



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Paulius Labokas

**SAULĖS ELEKTRINĖS ĮTAMPOS KEITIKLIO DARBO SU
ELEKTROS TINKLU TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Gytis Svinkūnas

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**SAULĖS ELEKTRINĖS ĮTAMPOS KEITIKLIO DARBO SU
ELEKTROS TINKLU TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

Vadovas

Doc. dr. Gytis Svinkūnas

Recenzentas

Doc. dr. Almantas Bandza

Projektą atliko

Paulius Labokas

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Paulius Labokas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Saulės elektrinės įtampos keitiklio darbo su elektros tinklu tyrimas“

AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. gegužės 25 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Pauliaus Laboko** baigiamasis projektas tema „Saulės elektrinės įtampos keitiklio darbo su elektros tinklu tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o 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)

Labokas, P. Saulės elektrinės įtampos keitiklio darbo su elektros tinklu tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas, elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2015. 40 psl.

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas – atlikti saulės elektrinės įtampos keitiklio darbo su elektros tinklu tyrimą. Darbe atliekama literatūros analizė, kurioje pateikiama informacija apie fotovoltinių keitiklių veikimo principą bei fotovoltinių keitiklių tipus ir panaudojamą. Taip pat aiškinamas fotovoltinio elemento veikimo principas. Aprašomos dažnio stabilumo palaikymo priemonės, jų paskirtis.

Metodinėje dalyje atliekamas saulės elektrinės prijungtos prie elektros tinklo modeliavimas. Naudojamas „Matlab/Simulink“ programų paketas. Saulės elektrinės modelis yra patobulinamas, įdiegiant elektros tinklo aktyviosios galios reguliavimą. Saulės elektrinė reaguoja į elektros tinklo dažnio pokyčius ir atitinkamai padidina perduodamą aktyviąją galią į elektros tinklą, arba sumažina. Lyginant nuo įprastų saulės elektrinių, sumodeliuota saulės elektrinė turi galios rezervą, tuo atveju jei elektros tinkle nukris dažnis. Saulės elektrinės keitikliai padidins aktyviąją galią ir prisidės prie aktyviosios galios balanso.

Pateikiami gauti simuliacijos rezultatai. Iš rezultatų matome, kad saulės elektrinė turi apie 20% aktyviosios galios rezervą. Nukritus tinklo dažniui, į tinklą saulės elektrinė perduoda maksimalią galią. Analogiškai padidėjus tinklo dažniui, saulės elektrinės perduodama galia sumažinama iki minimalios nustatytos reikšmės. Pateikta saulės elektrinės generuojamos galios priklausomybė nuo saulės energijos apšvietos. Gauta saulės elektrinės aktyviosios galios reguliavimo charakteristika, kuri taip pat atspindi dažnio reguliavimo nejautrumo zoną.

Reikšminiai žodžiai : Fotovoltiniai keitikliai, dažnio stabilumas, dažnio reguliavimas, saulės elektrinės modeliavimas.

Labokas, Paulius. The research on work of electric grid with solar power voltage converter. Final project of master's / supervisor doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electric Power Systems.

Kaunas, 2015. 40 p.

SUMMARY

The aim of the research is to carry out investigation of voltage converter effect to electric grid. Literature analysis delivers information about activity principles of photovoltaic converters, their types and usage.

Modeling of solar power linked up to electric grid is discussed in methodic part. "Matlab/Simulink" program package is used. Solar power station model is improved by introducing regulation of active power. Solar power reacts to frequency changes and correspondingly it increases or reduces its active power in the grid. In comparison with usual solar power station, modeled has its power reserve. In the case of reducing power in the grid, solar power station is able to increase the power and raise active power balance.

Simulation results are delivered. They show that solar power station has approximately 20% power in reserve. When frequency in the grid becomes lower, the solar power station delivers maximum of its power. If frequency increases then the solar power delivers its power reduced to minimum of fixed one. Solar power dependence upon the solar irradiance. Regulation of solar power characteristics reflects frequency regulation insensitive zone.

Keywords: photovoltaic converter, frequency stability, frequency regulation, solar power modeling.

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
IVADAS	10
1. FOTOVOLTINIAI KEITIKLIAI	11
1.1 Autonominiu režimu veikiantys keitikliai	11
1.2 Keitikliai jungiami į elektros tinklą	12
1.3 Fotovoltinio elemento veikimo principas	13
1.4 Fotovoltinių keitiklių veikimo principas	14
1.5 Keitiklio išėjimo filtras	17
2. DAŽNIO STABILUMO PALAIKYMAS	18
2.1 Sinchroninių generatorių dažnio reguliatorių paskirtis	19
2.2 Elektrinių agregatų su dažnio reguliatoriais darbas elektros sistemoje	20
2.3 Dažnio ir įtampos matavimas	21
2.4 Vėjo elektrinių ir vėjo elektrinių parkų dažnio avarinės vertės	23
3. SAULĖS ELEKTRINĖS PRIJUNGTOS PRIE ELEKTROS TINKLO MODELIAVIMAS ..	25
3.1 Fotovoltinio elemento modelis	25
3.2 DC-DC keitiklis	27
3.3 Galios taško reguliavimas	28
3.4 DC-AC keitiklis	29
3.5 Tinklo dažnio matavimas	29
3.6 DC-AC keitiklis	30
3.7 Viso modelio modeliavimas	30
4. SIMULIAVIMO REZULTATAI	32
4.1 Saulės spinduliavimo įtaka generuojamai galiai	32
4.2 Tinklo dažnio padidėjimo įtaka saulės elektrinės keitiklių darbui	34
4.3 Tinklo dažnio mažėjimo įtaka saulės elektrinės keitiklių darbui	36
IŠVADOS	39
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	40

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Viso tiltelio topologijos įtampos šaltinio inverterio raktų būsenos	15
2.1 lentelė. Generuojamojo dažnio valdymo vertės	23

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Autonominės fotovoltinės sistemos struktūrinė schema.....	12
1.2 pav. Skirtingos fotovoltinių keitiklių topologijos: a) centrinių keitiklių, b) serijų keitiklių, c) modulinų keitiklių, d) multi-serijų keitiklių	12
1.3 pav. Skersinis pn sandūros pjūvis ir procesai, kurie vyksta apšviestame fotovoltiniame elemente.....	13
1.4 pav. Vienfazis viso tiltelio topologijos įtampos šaltinio keitiklis.....	15
1.5 pav. Viso tiltelio topologijos įtampos šaltinio inverterio signalų epiūros vienpolei SPWM moduliacijai ($m_a = 0,8$, $m_f = 8$): a) nešlio ir moduliacijos signalai, b) rakto S_{1+} būseną, c) rakto S_{2+} būseną, d) išėjimo įtampa, e) išėjimo įtampos spektras, f) išėjimo srovė, g) nuolatinės įtampos šaltinio srovė, h) nuolatinės srovės spektras, i) rakto S_{1+} srovė, j) diodo D_{1+} srovė.....	16
1.6 pav. Žemųjų dažnių filtrai.	18
2.1 pav. Suminė elektros sistemos dažninė charakteristika.....	20
2.2 pav. Dažnio matavimo procedūra.....	22
2.3 pav. Įtampos matavimo procesas.....	22
2.4 pav. Apsaugos įtaiso algoritmas	23
2.5 pav. Dažnio valdymo grafikas, iliustruojantis 2.1 lentelės avarines vertes.....	24
2.6 pav. Vėjo elektrinių aktyviosios galios reguliavimo charakteristika.....	24
3.1 pav. Saulės elektrinės struktūra	25
3.2 pav. Fotovoltinio elemento atstojamoji grandinė	26
3.3 pav. Fotovoltinio keitiklio modelis.....	27
3.4 pav. Galios priklausomybė nuo įtampos	27
3.5 pav. DC-DC keitiklio modelis	28
3.6 pav. Galios parinkimo modelis.....	28
3.7 pav. DC-AC keitiklio modelis	29
3.8 pav. Dažnio reguliavimo blokas	29
3.9 pav. DC-AC kontrolerio modelis	30
3.10 pav. Saulės elektrinės modelis.....	31
4.1 pav. Saulės spinduliavimo priklausomybė nuo laiko	32
4.2 pav. Simuliavimo rezultatai pateikti grafiškai.....	32
4.3 pav. DC-DC keitiklio simuliavimo rezultatai pateikti grafiškai.....	33
4.4 pav. DC-AC keitiklio simuliavimo rezultatai pateikti grafiškai.....	33
4.5 pav. Saulės elektrinės galios priklausomybė nuo saulės apšvietos	34
4.6 pav. Simuliavimo rezultatai, kai dažnis pakyla pateikti grafiškai	34

4.7 pav. DC-AC keitiklio išėjimo charakteristikos, kai $f \geq 50$ Hz	35
4.8 pav. Saulės panelės išėjimo charakteristikos, kai $f \geq 50$ Hz	35
4.9 pav. DC-DC keitiklio išėjimo charakteristikos, kai $f \geq 50$ Hz	36
4.10 pav. Simuliavimo rezultatai, kai dažnis nukremta iki 49,5 Hz.....	36
4.11 pav. Saulės panelės išėjimo charakteristikos, kai $f \leq 50$ Hz	37
4.12 pav. DC-DC keitiklio išėjimo charakteristikos, kai $f \leq 50$ Hz	37
4.13 pav. DC-AC keitiklio išėjimo charakteristikos, kai $f \leq 50$ Hz	38
4.14 pav. Saulės elektrinės aktyviosios galios reguliavimo charakteristika.....	38

IVADAS

Elektros energijos gavimas iš saulės pastaraisiais metais vis didėja. 2009 metais iš saulės energijos gauta galia siekė 24 GW. 2010 metais galia padidėjo iki 40,7 GW, o 2012 metų pabaigoje galia siekė 102 GW. Numatoma, kad 2015 metais galia kurią išduos saulės elektrinės, gali viršyti 200 GW. Iš Europos fotovoltinės industrijos asociacijos „EPIA“ (angl. *European Photovoltaic Industry Association*) surinktų duomenų galima teigti, kad Europa išlieka lyderė fotoelektros gamyboje pasauliniu mastu. 2012 metais Europoje įdiegta FV energijos gamybos galia siekė 70 GW, o tai sudaro apie 70% viso pasaulio elektros gamybos iš FV elektrinių. Lietuvoje 2011 metais iš FV elektrinių buvo pagaminama 0,07599 GW, 2012 metais pagaminama 2,32 GW, o 2013 metais net 44,8 GW elektros energijos. Kaip pastebime FV elektrinės sparčiai plinta, dėl atsirandančių naujų technologijų, kurios padeda paprasčiau ir ekonomiškiau plėtoti šitokį elektros gamybos būdą.[1][2][3]

Darbo tikslas – pagerinti saulės elektrinės įtampos keitiklio darbą su elektros tinklu, kai elektros tinklas dirba nestabiliame režime. Šiam tikslui pasiekti keliami šie uždaviniai:

1. Susipažinti su saulės elektrinės įtampos keitiklio veikimo principu.
2. Išsiaiškinti dažnio reguliavimo būdus elektros tinkle.
3. Sukurti fotovoltinio keitiklio kuris tiekia energiją į elektros tinklą modelį.
4. Sudaryti saulės elektrinės veikimo algoritmą, įgyvendinant pirminį dažnio reguliavimą.
5. Atlikti saulės elektrinės įtampos keitiklio modelio simuliaciją ir išanalizuoti gautus rezultatus.

1. FOTOVOLTINIAI KEITIKLIAI

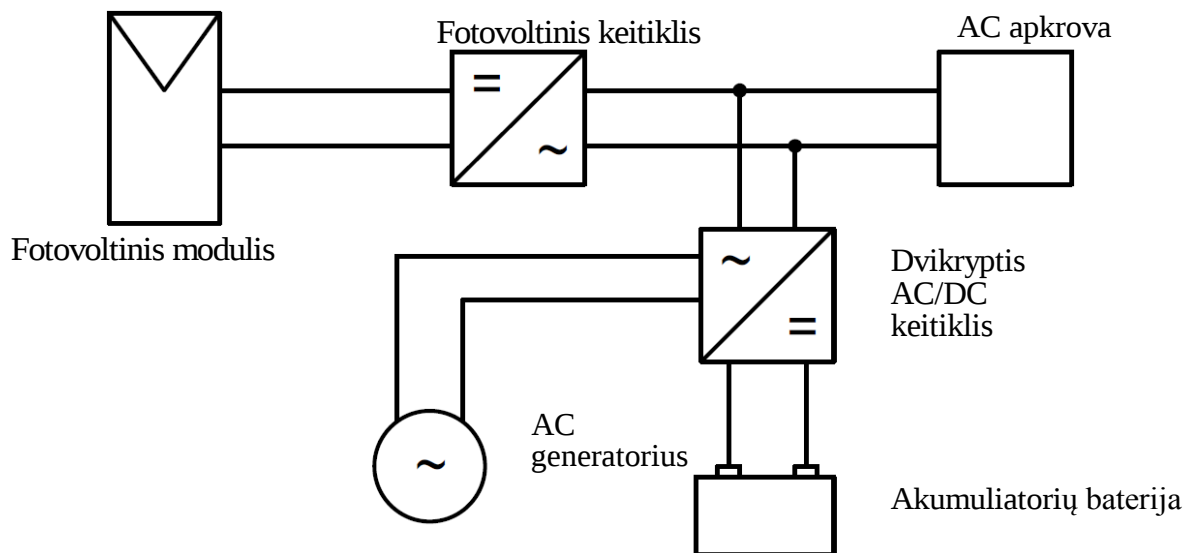
Energija, kuri išgaunama iš fotovoltinių elementų yra nuolatinės įtampos. Todėl daugeliu atvejų negali būti tiesiogiai panaudota. Kad panaudoti FV elektros energija elektros tinkluose, būtina nuolatinę generuojamą įtampą paversti standartine kintama įtampa. Tam tikslui pasiekti yra naudojami keitikliai.[3]

Keitiklis-elektroninė grandinė, kuri nuolatinę įtampą keičia standartine kintama įtampa. Galime išskirti penkias fotovoltinių keitiklių grupes, kurios skiriasi savo panaudojimu ir topologija.:

- autonominiai keitikliai;
- centriniai keitikliai;
- serijų keitikliai;
- moduliniai keitikliai;
- multi-moduliniai keitikliai.

1.1 Autonominiu režimu veikiantys keitikliai

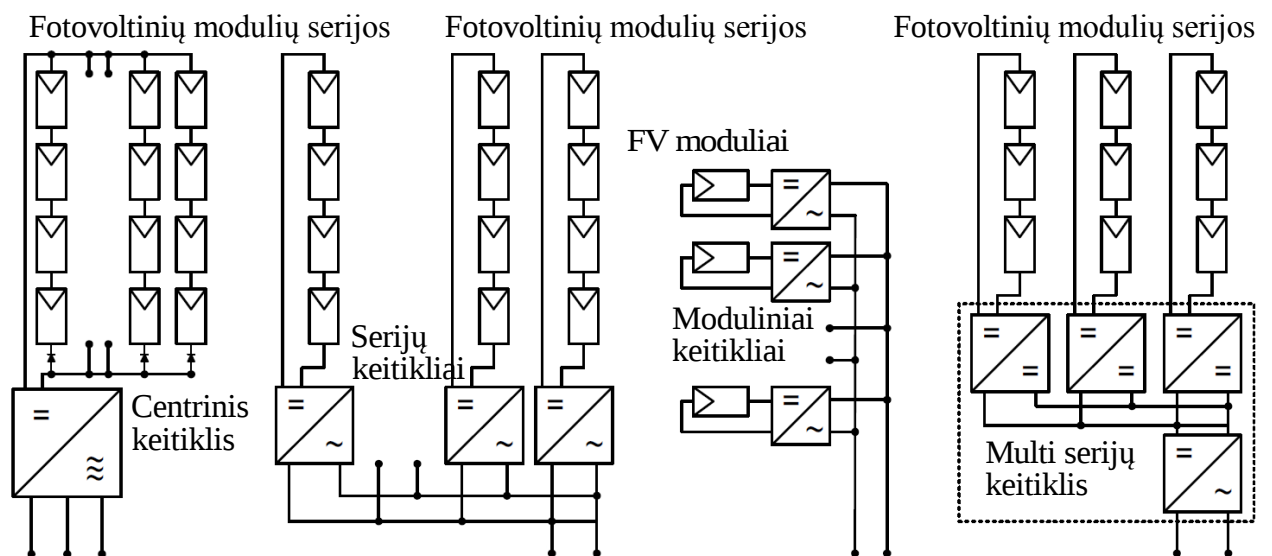
Fotovoltinės sistemos su autonominiu keitikliu struktūrinė schema pateikta 1.1 paveiksle. Autonominėje FV sistemoje keitiklis neturi jungties su elektros tinklu ir energiją iš fotovoltinių modulių tiekia tiesiai apkrovoms. Tokioje sistemoje FV keitiklis gali būti paprastesnis, nes nereikia sinchronizuotis su elektros tinkle esančia įtampa. Kita vertus, tokia sistema gali turėti rezervinį generatorių (tai gali būti ir kitas FV keitiklis arba kito tipo inverterio pagrindu veikiantis keitiklis, pvz. kuro celių), kuris gali įsijungti, kai generuojama nepakankamai energijos iš FV modulių. Tokiu atveju FV keitiklis privalo sinchroniškai veikti kartu su rezerviniu generatoriumi, kad srovė tekėtų į apkrovą, o ne tarp generatorių. Autonominėje sistemoje paprastai būna perteklinės energijos saugykla. Dažniausiai tai akumuliatorių baterija. Energijos saugyklos krovimo grandinės taip pat gali būti integruotos į FV keitiklį, tačiau pramonėje yra nusistovėjusi praktika išskirti šias funkcijas į skirtingus prietaisus, kadangi energijos saugyklos nusidėvėjimo laikas yra gerokai trumpesnis ir ją per FV sistemos veikimo laikotarpį gali tekti keisti keletą kartų. Tobulėjant technologijoms ateityje gali būti sukurtos efektyvesnės ar kitokiu principu veikiančios energijos saugyklos, kurioms valdyti reikės kitokių valdiklių. FV keitiklis paprastai derinamas su FV moduliais. FV modulių darbinis laikotarpis paprastai būna ne mažesnis kaip 25 metai, todėl ir FV keitikius stengiamasi gaminti panašiam darbiniam laikotarpiui.[3]



1.1 pav. Autonominės fotovoltinės sistemos struktūrinė schema[3]

1.2 Keitikliai jungiami į elektros tinklą

Viena iš seniausiai naudojamų topologijų yra centrinių keitiklių topologija (1.2 pav. a). Centrinių keitiklių topologija naudojama sistemose kurių galia svyruoja nuo 100 iki 1000 kW. Čia fotovoltiniai moduliai jungiami nuosekliai į serijas tam, kad būtų sukurta pakankamai aukšta įtampa (dažniausiai apie 500-700 V), o gavus reikiamą įtampą, serijos jungiamos lygiagrečiai, kad gauti norimą srovę. Seniau tokie keitikliai buvo gaminami naudojantis tiristoriniais galios raktais, dabar naudojamos raktai su IGBT tranzistoriais. Taip pat naudojantis centrinių keitiklių topologija kuriami mini-centriniai keitikliai, kurių galia yra mažesnė (nuo 6 kW) ir naudojami sistemose iki 100 kW.[3]



1.2 pav. Skirtingos fotovoltinių keitiklių topologijos: a) centrinių keitiklių, b) serijų keitiklių, c) moduliniai keitikliai, d) multi-serijų keitiklių. [3]

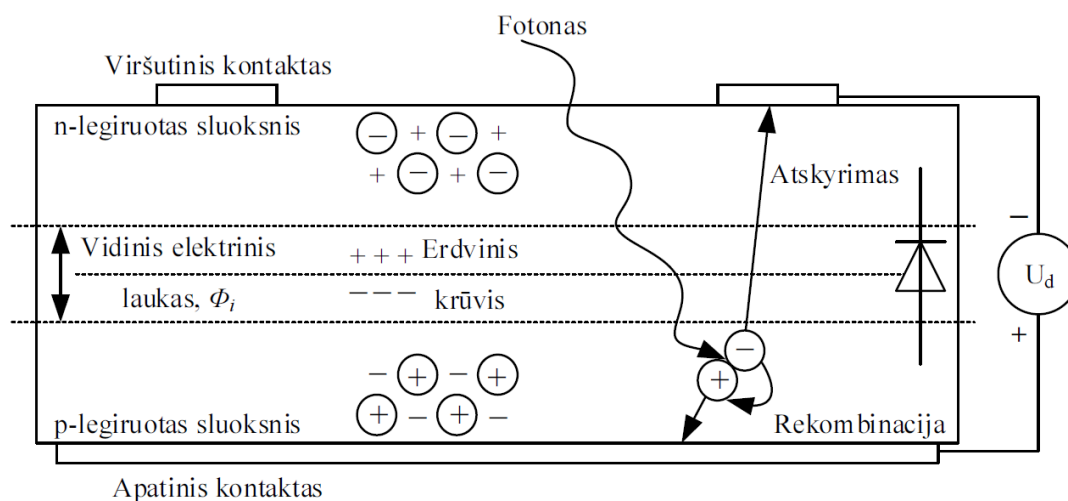
Dar viena keitiklių rūšis yra serijų keitikliai (1.2 pav. b). Tai moduline sistema paremti keitikliai. Jų galia svyruoja nuo 0,4 iki 2 kW. Čia FV moduliai jungiami nuosekliai į modulių serijas, o serijos jungiamos prie atskirų keitiklių. Tada serijų keitikliai sujungiami lygiagrečiai ir prijungiami prie tinklo. Jei norima padidinti įtampa iki reikiamos (320-350 V), privaloma naudoti įtampos aukštinimo pakopą, kas mažina efektyvumą. [3]

Modulinis keitiklis - kai vienas modulis per vieną keitiklį jungiamas prie elektros tinklo (1.2 pav. c). Jų galia siekia apie 400W. Didžiausias šių keitiklių privalumas, kad galima išgauti maksimalią energiją, nes kiekvienas modulis turi savo maksimalios galios sekimo valdiklį. Taip pat tokia sistema yra paprastesnė, todėl lengviau galima ją keisti ir modifikuoti. [3]

Multi serijos keitiklių topologija šiuo metu yra pati naujausia (1.2 pav. d). Šie keitikliai kiekvienai atskirai modulių serijai turi DC/DC keitiklius, kurie lygiagrečiai jungiami prie DC/AC keitiklio ir per jį prie elektros tinklo. Taip kiekvienas keitiklis turi maksimalios galios sekimo valdiklį, kas leidžia maksimaliai išnaudoti gaunamą energiją iš saulės. Šitokios sistemos yra lankstesnės ir turi didesnį patikimumą.[3]

1.3 Fotovoltinio elemento veikimo principas

Saulės spinduliuojamai energijai pakeisti į elektros energiją yra naudojami FV elementai. FV elementas yra silicio pn sandūra, kurioje krentantys fotonai sukuria elektros srovę. Žemiau 1.3 paveiksle pateikta fotovoltinio elemento *pn* sandūros pjūvis.[3]



1.3 pav. Skersinis pn sandūros pjūvis ir procesai, kurie vyksta apšviestame fotovoltiniame elemente.[3]

Silicio atomas išoriniame sluoksnyje turi keturis elektronus. Šie elektronai sudaro elektronų poras su aplinkiniais silicio atomais silicio kristale. Legiruojant silicį boru (akceptorinės priemaišos – p-tipas), kurio atomas išoriniame sluoksnyje turi tik tris elektronus, silicio kristale sukuriama elektronų trūkumas. Tokiu būdu yra sukuriama skylės, t. y.

teigiamieji krūvininkai, kurie gali judėti p-legiruotame silicio kristale. Kai monokristalinis silicis yra legiruojamas fosforu (donorinės priemonės – n-tipas), kurio atomas išoriniame sluoksnyje turi penkis elektronus, silicio kristale sukuriama elektronų perteklius. Tokiu būdu sukuriama laisvieji elektronai ir neigiamieji krūvininkai gali laisvai judėti n-legiruotame silicio kristale.[3]

Pn sandūroje, kur du skirtingai legiruoti puslaidininkiai susijungia, laisvieji elektronai iš n-legiruoto sluoksnio gali laisvai judėti į p-legiruotą sluoksnį. Sukuriama vidinis elektrinis laukas ir elektronai nebegali įveikti pn sandūros – susidaro pusiausvyros sąlygos.[3]

Į FV elementą krentantis fotonas gali būti absorbuotas elektrono psluoksnyje. Tada sukurama skylė ir krūvininkas gali laisvai judėti. Jei elektronas pasiekia pn sandūrą prieš įvykstant rekombinacijai, vidinis elektrinis laukas priverčia jį peršokti į n-sluoksnį. Kita vertus, jei krūvininkas rekombinuoja prieš pasiekdamas pn sandūrą, jis neprisideda prie elektros srovės generacijos. Rekombinacija gali pasireikšti dėl kristalo nereguliarumo, negrynumo arba atsitiktinumo. Kai elektronas pereina pn sandūrą, jam lieka du keliai grįžti atgal į p-sluoksnį: elektronas gali keliauti per pn sandūrą (tada FV elementas veikia kaip diodas) arba per išorinę FV elemento apkrovos grandinę. Minimali fotono energija, kuri reikalinga išlaisvinti elektroną iš p-sluoksnio, yra nuo $E_g = 0,2$ iki $3,7$ eV ir priklauso nuo konkrečios puslaidininkinės medžiagos draustinės juostos pločio, temperatūros, legiravimo laipsnio ir pn sandūros formavimo proceso. [3][4]

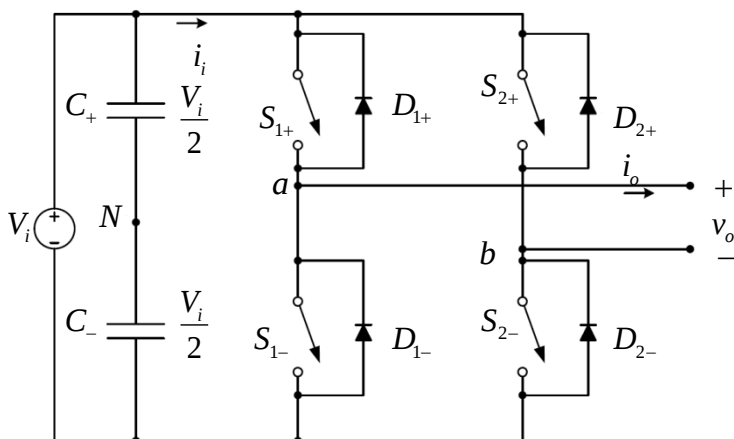
1.4 Fotovoltinių keitiklių veikimo principas

FV keitikli sudaro keitiklis ir jo darbą valdančios grandinės. Keitiklis yra pagrindinis keitiklio mazgas, iš nuolatinės įtampos formuojantis reikiamo dažnio ir amplitudės kintamą įtampą ir srovę. Keitikliai naudojami ne tik FV keitikliuose, bet ir kituose galios elektronikos prietaisuose kaip dažnio keitikliai asinchroninių variklių sukimosi greičiui valdyti, nepertraukiamo maitinimo šaltiniai ir kt. Keitiklis tiekia kintamą įtampą arba srovę, kurių amplitudę, dažnį ir fazę galima valdyti, keičiant į keitiklio raktus tiekiamu valdymo signalu. Priklausomai nuo išėjimo įtampos pobūdžio, keitiklio topologijos juos galima vadinti įtampos šaltinio keitikliais (angl. *VSI – Voltage-Source Inverter*), kuriuose valdoma yra išėjimo įtampos forma ir srovės šaltinių keitikliai (angl. *CSI – Current Source Inverter*), kuriuose valdoma yra išėjimo srovės forma. Kadangi elektros tinklas yra įtampos šaltinis, todėl FV keitikliuose naudojami įtampos šaltinio keitikliai.[3]

Keitikliai sudaryti iš galios raktų, todėl įtampos šaltinio keitiklio išėjimo įtampa yra impulsinė. Įtampai formuoti naudojama impulso pločio moduliacija (angl. *PWM – Pulse Width Modulation*). Naudojant šį įtampos formavimo metodą, išėjimo įtampą be pagrindinės harmonikos sudaro ir aukštesniosios harmonikos. Pagrindinės harmonikos kitimo dėsnį užtikrina

į raktus tiekiamos valdymo impulsų pločio moduliacijos būdas. FV keitiklių keitikliuose dažniausiai naudojami nešlio dažniu pagrįsti (pvz. sinuso, angl. *SPWM* – *Sinusoidal Pulse Width Modulation*) ir selektyvus harmonikų šalinimo (angl. *SHE* – *Selective Harmonic Elimination*) moduliacijos būdai.[3]

Keitiklių išėjimo signalas yra impulsinis, todėl įtampos šaltinių keitiklių apkrova turi būti induktyvaus pobūdžio, kad būtų gaunama tolydi sinuso dėsnio kintanti išėjimo srovė. Talpinio pobūdžio apkrova įtampos šaltinio keitiklyje sukurtų srovės šuolius. Tokiu atveju reikalingas induktyvus filtras tarp keitiklio išėjimo ir apkrovos.[3]



1.4 pav. Vienfazis viso tiltelio topologijos įtampos šaltinio keitiklis.[4]

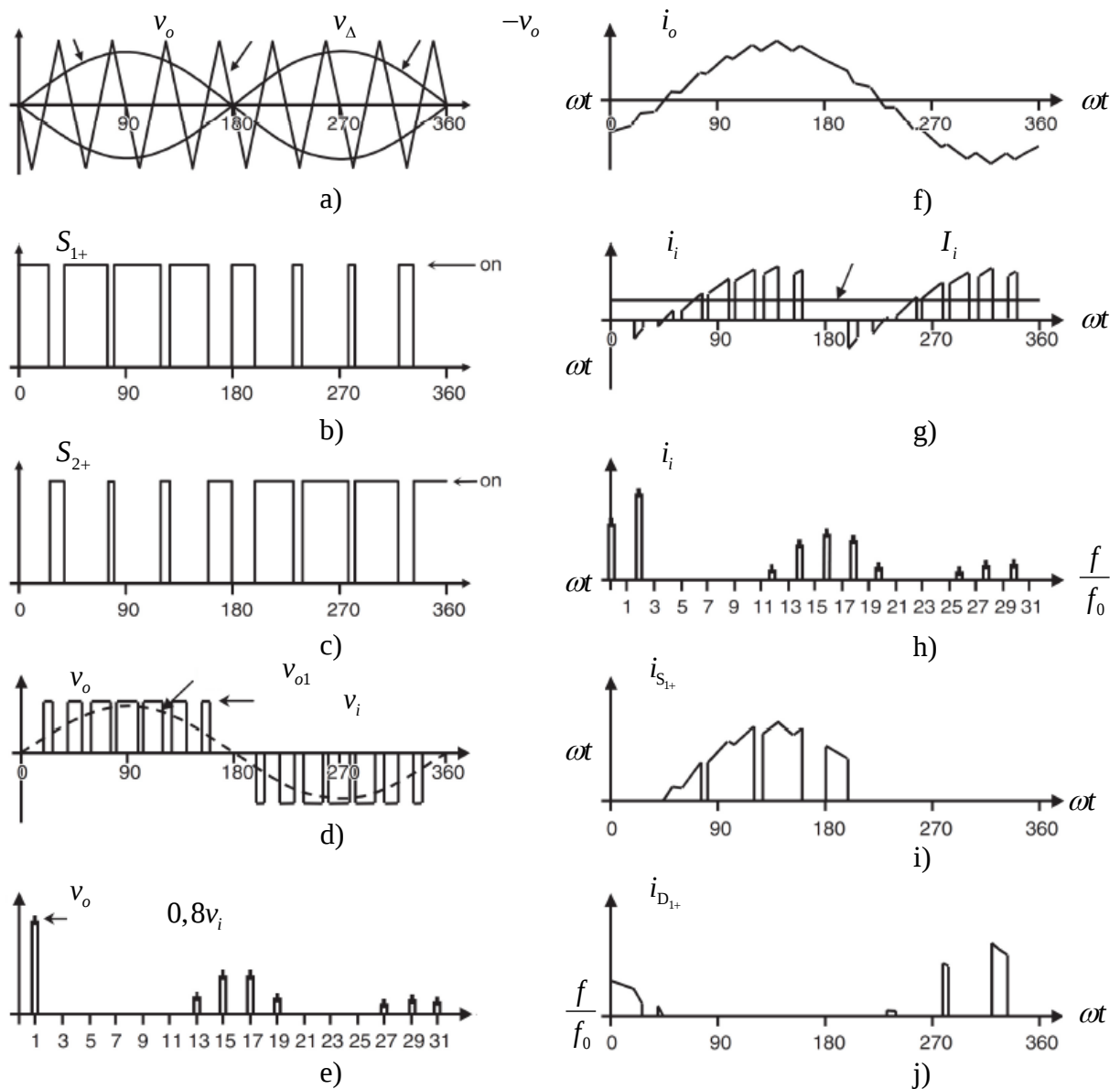
Vienfaziuose FV keitikliuose dažniausiai naudojami viso tiltelio įtampos šaltinių inverteriai. Viso tiltelio įtampos šaltinio inverterio topologija pateikta 1.4 paveiksle. Abu raktai tuo mačiu metu negali būti įjungti nes tokiu atveju įvyktų nuolatinės įtampos šaltinio trumpas jungimas. Taip pat to peties raktai inverteryje visuomet dirba priešfazėje. Todėl viso tiltelio įtampos šaltinių inverteriai turi keturias apibrėžtas (1, 2, 3 ir 4) ir vieną neapibrėžtą (5) raktų būsenas, pateiktas 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Viso tiltelio topologijos įtampos šaltinio inverterio raktų būsenos.[4]

Nr.	Būsena	v_{aN}	v_{bN}	v_o	Veikiantys elementai
1	S_{1+} ir S_{2-} įjungti, S_{1-} ir S_{2+} išjungti	$v_i/2$	$-v_i/2$	v_i	S_{1+} ir S_{2-} jei $i_o > 0$ D_{1+} ir D_{2-} jei $i_o < 0$
2	S_{1-} ir S_{2+} įjungti, S_{1+} ir S_{2-} išjungti	$-v_i/2$	$v_i/2$	$-v_i$	D_{1-} ir D_{2+} jei $i_o > 0$ S_{1-} ir S_{2+} jei $i_o < 0$
3	S_{1+} ir S_{2+} įjungti, S_{1-} ir S_{2-} išjungti	$v_i/2$	$v_i/2$	0	S_{1+} ir D_{2+} jei $i_o > 0$ D_{1+} ir S_{2+} jei $i_o < 0$
4	S_{1-} ir S_{2-} įjungti, S_{1+} ir S_{2+} išjungti	$-v_i/2$	$-v_i/2$	0	D_{1-} ir S_{2-} jei $i_o > 0$ S_{1-} ir D_{2-} jei $i_o < 0$
5	S_{1-} , S_{2-} , S_{1+} ir S_{2+} išjungti	$-v_i/2$ $v_i/2$	$v_i/2$ $-v_i/2$	v_i $-v_i$	D_{1-} ir D_{2+} jei $i_o > 0$ D_{1+} ir D_{2-} jei $i_o < 0$

Neapibrėžtos būsenos vengiama dėl to, kad išėjimo įtampa turi būti determinuota. Norint išvengti trumpo jungimo nuolatinės įtampos maitinimo šaltinyje ir neapibrėžtos išėjimo įtampos būsenos, moduliacijos metodus turi užtikrinti, kad kiekvienu laiko momentu tik vienas kiekvieno peties raktas yra įjungtas. Iš būsenų lentelės matyti, kad išėjimo įtampos amplitudė siekia inverterio maitinimo įtampos vertę. [4]

Yra keletas moduliacijos būdų, tinkančių viso tiltelio topologijai. Viena iš populiariausių yra vienpolė impulso pločio moduliacija. Vienpolėje impulso pločio moduliacijoje naudojamos 1, 2, 3 ir 4 raktų būsenos (1 lentelė) išėjimo įtampai formuoti. Todėl išėjimo įtampa gali įgyti tokias vertes: v_i , $-v_i$ ir 0. Raktų valdymo signalams generuoti naudojamas nešlio dažniu pagrįstas moduliacijos būdas, kai naudojami du sinusoidės pavidalo moduliuojantys signalai (1.5 pav.). [4]



1.5 pav. Viso tiltelio topologijos įtampos šaltinio inverterio signalų epiūros vienpolei SPWM moduliacijai ($m_a = 0,8$, $m_f = 8$): a) nešlio ir moduliacijos signalai, b) rakto S_{1+} būseną, c) rakto S_{2+} būseną, d) išėjimo įtampa, e) išėjimo įtampos spektras, f) išėjimo srovė, g) nuolatinės įtampos šaltinio srovė, h) nuolatinės srovės spektras, i) rakto S_{1+} srovė, j) diodo D_{1+} srovė. [4]

Įtampos, suformuotos viso tiltelio topologijos inverteriu, naudojant vienpolę impulso pločio moduliaciją, epiūros ir spektras pateikti 1.5 paveiksle. Išėjimo įtampa ($v_o = v_{ab} = v_{aN} - v_{bN}$) neturi lyginių harmonikų, nes fazinės įtampos (v_{aN} ir v_{bN}) yra vienodos amplitudės, tačiau skiriasi 180° faze. Todėl, kai m_f yra lyginis, harmonikos išėjimo įtampos atsiranda normalizuotuose nelyginiuose dažniuose f_h , sutelktuose aplink dvigubą normalizuotą nešlio dažnį m_f ir jo kartotinius:

$$h = l \cdot m_f \pm k, \quad l = 2, 4, \dots, \quad (1)$$

čia $k = 1, 2, 3, \dots$. Harmonikos nuolatinės įtampos maitinimo šaltinio srovėje atsiranda normalizuotuose dažniuose f_p , sutelktuose aplink dvigubą normalizuotą nešlio dažnį m_f ir jo kartotinius:

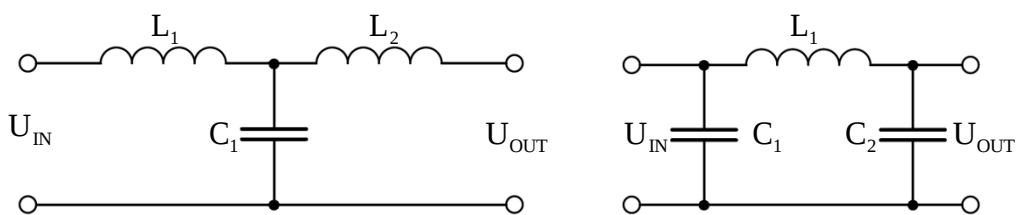
$$p = l \cdot m_f \pm k \pm 1, \quad l = 2, 4, \dots, \quad (2)$$

čia $k = 1, 2, 3, \dots$. Tai yra naudinga savybė, nes leidžia naudoti mažesnių nominalų filtravimo elementus, priešingai nei naudojant dvipolę SPWM moduliaciją.[4]

1.5 Keitiklio išėjimo filtras

Filtras - tai tokia elektrinė grandinė, kuri praleidžia tam tikrų dažnių signalus (pralaidumo juosta), ir slopina kitų dažnių signalus (slopavimo juosta). Filtrą sudaro reaktyvieji elementai, todėl jo elektrinės charakteristikos nevienodos skirtingų dažnių elektriniams signalams. Tam tikri dažniai turi pereiti filtro elektrinę grandinę pakisdami minimaliai, todėl ritės ir kondensatoriai turėtų būti idealūs elementai, nes bet kokia varža slopina visu dažniu signalus. Tarp pralaidumo juostos, kur slopinimas idealiai lygus nuliui, ir slopinimo juostos, kur slopinimas turėtų būti begalinis, yra ribinis dažnis. Šiame dažnyje slopinimas iš minimalaus pasikeičia į kažkokią baigtinę vertę. Filtras, kuris neturi savo maitinimo šaltinio, vadinamas pasyviuoju, o tas, kuris turi atskira maitinimo šaltinį, vadinamas aktyviuoju. Filtrai naudojami įvairiose elektronikos srityse: komunikacijoje, valdymo įtaisuose ir t.t. Šių filtrų pralaidumo juosta gali būti nuo kelių hercų iki kelių megahercų eilės. Inverteriuose naudojami žemų dažnių filtrai, nes reikia nufiltruoti nešančio dažnio harmonikas, kurios paprastai yra kelių kilohercų eilės, o išėjime gauti kuo didesnės amplitudės pagrindinę harmoniką, paprastai 50 Hz, signalą.

Žemųjų dažnių filtrai paprastai nagrinėjami dviejų topologijų: T ir π (1.6 pav.). Juose nuosekliai jungiamos ritės, o lygiagrečiai šuntuojantys kondensatoriai. Žemųjų dažnių filtras praleidžia visus dažnius, esančius žemiau ribinio dažnio. Tokie filtrai dažnai naudojami nuolatinės įtampos maitinimo šaltiniuose, nuolatinėms išėjimo įtampos pulsacijoms mažinti.[4]



1.6 pav. Žemųjų dažnių filtrai.[4]

2. DAŽNIO STABILUMO PALAIKYMAS

Dažnio stabilumo palaikymą apibrėžia tam tikros taisyklės, kurių privaloma laikytis norint tiekti elektros energiją į tinklą: Jas patvirtina Lietuvos Respublikos energetikos ministras, vadovaujantis elektros tinklų naudojimo taisyklėmis. Išskiriamos sisteminių paslaugų nuostatos apie dažnio stabilumo palaikymą:

1. dažnio stabilumo palaikymo bei aktyvios galios ir elektros energijos balanso valdymo sisteminė paslauga skirta palaikyti elektros energetikos sistemos dažnį nustatytose ribose bei užtikrinti elektros galios bei energijos balansą;
2. pagal lygiagretaus elektros energetikos sistemų darbo principus pirminio reguliavimo galios rezervas yra paskirstomas tarp sinchroniškai dirbančių elektros energetikos sistemų;

Pagrindiniai pirminio reguliavimo papildomos paslaugos teikimo reikalavimai:

1. generuojančio šaltinio pirminių variklių galios reguliavimo sistema turi užtikrinti generatoriaus aktyviosios galios kitimą reaguojant į dažnio pokyčius;
2. perdavimo sistemos operatoriui pareikalavus, gamintojas privalo veikiančiuose generatoriuose prijungti pirminį reguliavimą;
3. perdavimo sistemos operatorius turi teisę nuspręsti, kurį generuojantį šaltinį ir kuriam laikui įtraukti į pirminį reguliavimą.

Antrinio reguliavimo rezervo pagrindiniai papildomos paslaugos teikimo reikalavimai:

1. svarbiausi generuojančio šaltinio antrinio reguliavimo papildomos paslaugos teikimo techniniai parametrai yra antrinio reguliavimo (antrinio reguliavimo galios rezervo) diapazonas, galios keitimo greitis, galios reguliavimo tikslumas, parengties trukmė;
2. automatinis antrinis reguliavimas gali būti įdiegtas visuose naujai statomuose ar rekonstruojamuose generuojančiuose šaltiniuose;
3. generuojantis šaltinis teikiantis antrinio reguliavimo papildomą paslaugą, operatoriui pareikalavus, privalo vykdyti nurodytą antrinio reguliavimo komandą;
4. perdavimo sistemos operatorius turi teisę nuspręsti, kurį generuojantį šaltinį, kuriam laikui ir kokia apimtimi įtraukti į antrinį reguliavimą.

Elektros tinklų naudojimo taisyklių antrame priede nurodomi tiekėjai, kurie privalo teikti papildomas paslaugas. Pirminį reguliavimą privalo teikti:

Visi gamintojai, kurių generatoriaus vienetinė galia yra 5 MW ir daugiau bei elektros energijos gamybai normaliu darbo režimu naudoja tik arba dalinai (viename garo katile ar su skersiniais ryšiais) iškastinį kurą, hidroenergiją, biudujas. Visi gamintojai, kurių agregatai elektros energijos gamybai naudoja vėjo energiją ir vėjo parko suminė galia yra 5 MW ir daugiau.

Antrinį reguliavimą privalo teikti:

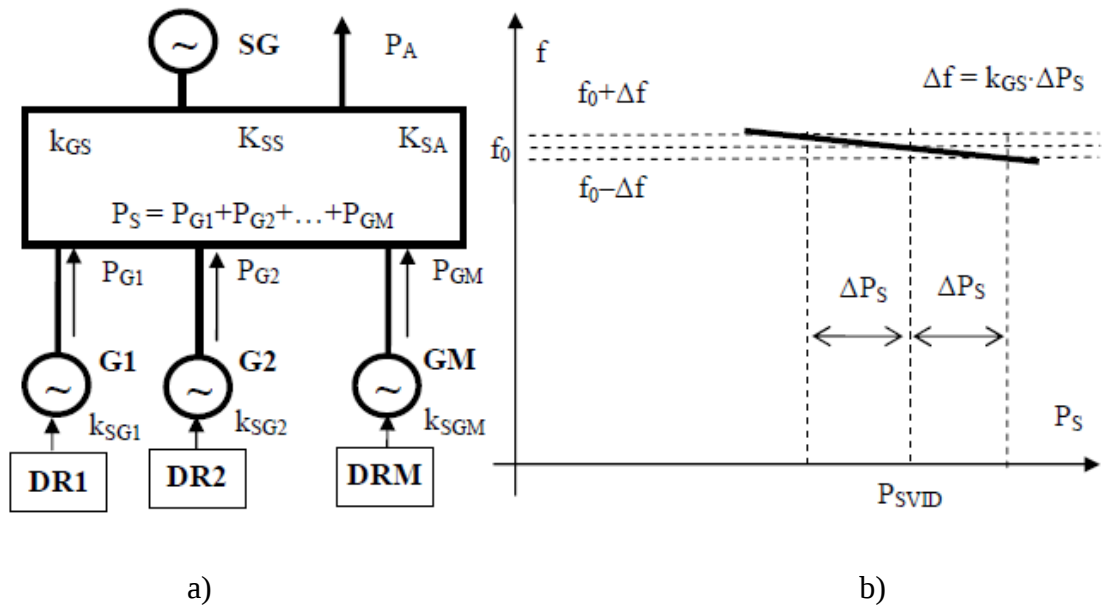
Gamintojai, kurių vienetinė generatoriaus galia 50 MW ir didesnė. Gamintojai, kurių agregatai elektros energijos gamybai naudoja vėjo energiją ir vėjo parko suminė galia yra 5 MW ir daugiau. Gamintojai, kurių agregatai elektros energijos gamybai naudoja hidroenergiją ir kurių vienetinė generatoriaus galia 10 MW ir didesnė.[5]

2.1 Sinchroninių generatorių dažnio reguliatorių paskirtis

Vienas iš pagrindinių elektros kokybės rodiklių yra sistemos dažnio palaikymas nustatytose ribose (pvz., $50 \pm 0,1$ Hz). Dažnio palaikymui naudojami sinchroniniai generatoriai, kuriuos suka pirminiai varikliai, kaip garo ar vandens turbinos. Kai suvartojama galia yra lygi pagaminamai galiai, sistemos dažnis nekinta, tačiau jei galios suvartojama daugiau nei pagaminama, sistemos dažnis krinta. Jei galios suvartojama mažiau, nei pagaminama, sistemos dažnis auga. Sumažėjus dažniui reikia didinti energijos nešiklio padavimą į pirminius variklius ir padidėjus dažniui – mažinti. Šitokį automatinį reguliavimą atlieka specialūs reguliatoriai, dar vadinami automatiniais dažnio reguliatoriais (ADR). Norint gauti galių balansą, negalima padidinti vieno agregato galią, nes pasikeis galios srautų pasiskirstymas, kas įtakos sistemos patikimumą ir ekonomiškumą. Todėl dažnio valdymas siejasi su aktyviųjų galių valdymu. Tam tikslu pasiekti, naudojama speciali valdymo sistema. Žemiausioje sistemos grandyje yra pirminių agregatų dažnių reguliatoriai. Aukštesnė grandis vadinama pagalbinė, nes ji veikia kaip grupinis elektrinės galios reguliatorius, koordinuojantis pirminių reguliatorių darbą – paskirstantis apkrovas tarp generatorių ir nuolat palaikantis nustatytus reguliavimo galios rezervus (galimybę didinti ar mažinti generuojamą galią). Trečioji grandis – elektros sistemos (valdymo rajono) reguliavimo sistema, kuri vadinama antriniu reguliatoriumi. Ji koordinuoja visų elektrinių generatorių, dalyvaujančių dažnio reguliavime, darbą ir stabilizuoja tarpsisteminius aktyviųjų galių srautus. Ši valdymo struktūra kitaip vadinama automatinio generacijos valdymo (AGV) sistema.[6]

2.2 Elektrinių agregatų su dažnio reguliatoriais darbas elektros sistemoje

Aukščiau minėti sinchroniniai generatoriai (pirminiai ADR) turi statines charakteristikas, todėl pilnai nestabilizuoja elektrinės sistemos dažnio. Nors ir laikantis keliamų dažnio palaikymo kokybės reikalavimų naudojantis pirminiais ADR, iškyla papildomos problemos. Privaloma išlaikyti rezervinę galią tarp dažnį reguliuojančių generatorių. Aiškinantis dažnio reguliavimo charakteristikos parametrus, sudarome sistema (2.1 pav. a), kuri susideda iš generatorių, kurie dalyvauja dažnio reguliavime ($G_1, G_2, \dots, G_M$), prie jų prijungti dažnio reguliatoriai (DR), dažnį nereguliuojantis generatorius (SG) ir sistemos apkrova (P_A). Bendra tokios sistemos charakteristika pateikta (2.1 pav. a).[6]



2.1 pav. Suminė elektros sistemos dažninė charakteristika[6]

Kaip pastebime suminė energetikos sistemos charakteristika (2.1 pav. b) yra analogiška vieno agregato charakteristikai. Aktyviosios galios ir dažnio kitimas nagrinėjamas tik tam tikrame vidutinės aktyviosios galios (P_{SVID}) ir vardinio dažnio (f_0) tam tikrame diapazone (2.1 pav. b).

Suminis sistemos statiškumo koeficientas, kuris turi M dažnio reguliavimo agregatų randamas šitaip:

$$k_{GS} = 1 / (k_1 / k_{SG1} + k_2 / k_{SG2} + k_3 / k_{SG3} + \dots + k_N / k_{SGM}) \quad (2)$$

Čia $k_{SG(1-M)}$ – generatorių dažnio charakteristikų statiškumo koeficientai, išreikšti vardiniais ar santykiniais vienetais; k_N – generatorių galios koeficientai, įvertinantys jų santykinę galią:

$$k_M = P_{GNM} / P_{SN} \quad (3)$$

P_{GNM} – atskiro generatoriaus vardinė galia, P_{SN} – vardinė sistemos galia (visų veikiančių generatorių vardinių galių suma). Dydis, atvirkščias statiškumo koeficientui (k_{GS}) kartais vadinamas reguliavimo galia:

$$P_{RG} = 1/k_{GS}, [MW/Hz] \quad (4)$$

Jis parodo, kiek aktyviosios galios (MW) reikia norint pakeisti sistemos dažnį vienu hercu. Dažnio nuokrypis pakitus apkrovai ΔP_A lygus:

$$\Delta f = k_{GS} \cdot \Delta P_A \quad (5)$$

Pagal šią lygybę ir žinant dažnio kitimo diapazoną (Δf_D) galima nustatyti aktyviosios galios (ΔP_R) kitimo (reikalingo reguliavimo galios rezervo) apimtį:

$$\Delta P_R = \Delta f_D / k_{GS} \quad (6)$$

Generatorių (ΔP_{GM}) apkrovų pasiskirstymas apskaičiuojamas taip:

$$\Delta P_{GM} = (k_{GS} \cdot k_N / k_{SGM}) \cdot \Delta P_A \quad (7)$$

Kaip matome iš formulės, apskaičiuoto generatoriaus apkrovos pokytis tiesiogiai priklauso nuo generatoriaus galios, suminio apkrovos pokyčio ir atvirkščiai proporcingas statiškumo koeficientui.

Ieškant visos sistemos statiškumo koeficientą vertiname ne tik generatorių, bet ir apkrovų statines charakteristikas. Tada formulė būtų tokia:

$$k_{ss} = 1 / (1/k_{GS} + 1/k_{AS}) \quad (8)$$

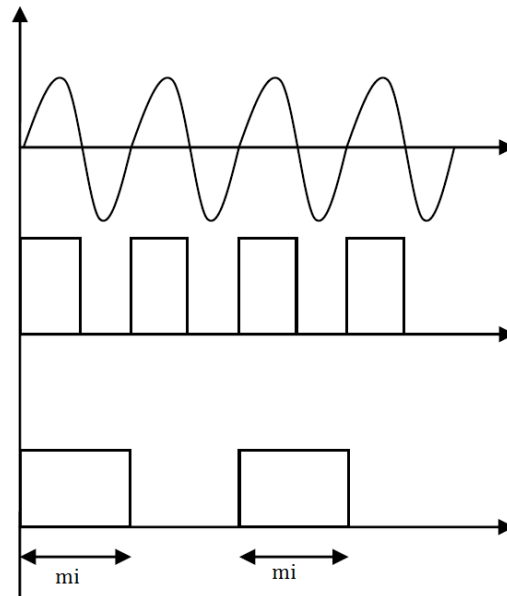
Čia k_{AS} – apkrovos statiškumo koeficientas.

Šie nagrinėjimai rodo, kad dažnio reguliavimas atskirais generatoriais, turinčiais statinę charakteristiką, neatitinka elektros energijos kokybės ir sistemos darbo ekonomiškumo reikalavimų, nes dažnis nestabilizuojamas ir apkrovos skirstomos pagal generatoriaus charakteristikos statiškumo koeficientą. Todėl sistemose reikalingi antriniai reguliatoriai (AGV sistema), koreguojantys atskirų agregatų dažnio charakteristiką (pradinį jos dažnį f_{G0}) ir tuo stabilizuojantys sistemos dažnį ir generatorių galią atsižvelgiant į ekonomiškumo ir patikimumo reikalavimus.[6]

2.3 Dažnio ir įtampos matavimas

Saulės elektrinėse galinėje pakopoje sumontuoti keitikliai jungiantys saulės elektrines su tinklu (*angl. grid-tie inverters*). Jie modeliuojami taip, kad dingus energijos tiekimui iš tinklo, saulės elektrinė būtų automatiškai atjungta saugumo sumetimais. Saulės elektrinės netieka atsarginės elektros energijos, kai tinklas avarijos metu tiekia nekokybišką energiją. Minėtas keitiklis matuoja tinklo parametrus ir tikrina kada jie išeina iš stabilumo ribų. Tokiu atveju saulės elektrinė yra atjungiamas nuo elektros tinklo. Tokiu atveju saulės elektrinės gali tiekti elektros

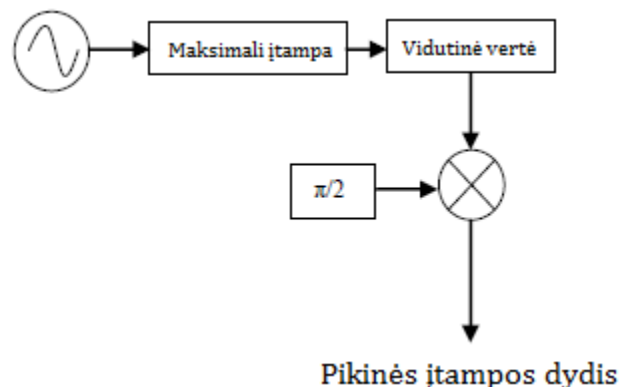
energija tik lokaliems vartotojams, jeigu generuojama pakankama galia. Taip pat kai tinklas pakartotinai prijungiamas, srovės šuoliai gali sugadinti saulės elektrinės įrangą, kaip pavyzdžiui jungtuvus. Siekiant to išvengti yra matuojama tinklo dažnis ir įtampa, nes šie parametrai labiausiai atspindi tinklo nestabilumą. Žemiau 2.2 paveiksle pateiktas apsauginio įtaiso dažnio matavimo procedūra.[7]



2.2 pav. Dažnio matavimo procedūra[7]

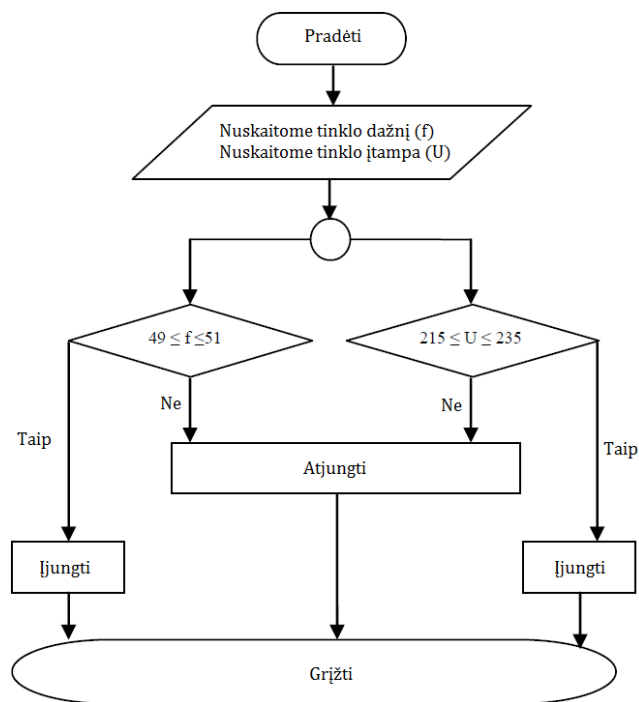
Generuojami stačiakampiai impulsai, kurių ilgis atitinka matuojamo sinusinio signalo pusperiodį. Matavimo įrenginys skaičiuoja laiką nuo vieno stačiakampio impulso pradžios, iki kito impulso pradžios. Išmatuotas laikas m_i atitinka vieną sinusinio signalo periodą T , tai dažnis f bus lygus $f=1/T$. [7]

Ieškant pikinės įtampos reikšmės, turime įvesti maksimalios įtampos paieškos algoritmą. Maksimalios įtampos matavimo procesas „MATLAB“ aplinkoje pavaizduotas 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Įtampos matavimo procesas[7]

Apsauginio įtaiso tinklo parametrų matavimo algoritmas pavaizduotas 2.4 paveiksle. Nuskaitoma tinklo įtampa ir dažnis, jei dažnis ar įtampa viršija leistinas ribas, saulės elektrinė atjungiama nuo tinklo.



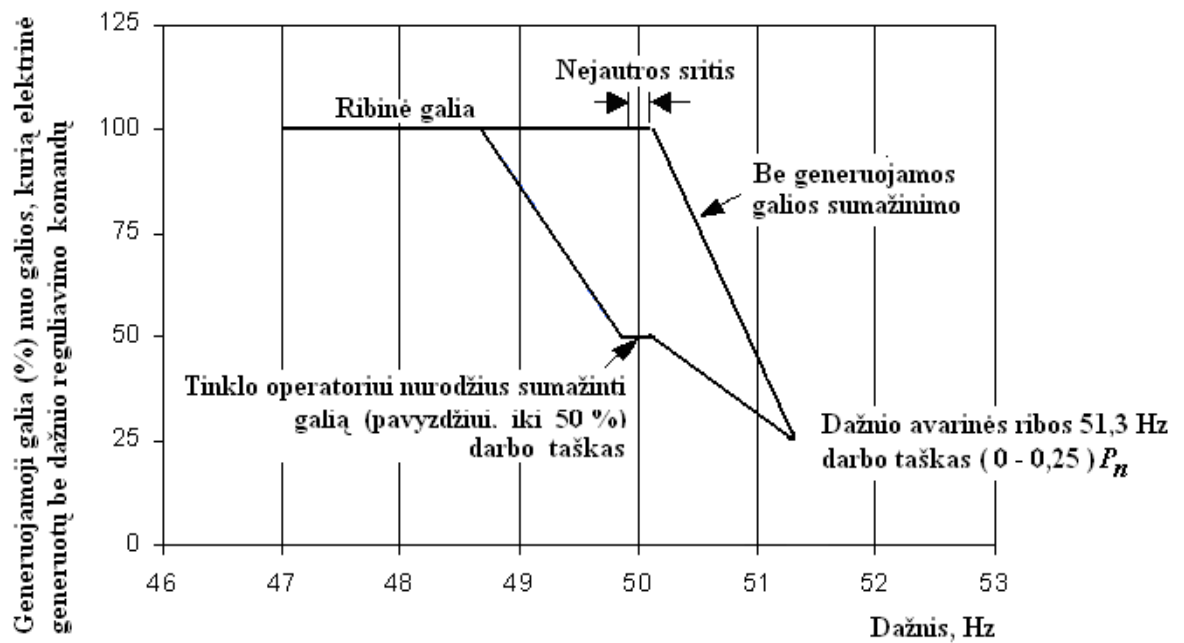
2.4 pav. Apsaugos įtaiso algoritmas

2.4 Vėjo elektrinių ir vėjo elektrinių parkų dažnio avarinės vertės

Lentelėje žemiau ir 2.5 paveiksle pateikti reikalavimai vėjo elektrinėms ir vėjo elektrinių parkams, kai pasikeičia tinklo dažnis.

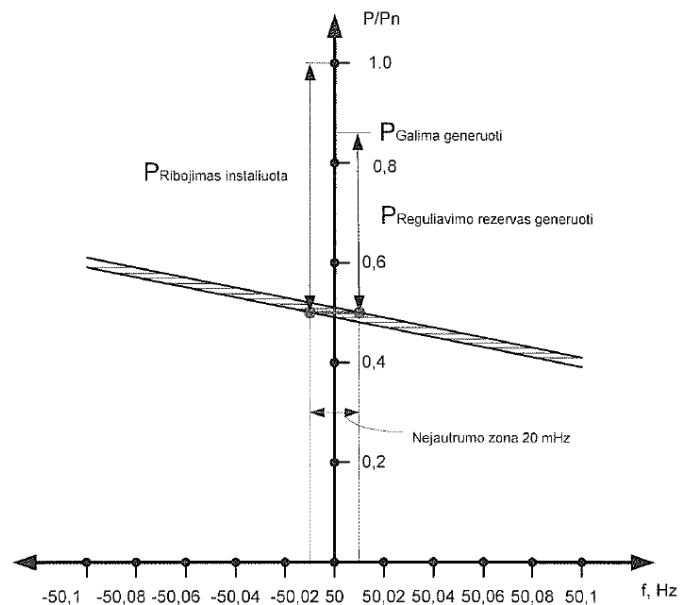
2.1 lentelė. Generuojamojo dažnio valdymo vertės[8]

	Statų sritis	Avarinė vertė
Nukrypusių nuo vardinio dažnių reguliavimo srities žemiausioji dažnio riba (f_{min})	50,00...47,00 Hz	48,7 Hz
Nukrypusių nuo vardinio dažnių reguliavimo srities aukščiausioji dažnio riba (f_{max})	50,00...53,00 Hz	51,3 Hz
Nukrypusių nuo vardinio dažnių nejautrumo srities aukštesnioji riba (f_{d+})	50,00...53,00 Hz	50,15 Hz
Generuojamos galios reguliavimo faktorius dažnių $f_{min}...f_{d-}$ ir $f_{d+}...f_{max}$ srityje, žr. 2.5 paveikslą	aukštesniems dažniams: $(1 - \frac{f - f_{d+}}{f_{max} - f_{d+}}) \cdot 100\%$ žemesniems dažniams: $(1 + \frac{f - f_{d-}}{f_{min} - f_{d-}}) \cdot 100\%$	
Reguliavimo greitis, apskaičiuotas nuo ribinės vertės iki visiško suregulavimo taško	10% vardinės galios per sekundę	



2.5 pav. Dažnio valdymo grafikas, iliustruojantis 2.1 lentelės avarines vertes[8]

Taip pat 2.6 paveiksle pateikta vėjo elektrinių aktyviosios galios reguliavimo charakteristika.



2.6 pav. Vėjo elektrinių aktyviosios galios reguliavimo charakteristika[9]

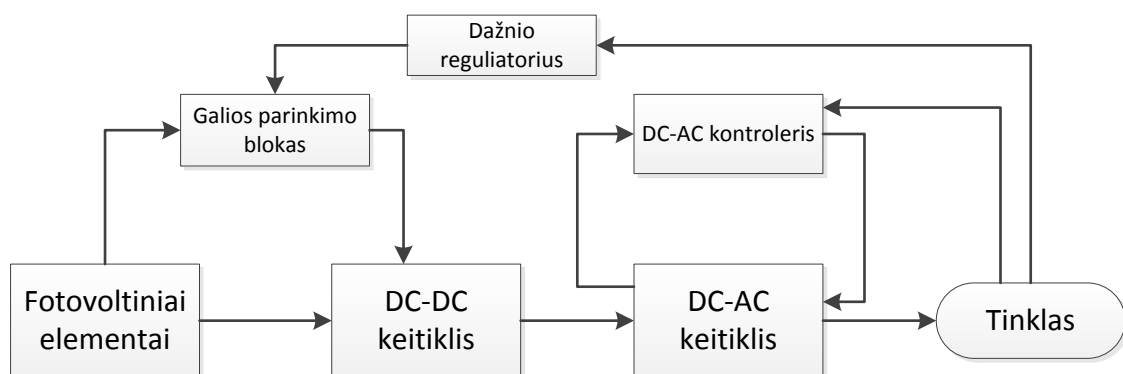
Iš šios charakteristikos pastebime, kad vėjo elektrinės aktyviąją galią privalo didinti tam tikru dėsniu, taip pat turi turėti nejautrumo zona 20 mHz ir aktyviosios galios rezervą 50 % nuo nominalios galios.

3. SAULĖS ELEKTRINĖS PRIJUNGTOS PRIE ELEKTROS TINKLO MODELIAVIMAS

Į elektros tinklą pajungtos fotovoltinės (FV) energijos sistemos yra vienos iš elektrinių, kurios konvertuoja nuolatinės srovės energiją į kintamos srovės energiją. Kai saulės elektrinės yra pajungtos į elektros tinklą, jos generuoja papildomą galią kurį yra panaudojama aprūpinti vartotojus ekologiška energija. Saulės elektrinės yra vienos iš ekologiškiausių atsinaujinančių energijos šaltinių. Šiame darbe sumodeliuota fotovoltinė sistema perduoda elektros galią į elektros tinklą. Sumodeliuotas DC-DC konverteris gali būti naudojamas pakelti ar sumažinti įtampą iš fotovoltinio keitiklio, kad įtampos dydis pasiektų reikiamą įtampą elektros tinklui. Taip pat DC-DC keitiklis yra reguliuojamas algoritmais, kad iš saulės elementų išgautume reikiamą galią. Maksimalaus galios taško reguliavimui (*angl. maximum power point tracking (MPPT)*) yra naudojama daug skirtingų algoritmų. Modeliuojant fotovoltinę sistemą šiame darbe naudosime dalinio atviros grandinės įtampos algoritimą (*Fractional open circuit voltage algorithm*). Šis metodas remiasi fotovoltinės sistemos įtampos stebėjimu. Matuojama fotovoltinės sistemos įtampa ir lyginama su atramine atviros grandinės įtampa. Norint keisti fotovoltinės sistemos galios tašką, nustatome atraminę įtampą mažesnę.[7]

Nuolatinės srovės konvertavimui į kintamą srovę bus naudojamas įtampos šaltinio konverteris (*angl. voltage-sourced converter*), kuris taip pat atliks išėjimo įtampos vidurkinimą, siekiant gauti kuo idealesnę sinusinę įtampą. Saulės elektrinės modelis prijungiamas prie elektros tinklo.

Žemiau 3.1 paveiksle pavaizduota supaprastinta fotovoltinės sistema struktūra prijungta prie elektros tinklo.

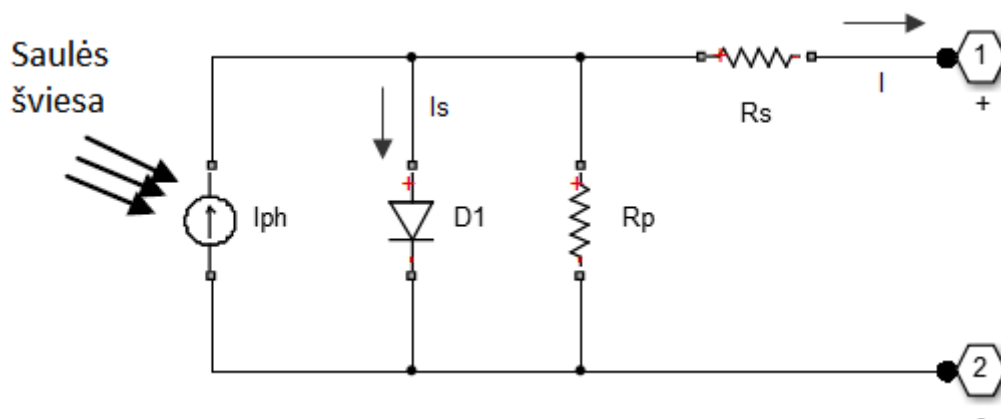


3.1 pav. Saulės elektrinės struktūra

3.1 Fotovoltinio elemento modelis

Fotovoltiniai elementai yra p-n sandūros puslaidininkiniai elementai, kurie konvertuoja saulės šviesą į elektros energiją. Kai fotovoltiniai elementai yra apšviečiami šviesa, puslaidininkiniai elementai absorbuoja fotonus ir paverčia juos elektros energija. Ekvivalentinė

fotovoltinių elementų grandinė pavaizduota 3.2 paveiksle. Ji susideda iš šviesa generuojamos srovės šaltinio, diodo, nuoseklaus ir lygiagreto rezistorių.



3.2 pav. Fotovoltinio elemento atstojamoji grandinė

Kur,

I_{ph} – saulės šviesa generuojama srovė;

R_s – nuosekliai prijungtas rezistorius;

R_p – šuntinis rezistorius;

Formulė kuri aprašo generuojamą fotovoltinio elemento srovę:

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(e^{\frac{(V+I \cdot R_s)}{N \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{(V+I \cdot R_s)}{R_p} \quad (9)$$

Kur,

I_s – diodo soties srovė;

V – įtampa tarp saulės keitiklio gnybtų;

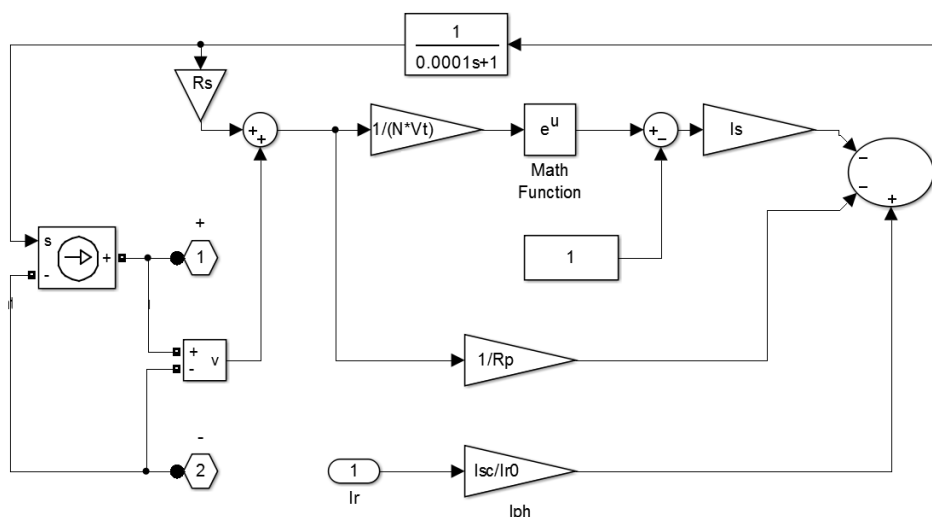
I – išėjimo srovė;

N – kokybės faktorius (diodo emisijos koeficientas)

V_t – temperatūrinė įtampa.

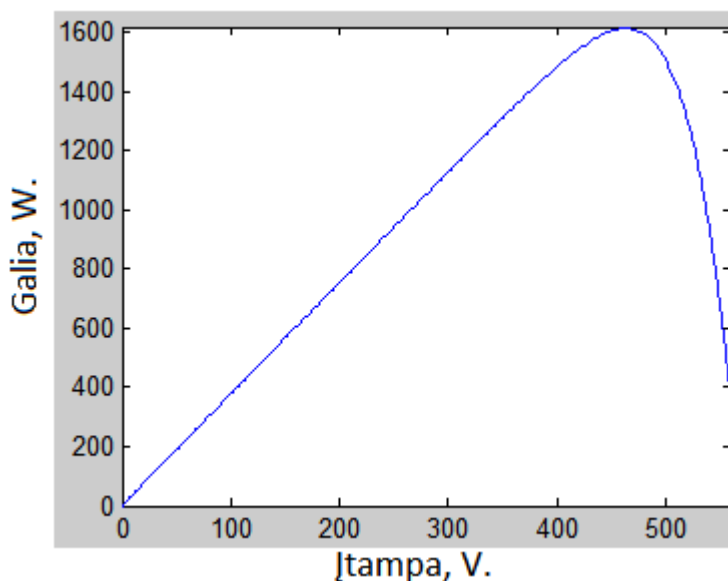
Fotovoltinio elemento modelis yra modeliuojamas „SIMULINK“ aplinkoje.

Naudojami SimPowerSystems elementai, siekiant išpildyti aukščiau pateiktą formulę. Žemiau 3.3 paveiksle pateiktas sumodeliuotas fotovoltinio keitiklio modelis:



3.3 pav. Fotovoltinio keitiklio modelis

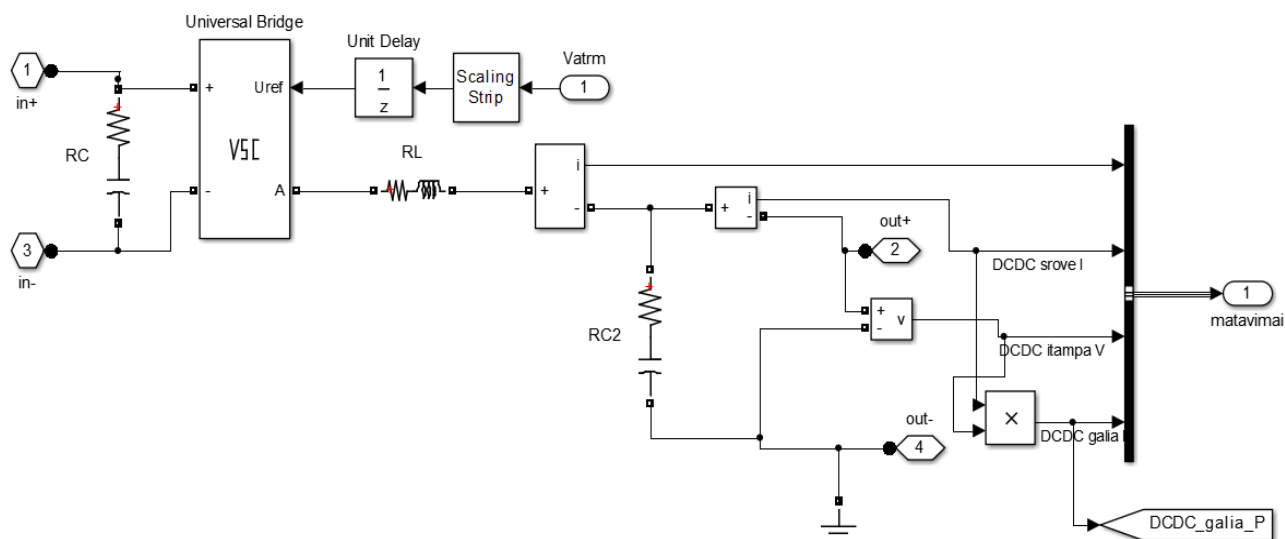
Sumodeliuoto fotovoltinio keitiklio charakteristika pateikta žemiau 3.4 paveiksle. Kaip matome iš gautos charakteristikos, fotovoltiniai elementai generuoja maksimalią galią tik prie tam tikros įtampos. Norint turėti galios rezervą, galios tašką reikia parinkti žemiau maksimalaus galios taško.



3.4 pav. Galios priklausomybė nuo įtampos

3.2 DC-DC keitiklis

Šiame moduliavimo etape buvo sumodeliuotas DC-DC keitiklis. Šio keitiklio paskirtis sumažinti ar padidinti fotovoltinio keitiklio įtampą. Jei įtampa būtų mažinama nenaudojant DC-DC keitiklio, tada saulės elektrinė negeneruotų norimos galios ir dirbtų neefektyviai. DC-DC keitiklio pagalbą galima nustatyti reikiamą galios tašką nepriklausomai kokia apkrova bus tinkle. Žemiau 3.5 paveiksle pavaizduotas DC-DC keitiklio modelis.

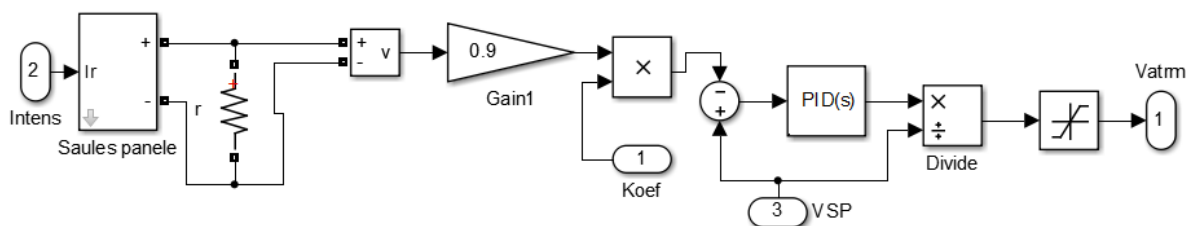


3.5 pav. DC-DC keitiklio modelis

Pasirinktas įtampos šaltinio konverteris vidurkina išėjimo signalą, todėl išėjime gauname nusistovėjusios linijinės įtampos signalą. Taip pat naudojant šį bloką nereikia naudoti impulso pločio moduliacijos, kas supaprastina modelį.

3.3 Galios taško reguliavimas

Maksimalios galios reguliavimas (*angl. maximum power point tracking (MPPT)*) reikalingas norint iš saulės keitiklio išgauti maksimalią galią. Paveiksle aukščiau pavaizduota charakteristika kuri parodo prie kokios įtampos yra išgaunama maksimali galia. Todėl privalome laikytis šio taško nepriklausomai nuo apkrovos. Maksimalios galios reguliavimui yra naudojama įvairių algoritmų. Šiame darbe naudosime dalinio atviros grandinės įtampos algoritmą (*Fractional open circuit voltage algorithm*). Šis metodas labiausiai tinka norint parinkti konkretų galios tašką su rezervine galia. 3.6 paveiksle pavaizduota šio algoritmo modelis.

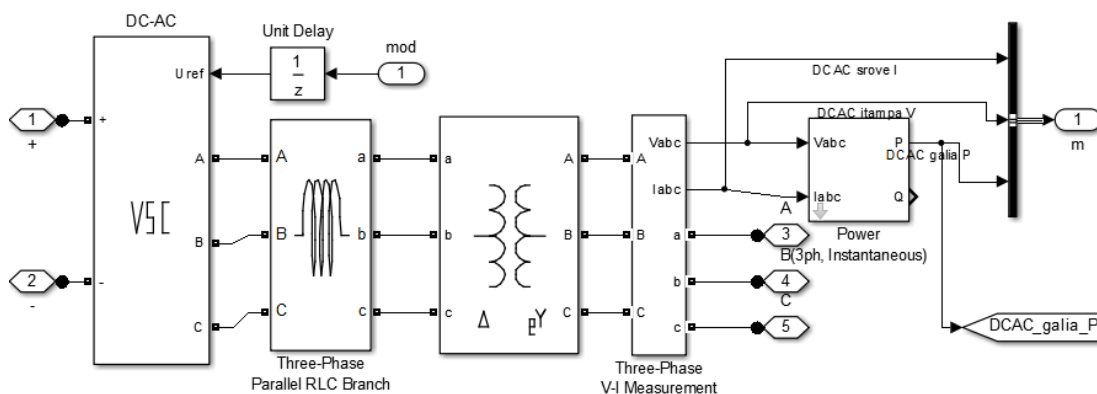


3.6 pav. Galios parinkimo modelis

Algoritmo veikimas pakankamai paprastas. Nuskaitoma įtampa iš saulės keitiklio. Įtampa lyginama su atviros grandinės atramine įtampa. Algoritmas bando gauti kuo mažesnę įtampų skirtumą ir taip atitinkamai didina arba mažina DC-DC konverterio atraminę įtampą. Gauta atraminė įtampa perduodama į DC-DC keitiklio bloką, kuris atitinkamai reguliuoja įtampą ir srovę išėjime.

3.4 DC-AC keitiklis

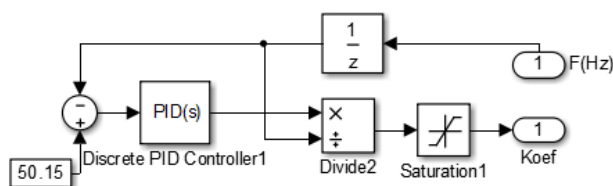
DC-AC keitiklis reikalingas norint nuolatinės srovės signalą konvertuoti į kintamos srovės 50 Hz. signalą, kuris tiktų elektros tinklui. Pasirinktas įtampos šaltinio keitiklis su vidurkinimo funkcija. Naudojant šį konverterį nebereikia naudoti žemo dažnio filtrų, nes išėjimo signalas nėra moduliacinio pobūdžio. Gauname trejų fazių, 50 Hz signalą. Atraminė sinusinė įtampa generuojama DC-AC kontrolieriu. Kontroleris matuoja elektros tinklo įtampą, taip yra parenkama reikiama atraminė įtampa. Taip pat atliekamas fazės suderinamumas, kad DC-AC konverteris, generuotų įtampą tokios pat fazės kaip ir tinklo įtampa. 3.7 paveiksle pavaizduotas DC-AC konverterio modelis.



3.7 pav. DC-AC keitiklio modelis

3.5 Tinklo dažnio matavimas

Modeliuojama saulės elektrinė lyginant su įprastomis saulės elektrinėmis gali dirbti, kai elektros tinklas dirba nestabiliame režime. Tam įgyvendinti yra reikalingas papildomas dažnio matavimo ir reguliavimo algoritmas. Šis algoritmas matuoja sistemos dažnį ir atsiradus dažnio pokyčiui atitinkamai naudoja rezervinę saulės elektrinės galią, arba sumažina saulės elektrinės galią iki minimalios reikšmės. Taip saulės elektrinė prisideda prie aktyviosios galios balanso. Nukritus tinklo dažniui, dažnio matavimo algoritmas pakelia saulės elektrinės galios parinkimo bloko atraminę įtampą. Taip yra perduodama didesnė saulės elektrinės galia į tinklą. 3.8 paveiksle pateiktas dažnio reguliavimo blokas.



3.8 pav. Dažnio reguliavimo blokas

Žemiau pateiktas „MATLAB“ programos kodas kuris aprašo 20 mHz nejautrumo ribą:

```
function y = MPPT(Hz)
```

```

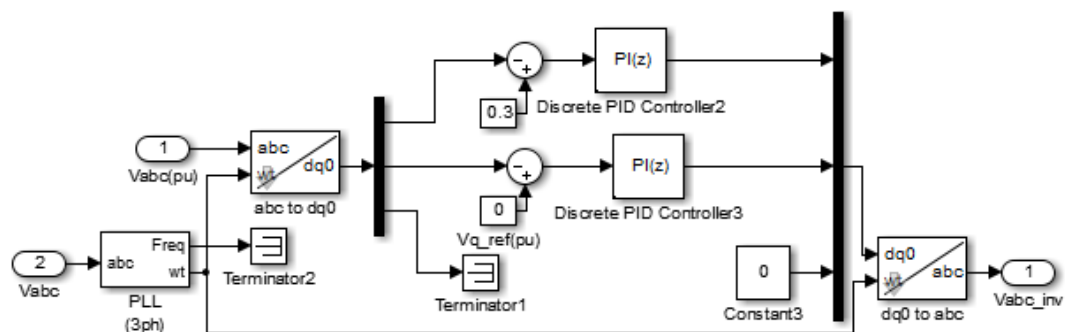
if (Hz > 50.02)
    set_param('Saules_elektrine/Gain','Gain','1');
    f=0;
else if (Hz < 49.98)
    set_param('Saules_elektrine/Gain','Gain','1');
    f=0;
else
    set_param('Saules_elektrine/Gain','Gain','0');
    f=50;
end
end
y = f;

```

Kai dažnis kinta $50 \pm 0,02$ Hz ribose, dažnio reguliavimo blokas nekreguoja į silpnus svyravimus.

3.6 DC-AC keitiklis

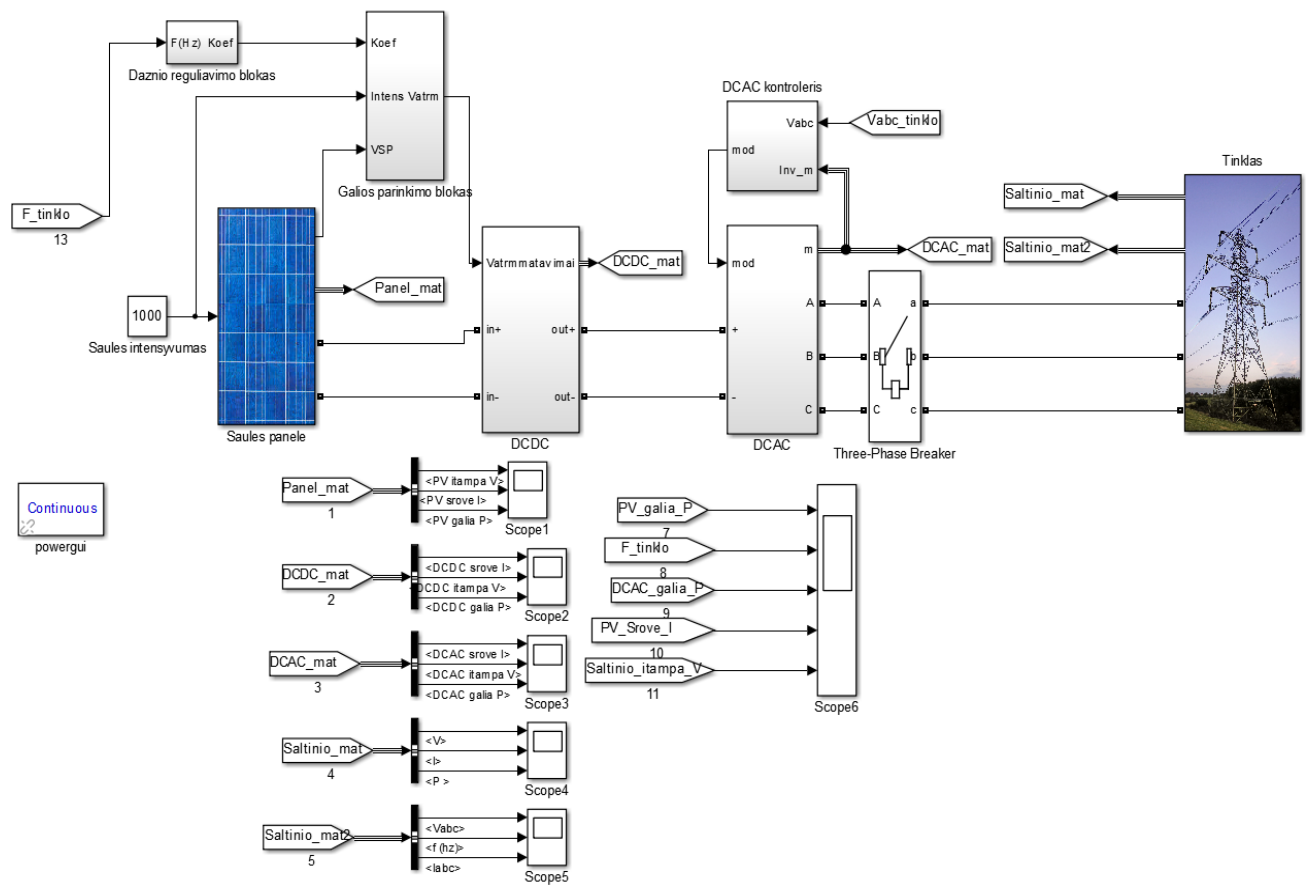
DC-AC kontrolieris reguliuoja į DC-AC keitiklio išėjimo įtampos amplitudę, fazę ir dažnį. Į DC-AC keitiklį yra paduodamas trejų fazių įtampos signalas, kuris priklauso nuo tinklo parametrų. Keičiantis tinklo dažniui, fazei ar amplitudei, atitinkamai keičiami ir DC-AC konverterio parametrai, kurie sutaptų su tinklo parametrais. Žemiau 3.9 paveiksle pavaizduotas DC-AC kontrolierio modelis.



3.9 pav. DC-AC kontrolierio modelis

3.7 Viso modelio modeliavimas

Sumodeliuota saulės elektrinė prijungiama prie elektros tinklo per jungiklį. Saulės elektrinės sudedamosios dalys sugrupuotos į blokus. Žemiau 3.10 paveiksle pateiktas visas saulės elektrinės modelis prijungtas prie elektros tinklo.

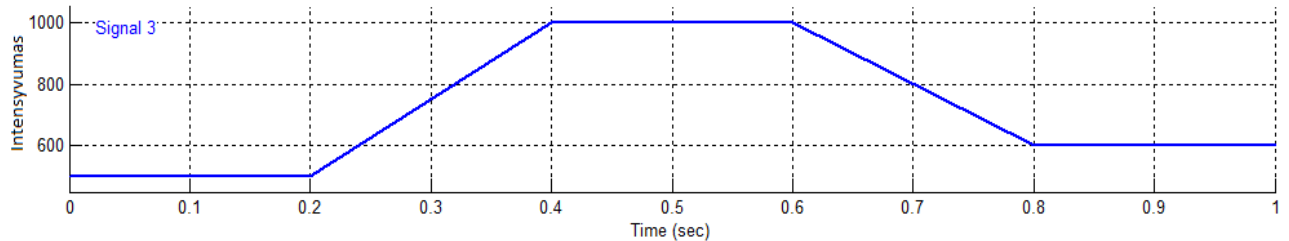


3.10 pav. Saulės elektrinės modelis

4. SIMULIAVIMO REZULTATAI

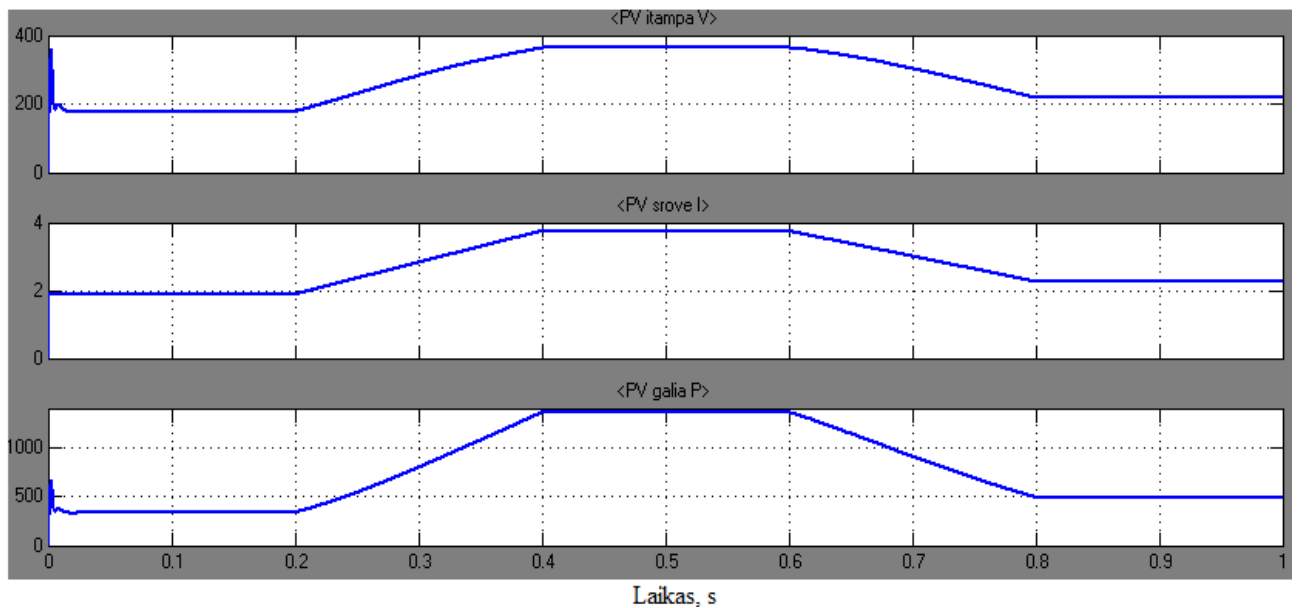
4.1 Saulės spinduliavimo įtaka generuojamai galiai

Saulės elektrinės generuojama galia yra tiesiogiai priklausoma nuo saulės fotonų kiekio tenkančio į saulės elektrinės fotovoltinius. Kuo daugiau saulės spinduliuos šviesos, tuo saulės elektrinė gamins daugiau galios. 4.1 paveiksle pateiktas saulės spinduliavimo kitimas.



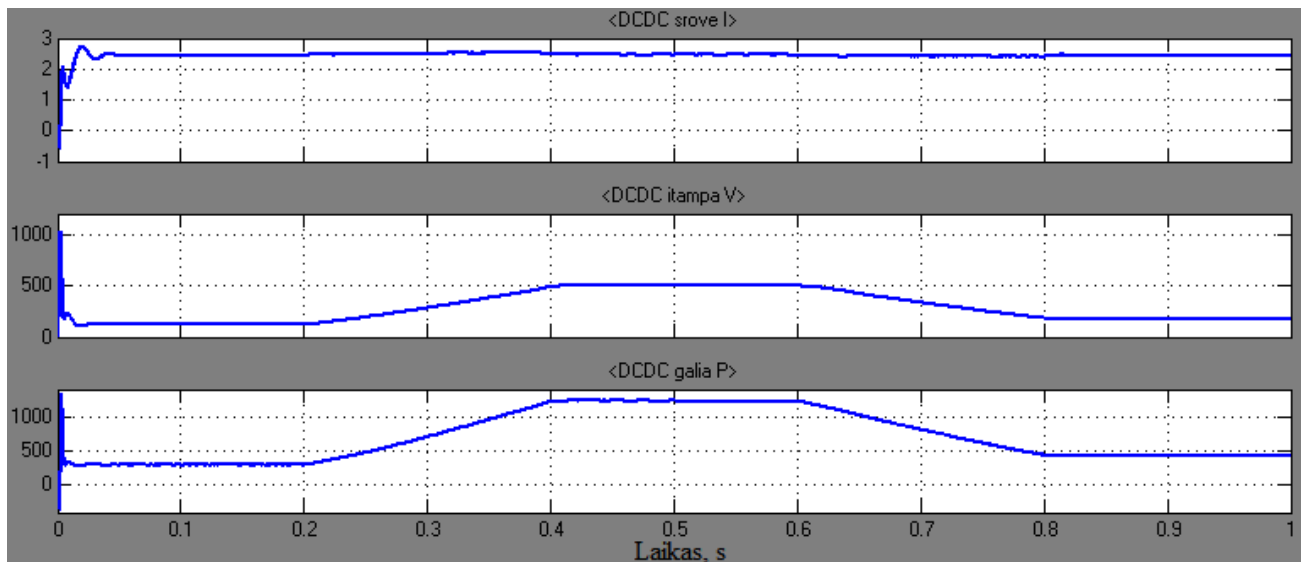
4.1 pav. Saulės spinduliavimo priklausomybė nuo laiko

Kaip matome nuo pradinio laiko momento iki 0,2 sekundės saulės elektrinės fotovoltiniai keitikliai apšviečiami 50% saulės spinduliuotės. Nuo 0,4 sekundės iki 0,6 sekundės keitikliai apšviečiami 100% saulės spinduliuotės. O nuo 0,8 sekundės iki 1 sekundės keitikliai apšviečiami 60%. Gauti saulės panelės simuliacijos rezultatai pavaizduoti 4.2 paveiksle.



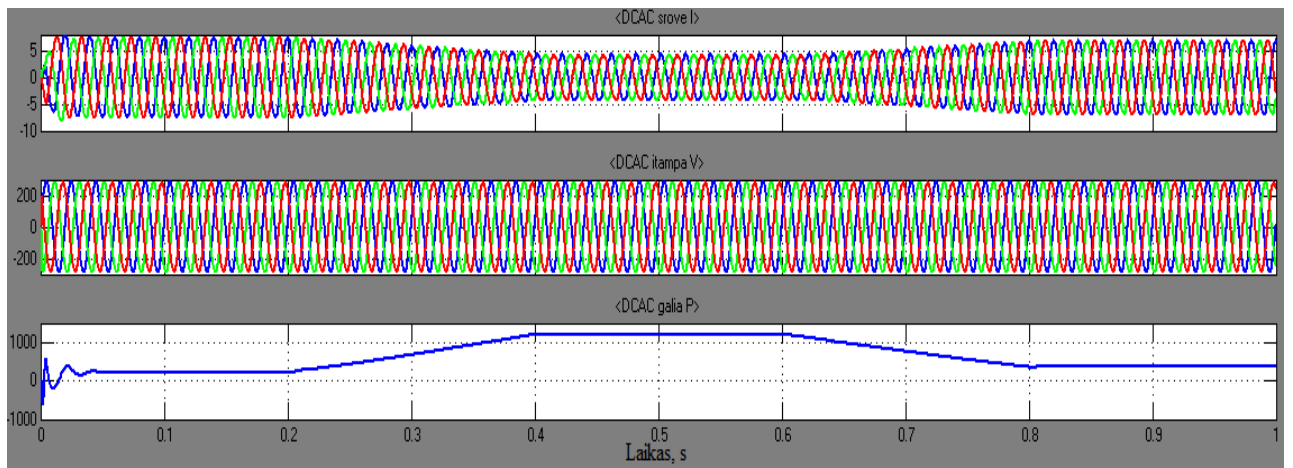
4.2 pav. Simuliacijos rezultatai pateikti grafiškai

Kaip pastebime iš gautų grafikų, generuojama galia tiesiogiai priklauso nuo saulės spinduliavimo. Analogiškai saulės elektrinės įtampa bei srovė turi tokią pačią priklausomybę nuo saulės apšvietimo lygio. Žemiau 4.3 paveiksle pateiktos DC-DC keitiklio išėjimo charakteristikos, kai tinklas dirba normaliaame režime (be dažnio svyravimų) o saulės spinduliuotė kita pagal grafiką pateiktą 4.1 paveiksle.



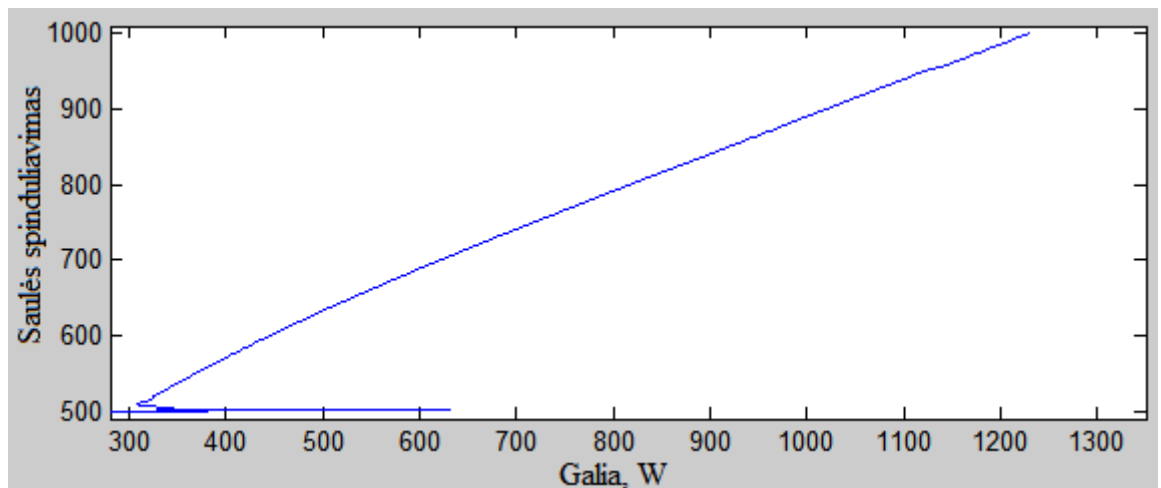
4.3 pav. DC-DC keitiklio simuliacijos rezultatai pateikti grafiškai

Kaip matome iš gautų rezultatų DC-DC keitiklio išėjimo įtampos ir srovės charakteristikos skiriasi nuo saulės panelės išėjimo charakteristikų. Taip yra todėl, nes DC-DC keitiklio kontroleris parenka maksimalų galios tašką, taip išlaikydamas maksimalią perduodamą galią nepriklausomai nuo apkrovos. Žemiau 4.4 paveiksle pateiktos DC-DC keitiklio išėjimo charakteristikos, kai saulės spinduliavimas kinta pagal kreivę atvaizduotą 4.1 paveiksle.



4.4 pav. DC-AC keitiklio simuliacijos rezultatai pateikti grafiškai

Iš gautų rezultatų matome, kad išėjimo galia išlieka tokia pati kaip ir DC-DC keitiklio išėjime, todėl galime spręsti, kad keitiklis dirba teisingai ir DC-DC keitiklio kontroleris parenka maksimalų galios tašką. Žemiau 4.5 paveiksle pateikta saulės elektrinės generuojamos galios priklausomybė nuo saulės spinduliavimo.

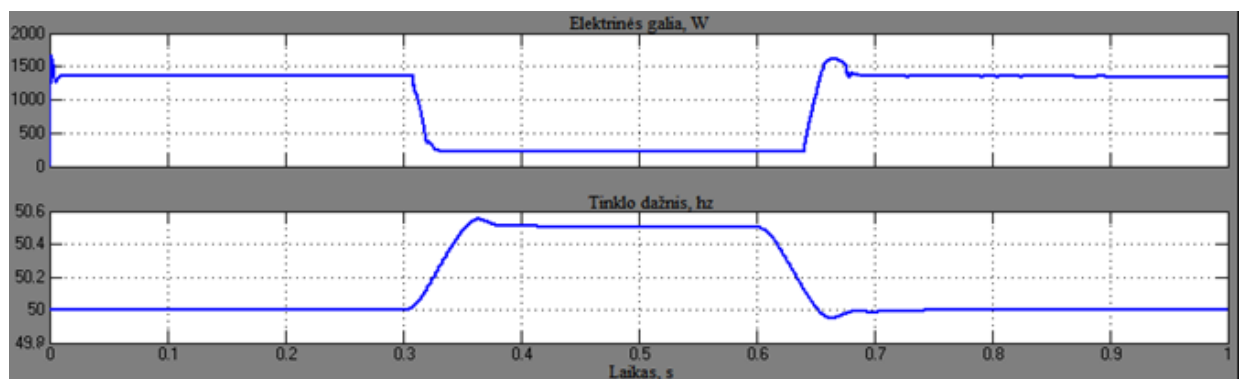


4.5 pav. Saulės elektrinės galios priklausomybė nuo saulės apšvietos

Kaip matome iš gautų rezultatų, saulės elektrinės generuojama galia tiesiogiai proporcinga saulės spinduliavimo kiekiui.

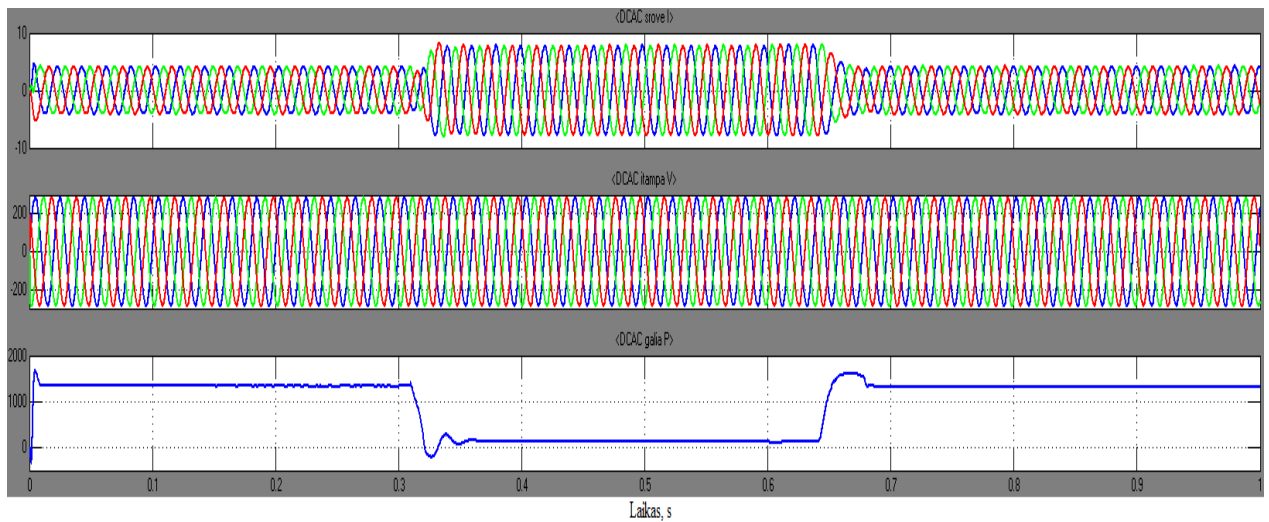
4.2 Tinklo dažnio padidėjimo įtaka saulės elektrinės keitiklių darbui

Kai elektros tinklas dirba normaliaame režime, saulės elektrinė perduodama galia yra 15% mažesnė, nei maksimali galia kurią gali perduoti saulės elektrinė. Šis rezervas reikalingas avarijos atveju, kai tinklo dažnis pradeda kristi, o tai reiškia aktyviosios galios trūkumą. Tuo metu saulės elektrinės keitikliai pastebi dažnio kritimą ir padidina savo generuojamą galią iki maksimalios, taip padėdama pakelti dažnį. Šiuo atveju dažnis pakyla, tai yra $f > 50$ Hz. Saulės elektrinė sumažina savo generuojamą galią 85% nuo maksimalios galios, taip padėdama mažinti per didelį dažnį tinkle. Žemiau 4.6 paveiksle pateikti gauti simuliacijos rezultatai.



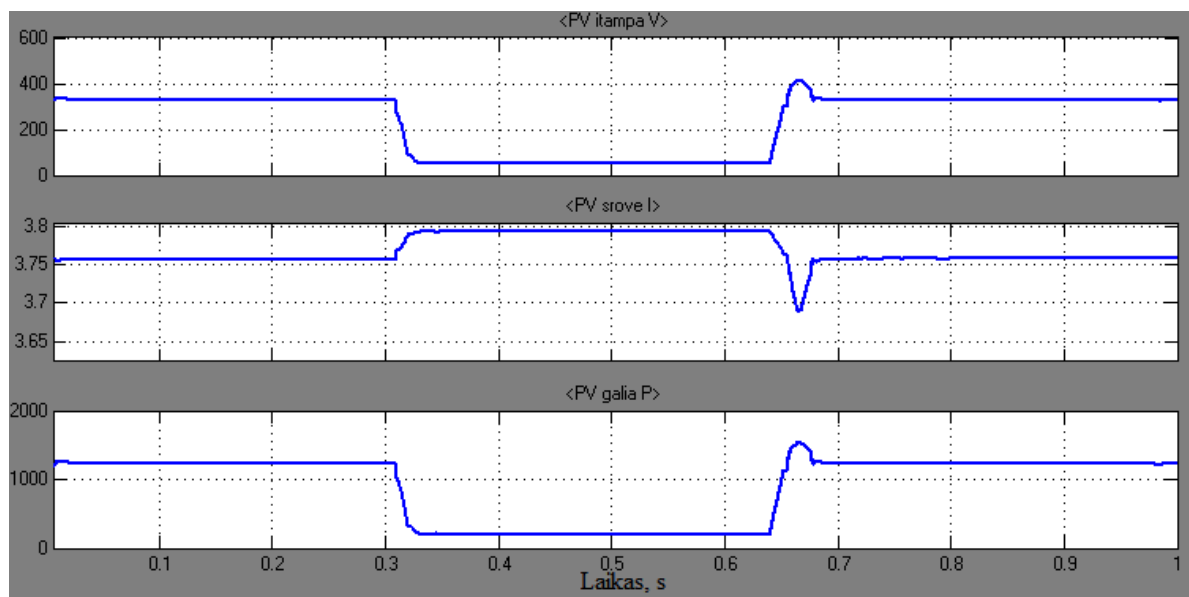
4.6 pav. Simuliacijos rezultatai, kai dažnis pakyla pateikti grafiškai

Kaip matome iš gautų rezultatų, ties 0,3 sekundės tinklo dažnis pradeda kilti iki 50,5 Hz. Saulės elektrinės galia pradeda kristi, kai dažnis pakyla virš 50,02 Hz. Taip yra todėl, nes saulės elektrinė turi neįsijautros ribą, kuri gauta remiantis vėjo elektrinių reikalavimais. Kai dažnis pradeda artėti prie normalios ribos, saulės elektrinė grįžta į normalaus darbo režimą. Žemiau 4.7 paveiksle pateiktos DC-AC keitiklio išėjimo charakteristikos.



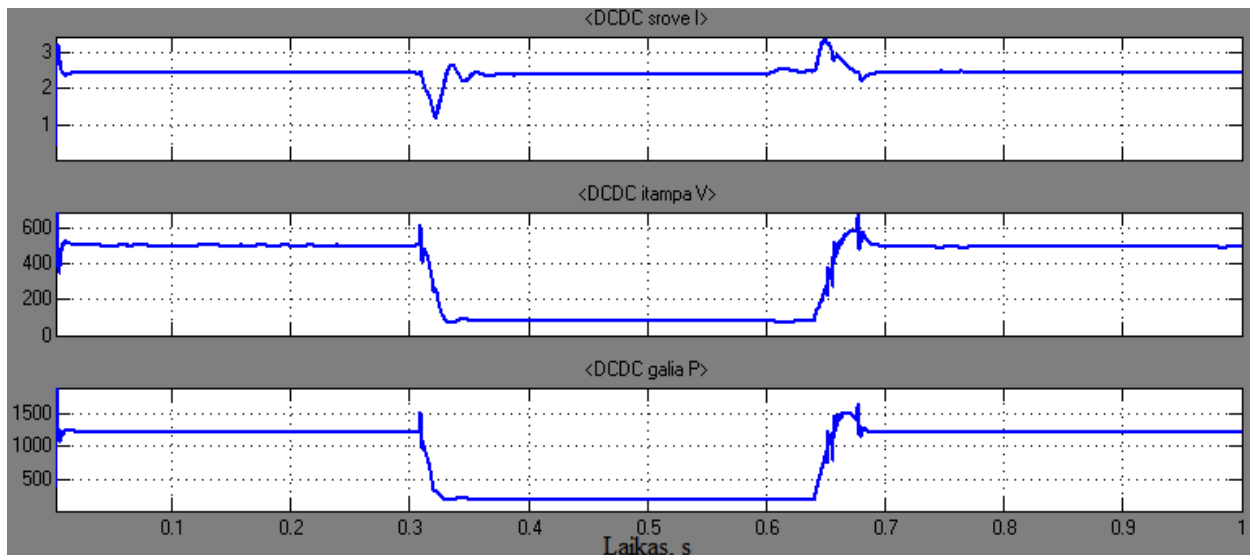
4.7 pav. DC-AC keitiklio išėjimo charakteristikos, kai $f \geq 50$ Hz

Kaip matome iš gautų duomenų DC-AC keitiklio išėjime laiko momentu kai kyla tinklo dažnis, išėjimo srovė pakyla, o įtampa išlieka pastovi. Dažniui grįžus į normalų režimą, srovė taip pat nusistovi normaliaame darbo režime. Žemiau 4.8 paveiksle pateiktos saulės panelės išėjimo charakteristikos, kai dažnis ties 0,3 sekundės pradeda kilti iki 50,5 Hz ir ties 0,6 sekundės pradeda kristi iki 50 Hz.



4.8 pav. Saulės panelės išėjimo charakteristikos, kai $f \geq 50$ Hz

Iš gautų simuliacijos rezultatų matome, kad saulės panelės charakteristikos kinta priklausomai nuo tinklo dažnio. Kuo dažnis didesnis, tuo saulės panelė gamina mažiau galios. Žemiau 4.9 paveiksle pateiktos DC-DC keitiklio išėjimo charakteristikos.

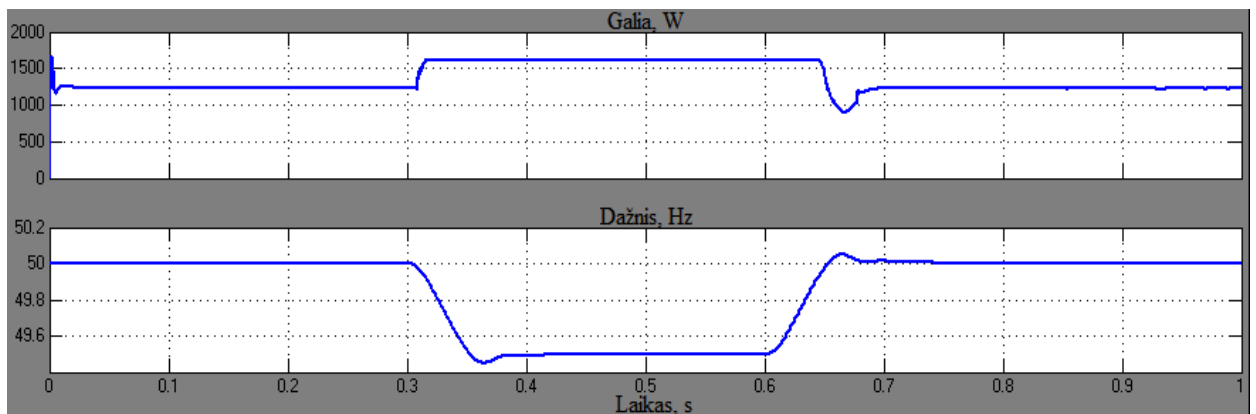


4.9 pav. DC-DC keitiklio išėjimo charakteristikos, kai $f \geq 50$ Hz

Iš gautų rezultatų matome, kad DC-DC keitiklis reguliuoja galią, keisdamas įtampos dydį. Išėjimo įtampa ir srovė priklauso nuo tinklo dažnio.

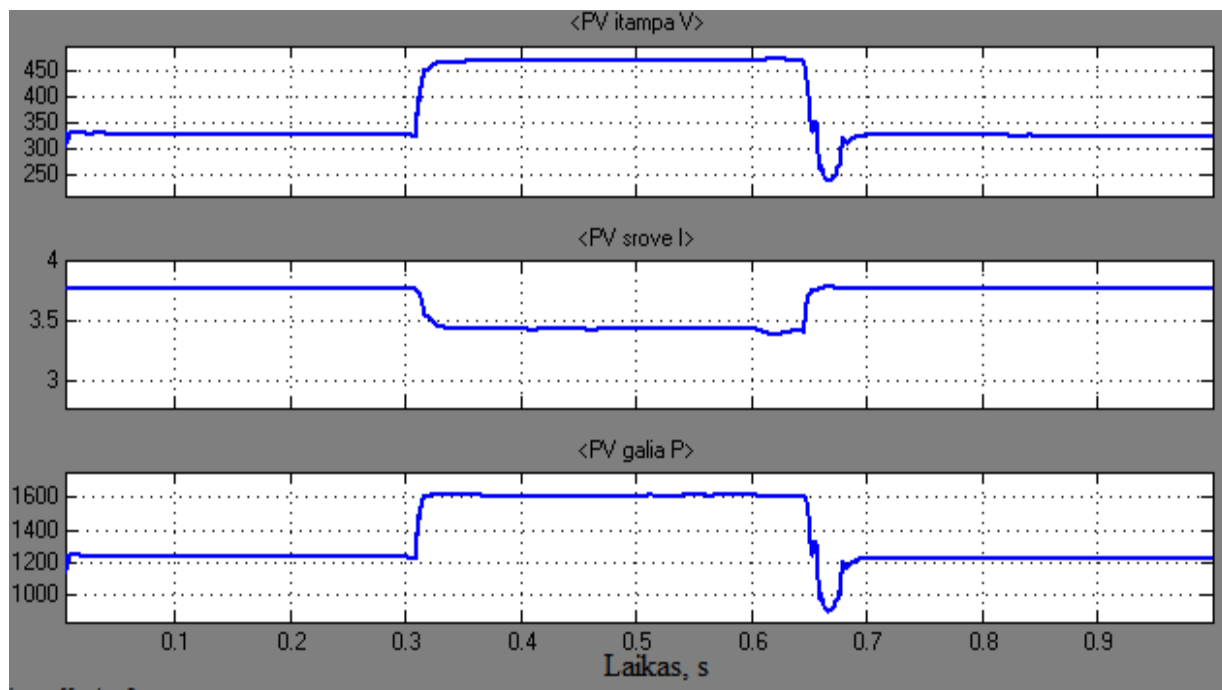
4.3 Tinklo dažnio mažėjimo įtaka saulės elektrinės keitiklių darbui

Kai tinklo dažnis pradeda kristi, saulės elektrinės keitikliai reaguoja į dažnio pokytį ir pakelia generuojama saulės elektrinės galią iki maksimalios. DC-DC keitiklis nustato maksimalų galios tašką ir saulės elektrinė dirba pilnu pajėgumu. Žemiau 4.10 paveiksle pateikti gauti simuliacijos rezultatai.



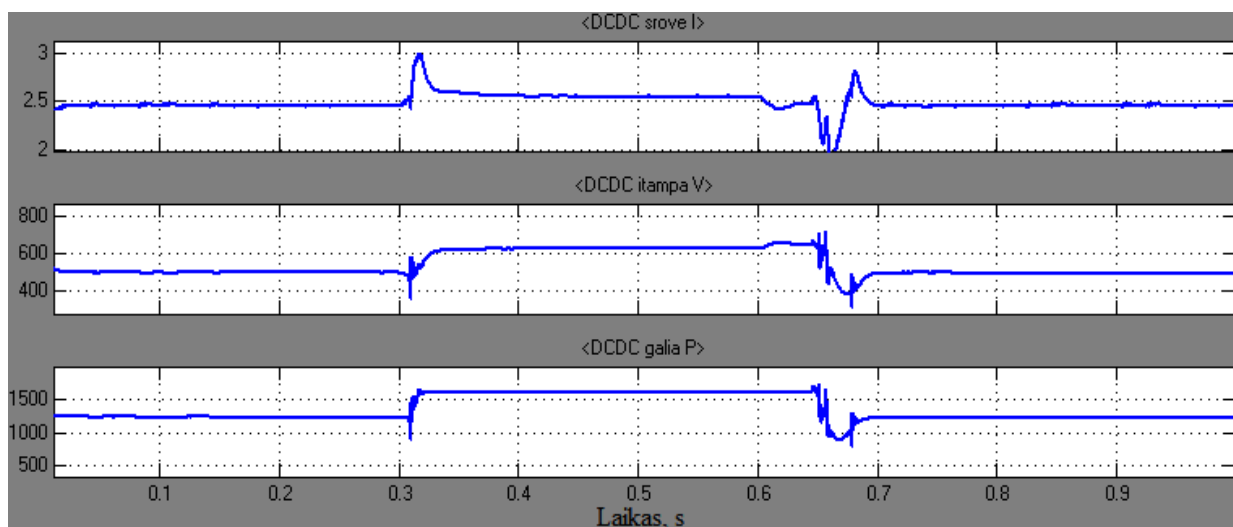
4.10 pav. Simuliacijos rezultatai, kai dažnis nukremta iki 49,5 Hz.

Kaip matome iš gautų duomenų, kai dažnis $f < 49,98$ Hz, saulės elektrinės keitiklis pastebi dažnio kritimą ir padidina saulės elektrinės generuojamą galią iki maksimalios. Maksimali galia generuojama kol dažnis $f > 49,98$ Hz, tada saulės elektrinė grįžta į normalų darbo režimą. Žemiau 4.11 paveiksle pateiktos saulės panelės išėjimo charakteristikos, kai dažnis ties 0,3 sekundės pradeda kristi iki 49,5 Hz ir ties 0,6 sekundės pradeda kilti iki 50 Hz.



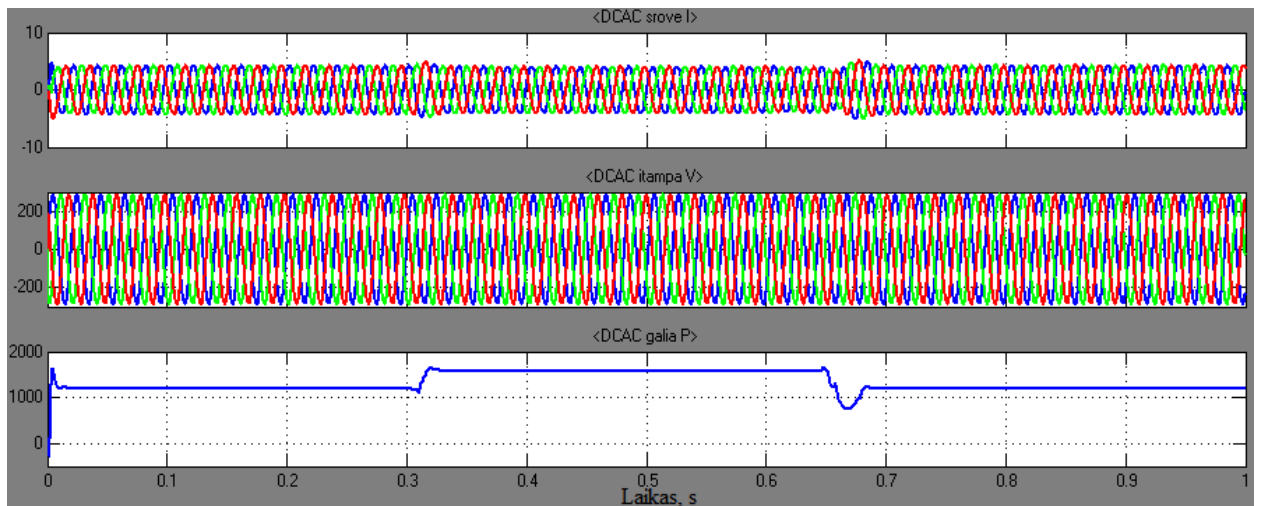
4.11 pav. Saulės panelės išėjimo charakteristikos, kai $f \leq 50$ Hz

Iš gautų simuliacijos rezultatų matome, kad saulės panelės charakteristikos kinta priklausomai nuo tinklo dažnio. Kuo dažnis mažesnis, tuo saulės panelė gamina daugiau galios. Žemiau 4.12 paveiksle pateiktos DC-DC keitiklio išėjimo charakteristikos.



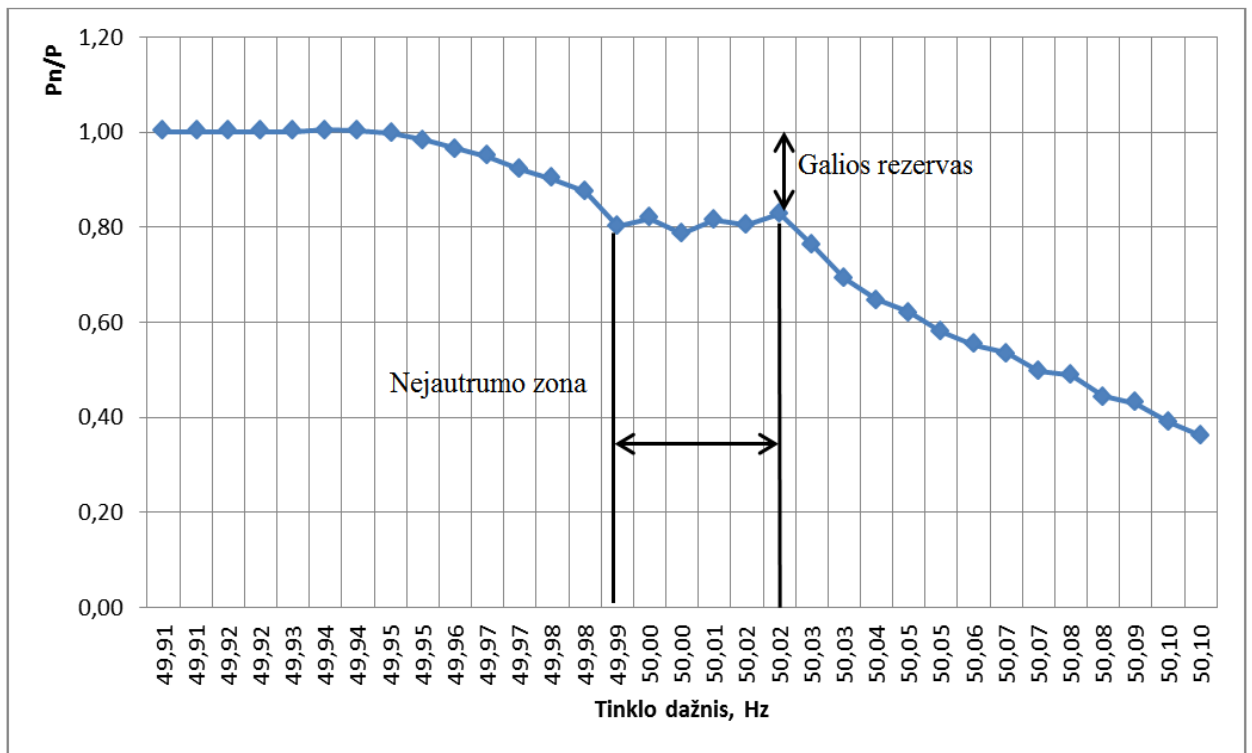
4.12 pav. DC-DC keitiklio išėjimo charakteristikos, kai $f \leq 50$ Hz

Nukritus tinklo dažniui, DC-DC keitiklio kontroleris pakelia galią, Taip pat yra atliekamas fazės ir dažnio suvienodinimas su tinklu. Žemiau 4.13 paveiksle pateiktos DC-AC keitiklio išėjimo charakteristikos, kai dažnis f yra mažesnis už 50 Hz.



4.13 pav. DC-AC keitiklio išėjimo charakteristikos, kai $f \leq 50$ Hz

Žemiau 4.14 paveiksle pateikta saulės elektrinės aktyviosios galios reguliavimo charakteristika.



4.14 pav. Saulės elektrinės aktyviosios galios reguliavimo charakteristika

Kaip matome iš gautos charakteristikos, saulės elektrinė prijungta prie elektros tinklo turi apie 20% galios rezervą, kuris yra panaudojamas padidinti aktyviąją galią tinkle. Taip pat yra nejautrumo zona apie $\pm 0,02$ Hz. Tai reiškia kad atsiradus tinklo mažiams dažnio svyravimams, saulės elektrinė nekeis aktyviosios galios kiekio perduodamo į elektros tinklą.

Padidėjus tinklo dažniui, kai $f > 50,02$ Hz. Saulės elektrinė mažina savo aktyviąją galią iki nustatytos minimalios ribos. Taip yra todėl, nes padidėjusio dažnio tinkle priežastis yra per didelis aktyviosios galios generavimas.

IŠVADOS

1. Elektros sistemos dažnis yra valdomas keičiant greito reguliavimo agregatų galią. Saulės elektrinės dirba maksimalios galios taške, todėl jos negali keisti galios.
2. Vėjo elektrinės pagal tinklo operatoriaus komandą turi pereiti į sumažintos galios režimą ir tada jos gali būti panaudojamos dažnio reguliavimui. Saulės elektrinėms tokių reikalavimų nėra. Siūloma saulės elektrines leisti dirbti 85-95 % maksimalios galios taške, taip sudarant galios rezervą reguliavimui.
3. Panaudojus standartinius keitiklio ir saulės elementų modelius ir įvedant papildomus blokus sudarytas saulės elektrinės modelis su galios rezervu, kurį galima panaudoti dažnio reguliavimui.
4. Atlikus modelio simuliaciją, gauti rezultatai, iš kurių pastebime, kad saulės elektrinės generuojama galia priklauso nuo tinklo dažnio. Gauta reguliavimo charakteristika artima vėjo elektrinių rekomenduojamo dažnio reguliavimo charakteristikai, tai įrodo, kad saulės elektrines taip pat galima naudoti dažnio reguliavimui.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Č. Ramonas, V. Kepalas, V. Adomavičius. Electronics and electrical, 2006 (ISSN 1392 – 1215) 78-83 p. [interaktyvus] [žiūrėta 2014 - 06 - 10]<http://www.ee.ktu.lt/journal/2006/2/1392-1215-2006-02-66-78.pdf>
2. RPIA Global Market Outlook Photovoltaics 2013-2017 [interaktyvus] [žiūrėta 2014 - 06 - 10] http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/GMO_2013_-_Final_PDF.pdf
3. Andrius Platakis. Fotovolyinių keitiklių tiekiamos energijos kokybės tyrimas ir gerinimas. Daktaro. [interaktyvus] [žiūrėta 2014 - 06 - 10] http://dspace.vgtu.lt/bitstream/1/1725/1/2252_PLATAKIS-A_Disertacija_20140430_tirazui.pdf
4. Andrius Platakis. Nuolatinės srovės keitiklio alternatyviems energijos šaltiniams kūrimas ir tyrimas. Magistro darbas, [interaktyvus] [žiūrėta 2014 - 06 - 14] http://vddb.laba.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2010~D20100702_090012-77157/DS.005.0.01.ETD
5. Elektros tinklų naudojimo taisyklės. 2011m.
6. Albertas Nargėlas. Rėlinė apsauga ir automatika. Mokymo, Kaunas 2012, 124-127 p.
7. S.M.A.Faisal. Model of Grid Connected Photovoltaic System Using MATLAB/SIMULINK. [interaktyvus] [žiūrėta 2014 - 06 - 10] [interaktyvus] [žiūrėta 2014 - 06 - 14] [interaktyvus] [žiūrėta 2014 - 06 - 14] [interaktyvus] [žiūrėta 2015 - 01 - 10] <http://www.jee.ro/covers/art.php?issue=WB1315669647W4e6b868f3a557>
8. Vėjo elektrinių prijungimo prie Lietuvos elektros energetikos sistemos techninės taisyklės. [interaktyvus] [žiūrėta 2015 - 01 - 10] http://www3.lrs.lt/pls/inter2/dokpaieska.showdoc_l?p_id=231095
9. „Lietuvos energijos gamyba“, AB. Išankstinės prijungimo sąlygos 35,2 MW vėjo elektrinių parko prijungimui prie elektros perdavimo tinklo.