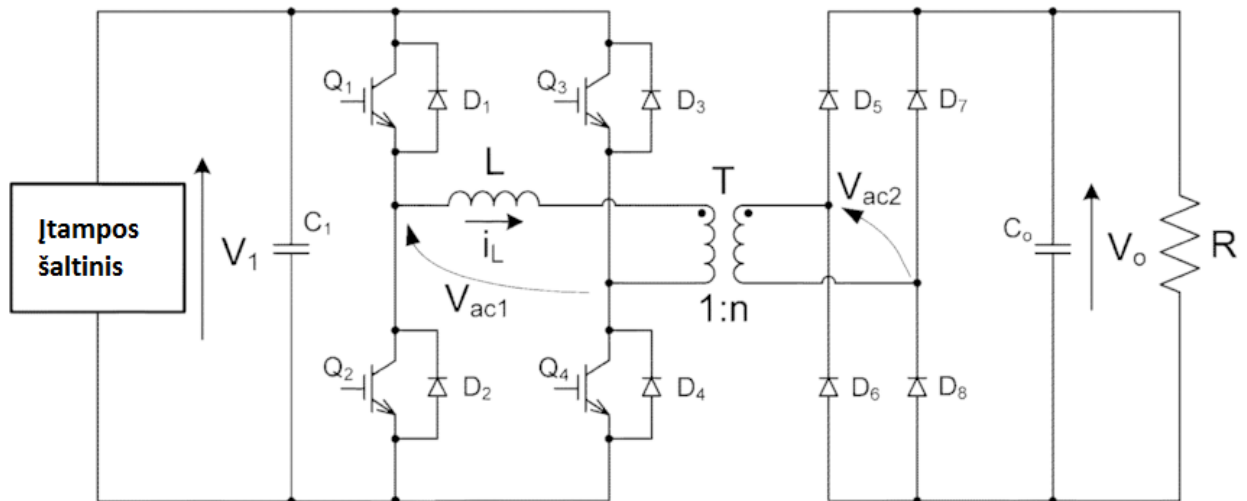
čia t_{on} - rakto įjungtos būsenos laikas; T_s - moduliacijos periodas

DC-DC keitiklio su transformatoriumi schema parodyta (1.5 pav.). Pirminė grandinė sudaryta iš nuolatinės įtampas šaltinio. Elektroninių jungiklių pagalba nuolatinė įtampa keičiama į kintamąją. Jungikliai Q1 ir Q2 veikia atitinkamai su Q3 ir Q4, formuodami sinusoidę, pasitelkiant impulso pločio moduliaciją. Transformatoriuje kuriamas kintamas magnetinis srautas. Antrinėje transformatoriaus grandinėje priklausomai nuo transformacijos koeficiento pakeliama arba sumažinama amplitudinė

įtampa. Antrinėje keitiklio grandinėje diodų ir elektroninių jungiklių pagalba įtampa verčiama nuolatine.

Praktiniai DC-DC keitiklių privalumai:

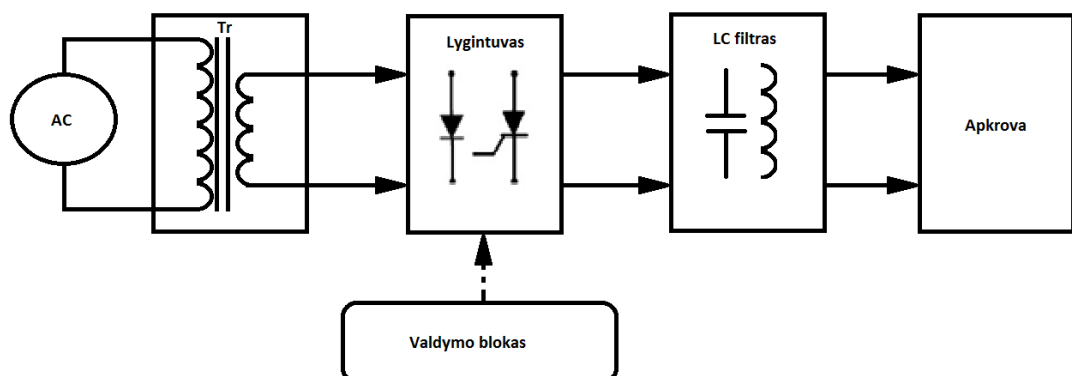
- Platus švelnaus perjungimo veikimo diapazonas, keičiantis apkrovos dydžiui;
- Efektyvus tuščiosios eigos galios sumažinimas
- Greitas dinaminis nusistovėjimas kintant apkrovai dėl abiejų pusių valdymo tarp transformatoriaus pirminės ir antrinės apvijos.



1.5 pav. DC-DC keitikliai su transformatoriumi [41]

AC-DC keitikliai

AC-DC keitiklis dar vadinamas lygintuvu. Jis yra vienas paprasčiausių energijos keitiklių. Kintamosios srovės keitiklio schema yra parodyta (1.6 pav.). Pagrindiniai šio keitiklio komponentai yra transformatorius, diodas, valdomas tranzistorius, LC filtras ir valdymo blokas.



1.6 pav. AC-DC keitiklio principinė schema

Paprastai vienfaziai AC/DC keitikliai naudoja LC filtras, kurie susideda iš didelių elektrolitinių kondensatorių ir induktyviųjų ričių. Dažniausiai tokie lygintuvai naudojami tarpinėje DC grandyje siekiant sumažinti pulsacijas. Tačiau elektrolitinių kondensatorių naudojimas padidina sistemos dydį

ir tuo pačiu sumažina sistemos tarnavimo laiką. 2015 metais buvo pasiūlyta keletas metodų skirtų sumažinti pulsacijas, atsisakant elektrolitinių kondensatorių. Vienas iš tokių - tai galios grandinių valdymas pagal įvesties ir išvesties parametrus komutuojami valdomi lygintuvai. Šie metodai padidino sistemų patikimumą ir tarnavimo laiką. Taip pat padidėja keitiklių efektyvumas, nes eliminuojami galios nuostoliai induktyvioje grandinėje.

DC-AC keitikliai

DC/AC keitiklis - sinusinės įtampos inverteris. Jis turi valdyti amplitudę, dažnį ir fazės kampą. Priklausomai nuo išėjimo pobūdžio, inverteriai gali būti įtampos (VSI) ir srovės (CSI) šaltinio inverteriai. Dažniau yra naudojami įtampos šaltinių inverteriai VSI.

DC/AC keitikliai-inverteriai sudaryti iš valdomų elektroninių jungiklių-raktų, todėl įtampos šaltinio inverterio išėjimo įtampa yra nesinusinė (impulsinė). Siekiant suformuoti išėjimo įtampos formą, maksimaliai artimą sinusoidės formai, naudojama impulso pločio moduliacija. Naudojant šį įtampos kreivės formavimo metodą, formuojama tik pirmoji sinusinės įtampos harmonika. Aukštesniųjų harmonikų tolydumui užtikrinti inverteriuose dažnai naudojami nešančiojo dažnio moduliacijos selektyvieji aukštesniųjų harmonikų šalinimo metodai.

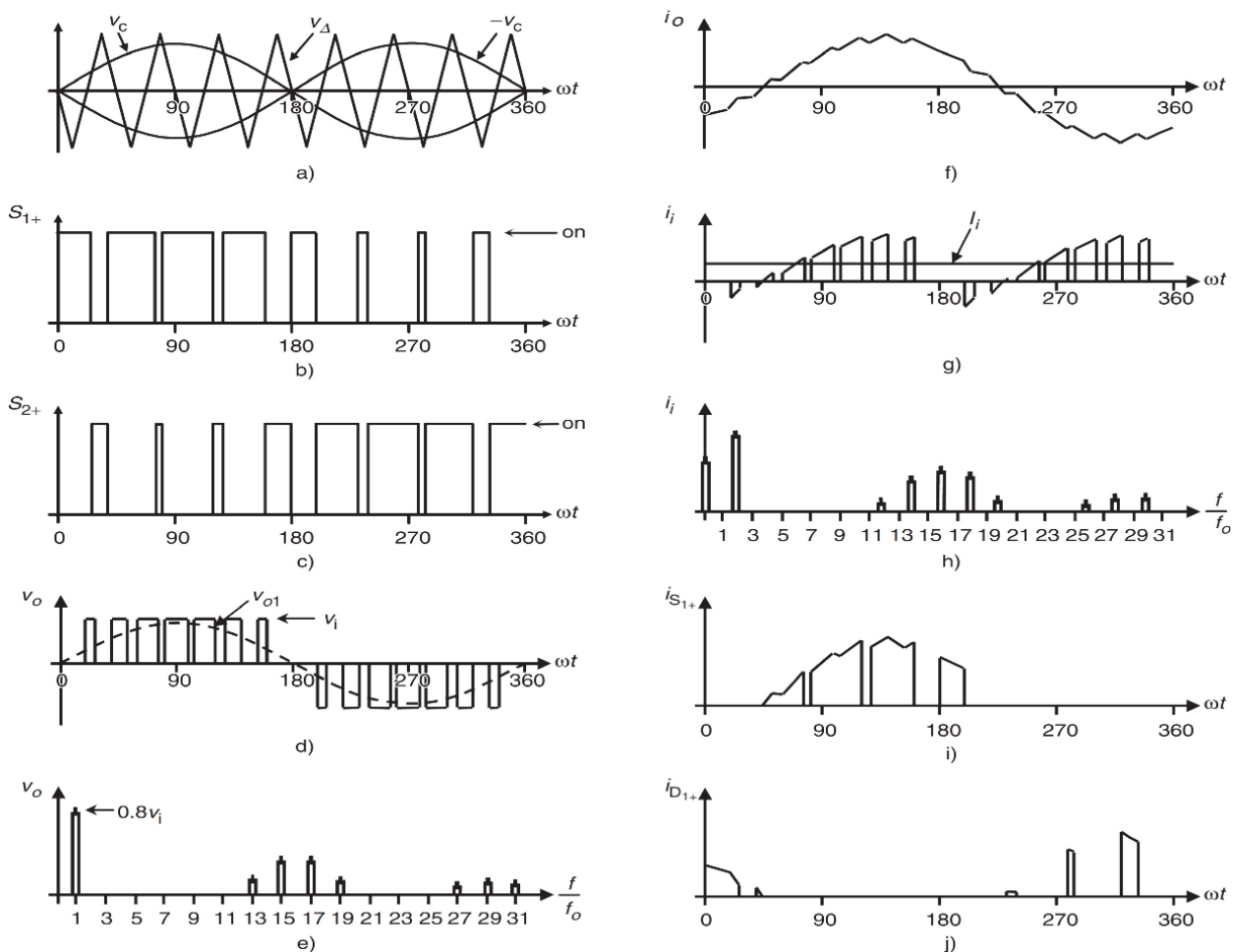
Kadangi VSI išėjimo signalas yra impulsinis, apkrova apart aktyviosios varžos turi turėti ir atitinkamo dydžio induktyvumą. Dėl to tarp inverterio išėjimo ir apkrovos papildomai įterpiama induktyviojo pobūdžio apkrova, pakeičianti laiptuotos įtampos formą tolydine sinusoide.

Vienfaziai VSI gali būti dviejų topologijų: pusės ir pilno tiltelio. Šių topologijų inverteriai naudojami nedidelės galios maitinimo šaltiniuose, vienfaziuose nepertraukiamo maitinimo šaltiniuose ir įvairiuose keitikliuose.

Nešlio signalu pagrįsto signalo formavimo metodas plačiai taikomas daugiafaziuose inverteriuose. Pagrindinis tokios topologijos pranašumas tai paprasta jo konfigūracija. Kitaip nei naudojantis erdvinių vektorių metodu, nereikia nustatinėti sektorių, sudaryti įjungimo laiko, tuščiosios eigos apskaičiavimo ir raktų padėties perjungimo tvarkos lentelių.

Siekiant padidinti įtampą išėjime, naudojant nešančiojo dažnio moduliaciją į sinusoidės formos pagrindinį signalą papildomai gali būti įterpiama n -tosios eilės harmonika [20]. Toks metodas gali būti taikomas tik nelyginių fazių sistemoms su apkrovomis sujungtomis žvaigžde ir izoliuota neutrале. Trifazėje sistemoje trečiosios harmonikos amplitudė atitinka $1/6$ pagrindinio signalo amplitudės. Dėl to trečiosios harmonikos įterpimas į pagrindinį signalą leidžia padidinti įtampos amplitudę 15,5 % .

Nešlio dažnio signalu pagrįsto sinusoidės formavimo metodas pateikiamas (1.7 pav.) čia a) nešlio ir moduliacijos signalai, b) jungiklio S_1 būseną, c) jungiklio S_2 būseną, d) išėjimo įtampa, e) išėjimo įtampos spektras, f) srovė išėjime, g) nuolatinės įtampos šaltinio srovė, h) nuolatinės srovės spektras, i) rakto S_1 srovė, j) diodo D_1 srovė



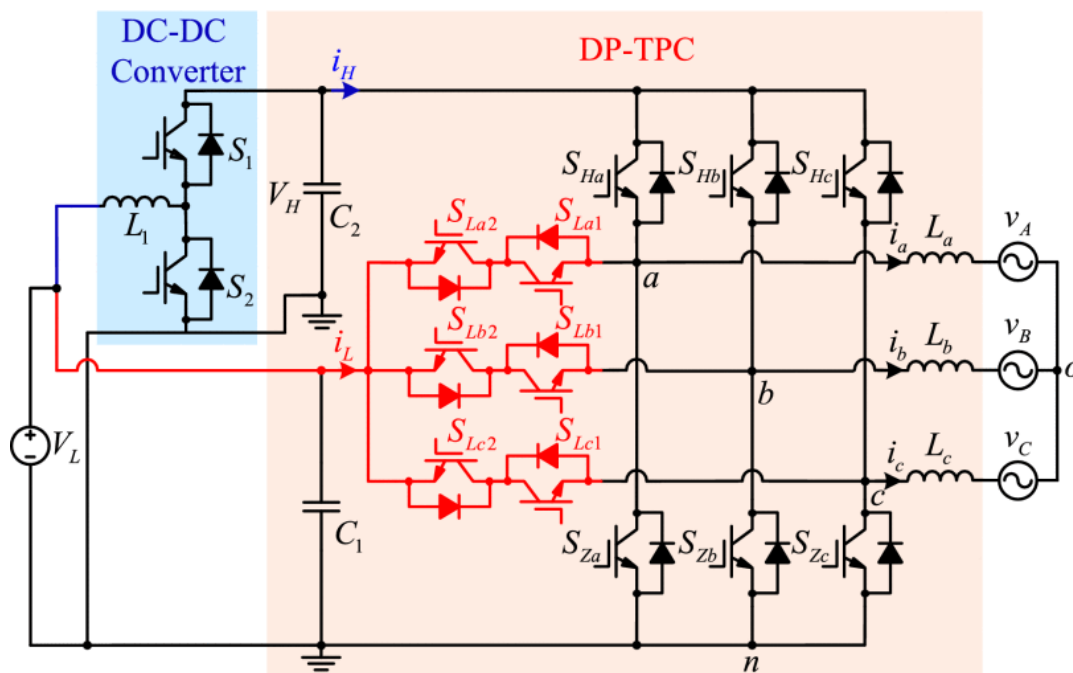
1.7 pav. Nešlio dažniu pagrįstas PWM moduliacijos būdas [20].

Dvikrypčiai DC-AC keitikliai

Kadangi mikrotinklo sistemoje naudojami trys vienfaziai inverteriai, jų veikimą paprasčiau paaiškinti remiantis trifazio dvikrypčio keitiklio modeliu. Dvikrypčiai trifaziai nuolatinės srovės keitikliai atlieka svarbų vaidmenį, siekiant užtikrinti nepertraukiamą maitinimą elektrinėse transporto priemonėse, atsinaujinančių energijos šaltinių tinklų integravime, energijos kaupimo sistemose [12]. Kalbant apie galios srautą nuo nuolatinės srovės iki AC, trifazių inverterių žeminančiojo tipo keitikliai buvo populiariausi dėl savo paprastos topologijos, didelio efektyvumo, lanksčios moduliacijos ir kontrolės strategijos. Tačiau dažniausiai naudojamuose sistemose kintamosios įtampos amplitudė būna net kelis kartus didesnė nei nuolatinės, pavyzdžiui mikrotinklų energijos kaupimo sistemoms akumuliatorių įkrovimas/iškrovimas. Norint prisitaikyti prie plataus nuolatinės srovės įtampos diapazono, tenka naudoti kitokį dviejų pakopų DC-AC keitiklį su integruotu nuolatinės srovės keitikliu.

Dvikryptis AC-DC/DC-AC keitiklis su integruotu nuolatinės srovės keitikliu parodytas (1.8 pav.). Šiame keitiklyje naudojamas DP-TPC, atsakingas už dvikryptę nuolatinės srovės konversiją. Matyti, kad dvigubos nuolatinės srovės iš žemos ir aukštos įtampos atšakų vienu metu teka į DP-TPC. Žemosios įtampos DC atšaka yra tiesiogiai prijungta prie akumuliatoriaus, o aukštosios įtampos DC atšaka yra prijungta prie tarpinio tranzistoriaus. Akivaizdu, kad DP-TPC sukuria naują galios srauto atšaką tarp akumuliatoriaus ir kintamosios srovės tinklo, įvedant dvikryptį jungiklį. Dvikryptis jungiklis formuojamas nuosekliai sujungus du bipoliarinius tranzistorius su izoliuotą užtūra (IGBT).

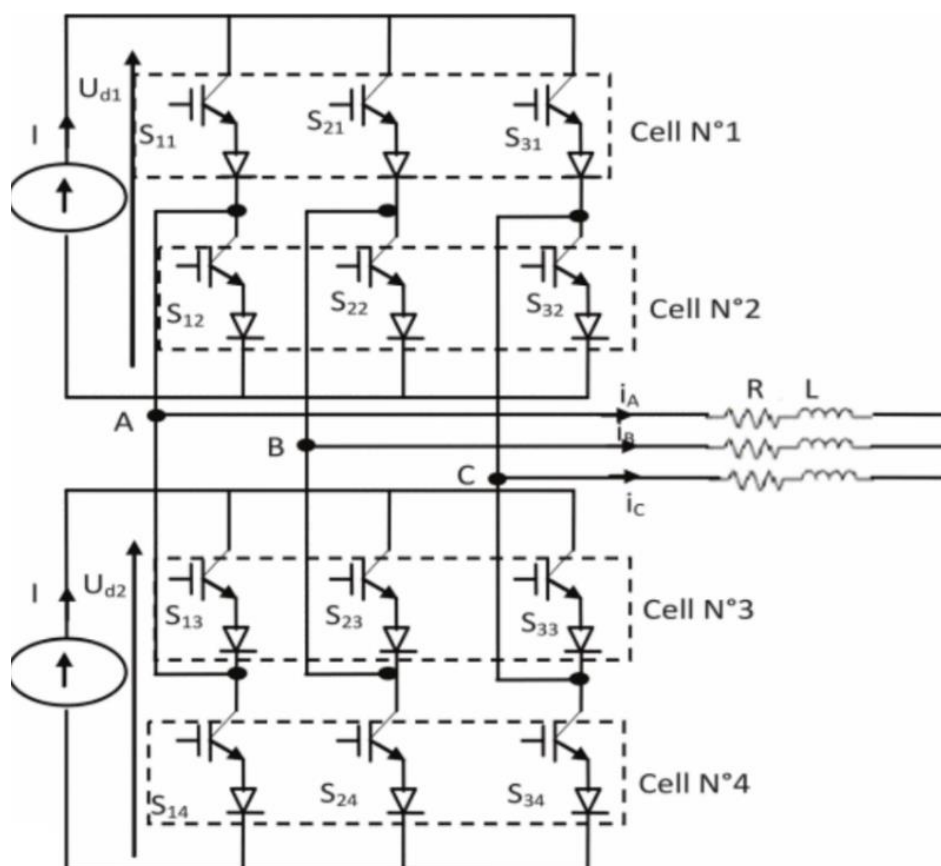
Taigi, dalis energijos gali būti tiesiogiai tiekama iš akumulatoriaus į kintamąjį tinklą be apdoroto įterptinio nuolatinės srovės keitiklio ir atvirkščiai.[15]



1.8 pav. Dvikryptis DC-AC AC-DC keitiklis su DP-TPC .[15]

Toliau bus aprašomas mikrotinklo sistemoje veikiančio trifazio inverterio veikimo principas. Šis inverteris skirtas saulės elektrinės DC įtampai keisti į trifazės sistemos AC įtampą. Šiame keitiklyje taip pat yra integruota maksimalios galios taško sekimo sistema ir harmoninės kompensacijos sistema. Kadangi trifaziai keitikliai įprastai projektuojami didesnės galios lyginant su vienfaziais inverteriais, dažniausiai yra naudojami daugiapakopiai keitikliai.

Palyginti su dviejų lygių keitikliais, daugiapakopiai keitikliai yra kur kas pranašesni ten kur reikalinga didesnė galia. Daugiapakopiuose keitikliuose gaunami mažesni harmoniniai iškraipymai, nes lyginant su dviejų lygių keitikliais sumažėja perjungimo įrenginio įtampa ir srovės įtempiai. Iki šiol daugiapakopių įtampos šaltinių inverteriai buvo dominuojanti daugiapakopė topologija dėl stabilesnių eksploataavimo sąlygų. Daugiapakopiai keitikliai turi tiesioginį išėjimo srovės valdymą, greitesnį dinaminį atsakymą tam tikromis aplinkybėmis, tuo tarpu ir lengvesnį gedimų valdymą.[14]



1.9 pav. Trijų fazių penkių lygių DC-AC keitiklio struktūra [14]

1.1 lentelė. Trijų fazių daugiapakopio keitiklio raktų apibrėžtys [14]

Raktų kombinacijos	Amplitudinė reikšmė
$S_{k1} S_{k4}$ arba $S_{k3} S_{k2}$ arba $S_{k1} S_{k2}$ arba $S_{k3} S_{k4}$	0
S_{k1} arba S_{k3} arba $S_{k1} S_{k3}$ arba S_{k4} arba $S_{k3} S_{k1}$ arba S_{k2} arba $S_{k1} S_{k3}$	I
S_{k2} arba S_{k4} arba $S_{k2} S_{k3}$ arba $S_{k4} S_{k1}$ arba S_{k2}	2I
$S_{k2} S_{k4}$	-I
-	-2I

S_{ki} - kontroliuojamas signalas puslaidininkiiui; i - elektroninio rakto numeris (1, 2,3 arba 4); $k = (1,2$ arba 3) fazės numeris. Bet kuriuo momentu veikia tik vienas jungiklis viršutinėje tiltelio pusėje ir vienas jungiklis apatinėje tilto pusėje. Tam, kad išvengti trumpojo jungimo raktų komutacijos metu keitiklyje turi būti užtikrinamas laisvosios eigos kelias.

1.5. Pagrindinės tinklo iškraipymų mažinimo priemonės

Remiantis standartais, tokiais kaip VDE-AR-N 4105 ir IEEE-1547, kuriuose nurodytos harmonikų vertės (1.2 lentelė), kurias gali skleisti generavimo šaltiniai, galima teigti, kad generuojama elektros energija neprivalo būti idealios sinusoidės formos, tai leidžia daryti prielaidą, kad įvedus tam tikro aukštesniojo laipsnio harmonikas, kurios neišeina iš leistinų ribų, galima optimaliai pagerinti ir kitus tinklo kokybės parametrus, tokius kaip įtampos lygiai ar galios koeficientas

1.2 lentelė. Harmoninių srovių ribos generavimo šaltiniams [42]

Harmonikos Nr.	Dažnis	Riba
n	Hz	% nuo pagrindinės (50Hz) harmonikos
Nelyginės harmonikos		
$3 \leq n \leq 9$	150–450	4
$11 \leq n \leq 15$	550–750	2
$17 \leq n \leq 21$	850–1050	1,5
$23 \leq n \leq 33$	1150–1650	0,6
$35 \leq n \leq 39$	1750–1950	0,3
Lyginės harmonikos		
$2 \leq n \leq 10$	100–500	1,0
$12 \leq n \leq 16$	600–800	0,5
$18 \leq n \leq 22$	900–1100	0,375
$24 \leq n \leq 34$	1200–1700	0,15
$36 \leq n \leq 40$	1800–2000	0,0075

Tinkle naudojant energijos keitiklius su neteisinais elementais dėl impulso pločio moduliacijos sistemoje įvedami papildomi harmoniniai iškraipymai. Tokie iškraipymai gali privesti ir prie kitų sistemos parametrų iškraipymų, pavyzdžiui dėl harmoninių iškraipymų sistemoje iškraipoma ir sistemos įtampa įrenginiuose, tokiuose kaip transformatoriai, galios koeficiento korekcijos kondensatoriai, automatikos įtaisai. Taip pat šie iškraipymai gali daryti neigiamą įtaką ir kitų sistemoje esančių keitiklių valdymo sistemoms. 1.3 lentelėje pateikiamos pagrindinės tinklo iškraipymo mažinimo priemonės.

1.3 lentelė. Pagrindinės tinklo iškraipymų mažinimo priemonės

Priemonės	Tikslas	Trūkumai
Leistinojo trumpojo jungimo dydžio padidinimas	Tinklo įtampos svyravimo sinusoidės iškraipymo sumažinimas	Pakyla įrengimo kaina, padidėja trumpo jungimo srovės
Harmoninių LC kompensatorių įvedimas į schemą	Postūmio koeficiento pagerinimas, tinklo įtampos kreivės sumažinimas	Kainos padidėjimas
Srovę ribojančio reaktoriaus arba keitiklio transformatoriaus induktyvios sklaidos padidinimas	Tinklo iškraipymo sumažinimas, trumpo jungimo srovės sumažinimas	Reaktyvios galios komutacijos padidėjimas; apkrovimo charakteristikos pa- svirimo padidėjimas
Nešlio dažnio padidinimas	Aukštųjų harmonikų sumažinimas	Išauga keitiklio kaina
Sutampantis arba priešpriešinis dviejų valdomų keitiklių pajungimas	Pareikalaujamos reaktyvios galios pagal pirmą harmoniką sumažinimas	Padidėjęs aukštųjų harmonikų kiekis srovėje kuri naudojama iš tinklo
Lygiagrečiai kompensuojančių kondensatorių įjungimas	Postūmio koeficiento pagerinimas, įtampos pasikeitimo sumažinimas	Aukšta kaina, pavojus rezonanso atsiradimui tinkle, esant atitinkamam dažniui

1.6. LC filtrai

LC Filtras naudojamas įvairiuose energijos keitikliuose. Jo paskirtis yra sudaryti slopinimo ir pralaidumo juostas atitinkamiems dažniams [37]. Filtrą sudaro induktyviniai ir talpiniai elementai, todėl prie skirtingo dažnio, elektrinės charakteristikos yra skirtingos. Kadangi signalai nepatenkantys į nufiltravimo diapazoną turi pakisti minimaliai, induktyviosios apkrovos ir kondensatoriai turi būti projektuojami taip, kad visų dažnių signalai būtų slopinami su mažiausiais nuostoliais.

Tarp pralaidumo juostos, kur slopinimas idealiai lygus nuliui ir juostos kurioje slopinimas teoriškai įgyja begalinę reikšmę, yra ribinis dažnis. Ribiniame dažnyje slopinimas iš minimalaus pasikeičia į vertę, kuri priklauso nuo pačio filtro darbo charakteristikos. Filtrai gali būti skirstomi į aktyviusius, kurie naudoja papildomą energijos šaltinį ir pasyviuosius, kurie yra be papildomo išorinio maitinimo. Pasyviųjų šaltinių trūkumas tas, kad jie lyginant su aktyviuoju ženkliai stipriau slopina ir pagrindinį signalą. Pagal paskirtį aktyviųjų ir pasyviųjų filtrų rūšys yra keturios: žemų dažnių, aukštų dažnių, juostinis ir juostinis užtvarinis. Kadangi inverteriuose reikia nufiltruoti nešančio dažnio harmonikas, kurios šiuolaikiniuose galios keitikliuose gali siekti iki keliasdešimt kilohercų, o išėjime gauti kuo didesnės amplitudės 50Hz pirmosios harmonikos signalą, inverteriuose yra naudojami žemų dažnių filtrai.

Taigi žinant ribinį dažnį filtrų parinkimas gali būti atliekamas naudojantis formulėmis:

$$L = \frac{R_0}{\pi f_c}; \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{\pi R_0 f_c}; \quad (5)$$

čia L – induktyvumas; C – talpumas; R_0 – aktyvioji varža; f_c –ribinis dažnis.

Parenkant inverterių filtrus turi būti įvertinamas ir keitiklio našlio dažnis, vardinė srovė, vardinė įtampa, tokių filtrų optimaliam parinkimui yra sukurti filtrų parinkimo matematiniai algoritmai, pavyzdys pateikiamas žemiau.

LC filtrų parinkimo algoritmas [25]

```
clc;
k=1;% Moduliacijos indeksas
f1=50;%Tinklo dažnis.
fs=2000;% Nešlio dažnis.
vo=400/sqrt(3); %Fazine įtampa
voh_avg=4; %%0.02*400/sqrt(3); %Harmoninė įtampa
io=7,5; %Vardinė srovė
Vdc=450; % dc įtampa
a=k^2;
b=(15/4)*k^4;
c=(64/(5*pi))*k^5;
d=(5/4)*k^6;
ke=sqrt((a-b+c-d)/1440);
aa=ke*(Vdc/voh_avg);
bb=vo/(io*fs);
cc=f1/fs;
Lf=bb*sqrt(aa*(1+4*pi^2*cc^2*aa))
Cf=ke*Vdc/(Lf*fs^2*voh_avg)
```

1.7. Simetrinių dedamųjų metodas.

Dėl vienfazių vartotojų tinkle atskirose fazėse galimas įtampos kritimas, esant nevienodiems įtampos lygiams gaunama tinklo asimetrija. Darbe bus nagrinėjami vienfaziai keitikliai su vienfazėmis apkrovomis be srovės kompensavimo įrenginių, dėl to svarbu įvertinti sistemos asimetriją. Tinklo asimetrijai skaičiuoti priklausomai nuo įtampos dydžių atskirose fazėse naudojamas fazinių simetrinių dedamųjų metodas, pagal kurį išskaičiuojamas tinklo asimetrijos koeficientas k %.

Fazinių įtampų sistemą, naudojant simetrinių dedamųjų metodą, galima išskaidyti į tris simetrines dedamąsias:[36]

Tiesioginės sekos dedamoji:

$$U_1 = \frac{U_A + a^2 U_B + a U_C}{3}; \quad (6)$$

Atvirkštinės sekos dedamoji

$$U_2 = \frac{U_A + a U_B + a^2 U_C}{3}; \quad (7)$$

Nulinės sekos dedamoji

$$U_0 = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}. \quad (8)$$

Trifazio tinklo asimetrijos koeficientas %

$$k = \frac{U_2}{U_1}; \quad (9)$$

čia U_A – pirmos fazės įtampa; U_B – antros fazės įtampa; U_C – trečios fazės įtampa; a – fazės poslinkio kampas .

2. Mikrotinklo modelio sudarymas

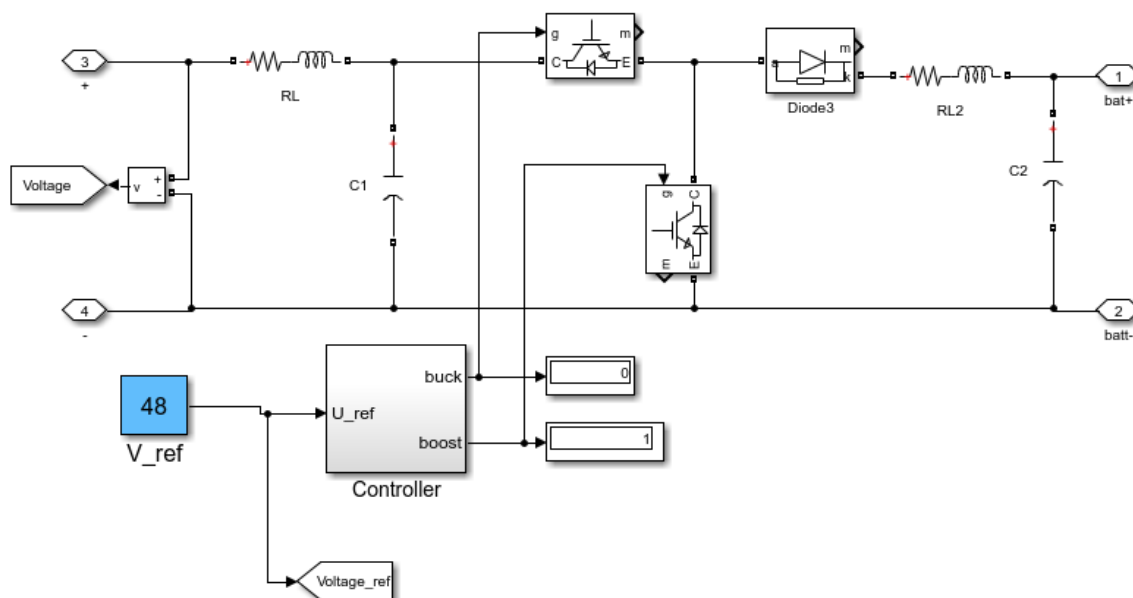
Šioje dalyje bus aprašomi projektinės sistemos įrenginių parametrai ir modeliavimo metodika MATLAB/SIMULINK programoje. Sudarinėjant modelius, gautos charakteristikos lyginamos su gamintojo nurodytomis charakteristikomis. Modeliuojamos atskiros sistemos dalys apjungiamos į blokus, vėliau blokai apjungiami į mikrotinklo sistemą.

2.1. Baterijų ir įkroviklio modeliavimas

Tarp daugelio akumuliatorių įkrovimo modeliavimo strategijų ir metodų, pagrindinė jų dalis yra susijusi su įkrovimu, esant nepastoviai srovei ir įtampai. Siekiant maksimaliai panaudoti generuojamą energiją turi būti tinkamai reguliuojama įkrovimo srovė ir įtampa. Tinkamas baterijos įkrovimas leidžia išvengti neleistinų srovių, dėl kurių baterijos gali būti perkaitintos. Įkroviklio modelis pateiktas (2.1 pav.) kroviklio sistemoje yra kontroliuojama išėjimo įtampa, kuri yra tiesiogiai susijusi su įkrovimo srove. Įtampos priklausomybė nuo baterijos SOC pateikta (2.2 pav.) . modeliuojamų baterijų ir įkroviklio parametrai pateikiami (2.1 lentelė ir 2.2 lentelė)

Įkroviklį sudarantys pagrindiniai elementai yra :

- IGBT -tranzistoriai, kurie yra valdomi kontrolerio
- Kontroleris – matuoja įėjimo, išėjimo įtampas, lygina jas su nominaliąja. Pagal įtampų santykius formuojamas signalo ilgis siunčiamas tranzistoriams.
- RLC filtras – sumažina pulsacijas .
- Diodas – sumažina atgalinių srovių lygį tranzistoriuose ir harmonikas tinklui.



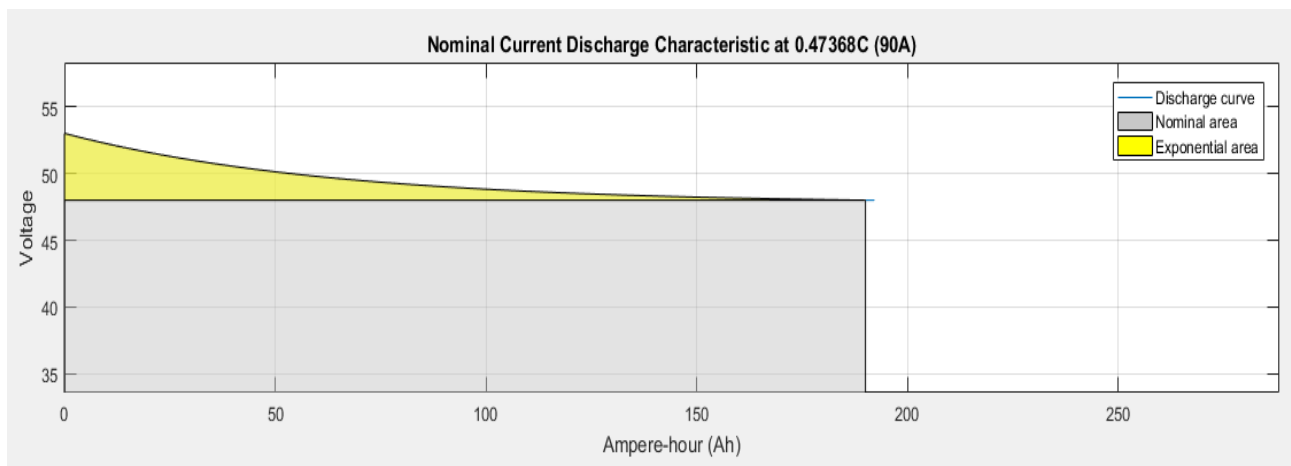
2.1 pav. DC-DC keitiklio - įkroviklio MATLAB/SIMULINK modelis

2.1 lentelė. Pagrindiniai baterijų parametrai

Baterijų tipas	Švino-rūgštis
Minimali įtampa (cut-off voltage)	1,85 V
Vardinė įtampa	2V
Pilnai įkrautos baterijos įtampa	2,2 V
Vardinė išsikrovimo srovė	90 A
Vidinė varža	0,05 ohm
Talpumas	190 Ah

2.2 lentelė. Generator Charge Controller SF20-48 parametrai

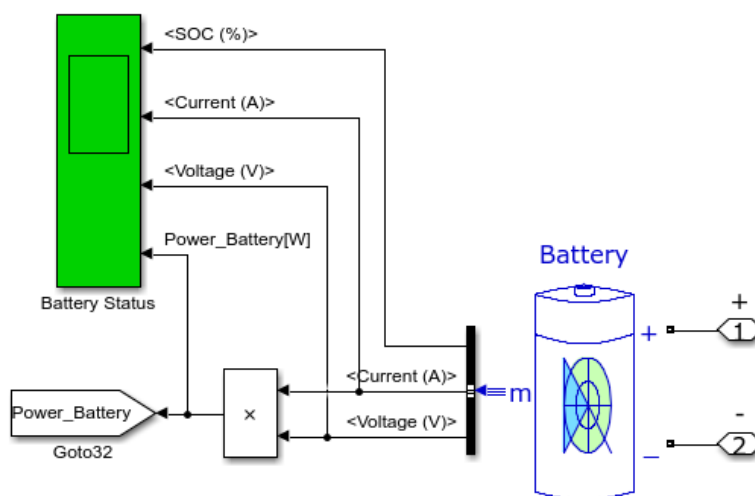
Įėjimas	DC
Maksimali galia	2400W
MPP skaičius	1
Srovės kontrolė	Vidutinė kas 2 minutes, Momentinė kas 2sekundes
Išėjimas į baterijas	DC
Vardinė galia	2400 W
Vardinė įtampa	48 V
Maksimali krovimo srovė	40 A



2.2 pav. Baterijų įtampos priklausomybės nuo talpumo MATLAB/SIMULINK charakteristika

MATLAB/SIMULINK elektronikos paketo SIMSCAPE bibliotekoje parenkamas baterijos blokas „battery“, kuriame, suvedus reikiamus parametrus, gauname analogišką baterijos modelį. Baterijos parametrai pateikiami (2.1 lentelė). Kadangi baterijų blokas yra vienas iš pagrindinių mikrotinklo elementų, baterijos būklei stebėti naudojamas oscilografas, kuriame stebimi baterijos parametrai: įtampa, įkrovimo ir išsikrovimo srovė, SOC ir galia tiesiogiai proporcinga srovės kryptčiai. Kadangi yra naudojamos 24 nuosekliai sujungtos baterijos, o modelyje blokas naudojamas kaip viena baterija,

(2.3 lentelė) dėl to įtampa yra perskaičiuojama pagal nuoseklaus baterijų jungimo dėsnį ir įvedama 48V nominali, 53V pilnai įkrautos, 44,4V minimali (cut-off) baterijų įtampos reikšmės.



2.3 pav. Baterijų MATLAB/SIMULINK modelis

2.2. Saulės elektrinių modeliavimas

MATLAB/SIMULINK elektronikos paketo SIMSCAPE bibliotekoje parenkamas blokas „PV panel“, kuriame, suvedus reikiamus parametrus, gauname analogišką saulės elektrinės modelį. Saulės panelės parametrai pateikiami (2.3 lentelė). Saulės elektrinės bloko struktūra pateikiama (2.4 lentelė).

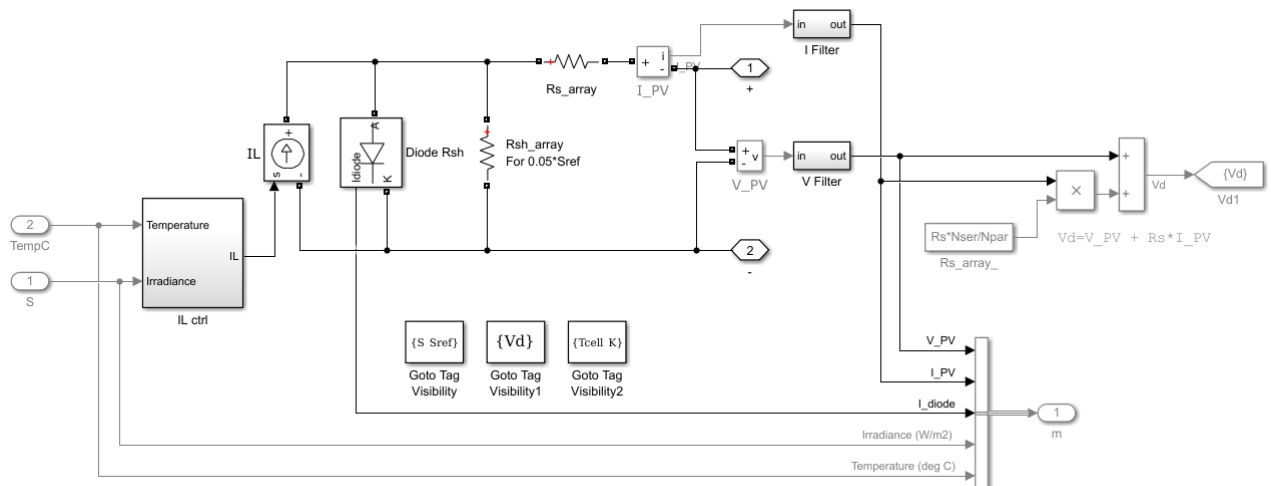
2.3 lentelė. Saulės panelės „Solitek Prime“ parametrai

Maksimali vieno modulio galia	250Wp
Įtampa esant atvirai grandinei	37,9 V
Maksimalios galios įtampa	30,70 V
Trumpo jungimo srovė	8,60 A
Maksimalios galios srovė	8,10 A
Modulio efektyvumas	15,08 %
Temperatūrinis koeficientas I_{sc}	0,05 %
Temperatūrinis koeficientas V_{oc}	0,34 %
Temperatūrinis koeficientas P_{max}	0,42 %

Saulės elektrinės bloką sudarantys pagrindiniai elementai yra :

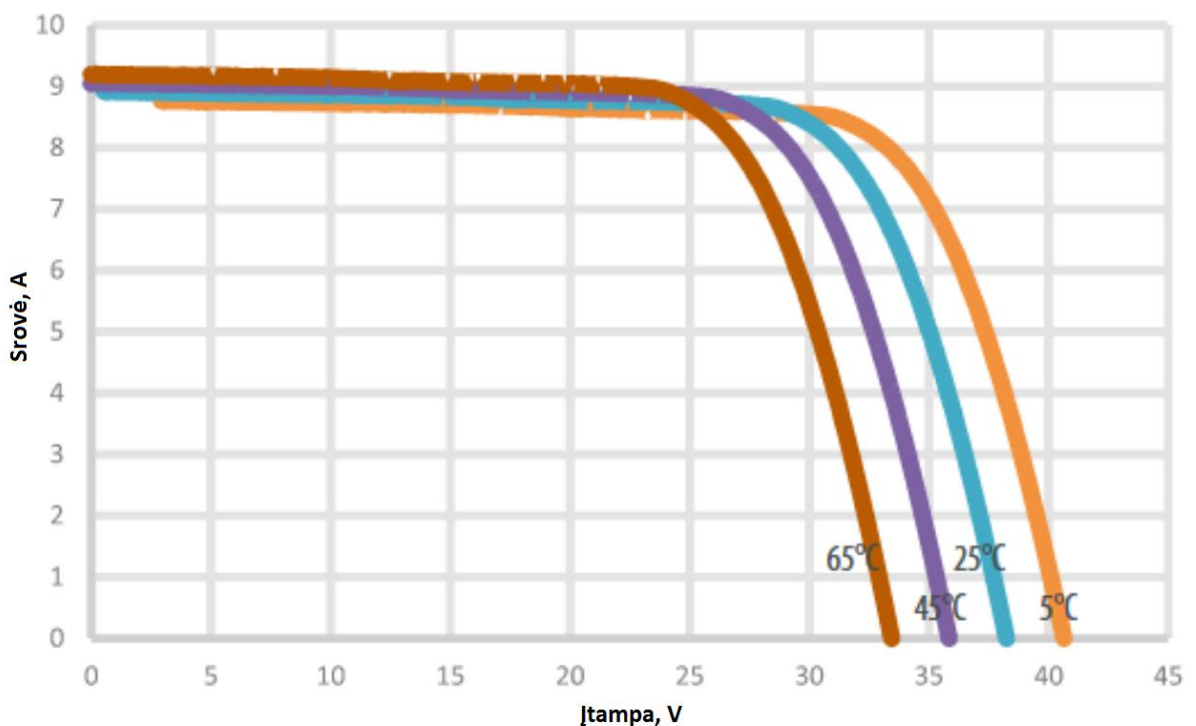
- srovės šaltinis
- informacijos blokas, skirtas formuoti signalą srovės šaltiniui priklausomai nuo nustatytos apšvietos ir temperatūros.
- diodas

- aktyvioji varža, imituojanti vidinę saulės modulio varžą

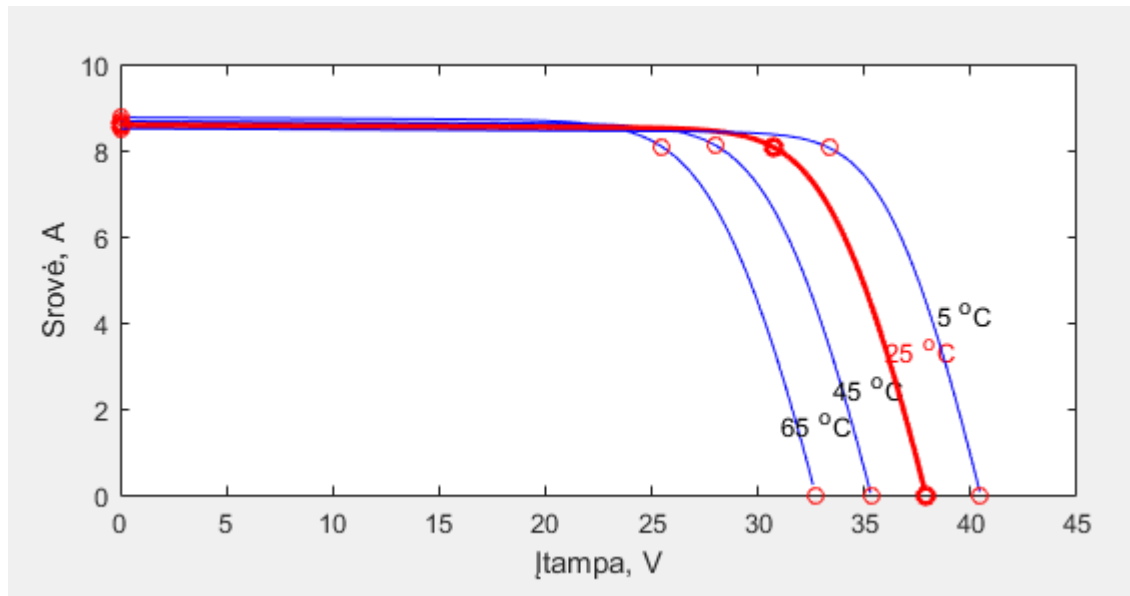


2.4 pav. Saulės elektrinės bloko struktūra.

Modeliuojamos saulės elektrinės vieno modulio voltamperinė charakteristika (2.5 pav.) yra palyginama su gamintojo pateikiama voltamperine charakteristika (2.6 pav.). Charakteristikose pateikiamos kreivės prie skirtingų temperatūrų. Matoma, kad didesnė galia yra gaunama prie žemesnės modulio temperatūros. Galima teigti, kad MATLAB modelis atitinka gamintojo pateikiamą saulės elemento voltamperinę charakteristiką. Atliekant modelį bus priimamos idealios saulės panelės apšvietimo sąlygos, neįvertinant panelės užterštumo ir saulės spindulių kritimo kampo.

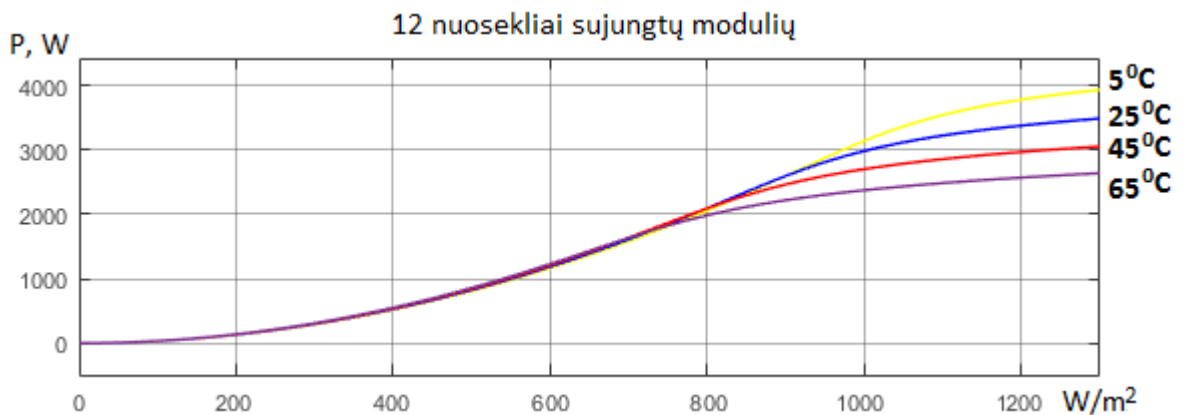


2.5 pav. Gamintojo pateikiama Solitek 240-250 voltamperinė charakteristika [39]

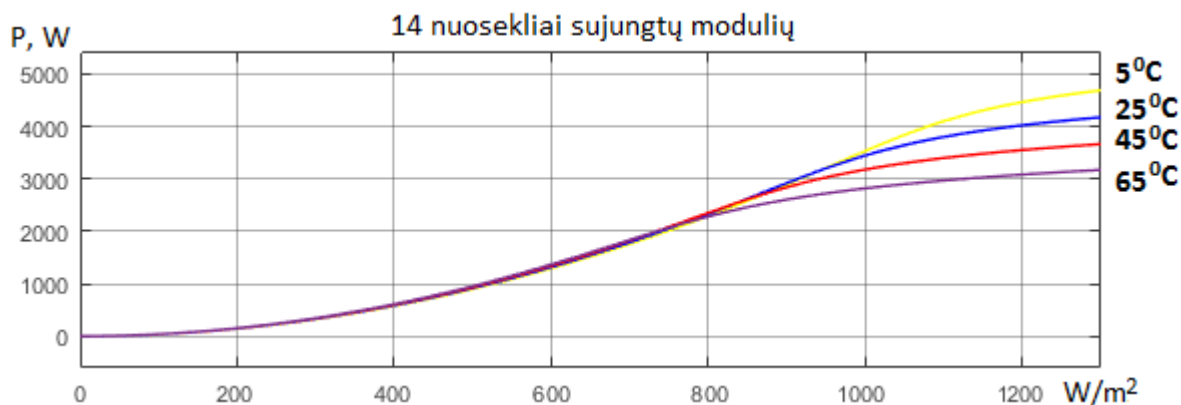


2.6 pav. MATLAB/SIMULINK sistemoje gauta voltamperinė charakteristika

Darbe modeliuojamos dvi elektrinės: pasukama, kuri maksimaliai išnaudoja saulės energiją paros bėgyje ir stacionari. Stacionarioji elektrinė tam tikru paros metu lieka šešėlyje. Pasukamoje naudojama 14 nuosekliai sujungtų saulės elementų, stacionarioje 12 nuosekliai sujungtų saulės elementų. Analizuodami elektrinių charakteristikas (2.7 pav. ir 2.8 pav.) matome, kad elektrinių galia yra proporcingos apšvietai. Stacionariosios elektrinės maksimali galia, esant 1000 W/m^2 , maksimali galia yra apie 3000 W , o pasukamosios - atitinkamai 3500 W . Pagal voltamperinę charakteristiką (2.9 pav.) matome, kad srovė yra pastovus dydis, tai parodo, kad saulės modulis yra srovės šaltinis.

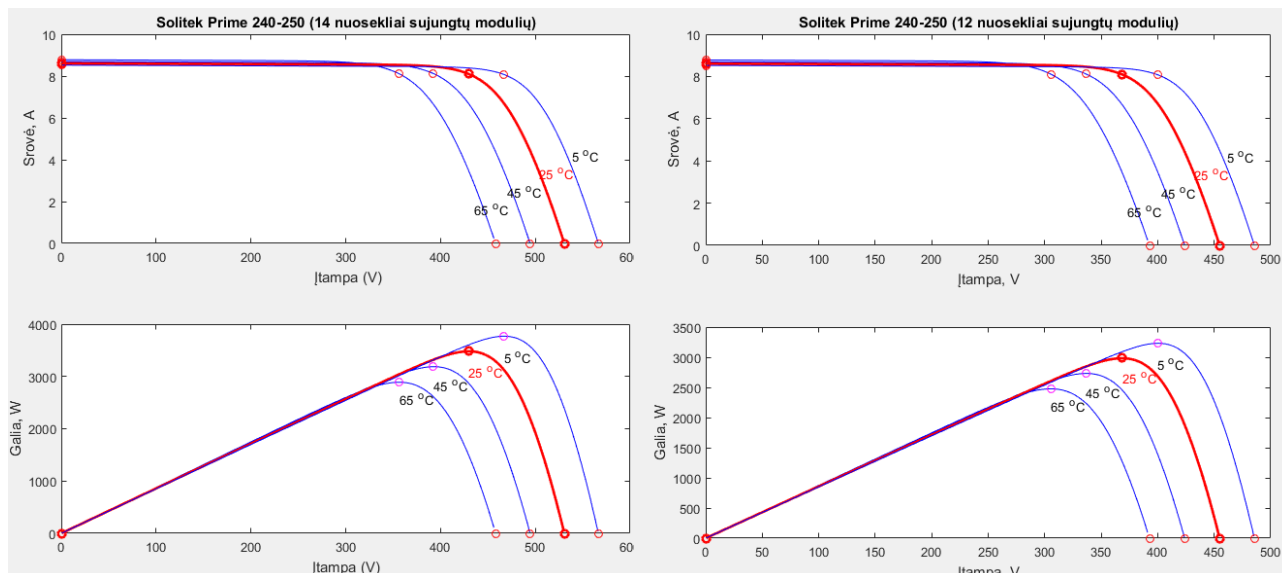


2.7 pav. Stacionariosios elektrinės galios charakteristika MATLAB modelyje



2.8 pav. Pasukamosios elektrinės galios charakteristika MATLAB modelyje

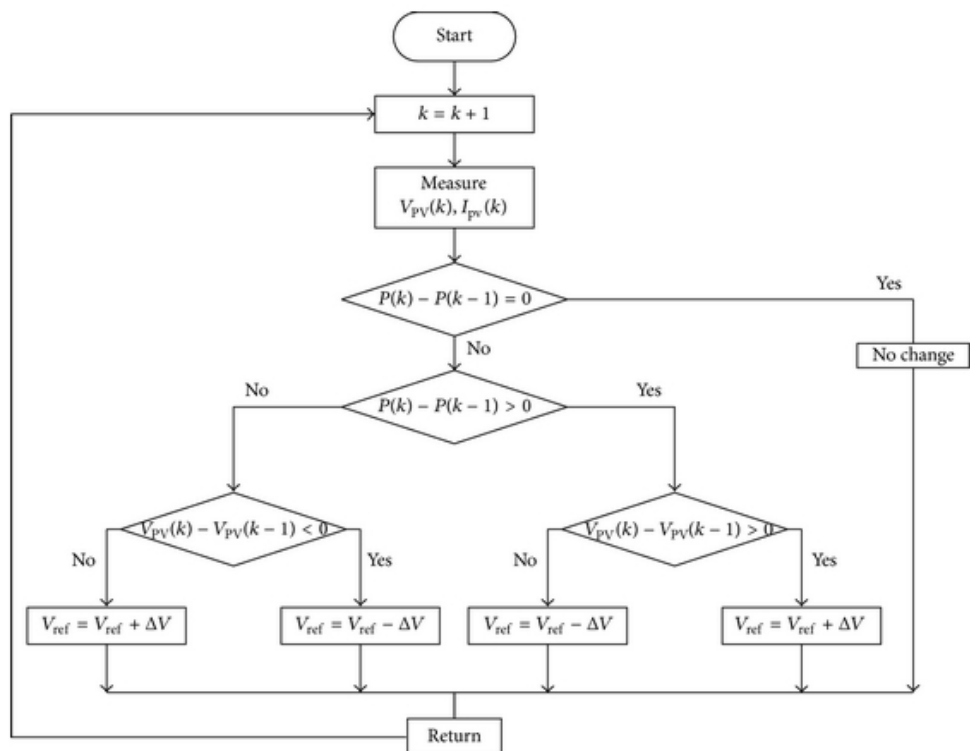
Pastebima, kad saulės panelės temperatūrai keičiantis nuo 5 °C iki 65 °C maksimali galia, srovė ir įtampa atitinkamai mažėja apšvietai pasiekus apie 800 W/m². Kadangi didesnė nei 800 W/m² apšvieta realiomis sąlygomis būna retai, todėl atliekant mikrotinklo tyrimus visuose modeliuose bus priimama standartinė 25 °C panelės temperatūra.



2.9 pav. Stacionariosios ir pasukamosios elektrinių charakteristikos MATLAB modelyje

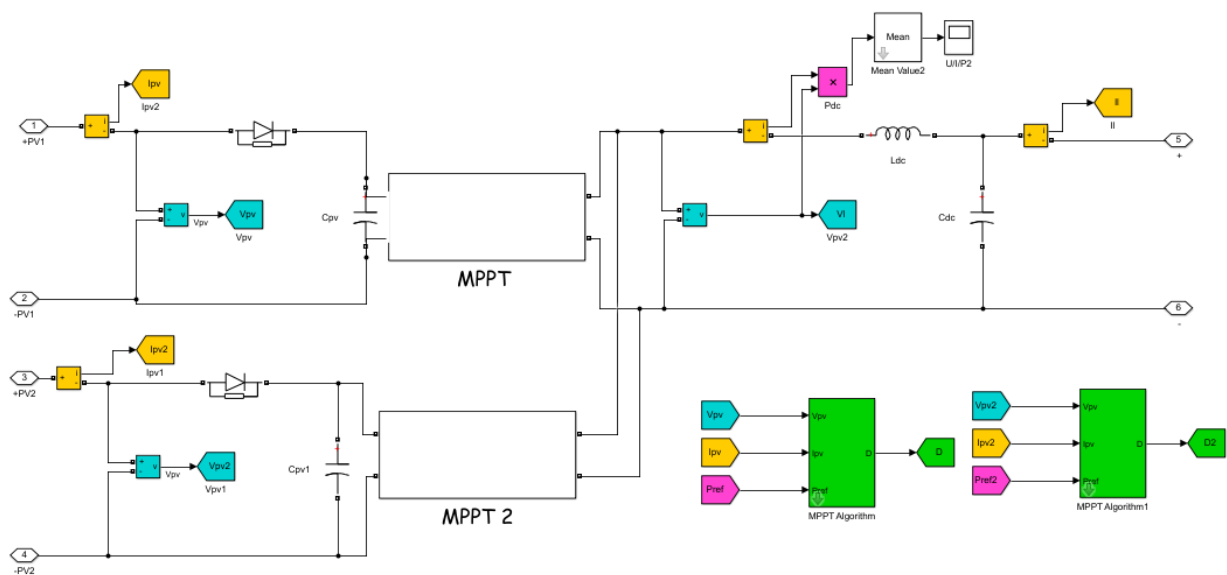
2.3. Trifazio inverterio modeliavimas

5 kW Trifazio inverterio prijungto prie PV sistemos schema pateikta (2.13 pav.). Šio inverterio paskirtis yra keisti DC įtampą į trifazę AC užtikrinant pagrindinius trifazio tinklo žemosios 0.4kV įtampos reikalavimus. Viduje esantis „VSC control“ sistemos modulis naudojamas matuoti išėjimo įtampą ir valdyti inverterio PWM įvestį. DC dalis apima filtravimo įrenginius ir maksimalios galios taško aptikimo modulį, kuriame yra naudojamas (P&O) algoritmas (2.10 pav.). Šis algoritmas skirtas formuoti signalą DC-DC aukštinčiajame (boost) keitiklyje esančio IGBT modulio valdymui

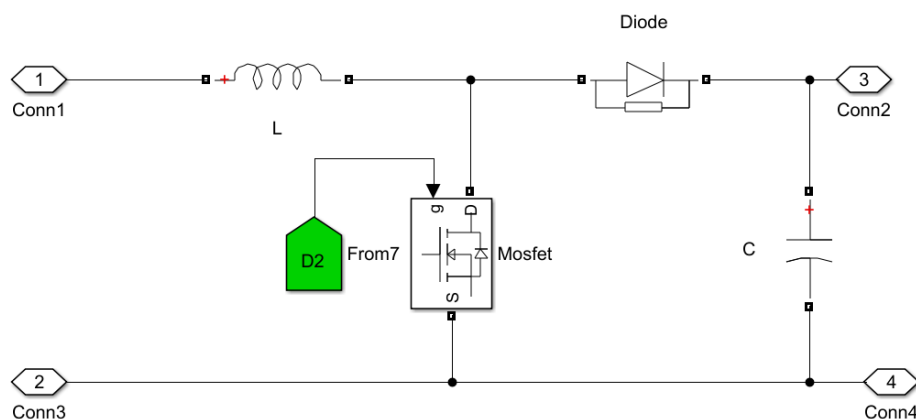


2.10 pav. P&O algoritmo struktūra [26]

DC-DC Boost topologija parodyta (2.12 pav.) sudaryta iš kondensatorių, induktyviosios ritės, MOSFET/diodų modulio ir diodo. Kadangi keitiklis turi 2 įvestis stacionariosios ir pasukamos saulės elektrinės, MPPT MATLAB bloke (2.11 pav.) naudojami 2 (P&O) algoritmai ir 2 DC-DC boost keitikliai. Šio bloko paskirtis yra maksimaliai išnaudoti saulės modulyje generuojamą energiją, esant skirtingiems generacijos režimams. Be to MPPT modulyje esant Boost keitiklis gali padidinti nuolatinės srovės DC išėjime amplitudinę įtampą ($V_{mpp} = 450 \text{ V}$) iki apytiksliai 600 V DC .



2.11 pav. MPPT blokas MATLAB/Simulink modelyje



2.12 pav. MPPT modulyje esanti įtampos valdymo schema

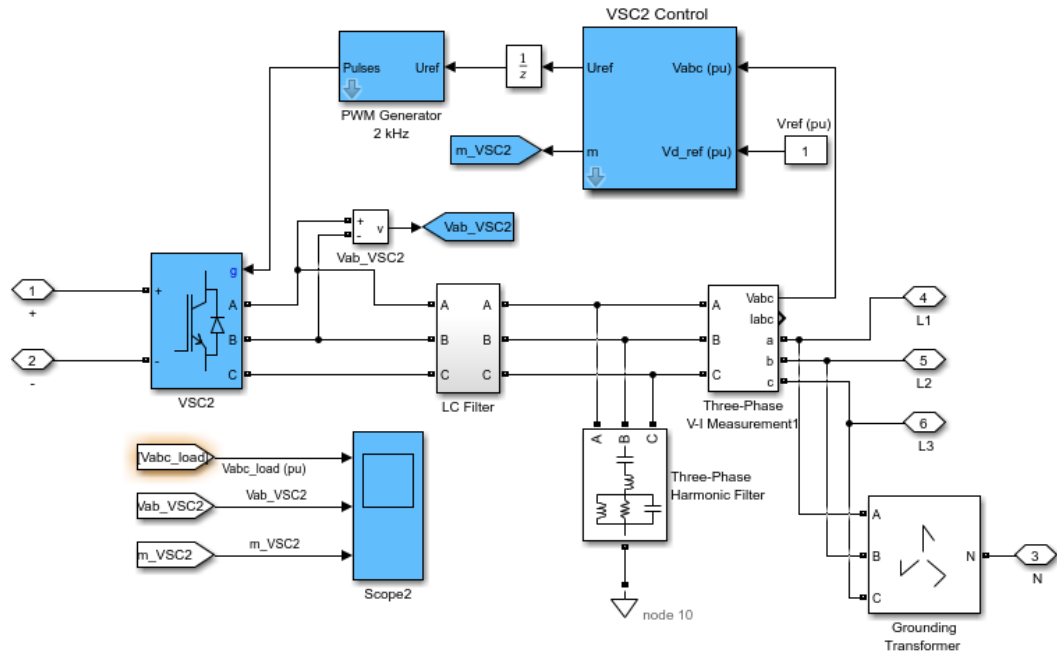
Pagrindinio trifazio keitiklio (2.13 pav.) konfigūracijos parametrai pateikiami (2.4 lentelė). Inverterį sudarantys pagrindiniai elementai yra:

- VSC (Voltage source converter), kurį sudaro 12 valdomų IGBT/diodų raktų .
- kontroleris – matuoja įėjimo, išėjimo įtampas, lygina jas su nominaliąja 400V (tarp fazių), kuri matavimo įrenginyje išreiškiama santykiniais vienetais. Pagal įtampų santykius formuojamas signalo ilgis, siunčiamas tranzistoriams.
- integravimo logika – įrenginys, kuris formuoja reikiamos reikšmės signalą tarp skirtingų blokų įėjimo ir išėjimo verčių, kurios yra išreiškiamos santykiniais vienetais.
- PWM generatorius – priklausomai nuo VSC kontrolerio paklaidos koeficiento signalo, formuojamas signalo ilgis IGBT moduliams formuojant sinusinę įtampą. Nešantysis dažnis 2000Hz.
- LC filtras – IGBT modulių išėjime formuojamai laiptuotai įtampos ir tuo pačiu srovės charakteristikai paversti tolydine sinusoide suteikiant talpumo ir induktyvumo.
- harmonikų kompensavimo filtras – kintamo talpumo ir induktyvumo ir aktyviosios varžos elementai, kompensuojantys reaktyviosios ir aktyviosios galios srautus.

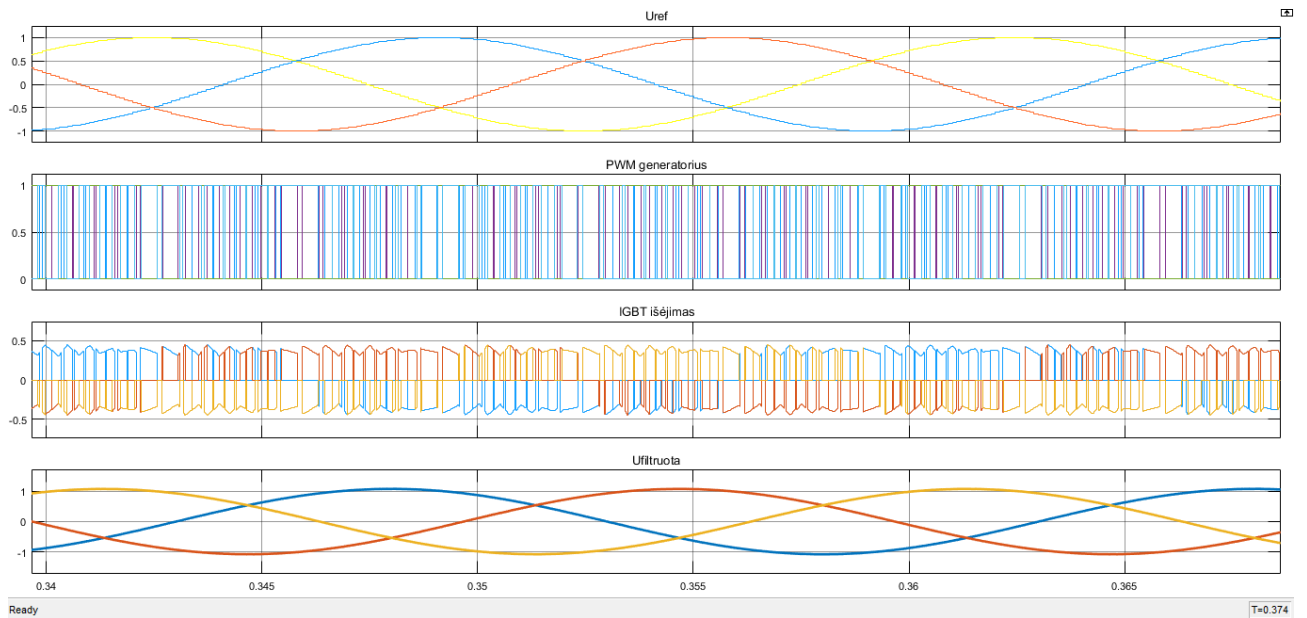
2.4 lentelė. Sunny Tripower 6000TL parametrai

Įėjimas DC	
Max. DC galia $\cos \varphi = 1$	6000W
Maksimali tampa	1000 V
MPP įtampos ribos	245 V ... 800 V / 580 V
Minimali įėjimo įtampa	150 V / 188 V
Maksimali vieno įėjimo srovė	11A
MPP įėjimų skaičius	2
Išėjimas AC	
Vardinė galia (230V; 50Hz)	6000 W
Maksimali pilnutinė galia	6000VA

Vardinės įtampos	3 / N / PE; 230 V / 400 V
AC įtampos ribos	160-280V
Maksimali srovė	7,3A
Maksimalus naudingumo koeficientas	98%



2.13 pav. Trifazio inverterio MATLAB/SIMULINK modelis



2.14 pav. Trifazio inverterio PWM oscilograma

2.4. Dvikrypčių vienfazių keitiklių trifazėje sistemoje modeliavimas

Modeliuojamoje sistemoje naudojami 3 vienfaziai inverteriai ir aukštinančiojo-žeminančiojo tipo DC-DC keitiklis, kurie imituoja dvikrypčio AC-DC DC-AC keitiklių Sunny iseland 6.0H topologija. Sistema yra valdoma jungikliais, priklausomai nuo įtampos vertės tinkle įjungiamas arba inverteris (kuomet dėl trūkstamos galios tinkle įtampa krenta atitinkamoje fazėje) arba lygintuvas (kuomet išauga įtampa, esant generacijai didesnei nei apkrova). Tokia logika sudaroma naudojant SIMSCAPE elementą „selector“, kuriame formuojama logika $U > U_{min}$, tai jungikliams siunčiamas loginis 0, priešingu atveju loginis 1. (2.21 pav.). Jungiklis, prijungiantis inverterį prie tinklo, yra normaliai atviroje pozicijoje. Kuomet įtampa yra $U = U_{min}$ jungiklis, gavęs loginio elemento 1 signalą tampa uždaras, taip tiekdamas energiją į tinklą. Lygintuvo valdomas jungiklis yra normaliai uždaras, todėl inverteriui, tiekiant elektros energiją į tinklą, lygintuvas nuo tinklo yra atjungiamas. Tokiu pačiu principu įtampai esant $U > U_{min}$, inverteris yra atjungiamas nuo tinklo ir baterijų, o lygintuvas prijungiamas. Modeliuojamojo vienfazio keitiklio parametrai pateikiami (2.5 lentelė)

2.5 lentelė. Sunny iseland 6.0H charakteristikos

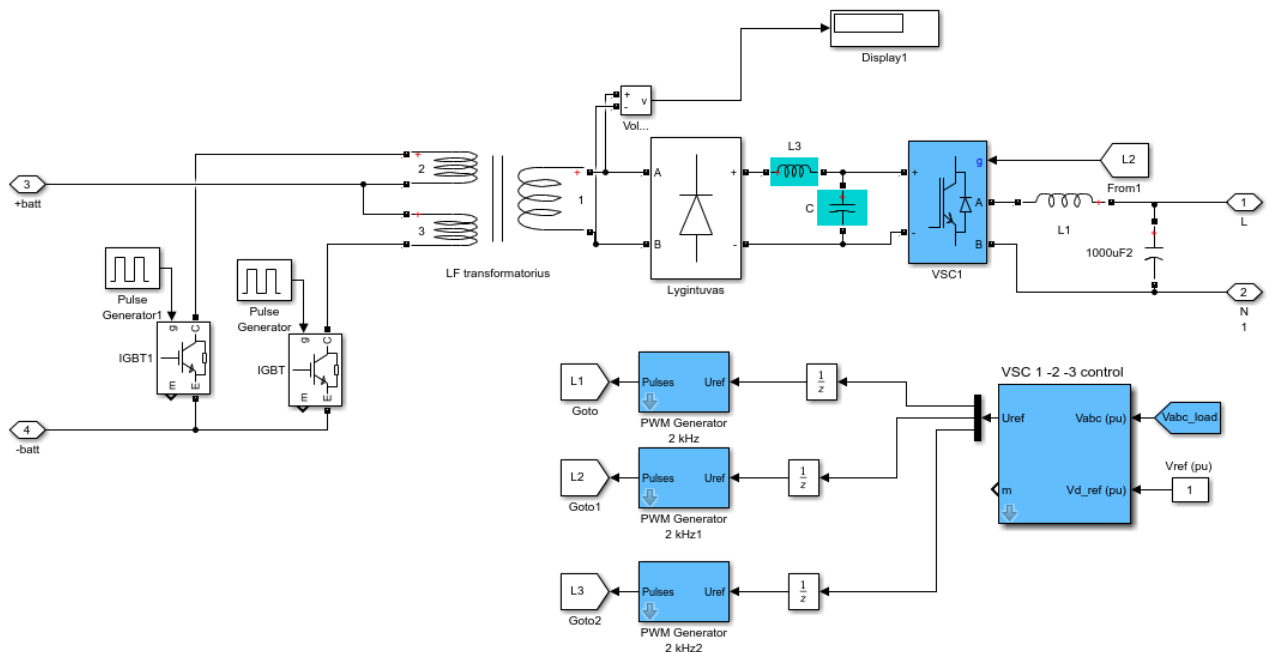
AC vardinė įtampa	230V (202...253V)
Nominali galia	6000 W
Nominali srovė	26-120A
THD	<4%
DC vardinė įtampa	48V (41-63V)
Maksimali baterijų įkrovimo srovė	140A
Vardinė įkrovimo/iškrovimo srovė	115/136A

Vienfazio inverterio blokas pavaizduotas (2.15 pav.). Kadangi naudojami 3 vienfaziai inverteriai atskirai kiekvienai fazei, dėl to VSC kontroleryje formuojamas signalas naudojantis „demux“ elementu yra išplečiamas į 3 dedamąsias. Kiekvienas signalas skirtas PWM generatoriui formuojamas taip, kad fazės būtų perstumiamos: pirmoji fazė -120° , 0° antra fazė ir $+120^{\circ}$ trečia fazė. Signalų perdavimui nesant fiziniai jungčiai tarp blokų naudojami elementai „Goto“ ir „From“.

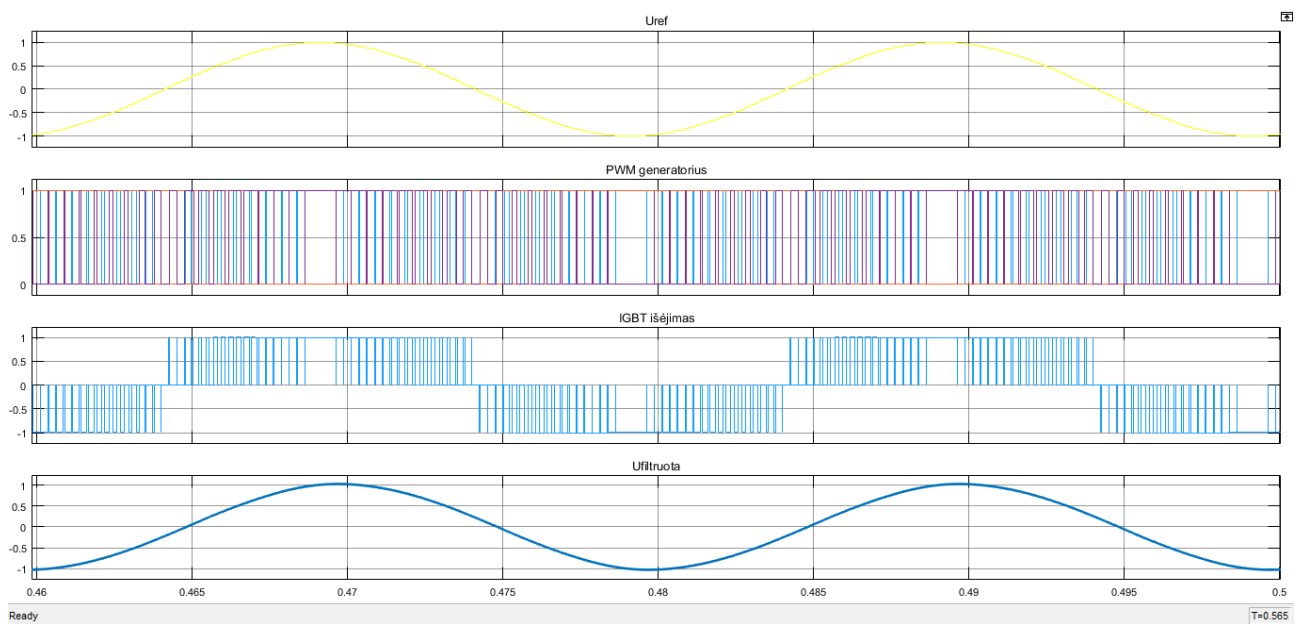
Vienfazio inverterio struktūrą sudarantys elementai :

- VSC (voltage source converter) - IGBT/diodų modulis, pilnos pulsacijos periodo su 4 valdomais raktais.
- kontroleris – matuoja įėjimo, išėjimo įtampas, lygina jas su nominaliąja 400V tarp fazių kuri matavimo įrenginyje išreiškiama santykiniais vienetais. Pagal įtampų santykius formuojamas signalo ilgis siunčiamas tranzistoriams.
- integravimo logika – įrenginys, kuris formuoja reikiamos reikšmės signalą tarp skirtingų blokų įėjimo ir išėjimo verčių, kurios yra išreiškiamos santykiniais vienetais.
- PWM generatorius – priklausomai nuo VSC kontrolerio paklaidos koeficiento signalo, formuojamas signalo ilgis IGBT moduliams formuojant sinusinę įtampą. Nešantysis dažnis 2000Hz.

- LC filtras – IGBT modulių išėjime formuojamai laiptuotai įtampos tuo pačiu ir srovės charakteristikai paversti į tolydinę sinusoidę suteikiant talpumo ir induktyvumo.
- IGBT tranzistoriai – sudaro tarpinę AC grandinę įtampos transformatoriui.
- pulsų generatoriai – atlieka IGBT tranzistorių valdymo algoritmą, kuris formuoja AC .
- LF Transformatorius – paaukština įtampą nuo 48V iki 300V
- lygintuvas – išlyginama tarpinėje įtampos paaukštinimo grandinėje sukurta AC įtampa.



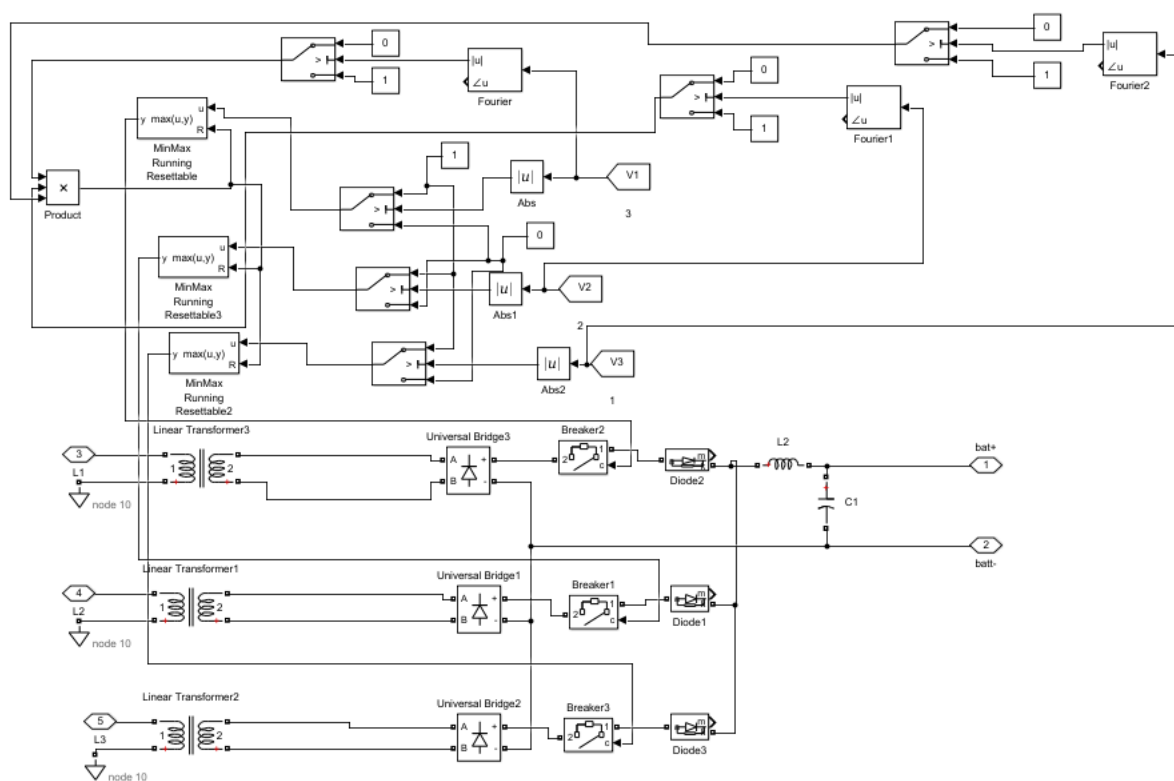
2.15 pav. Vienfazio inverterio MATLAB modelyje struktūra



2.16 pav. Vienfazio inverterio PWM oscilograma

Pagal oscilogramą (2.16 pav.) matoma kaip modelyje veikia keitiklis nešlio dažnio principu. VSC kontroleryje formuojama atitinkamos fazės įtampos sinusoidė U_{ref} . Matoma, kad PWM generatoriaus impulsu ilgai sumažėja ties sinusoidės kilimo vidurio tašku ir esant maksimaliai sinusoidės reikšmei. Identiška situacija ir neigiamo sinusoidės pusperiodo pusėje. PWM generatoriaus impulsai atidarinėja IGBT modulius, kurių išėjime formuoja kvadratinės formos su įtrūkimais kurie priklauso nuo impulso ilgio AC įtampa. Dėl už IGBT modulio esančio filtro induktyvumo ir talpumo gaunama tolydi sinusoidė. Įtampos vertė oscilogramoje pateikiama santykiniais vienetais.

AC-DC keitikliai MATLAB sistemoje sumodeliuoti taip, kad įtampai pasiekus 230V, būtų įjungiamas baterijų įkrovimas. Blokas „Resetible max“ palaiko loginį vienetą jungikliui iki tol kol efektinė įtampos vertė bet kurioje fazėje nenukrenta žemiau 207V. Jeigu įtampa krenta žemiau 207V, reiškia apkrova yra didesnė nei generacija ir tokiu atveju energija imama iš baterijų per inverterį. AC-DC keitiklio struktūra pateikiama (2.17 pav.)



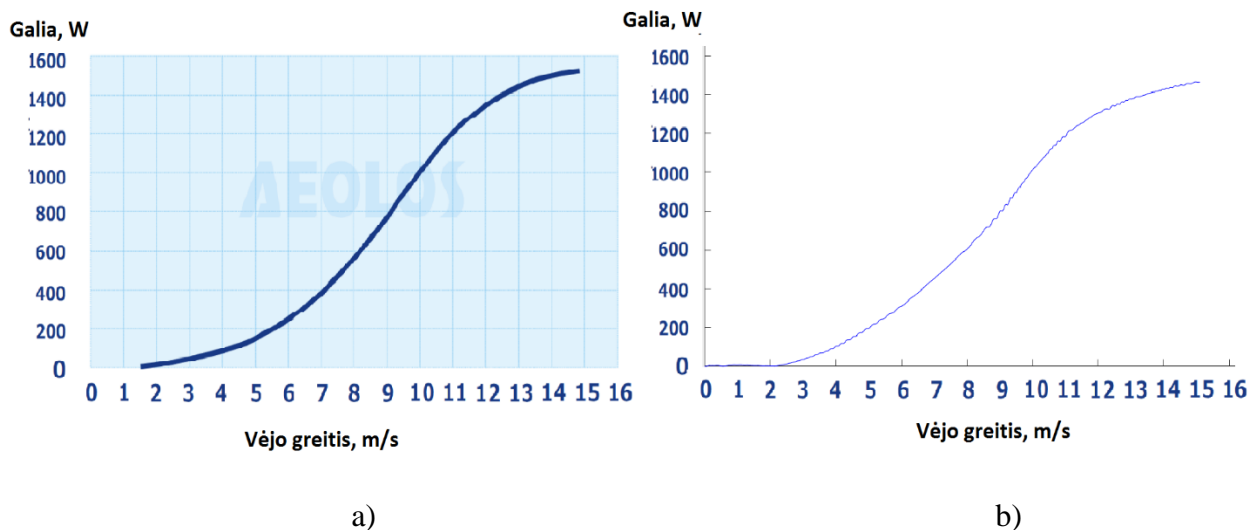
2.17 pav. AC-DC keitiklių MATLAB modelyje struktūra

2.5. Vėjo elektrinės modeliavimas

Modeliuojamos vėjo elektrinės parametrai pateikiami (2.6 lentelė.) Gauta galios charakteristika MATLAB palyginama su gamintojo pateikiama galios charakteristika. Galima teikti, kad modeliuojamos elektrinės parametrai faktiškai atitinka gamintojo parametrus. (2.18 pav.) Neženklūs neatitikimai yra pradinėje kreivės dalyje iki 4m/s vėjo greičiui ir pasiekus 14m/s vėjo greitį (tikslėniam modeliui reikėtų palyginti su veikiančios sistemos rezultatais). Atliekant sistemos tyrimus simuliacija bus atliekama 4m/s -14m/s ribose, todėl tyrimų rezultatams tai įtakos neturės.

2.6 lentelė. 1 kW vertikaliosios ašies vėjo elektrinės parametrai

Generatoriaus tipas	Trifazis PMSG
Vardinė galia	1,0 kW
pradinis vėjo greitis	2 m/s
vardinis vėjo greitis	10 m/s
Generatoriaus dažnis	50 Hz arba 60 Hz
DC Įtampa	48 V
Apsaugos	Automatinis ir rankinis atjungimas
Maksimalus sparnuočių Sukimosi greitis	320 rpm (33,5 rad/s)
Maksimalus sukimo momentas	25 Nm
Induktyvumas apvijose	5,2 mH
Aktyvioji varža apvijose	0.91ohm

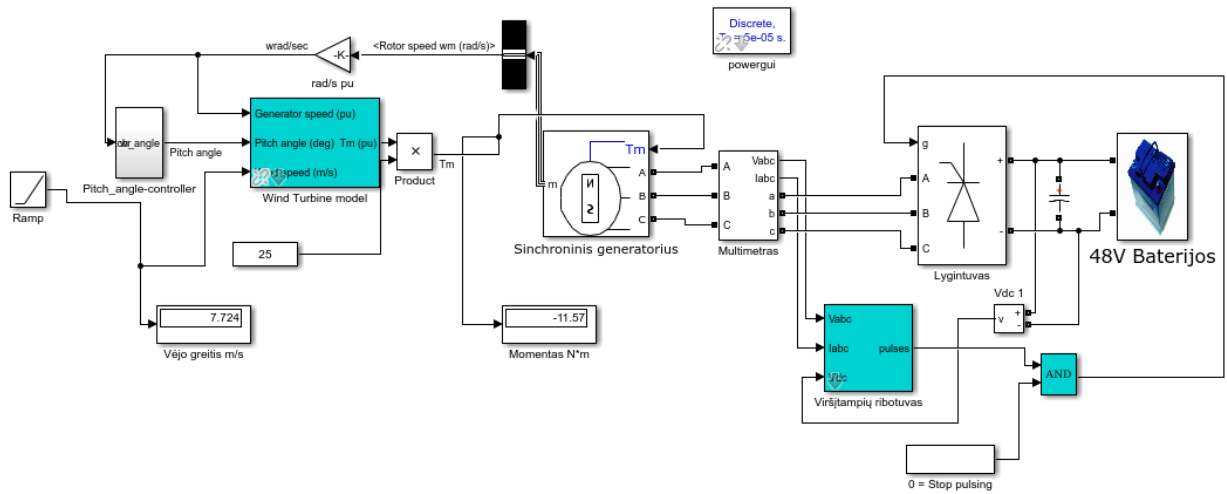


2.18 pav. Vėjo elektrinės galios charakteristika a)-pateikiama gamintojo [22], b)-sumodeliuota MATLAB modelyje.

Vėjo elektrinės modelis pateikiamas (2.19 pav.) jį sudarantys pagrindiniai elementai yra :

- sinchroninis generatorius su nuolatiniais magnetais – nustatomos varža ir induktyvumas apvijose, inertiškumas, sukimo momentas, apskukos ir amplitudinė įtampa tarp fazių (2.6 lentelė.)
- turbinos blokas pagal vėjo stiprumą ir turbinos tipą (horizontalios ar vertikalios ašies) suformuojamas sukimo momentas generatoriui kuris tiesiogiai priklauso nuo vėjo stiprumo.
- universalus tiltelis – Lygintuvui naudojami valdomi tranzistoriai ir diodai.
- LC filtras – Nufiltruoja pulsacijas esančias už lygintuvo.

- srovės ir įtampos matavimo įrenginiai – leidžia matuoti tiek linijinę tiek fazinę įtampą, išmatuotos vertės yra siunčiamos į valdymo sistemas.



2.19 pav. Vertikaliosios ašies vėjo elektrinės modelis MATLAB aplinkoje

2.6. Matavimų blokas

Pagrindinių sistemos nusistovėjusių parametų reikšmėms fiksuoti sukuriamas matavimų blokas (2.20 pav.), kuriame fiksuojamos šie dinaminių procesų parametrai :

Tinkle esančių harmonikų vertės naudojantis „THD“ bloku.

Maksimali amplitudinė įtampos ir srovės reikšmė naudojantis „Furier“ (pirmosios eilės harmonika).

Vartotojų galia fiksuojama „Power“ bloko pagalba, kurio įvestys yra matuojamos amplitudinės srovės ir įtampos vertės. MATLAB/SIMULINK sistemoje galia yra skaičiuojama pagal formules, kurios pateikiamos šaltinyje [40].

Aktyvioji galia:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V(\omega t) \cdot I(\omega t) dt; \quad (10)$$

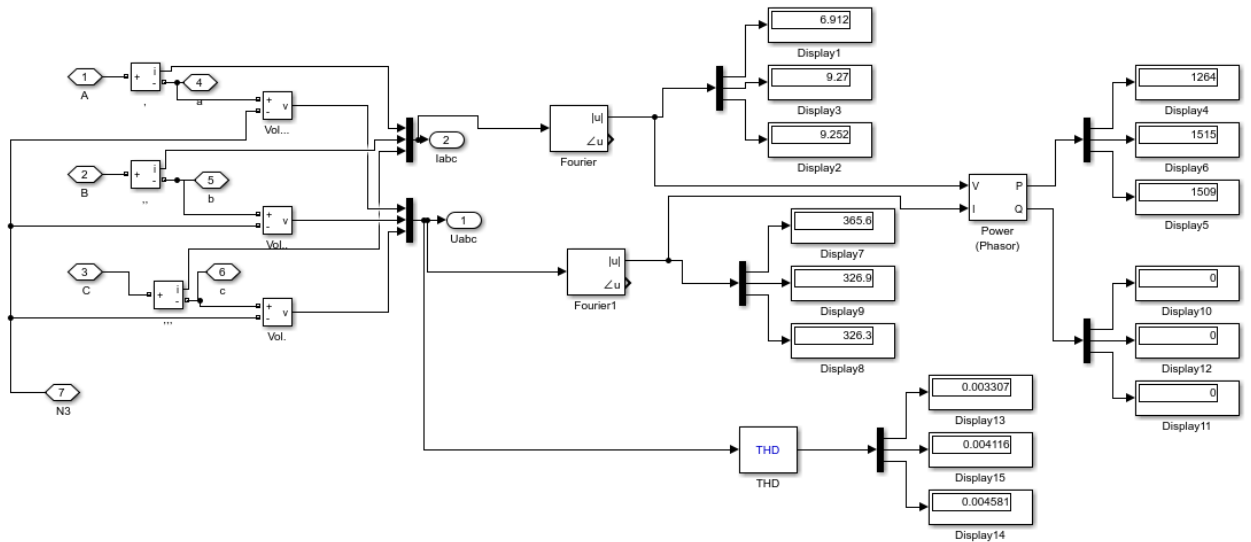
reaktyvioji galia:

$$Q = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V(\omega t) \cdot I\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) dt; \quad (11)$$

čia T - periodas, t - laikas per periodą; ω - kampinio greičio vektorinis dydis.

Pilnutinė galia perskaičiuojama pagal formulę:

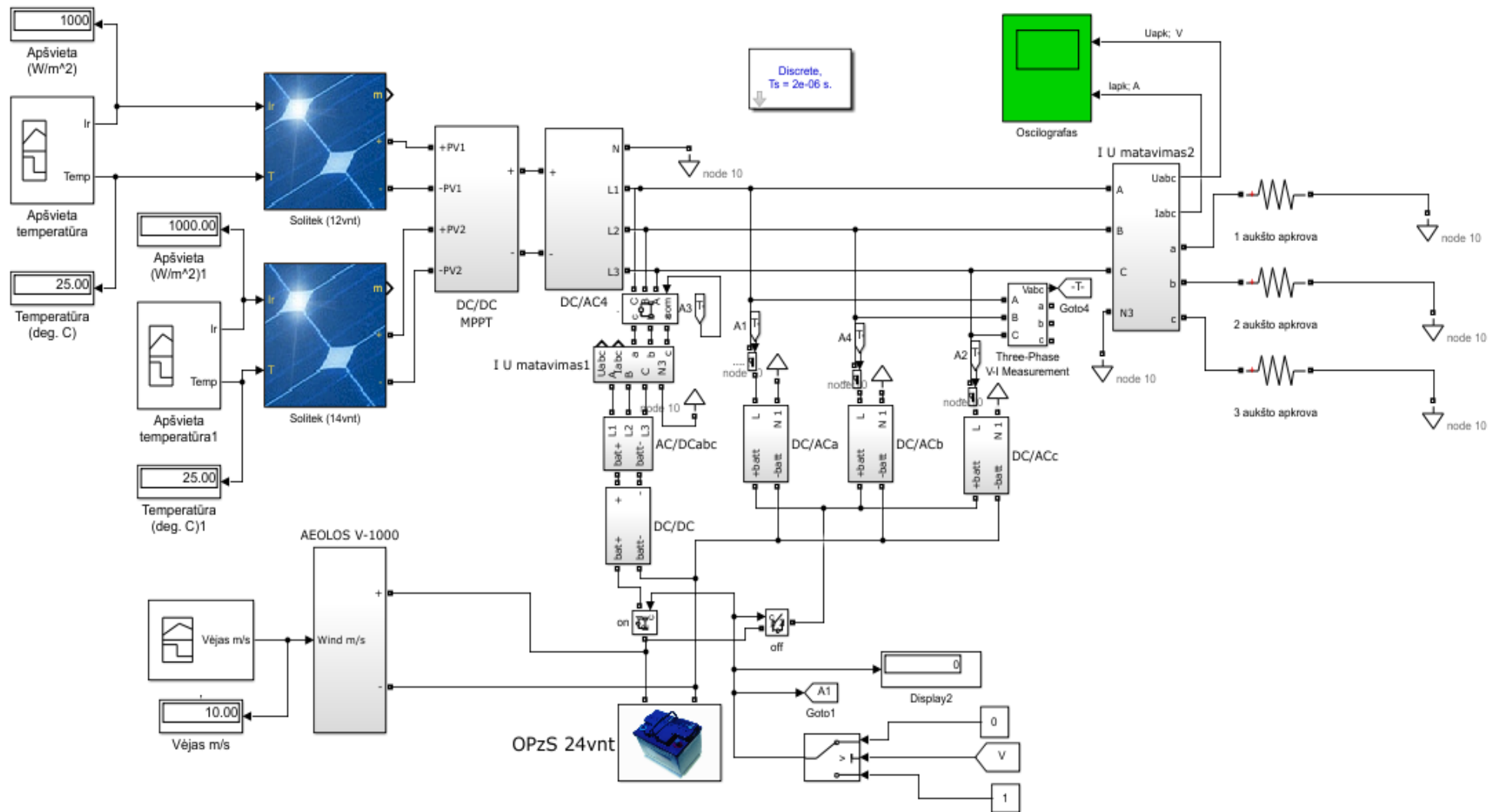
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (12)$$



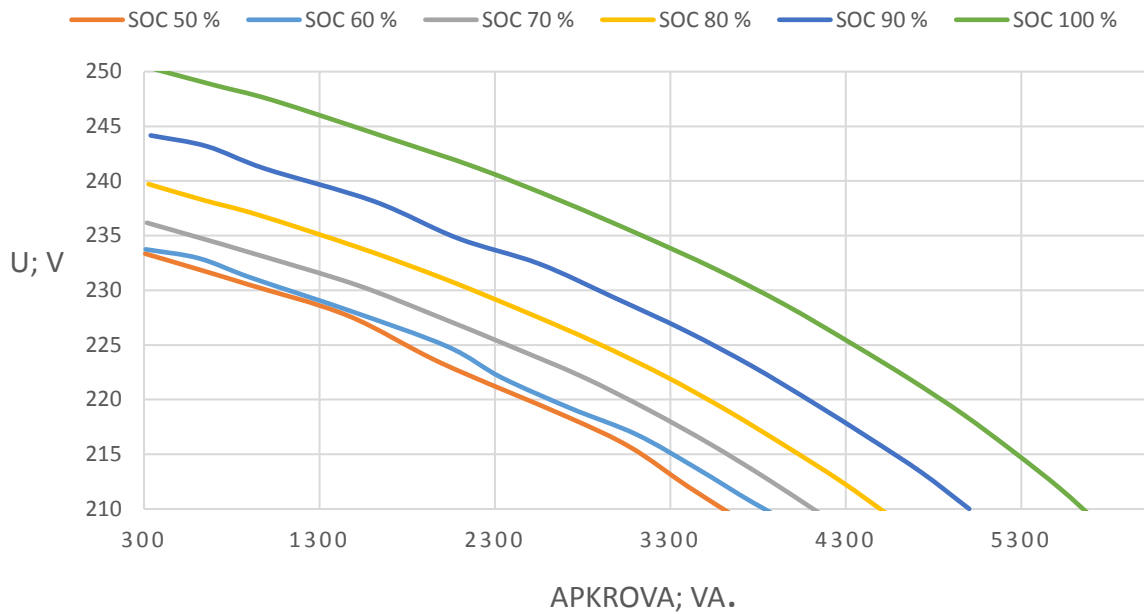
2.20 pav. Sistemos dinaminųjų procesų matavimų blokas

2.7. Mikrotinklo sistemos modelis

Modeliuojamoji MATLAB sistema pateikiama (2.21 pav.). Sistema suskirstyta blokais, kurie plačiau aprašyti anksčiau minėtuose poskyriuose. Kadangi sistemos parametrai bus kintantys laike, dėl to MATLAB sistemos simuliacijai bus naudojamas „powergui“ blokas, atliekantis skaičiavimus pagal laiko intervalą, kurį programos sistema parenka optimaliai. Atliekant elektros sistemos tyrimus bus keičiami šie parametrai: apšvieta, vėjo stiprumas, baterijos įkrovimo lygis (SOC), vartotojų apkrovos. Tinklo amplitudinės įtampos ir srovės kreivės gaunamos naudojantis oscilografu (Scope blokas);

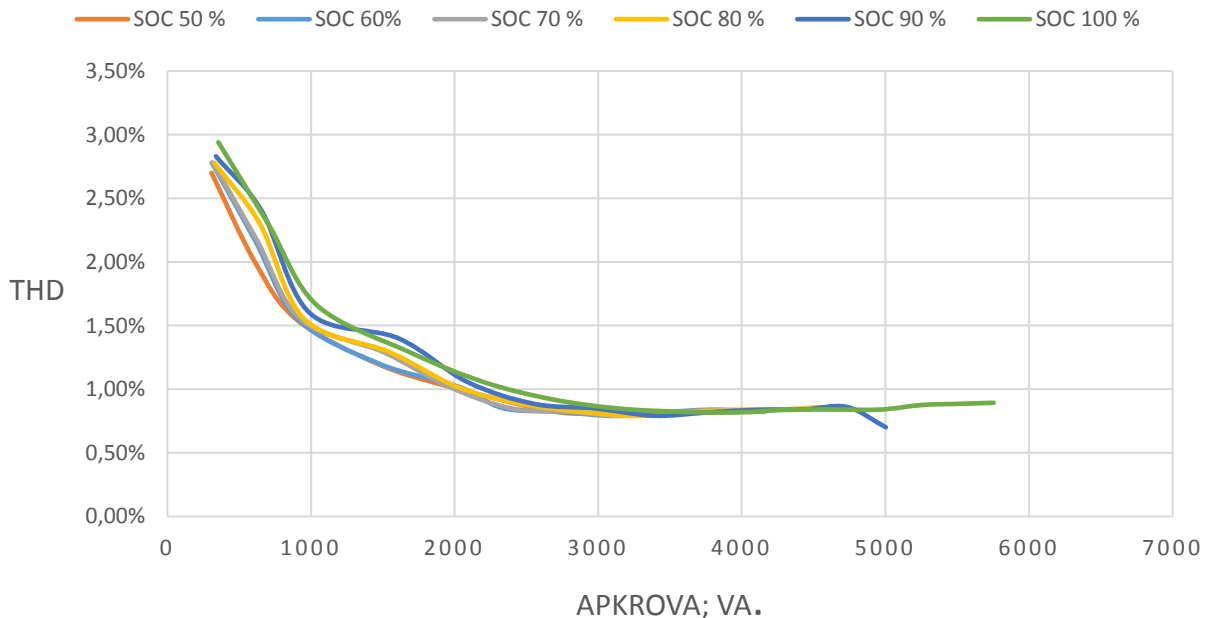


2.21 pav. Mikrotinklo sistemos MATLAB/SIMULINK modelio struktūra



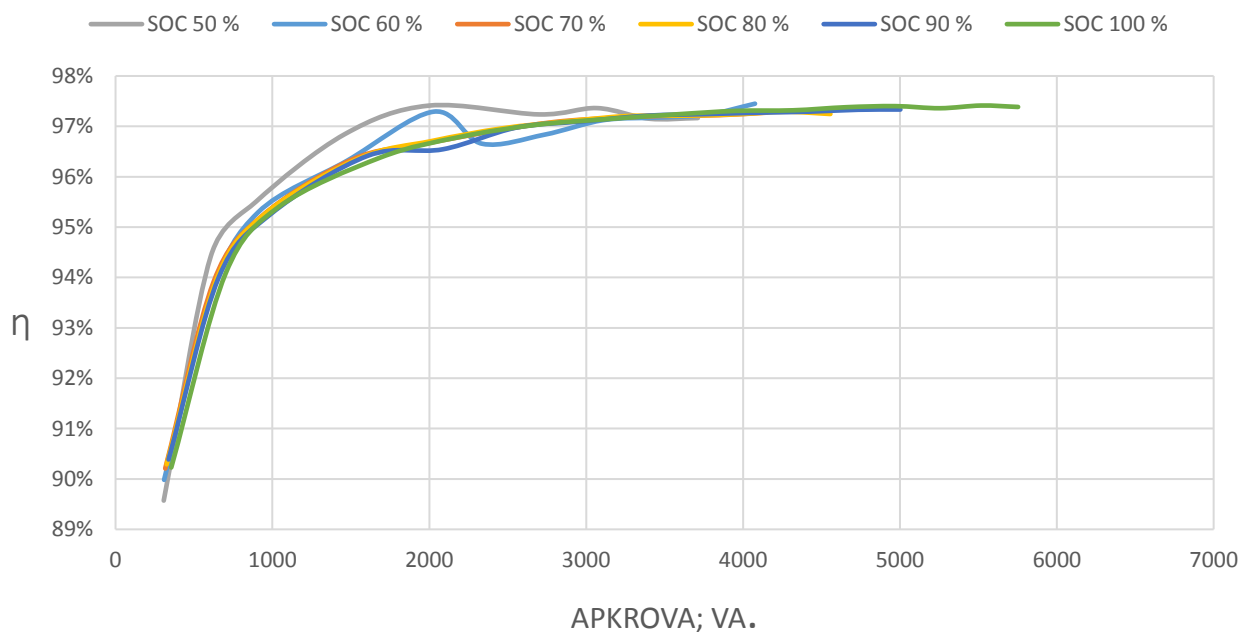
3.1 pav. Vienfazio inverterio įtampos priklausomybė nuo apkrovos

Grafike (3.1 pav.) pateikiama įtampos, inverterio išėjime, priklausomybė nuo apkrovos. Matoma, kad įtampos lygiai, kylant apkrovai mažėja netiesiškai. Didėjant apkrovai įtampos kritimas tampa staigesnis. Matoma, kad įtampos lygiui inverteryje turi įtakos ir baterijos įkrovimo lygis. Didinant baterijų įkrovimo lygį atstumai tarp lygiagrečių įtampos kritimo kreivių taip pat didėja. Tai rodo, kad modelyje esantys inverteriai nėra gerai suderinti su baterijų darbo ciklu.. Dėl to modelį reikia tobulinti patikrinus panašias situacijas realioje mikrotinklo sistemoje.



3.2 pav. Vienfazio inverterio įtampos THD priklausomybė nuo apkrovos

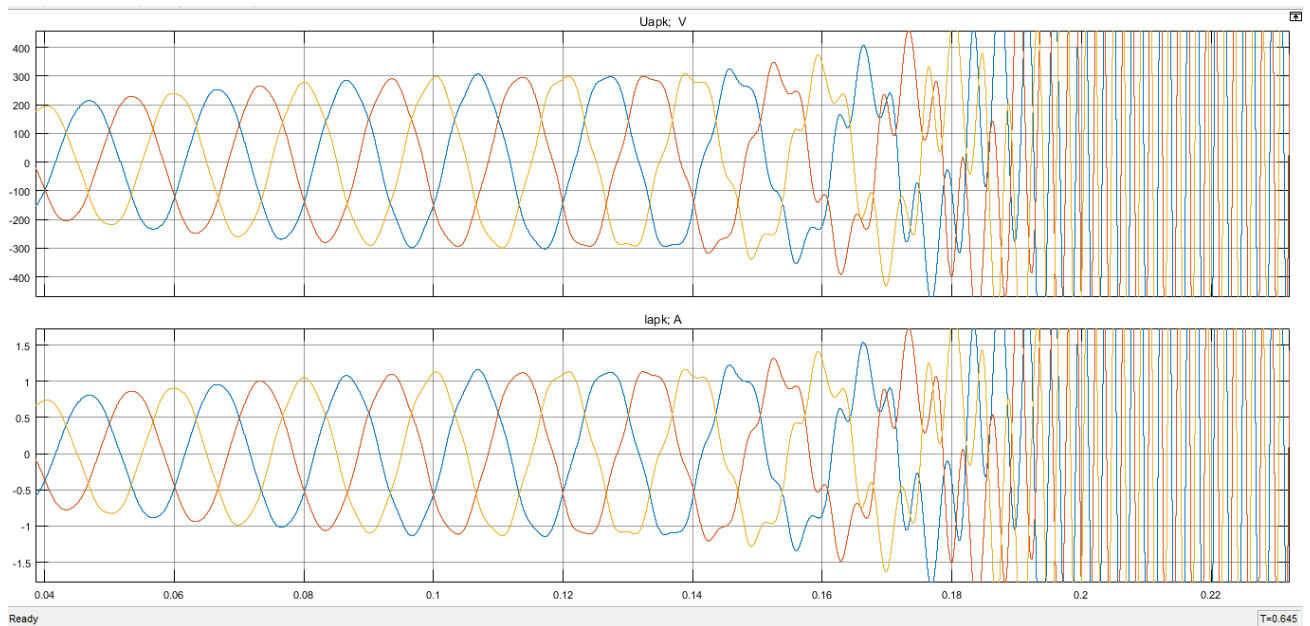
Grafike (3.2 pav.) pateikiama įtampos THD inverterio išėjime priklausomybė nuo apkrovos. Matoma, kad THD lygiai kylant apkrovai mažėja. Įtampos THD ribos keičiasi tarp 2.7 % ir 0.8 % ribose. THD vertės neviršija gamintojo deklaruojamų 4 %. Matoma, kad įtampos lygiui inverteryje turi įtakos ir baterijos SOC lygis. Apkrovoms esant didesnėms nei 3000 VA įtampos THD išlieka beveik nekintanti. Didinant baterijų SOC lygį esminio įtampos THD skirtumo nepastebėta.



3.3 pav. Vienfazio inverterio efektyvumo priklausomybė nuo apkrovos

Grafike (3.3 pav.) pateikiama inverterio efektyvumo priklausomybė nuo apkrovos. Apkrovas didinant iki 1000VA matomas staigus inverterio naudingumo koeficiento kreivės didėjimas. Maksimalus naudingumo koeficientas 97 % pasiekiamas apkrovoms esant 3000 VA. Tokį pat maksimalų naudingumo koeficientą pateikia ir gamintojas. Didinant baterijų SOC lygį tendencingo naudingumo koeficiento pokyčio nepastebima..

Toliau atliekamas vienfazių keitiklių tyrimas jiems veikiant trifazėje sistemoje. Taip pat priimama, kad nėra apšvietos. Tokiu atveju visa energija imama iš baterijų ir vėjo elektrinės. Tokiu atveju energija apkrovoms perduodama per vienfazius keitiklius. Pastebėta, kad kitaip nei vienfazėje sistemoje, trys vienfaziai inverteriai, kurių nulis sujungtas bendrai sumodeliuotoje sistemoje, negali veikti laisvąja eiga - be apkrovos. Kadangi inverterių puslaidininkiniai elementai, valdymo sistemos ir LC filtrai parenkami remiantis nominaliais parametrais, o ribinis dažnio riba ir įtampos lygiai keičiasi priklausomai nuo tinkle esančios apkrovos, dėl to apkrovai esant mažesnei nei minimali, sistemos įtampa ir THD išauga iki neleistinų verčių. Stabilumo riba nustatoma eksperimentiškai – apkrovas parenkant nuo 0 VA kiekvienoje fazėje ir didinant kas 50 VA, kol gaunamas stabilus sistemos darbas .



3.4 pav. Nestabilus sistemos darbas $S_1=S_2=S_3=200W$

Pagal oscilogramą matoma, kad inverterių paleidimo metu, pereinamajame procese įtampa palaipsniui didėja, įtampai pasiekus 320 V amplitudinės reikšmės, VSI reguliatorius pradeda mažinti IGBT moduliams skirtą impulso ilgį, dėl to sinusoidė tampa iškraipyta (0,12 s). Sistemai pasileidinėjant toliau, įtampa ir tuo pačiu srovė auge, iškraipymai didėja ir ties 0,2 sekundės sistema išeina iš stabilumo. Padidinus apkrovą iki 250 W kiekvienai fazei, gaunamas stabilus sistemos darbas (3.4 pav.). Tokios sistemos nusistovėjusio režimo parametrai pateikiami (3.3 lentelė).

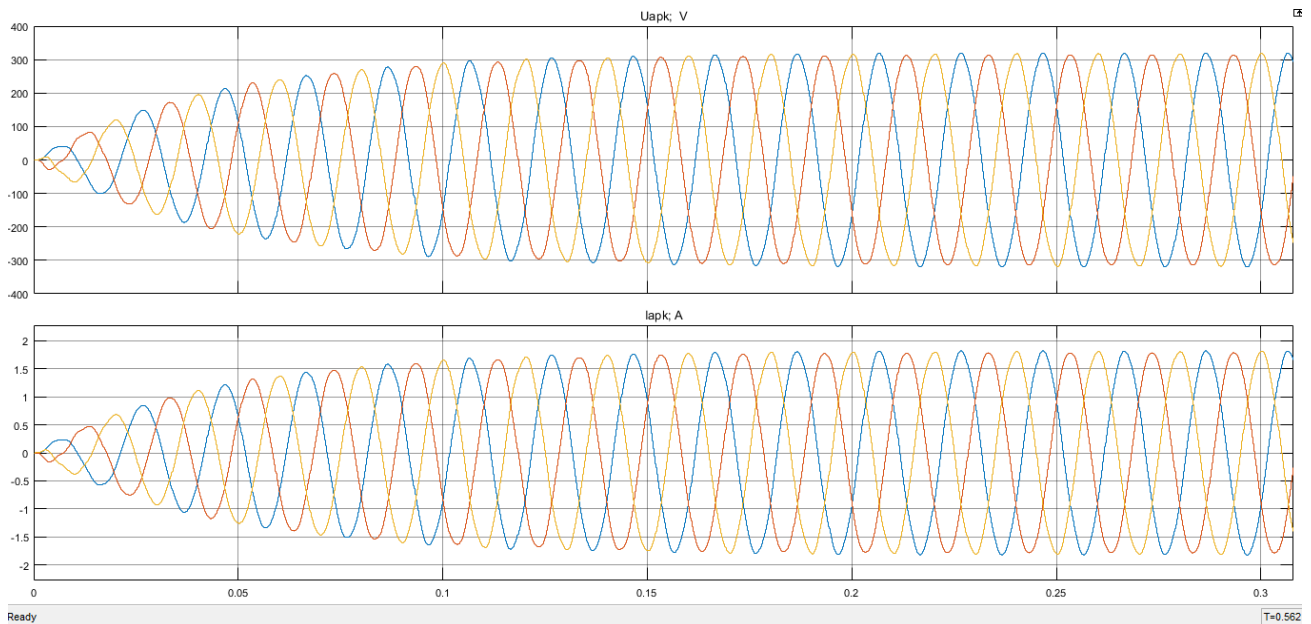
3.3 lentelė. Sistemos parametrai esant minimaliai stabilaus režimo apkrovai

	A	B	C
$U_{Amp}; V$	328,94	328,94	328,09
$I_{Amp}; A$	1,53	1,53	1,53
$U_{ef}; V$	232,6	232,6	232,3
$I_{ef}; A$	1,08	1,08	1,08
S, VA	251,0	251,0	251,0
THD %	1,0	0,9	1,3
$P_{vėjo}, W$	358,00		
$P_{baterijų}, W$	542,00		
$S_{apkrovos}; VA$	752,92		
η %	0,84		
Asimetrija %	0,00		

Kadangi MATLAB/SIMULINK modelyje matuojama amplitudinė įtampa, toliau rezultatai bus pateikti perskaičiuojami pagal formules:

$$U_{ef} = \frac{U_{Amp}}{\sqrt{2}}; \quad (13)$$

$$I_{ef} = \frac{I_{Amp}}{\sqrt{2}}. \quad (14)$$



3.5 pav. Stabilios sistemos paleidimo procesas $S1=S2=S3=250W$

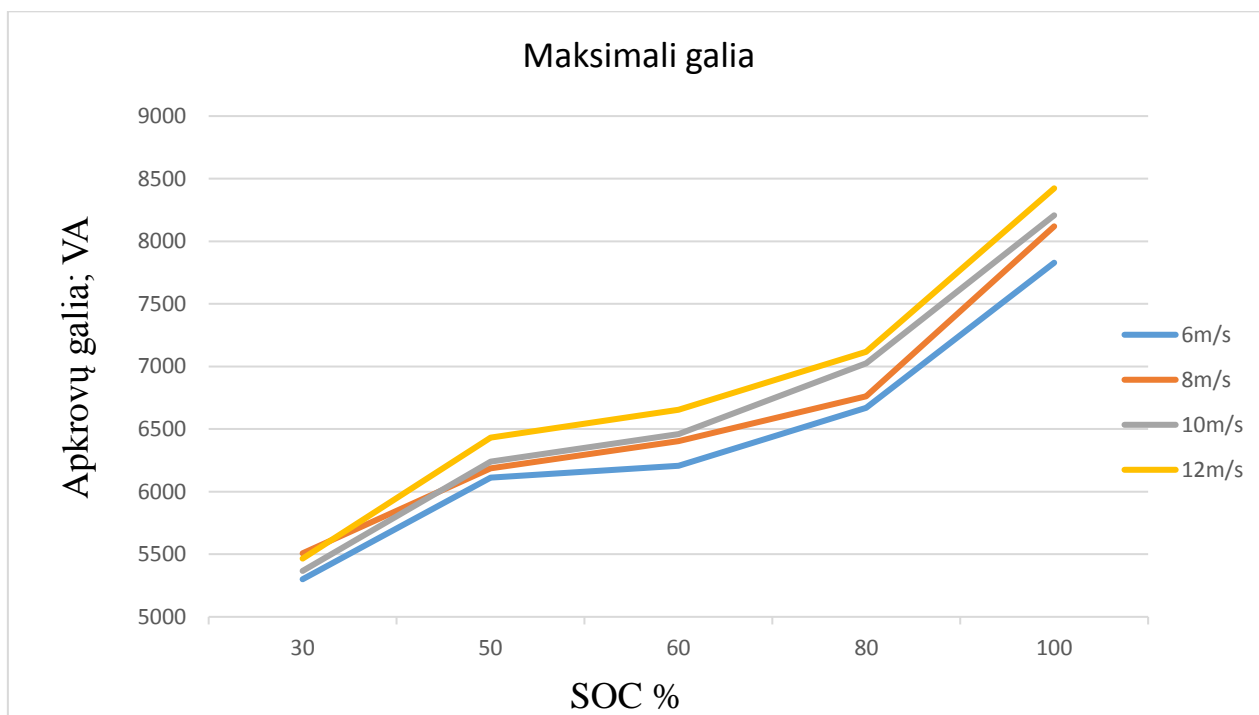
Toliau atliekama sistemos analizė, kai saulės apšvietimas yra 0 W/m^2 , o apkrovos maksimalios. Maksimali galia laikoma apkrovų reikšmės, prie kurių sistemos parametrai lieka leistinose normose. Sistema yra leistinose ribose tada, kai įtampos efektyvi vertė nenukrenta žemiau 207 V. Keičiamas baterijų SOC lygis ir vėjo greitis. Rezultatai pateikiami (3.4 lentelė).

3.4 lentelė. Maksimali leistina apkrova

Vėjo greitis= 6m/s					
$S_{vart}; VA$	5300	6111	6207	6669	7829
$P_{vėjo}; W$	332	340	306	306	323
$P_{bat}; W$	5687	6650	6750	7157	8676
SOC %	30	50	60	80	100
η %	88	87	88	89	87
Vėjo greitis= 8m/s					
$S_{vart}; VA$	5507	6186	6403	6763	8119
$P_{vėjo}; W$	647	601	614	585	522
$P_{bat}; W$	5671	6545	6843	7088	8836
SOC %	30	50	60	80	100
η %	87	87	88	88	87
Vėjo greitis= 10m/s					
$S_{vart}; VA$	5367	6241	6459	7026	8207
$P_{vėjo}; W$	915	962	884	982	978

$P_{bat}; W$	5163	6152	6473	7005	8452
SOC %	30	50	60	80	100
η %	88	88	88	88	87
Vėjo greitis= 12m/s					
$S_{vart}; VA$	5065	6331	6553	7117	9085
$P_{vėjo}; W$	1315	1342	1339	1389	1393
$P_{bat}; W$	4523	5882	6147	6740	8866
SOC %	30	50	60	80	100
η %	87	88	88	88	09

Pagal lentelių duomenis braižomos galios kreivės (3.6 pav.). Kuomet SOC yra 80%-100% matomas staigus maksimaliai atiduodamos galios kreivės šuolis. Taip pat matoma, kad nominalus baterijos darbas yra, SOC yra nuo 50% iki 80% ribose. Pastebima, kad SOC esant nuo 30 % iki 50 % ribose, maksimali galia kuri gali būti atiduodama vartotojams nuo vėjo greičio kuris tiesiogiai proporcingas elektrinės generuojamajai galiai priklauso nedaug. Daroma prielaida, kad šioje dalyje didesnioji dalis vėjo elektrinės generuojamosios galios yra naudojama ne vartotojams, o baterijų įkrovimui.



3.6 pav. Maksimalios leistinos apkrovos

Toliau atliekami tinklo simetrijos tyrimai. Šioje dalyje remiantis simetrinių dedamųjų metodu apskaičiuojamos visos įmanomos įtampų nuo 207 iki 253 V galimos kombinacijos. Maksimali įtampa sistemoje – 232 V, kuri yra prie minimalios 200 W apkrovos. Būtent 232V bus atskaitos taškas. Ribinės apskaičiuotos asimetrijos vertės pateikiamos 3.5 lentelėje, kurioje matomos įtampos atskirose fazėse, prie kurių gaunama tinklo asimetrija neatitinka sistemos reikalavimų $k < 2$ %.

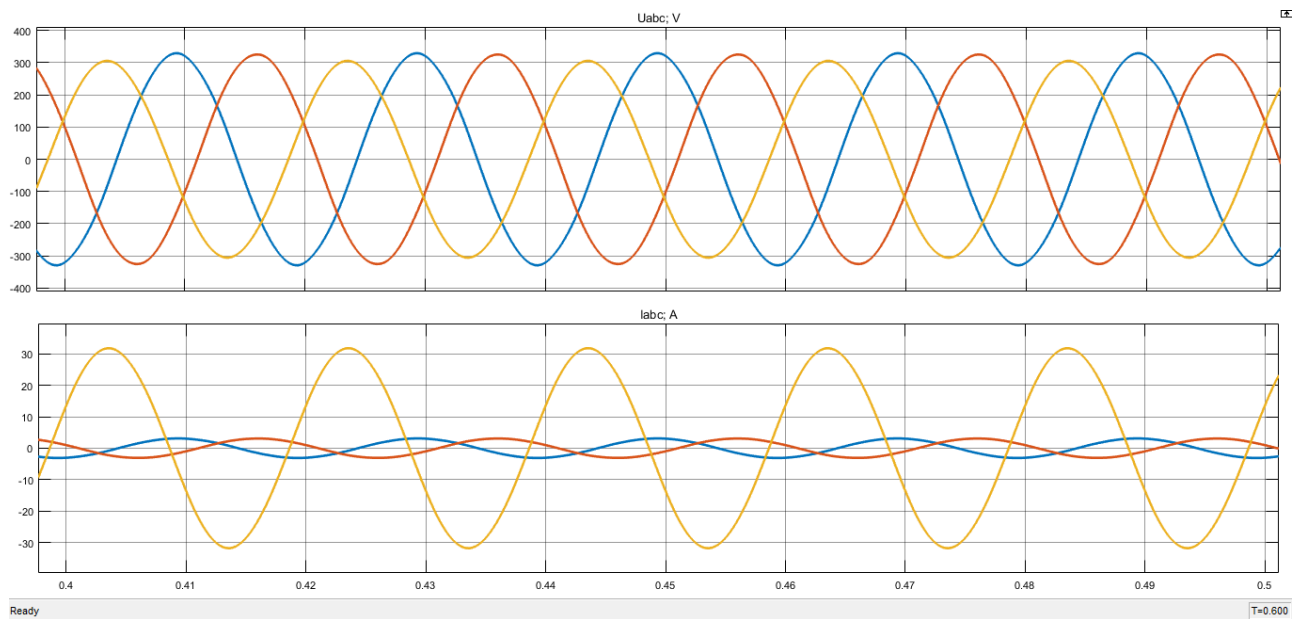
3.5 lentelė. Ribinės asimetrijos vertės prie minimalios apkrovos

Ribinės tinklo asimetrijos įtampų vertės							
L1	L2	L3	k %	L1	L2	L3	k %
232	219	215	2.02	232	225	211	2.10
232	219	216	1.99	232	225	212	1.98
232	219	219	1.94	232	226	213	2.00
232	220	207	2.50	232	226	214	1.79
232	220	213	2.02	232	227	212	2.07
232	220	214	1.96	232	227	213	1.95
232	221	212	2.03	232	228	213	2.02
232	221	213	1.95	232	228	214	1.89
232	222	211	2.08	232	229	213	2.10
232	222	212	1.99	232	229	214	1.98
232	223	211	2.06	232	230	214	2.07
232	223	212	1.96	232	230	215	1.94
232	224	211	2.07	232	231	216	2.05
232	224	212	1.96	232	231	217	1.92
				232	232	215	2.04
				232	232	216	1.91

Eksperimentiniu būdu palaipsniui didinant apkrovas atliekama tinklo analizė, prie kokios minimalios apkrovos tinklas tampa nesimetriškas. Baterijoms esant įkrautoms 50 %, didinant apkrovas, asimetrija nepasiekama. Taip yra todėl, kad 215 V įtampa fazėje pasiekama prie 4 kVA apkrovos, tokiu atveju priartėjama prie maksimalios baterijų galios ir įtampa atitinkamai krenta kitose dvejose fazėse. Todėl neleistinos asimetrijos taškai ieškomi padidinus baterijų įkrovimo lygį. Rezultatai pateikiami 3.6 lentelėje.

3.6 lentelė. Asimetriško tinklo apkrovos

SOC 80%	A	B	C
U _{ef} ; V	232	230	214
S, VA	500	500	5000
Asimetrija %	2,07		
SOC 90%	A	B	C
U _{ef} ; V	232	232	215
S, VA	700	700	5200
Asimetrija %	2,04		
U _{ef} ; V	232	231	216
S, VA	600	1100	4900
Asimetrija %	2,05		



3.7 pav. Tinklo asimetrija SOC 80%

Atlikus asimetrijos bandymus pastebėta, kad neleistina tinklo asimetrija gali būti pasiekta tik prie maksimalios baterijų atiduodamos galios, kuomet baterijų SOC yra didesnis nei 80%. Ilgalaikiai galios skirtumai tarp apkrovų neturėtų būti didesni nei 4kVA. Galima daryti išvada, kad neleistina asimetrija gaunama tik tada, kai apkrova vienoje fazėje yra artima maksimaliai visos iš baterijų atiduodamos galios.

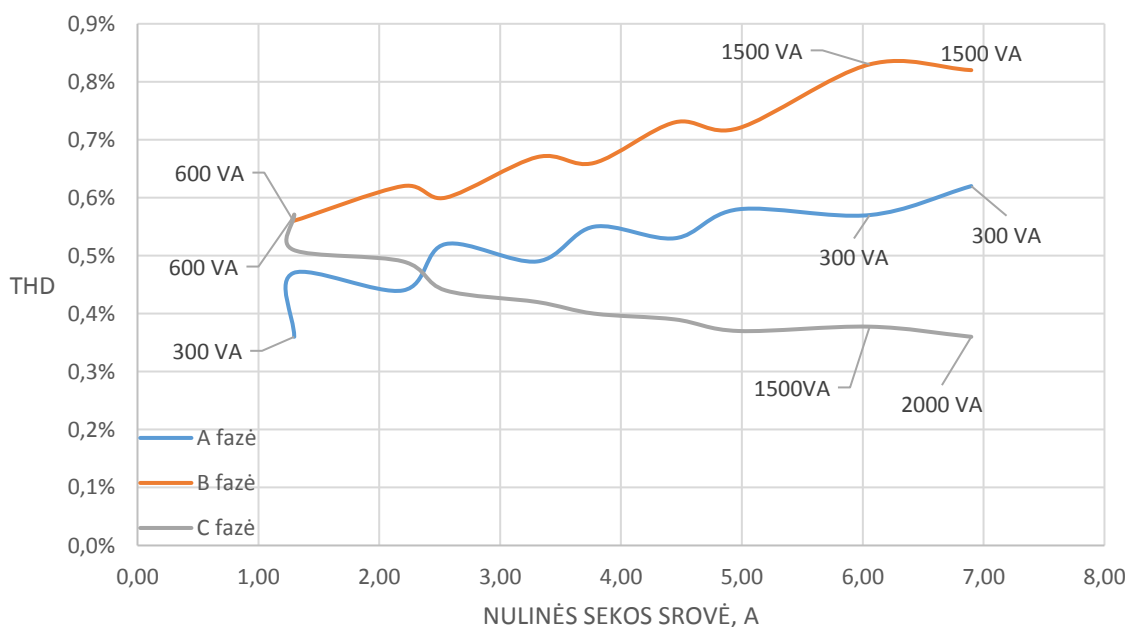
Pastebėta, kad atjungus vėjo elektrinę, keitikliai trifazėje sistemoje stabiliai gali veikti ir be apkrovos, dėl to atliekami simetriško ir nesimetriško tinklo THD tyrimai priimant sąlygas, kad vėjo greitis 0 m/s, o SOC 50%, taip pat pastebėta, kad didinant asimetrija didėja harmoniniai tinklo iškraipymai, dėl to atliekant tyrimą bus matuojama ir nulinės sekos srovė. Rezultatai pateikiami (3.7 lentelė ir 3.8 lentelė)

3.7 lentelė. THD ir simetrinės apkrovos

A fazė						
Įtampos THD %	0,4%	0,4%	0,4%	0,5%	0,5%	0,6%
Sroves THD %	0,4%	0,4%	0,4%	0,5%	0,5%	0,6%
S _{apkrovos} ; VA	300	600	900	1200	1500	2000
B fazė						
Įtampos THD %	0,5%	0,5%	0,5%	0,6%	0,7%	0,8%
Sroves THD %	0,5%	0,5%	0,5%	0,6%	0,7%	0,8%
S _{apkrovos} ; VA	300	600	900	1200	1500	2000
C fazė						
Įtampos THD %	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,6%
Sroves THD %	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,6%
S _{apkrovos} ; VA	300	600	900	1200	1500	2000
I _N , mA	0,7	1,4	2,1	2,8	3,5	4,5

3.8 lentelė. THD ir nesimetrinės apkrovos

A fazė										
Įtampos THD %	0,4%	0,5%	0,4%	0,5%	0,5%	0,6%	0,5%	0,6%	0,6%	0,6%
Sroves THD %	0,4%	0,5%	0,4%	0,5%	0,5%	0,6%	0,5%	0,6%	0,6%	0,6%
$S_{\text{apkrovos; VA}}$	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
B fazė										
Įtampos THD %	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,8%	0,8%
Sroves THD %	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,8%	0,8%
$S_{\text{apkrovos; VA}}$	300	600	600	900	900	1200	1200	1500	1500	2000
C fazė										
Įtampos THD %	0,6%	0,5%	0,5%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
Sroves THD %	0,6%	0,5%	0,5%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
$S_{\text{apkrovos; VA}}$	600	600	900	900	1200	1200	1500	1500	2000	2000
I_N, A	1,30	1,29	2,20	2,55	3,31	3,78	4,45	4,97	6,06	6,90



3.8 pav. THD priklausomybės nuo nulinės sekos srovės charakteristika

3.2. Mikrotinklo sistemos statinių procesų tyrimas

Šioje dalyje išnagrinėjamos situacijos keičiant apkrovas ir saulės elektrinių generacija. Priklausomai nuo skirtumo tarp generacijos ir vartojimo gaunami įtampos THD ir naudingumo koeficiento parametrai. Rezultatai pateikiami (3.9 lentelė ir 3.10 lentelė). Atliekant tyrimus modelyje keičiama

apšvieta nuo 100 W/m² iki 1000 W/m². Suminė apkrova keičiama nuo 900 VA iki 6000 VA. Vėjo elektrinė nevertinama. Baterijų SOC išlieka pastovi 50 %.

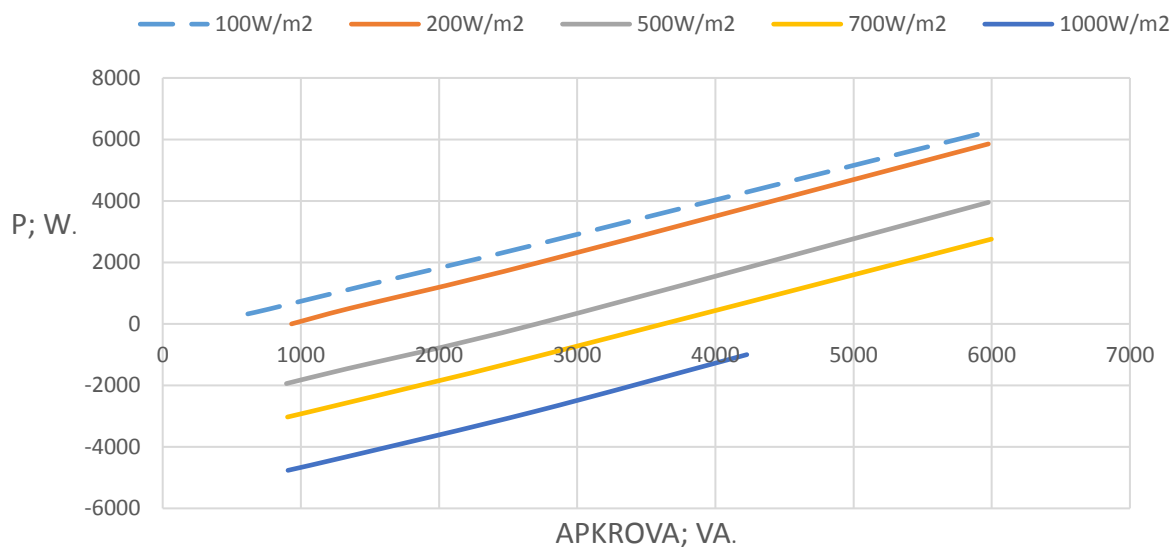
3.9 lentelė. Sistemos statiniai parametrai

Apšvieta 100W/m²					
Apkrovos; VA	616	771	1516	2714	5976
THD	4,90 %	4,70 %	4,33 %	1,57 %	0,60 %
η	79,45 %	82,32 %	86,14 %	88,61 %	88,88 %
P _{baterijų} ; W	324	484	1304	2593	6253
Apšvieta 200W/m²					
Apkrovos; VA	616	771	1516	2714	5976
THD	4,90 %	4,70 %	4,33 %	1,57 %	0,60 %
η	79,45 %	82,32 %	86,14 %	88,61 %	88,88 %
P _{baterijų} ; W	324	484	1304	2593	6253

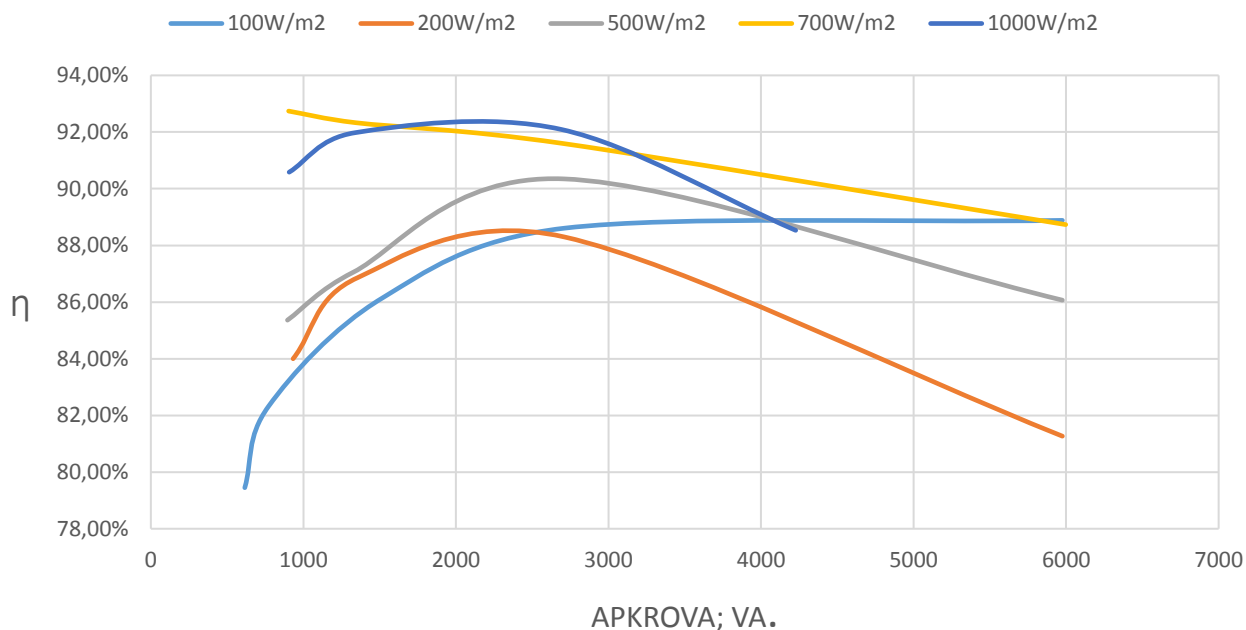
3.10 lentelė. Sistemos statiniai parametrai

Apšvieta 500W/m²				
Apkrovos; VA	895	1328	2707	5976
THD	2,80 %	2,73 %	3,80 %	0,33 %
η	85,36 %	87,06 %	90,35 %	86,07 %
P _{baterijų} ; W	-1940	-1465	0	3953
Apšvieta 700W/m²				
Apkrovos; VA	903	1344	2700	5997
THD	2,33 %	2,53 %	2,47 %	0,17 %
η	92,74 %	92,33 %	91,60 %	88,73 %
P _{baterijų} ; W	-3028	-2556	-1067	2757
Apšvieta 1000W/m²				
Apkrovos; VA	907	1339	2690	4227
THD	2,33 %	2,40 %	2,30 %	2,15 %
η	90,58 %	91,98 %	92,09 %	88,53 %
P _{baterijų} ; W	-4763	-4313	-2852	-1000

Remiantis lentelių (3.9 lentelė ir 3.10 lentelė) rezultatais vaizduojamos galios pasiskirstymo tarp baterijų ir apkrovų, THD ir naudingumo koeficiento priklausomybė keičiantis apšvietai ir baterijoms esant įkrautoms 50%. Galios pasiskirstymo grafike (3.9 pav.) matoma, kad saulės apšvietai esant nuo 100 iki 200 W/m² visa saulės elektrinių generuojama galia atiduodama vartotojas, taip pat dalis energijos imama iš baterijų. Apšvietai esant nuo 500 W/m² iki 700 W/m² pradžioje dalis energijos atiduodama į baterijas, toliau didinant apkrovas pasiekiamas taškas kuomet generacija yra lygi suvartojimui (prie suvartojimo galios nuostoliai nevertinami), šie taškai atitinkamai yra prie 2,8 kVA ir 3,5k VA apkrovos. Apšvietai esant 1000 W/m² viso modeliavimo metu dalis energijos atiduodama į baterijas.



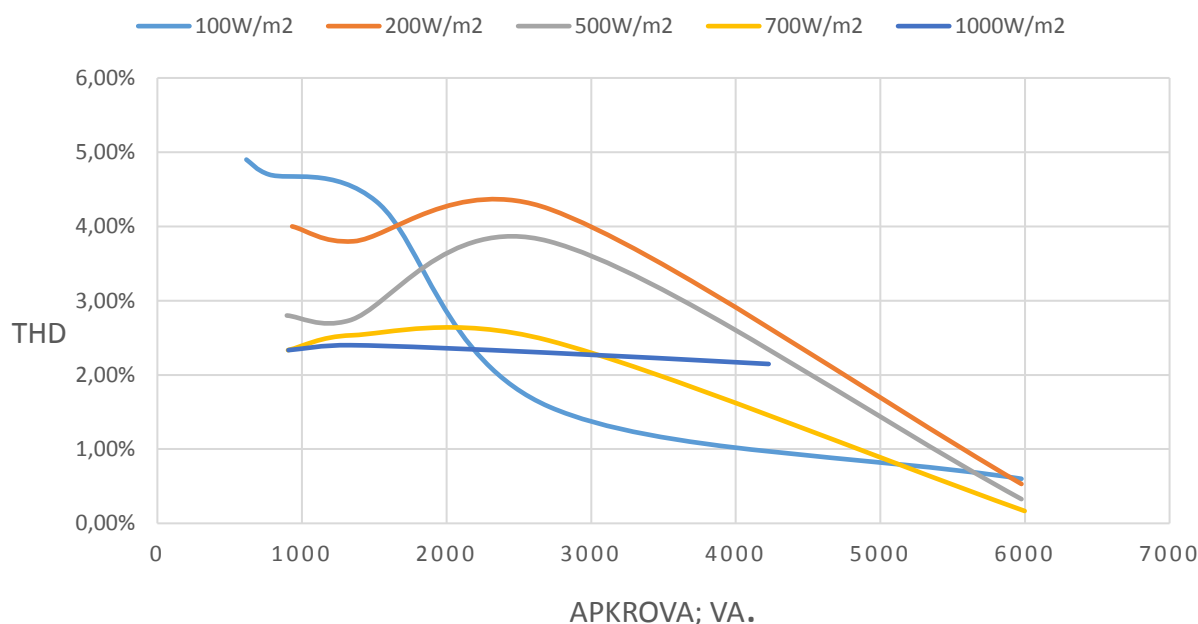
3.9 pav. Galios pasiskirstymo kreivės



3.10 pav. Mikrotinklo salos režime naudingumo priklausomybė nuo apkrovos.

Pagal charakteristiką (3.10 pav.) matoma kaip kinta mikrotinklo naudingosios galios koeficientas keičiantis , apkrovai ir apšvietai. Kuomet saulės apšvieta yra 100 W/m² gaunamas mažiausias naudingumas (nuo 79 % iki 88%) kadangi didžioji elektrinės galia yra suvartojama mikrotinklui skirtų keitiklių maitinimui. Priklausomai nuo apšvietos ir apkrovos matoma, kad naudingumo koeficientas didėja didinant apkrovą iki taško kuriame dalis energijos jau pradedama imti iš baterijų. Didžiausias mikrotinklo sistemos naudingumas (93%) pasiekiamas prie 1000 W/m² apšvietos ir 2.5 kVA apkrovos . Matoma, kad apšvietai esant 100 W/m² ir apkrovas didinant virš 3000 VA ,

efektyvumo kreivė nekinta, taip yra todėl, kad prie tokios apšvietos faktiškai visa galia apkrovoms naudojama iš baterijų per vienfazius inverterius, kurių maksimalus efektyvumas pasiekiamas prie 3000 VA. Prie didesnės apšvietos apkrovos dalį energijos ima iš saulės ir iš baterijų, todėl keičiasi veikiančių keitiklių darbo ciklai priklausomai nuo to ar energija imama iš baterijų ar atiduodama į baterijas keičiasi ir visos sistemos efektyvumas. Didinant apkrovas kuomet apšvieta daugiau nei 200 W/m² prie 2500 VA apkrovos pasiekiamas maksimalus trifazio inverterio efektyvumas, toliau didinant apkrovas dalis energijos imama iš baterijų, kadangi dėl sistemoje didėjančių apkrovų mažėja įtampa ir didėja srovė, mažėja vienfazinių inverterių efektyvumas.



3.11 pav. Sistemos THD priklausomybė nuo apkrovos

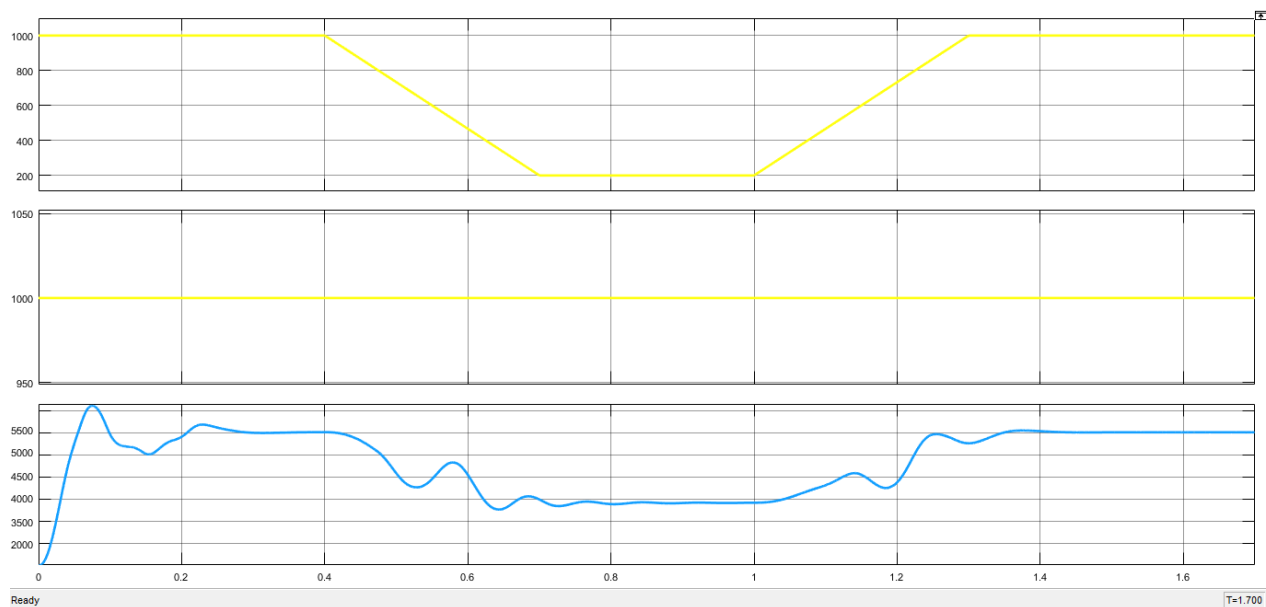
Pagal charakteristiką (3.11 pav.) matoma, kad didžiausi THD iškreipimai atsiranda sistemai veikiant su minimaliomis apkrovomis, didinant apkrovą, esant 100 W/m² apšvietai THD nusistovi ties 1 %. Kai apšvieta yra 200 W/m² iki 1500 VA apkrovos THD mažėja, toliau didinant apkrovą, dalis energijos naudojama iš baterijų, sistemoje veikia keli inverteriai, dėl to THD išauga iki 4 %, tame taške inverteris veikia su minimalia apkrova. Toliau didinant apkrovą, THD toliau mažėja. Analogiška THD tendencija yra apšvietai esant 500 W/m². Apšvietą padidinus iki 700 W/m² matomas nedidelis harmonikų didėjimas iki 2,3 kVA. Šiame taške dvikryptis keitiklis dar krauna baterijas minimalia galia. Toliau didinant apkrovą harmonikos mažėja. Apšvietai esant 1000 W/m², harmoniniai iškreipimai keičiant apkrovas kinta nežymiai .

3.3. Sistemos pereinamųjų procesų tyrimas

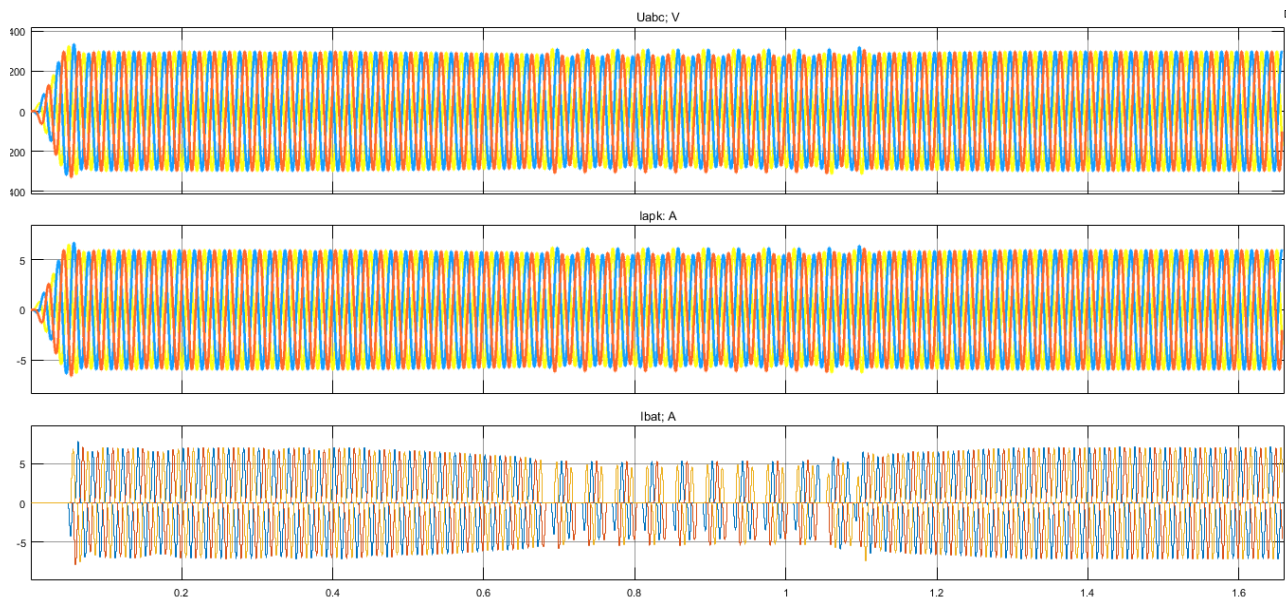
Saulės elektrinės įtaka mikrotinklui kintant generacijai

Šioje dalyje bus pateikiamos pereinamųjų procesų oscilogramos, pasirenkant pastovią apkrovą laike keičiantis vienos saulės apšvietai vienoje elektrinėje PV2 ir kintant bendrai PV1 ir PV2 elektrinių generuojamajai galiai. Saulės apšvieta realioje mikrotinklo sistemoje tarp elektrinių skiriasi dėl to , kad paros bėgyje stacionarioji apšviečiama tik tam tikru kampu, o pasukama elektrinė keičia savo

padētī priklausomai nuo apšvietimo kampo. Vienos fazēs apkrova parenkama 1,2 kVA tam, kad būtu pasiektas ribinis taškas, kuomet generacija yra didesnē nei apkrovos. Baterijū SOC 50 %.

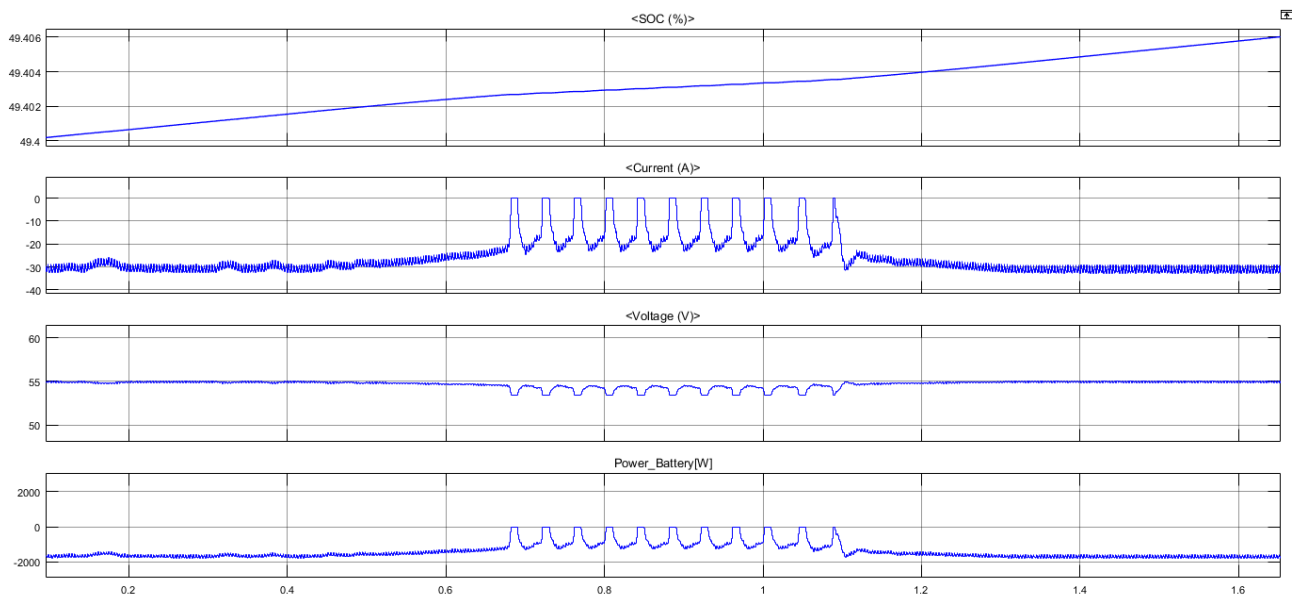


3.12 pav. PV1, PV2 apšvietos ir bendros galios kitimas laike



3.13 pav. Sistemos U, I ir srovės į baterijas oscilogramos keičiantis apšvietai

čia: U_{abc} – įtampa tinkle; I_{apk} – srovė tenkanti į apkrovas; I_{bat} – srovė tekanti į baterijas

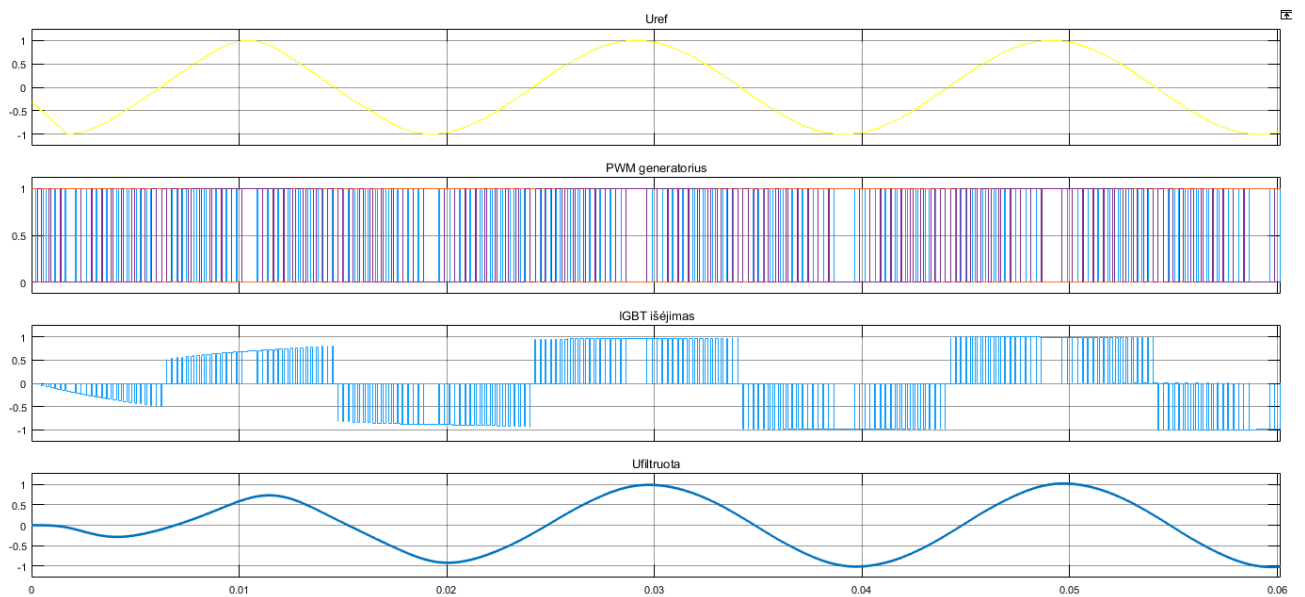


3.14 pav. Baterijų įkrovimo ciklas

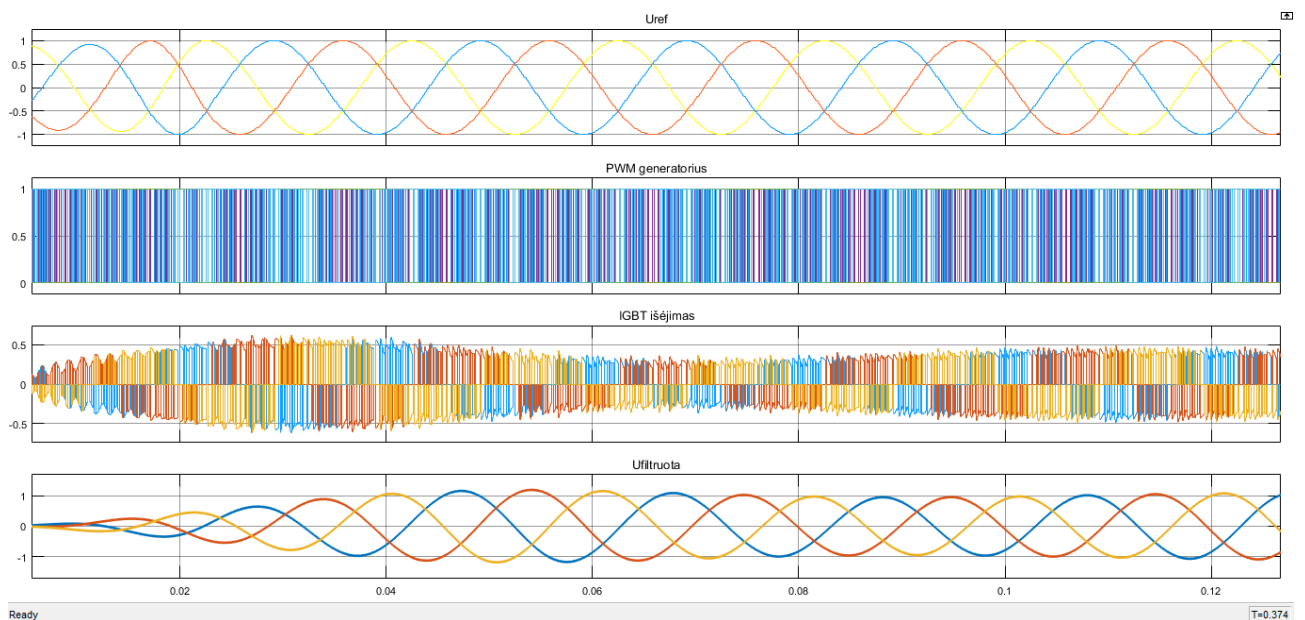
Iš Oscilogramų matyti, kad mažėjant apšvietai į vieną modulį įtampa palaipsniui mažėja, įtampai sumažėjus iki ribos 207 V (0,6...0,7 s) keitiklis persijungia iš AC/DC keitiklio į inverterį (Apkrova>generacija), krovimo srovė baterijoms nutraukiama. Įtampa trumpam laikui pakyla (240 V) ir dėl to vėl įjungiamas baterijų krovimas (Apkrova=generacija). Toliau mažinant apšvietą antrajai elektrinei iki 200W/m² (0,7...1,1 s) keitikliai veikia inverterio ir įkroviklių režime pakaitomis. Simuliacijoje po 1 sekundės apšvieta vėl didinama. PV2 pasiekus 400 W/m² (1,1 s) keitikliai pilnai persijungia į įkroviklius. Baterijų oscilograma pateikiama (3.14 pav.) matoma, kad SOC visame intervale didėja, o intervale nuo 0,7 s iki 1,1 s matomi įtampų ir srovių šuoliai.

Įnevrterių pasileidimo charakteristikos

Toliau pateikiamos vienfazio ir trifazio inverterių pasileidimo charakteristikos prie nominalių apkrovų. Matoma, kad pasileidimo pradžioje PWM impulsai yra sutankėję, sinusoidei pasiekus vardinę reikšmę, amplitudės maksimumo taške impulsų ilgai sutrumpėja. Vienfazis inverteris (3.15 pav.) vardinę amplitudinę reikšmę pasiekia per 0,05 s, o trifazis inverteris (3.16 pav.) stabilumo riba su vardine įtampa pasiekia per 0,12 s.



3.15 pav. Vienfazio inverterio pereinamasis pasileidimo procesas



3.16 pav. Trifazio inverterio pereinamasis pasileidimo procesas

čia: U_{ref} – nešlio dažninė įtampos sinusoidė; PWM generatorius- impulsų ilgiai kurie priklauso nuo paklaidos tarp nešlio dažnio ir formuojamos sinusinės įtampos inverterio išėjime; IGBT išėjimas – amplitudinės reikšmės inverterio IGBT modulių išėjime iki LC filtro; $U_{filtruota}$ – tampos charakteristika inverterio išėjime už LC filtro. Oscilogramų amplitudinės reikšmės santinkiniais vienetais.

Išvados

1. Atlikus mikrotinklo modeliavimą nustatyta, kad įtampos ir srovės bendras harmoninis iškraipymas neviršija 3 % mikrotinkle veikiant tik dvikrypčiams keitikliams, o visų generavimo šaltinių mikrotinkle įtampos ir srovių bendras harmoninis iškraipymas nesiekia 5 % ir atitinka standartą (LST EN 50160:2015), kuris nurodo, kad ilgalaikiai bendrieji harmoniniai iškraipymai turi neviršyti 8 %.
2. Atlikus tyrimą nustatyta, kad įtampos ir srovės THD keičiasi didinant tinklo asimetrija ir tuo pačiu nulinės sekos srovės, atitinkamai daugiausiai apkrautoje fazėje THD mažėja, o mažiau apkrautose fazėse didėja.
3. Nustatyta, kad veikiant vėjo elektrinei prie 6 m/s vėjo greičio ir mikrotinkle apkrovoms naudojant mažiau nei 250 VA galias kiekvienoje fazėje, mikrotinkle gaunamas nestabilus darbas, todėl reikia tobulinti modelyje esančių baterijų įkrovimo suderinamumą su generavimo šaltinių darbo režimais.
4. Atlikus skaičiavimus ir modeliavimą nustatytos asimetrijos ribos, kurios siekia 4 kVA galios skirtumo tarp atskirų fazių ir viršija leistinus 2 % nustatytus elektros kokybės standarte (LST EN 50160:2015).
5. Atlikus mikrotinklo tyrimą nustatyta, kad vienfazio keitiklio naudingumo koeficientas yra nuo 90 % iki 97 %, o viso mikrotinklo su visais generavimo šaltiniais nuo 79 % iki 93 %.

Literatūros sąrašas

1. Boris Dumnic ; Bane Popadic ; Dragan Milicevic ; Vladimir Katic ; Zoltan Corba „Influence of modulation technique on power quality issues for grid connected converter“ 2015 international conference on electrical drives and power electronics (EDPE).
2. Mohan V. Aware ; Jayant j. Mane “Multilevel grid-connected inverter performance under different modulation strategies“15 april 2013
3. Prasad V. Joshi ; Yogesh S. Bhavsar ; Sharad S. Dhamal ; Anurag M. Lulhe ; Tushar P. Pandhi „Grid interconnection of DC microgrid at distribution level using power electronic converter system-MATLAB/Simulink modeling and analysis „ 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)
4. Wooyoung Choi; Woongkul Lee; Di Han; Bulent Sarlioglu” New configuration of multifunctional grid-connected inverter to improve both current-based and voltage-based power quality” IEEE transactions on industry applications (volume: 54 , issue: 6 , nov.-dec. 2018).
5. Math H.J. Bollen, Jin Zhong, Francisc Zavoda, Jan Meyer, Alex Mceachern, and f. C. Lopez, "Power quality aspects of smart grids, " in International conference on renewable energies and power quality, Granada, Spain, 2010, pp. 1-6.
6. Jingshuang Shen, Chuanwen Jiang, Bosong Li, "Controllable load management approaches in smart grids", energies, vol. 8, pp. 11187-11202, 2015.
7. Jingwei Hu, Tieyan Zhang, Shipeng Du, Yan Zhao, "An overview on analysis and control of micro-grid system", international journal of control and automation, vol. 8, no. 6, pp. 65-76, 2015.
8. Hardesty, “What's a nanogrid energy manager today?”, March 2014.
9. Nikolay Lyuboslavov Hinov ; Rad Hristov Stanev ; Gergana Ilieva Vacheva “A power electronic smart load controller for nanogrids and autonomous power systems” 2016 xxv international scientific conference electronics (ET)
10. H. R. Karshenas, H. Daneshpajoo, A. Safaee, P. Jain, and A. Bakhshai, “bidirectional dc-dc converters for energy storage systems”, in energy storage in the emerging era of smart grids, intech, 2011.
11. Mitsuyasu Abe ; Hitoshi Haga ; Seiji Kondo „Electrolytic capacitor-less single-phase ac/dc converter using t-type npc circuit“ 2015 IEEE international telecommunications energy conference (INTELEC)
12. S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, J. M. Carrasco, "Energy storage systems for transport and grid applications", IEEE trans. ind. electron., vol. 57, no. 12, pp. 3881-3895, dec. 2010.
13. Rashid, M „power electronics“ handbook, elsevier: oxford, 3rd ed, 1362 p, 2011
14. R. Guedouani ; B. Fiala ; E. M. Berkouk ; M. S. Boucherit „Modeling and control of multilevel three-phase pwm current source inverter” 04 april 2013
15. Jiangfeng Wang ; Hongfei Wu ; Tianyu Yang ; Li Zhang ; Yan Xing „Bidirectional three-phase dc-ac converter with embedded dc-dc converter and carrier-based pwm strategy for wide voltage range applications” 24 august 2018
16. Navigant-research, 2013. Microinverters and dc optimizers: module-level power electronics market and technology trends, installations, revenue forecasts, and key players, 2013, 65 p.

17. S. Sumathi, L. A. Kumar, and P. Surekha, Solar PV and Wind energy conversion systems: An introduction to theory, Modeling with MATLAB/SIMULINK, and the Role of Soft Computing Techniques. Springer, 2015.
18. J. R. Bumby, N. Stannard and R. Martin „A permanent magnet generator for small scale wind turbines
19. Vėjo energija <http://www.zec.lt/energetikos-rusys/vejo-energija> Prieiga per internetą [2018.10.9]
20. Renukadevi G., Rajambal K. 2013. Novel PWM Technique for nth Harmonic Injection for N-phase VSIs International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC).
21. https://www.researchgate.net/publication/315829839_Modeling_and_analysis_of_1kW_Wind_Turbine_Generator_Using_Matlab_Simulink Prieiga per internetą [2018.10.7]
22. Vėjo elektrinės parametrai <https://www.mpsbe.com/AE%20v1000.pdf> Prieiga per internetą [2018.10.9]
23. Saulės elementų parametrai http://www.viasolis.eu/data/editable/downloads/SoliTek_Prime_240-250_ENG.pdf Prieiga per internetą [2018.5.9]
24. Baterijų katalogas http://www.midacbatteries.com/batteries_standby/117/OPZS.pdf Prieiga per internetą [2018.5.9]
25. LC filtrų parinkimo algoritmas <https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33264-designing-of-lc-filter> Prieiga per internetą [2018.10.9]
26. MPPT algoritmas https://www.researchgate.net/publication/273310702_Matlab-Based_Modeling_and_Simulations_to_Study_the_Performance_of_Different_MPPT_Techniques_Used_for_Photovoltaic_Systems_under_Partially_Shaded_Conditions Prieiga per internetą [2018.7.12]
27. Sunny iseland inverterio charakteristikos https://files.sma.de/dl/2485/SI_6H8H-AEN131411W.pdf Prieiga per internetą [2018.7.12]
28. Patil S.N. ; R. C. Prasad „Design and development of MPPT algorithm for high efficient DC-DC converter for solar energy system connected to grid“ 2015 International Conference on Energy Systems and Applications
29. Deepak Verma ; Savita Nema ; R. K. Nema „Implementation of perturb and observe method of maximum power point tracking in SIMSCAPE/MATLAB“ 2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)
30. Zhiguo Lu ; Chunjun Wu ; Lili Zhao ; Wanping Zhu „A new three-phase inverter built by a low-frequency three-phase inverter in series with three high-frequency single-phase inverters“ 06 August 2015
31. Minsoo Jang ; Mihai Ciobotaru ; Vassilios G. Agelidis „A compact single-phase bidirectional buck-boost-inverter topology“ IEEE Xplore: 14 March 2015
32. Paulose Thomas „Bidirectional dual inverter algorithm for grid tied microgrid systems“ 2017 Third International Conference on Science Technology Engineering & Management (ICONSTEM)
33. K.bhanu teja; j tramalingeswar „Voltage unbalance and harmonics compensation for islanded microgrid inverters“ international Journal of Latest Engineering and Management Research ISSN: 2455-4847

34. Daming Zhang ; King Jet Tseng „Design and modelling of grid-connected PMSG-based wind energy conversion through diode rectifier, DC/DC and DC/AC converters“ 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)
35. Holtz, J. (1992). Pulsewidth modulation-a survey. Power Electronics Specialists Conference, 1992. PESC '92 Record., 23rd Annual IEEE, pages 11 –18 vol.1.
36. Tinklo asimetrijos skaičiavimo metodika:
http://web.ecs.baylor.edu/faculty/lee/ELC4340/Lecture%20note/Chapter8_GSO5.pdf. 428-430p. Prieiga per internetą [2018.12.15]
37. Bird, J. O. (2003). Electrical Circuit Theory and Technology. Newnes, Oxford, 3rd edition.
38. Mikrotinklų plėtra lietuvoje :
https://www.lrs.lt/sip/portal.show?p_r=36177&p_k=1&p_t=257867&fbclid=IwAR0X2GkUQy7yeO16R8ZqIZroMET-rtDcxw3mKVj1rEEqXT7wJLyS38j6lzc Prieiga per internetą [2019.01.15]
39. <https://solitek.eu/wp-content/uploads/2018/11/SOLID-PRO-solar-module-datasheet.pdf> Prieiga per internetą [2019.04.14]
40. <https://ch.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/activeractivepower.html> Prieiga per internetą [2019.01.14]
41. <https://www.quora.com/what-is-the-use-of-a-bridge-rectifier-in-a-dc-to-dc-converter> Prieiga per internetą [2019.01.14]
42. Andrius PLATAKIS „Fotovoltinių keitiklių tiekiamos energijos kokybės tyrimas ir gerinimas“ Daktaro disertacija, Vilnius 2014.