



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Paulius Grigalis

**Hibridinės saulės-vėjo elektrinės elektros konversijos procesų
modeliavimas**

Magistro baigiamasis projektas

Vadovas

Lekt. dr. Povilas Norkevičius

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**Hibridinės saulės-vėjo elektrinės elektros konversijos procesų
modeliavimas**

Magistro baigiamasis projektas
Elektros energetikos sistemos 621H63005

Vadovas:

Lekt. dr. Povilas Norkevičius

.....
(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

.....
(data)

Recenzentas:

.....
(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

.....
(data)

Projektą atliko:

Paulius Grigalis

.....
(vardas, pavardė, parašas)

.....
(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

PAULIUS GRIGALIS

(Studento vardas, pavardė)

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA, 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Hibridinės saulės-vėjo elektrinės elektros konversijos procesų modeliavimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Pauliaus Grigalio**, baigiamasis projektas tema: „Hibridinės saulės-vėjo elektrinės elektros konversijos procesų modeliavimas“ 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)

Grigalis, Paulius. Hibridinės saulės-vėjo elektrinės elektros konversijos procesų modeliavimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. P. Norkevičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 61 psl.

Santrauka

Šiame tyrime yra tiriama hibridinė energijos sistema, kuri apima tiek saulės fotomodulius, tiek ir vėjo turbinos generatoriaus kaip elektros energijos šaltinį vartotojo būsto poreikiams patenkinti. Sumodeliuota valdymo technologija, kuri leidžia hibridinei sistemai pasiekti didžiausią efektyvumą, kuriame optimalus elektros energijos panaudojimas gali būti pasiekiamas iš saulės elektrinės ir vėjo turbinos generatoriaus sistemų pagal nuolat kintančias aplinkos sąlygas. Išnagrinėta hibridinė sistema, surinkti duomenys reikalingi modeliavimo rezultatams gauti. Programinė įranga ir imitacinis modelis analizuojamas Matlab/Simulink programa.

Reikšminiai žodžiai: hibridinė, vėjo, saulės, generatorius, sistema, Matlab/Simulink.

Grigalis, Paulius. Simulation of Hybrid- Solar –Wind Power System Conversion Processes. Final project of master degree / supervisor lect. / dr. P. Norkevičius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electric Power Systems.

Kaunas, 2016. 61 pp.

Summary

In this study, we proposed a hybrid energy system which combines both solar panel and wind turbine generator as an alternative for conventional source of electrical energy generators. A simple control technique which is also cost effective has been proposed to track the operating point at which optimal power can be coerced from the PV system and wind turbine generator system under continuously changing environmental conditions. The entire hybrid system is described given along with comprehensive simulation results that discover the feasibility of the system. A software simulation model is developed in Matlab/Simulink.

Keywords: hybrid, wind, solar, generator, system, Matlab/Simulink.

Turinys

Iliustracijų sąrašas.....	8
Lentelių sąrašas.....	10
Santrumpos.....	10
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga.....	13
2. Aktualumas.....	13
3. Darbo tikslas.....	13
4. Saulės energija.....	14
4.1.1 Fotocelės.....	14
4.1.2 Fotomoduliai.....	15
4.1.3 Fotoelektrinės.....	15
4.1.4 Saulės elektrinės sudedamosios dalys.....	16
4.2. Fotomodulių moduliavimas.....	17
4.3. Saulės elementų orientavimas saulės atžvilgiu.....	21
4.4. Maksimalaus galio taško suradimas.....	22
4.4.1 Maksimalaus galios taško reikalavimai.....	23
4.4.2 Maksimalaus galio taško algoritmas.....	23
4.4.3 Algoritmo pritaikymas modeliui.....	23
5. DC-DC keitiklių tipai.....	24
5.1. Žeminantysis (buck) keitiklis.....	25
5.2. Aukšinantysis (boost) keitiklis.....	26
5.3. Žeminantysis – aukštinantysis (buck-boost) keitiklis.....	27
6. Inverteris.....	28
7. Vėjo elektrinė.....	29
7.1. Istorija.....	29
7.2. Sistemos principas.....	30
7.3. Vėjo turbina.....	31

7.3.1	Vėjo turbinos modeliavimas.....	31
7.4.	Generatorius.....	32
7.4.1	Generatorių tipai.....	32
7.4.2	Nuolatinių magnetų sinchroninis generatorius.....	33
7.5.	Vėjo elektrinės maksimalus galio taškas.....	34
8.	Hibridinės sistemos įtaka elektros tinklui.....	36
9.	Hibridinės sistemos modeliavimas.....	36
10.	Tyrimo rezultatų aprašymo dalis.....	40
11.	Išvados.....	58
12.	Literatūra.....	59

Iliustracijų sąrašas

1 pav. Saulės elemento konstrukcijos ir veikimo principas [2].....	14
2 pav. Integruota saulės elektrinė ant pastato [3].....	16
3 pav. Fotocelės veikimo principas [5].....	18
4 pav. Ekvivalentinė fotocelės schema.....	18
5 pav. Fotomodulio principinė schema.....	19
6 pav. FM voltamperinė charakteristika.....	20
7 pav. FM galios priklausomybė nuo įtampos.....	20
8 pav. Saulės spinduliuojamos energijos į plokštumą priklausomybės nuo orientavimo erdvėje ir metų laiko.....	21
9 pav. Optimalaus saulės panelės pasvirimo į horizontalų kampą kitimas priklausomai nuo metų laiko.....	22
10 pav. Galios priklausomybė nuo įtampos pagal Perturb ir Observe algoritmą.....	23
11 pav. Maksimalaus galios taško algoritmas pagal Perturb ir Observe [8].....	24
12 pav. DC-DC keitiklio struktūrinė schema [9].....	25
13 pav. Žeminančiojo (buck) keitiklio schema [9].....	26
14 pav. Aukštinantysis (boost) nuolatinės srovės keitiklis [9].....	27
15 pav. Žeminantysis-aukštinantysis (buck-boost) nuolatinės srovės energijos keitiklis [9].....	27
16 pav. Mažos galios vėjo turbinos sandara [13].....	30
17 pav. VE blokinė schema.....	31
18 pav. VE galios ir vėjo greičio priklausomybė.....	34
19 pav. Modelyje naudojama hibridinės saulės ir vėjo elektrinės blokinė schema.....	37
20 pav. Hibridinės saulės ir vėjo elektrinės simulink modelis.....	39
21 pav. Saulės fotomodulio srovės priklausomybė nuo įtampos.....	40
22 pav. Saulės fotomodulio galios priklausomybė nuo įtampos.....	41
23 pav. Srovės priklausomybė nuo įtampos prie skirtingų apšvietų.....	41
24 pav. Galios priklausomybė nuo įtampos prie skirtingų apšvietų.....	42
25 pav. Srovės priklausomybė nuo įtampos prie skirtingų temperatūrų.....	42
26 pav. Galios priklausomybė nuo įtampos prie skirtingų temperatūrų.....	43
27 pav. Saulės fotomodulio galia modeliuojant su MPPT.....	43
28 pav. Saulės fotomodulio įtampa modeliuojant su MPPT.....	44
29 pav. Vėjo turbinos galios charakteristika kai (pitch angle = 0°) [18].....	44
30 pav. Trifazio generatoriaus išėjimo įtampa.....	45

31 pav. Vėjo elektrinės generuojama galia.....	45
32 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas, keičiant apšvietą ir vėjo greitį ($t= 10$ s).....	46
33 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia, keičiant apšvietą ir vėjo greitį ($t= 10$ s).....	47
34 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas, keičiant apšvietą ($t= 10$ s).....	48
35 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia, keičiant apšvietą ($t= 10$ s).....	48
36 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas, keičiant vėjo greitį 1 dalis ($t= 10$ s).....	49
37 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas, keičiant vėjo greitį 2 dalis ($t= 10$ s).....	50
38 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia, keičiant vėjo greitį 1 dalis ($t= 10$ s).....	50
39 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia, keičiant vėjo greitį 2 dalis ($t= 10$ s).....	50
40 pav. Vartotojo galios priklausomybė nuo generuojamos įtampos.....	52
41 pav. THDU priklausomybė nuo generuojamos įtampos.....	52
42 pav. THDI priklausomybė nuo generuojamos įtampos.....	53
43 pav. Moduliacijos koeficiento priklausomybė nuo generuojamos įtampos.....	53
44 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas Nr. 1, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t= 10$ s).....	54
45 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia Nr. 1, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t= 10$ s).....	55
46 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas Nr. 2, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t= 10$ s).....	55
47 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia Nr. 2, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t= 10$ s).....	55
48 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas Nr. 3, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t= 10$ s).....	56
49 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia Nr. 3, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t= 10$ s).....	56
50 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas Nr. 4, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t= 10$ s).....	57
51 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia Nr. 4, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t= 10$ s).....	57

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Saulės elektrinių sistemų komponentai.....	17
2 lentelė. Moduliavime naudojami saulės fotomodulio parametrai 25 °C, 800 W/m ²	21
3 lentelė. Sistemos parametrai keičiant saulės intensyvumą ir vėjo greitį.....	46
4 lentelė. Sistemos parametrai keičiant saulės intensyvumą.....	47
5 lentelė. Sistemos parametrai keičiant vėjo greitį.....	49
6 lentelė. Sistemos parametrai keičiant vartotojo apkrovą.....	51
7 lentelė. Sistemos parametrai prijungiant elektros tinklą.....	54

Santrumpos

AEI - atsinaujinantys energijos išteklių;
AIE - atsinaujinančių išteklių energija;
EES - elektros energetikos sistema;
EEST - elektros energetikos sistemos tinklas;
SE - saulės elektrinė;
FEM - fotoelektros modulis;
EĮ - elektros įrenginys;
EEG - elektros energijos gamyba;
AB - akumuliatorių baterija;
KS – kintamos srovės;
NS – nuolatinės srovės;
SF- saulės fotomodulis;
HĮE – horizontalus įžeminimo elektrodas;
VĮE – vertikalus įžeminimo elektrodas.
MPPT– maksimalus galios taško sekimas;
DC – nuolatinė srovė;
MATLAB - MATrix LABoratory;
PMSG - nuolatinių magnetų sinchroninis generatorius;
MPP - maksimalus galios taškas;
I_{PV} - fotomodulio srovė;
I_O - diodo grįžtama srovė;
U – per diodą pratekanti įtampa;
a – idealumo faktorius;
U_T – šiluminė įtampa;
R_s – suminė varža;

R_p – šunto varža;
 K_I – celės srovės temperatūrinis koeficientas;
 G – saulės apšvieta W/m^2 ;
 G_{STC} – normaliomis darbo sąlygomis saulės apšvieta W/m^2 ;
 I_{PV_STC} - šviesos sugeneruota srovė normaliomis darbo sąlygomis;
 I_{0_STC} – nominali srovė;
 E_g – puslaidininkio energija;
 T_{STC} – temperatūra normaliomis darbo sąlygomis;
 q – elektrono krūvis;
 I_{SC_STC} – trumpojo jungimo srovė normaliomis darbo sąlygomis;
 U_{OC_STC} - trumpojo jungimo įtampa normaliomis darbo sąlygomis;
 K_U – temperatūros koeficientas tuščios eigos režimu;
 N_S – fotocelių skaičius;
 N_p – lygiagrečiai sudėliotų fotocelių skaičius;
 P_M – vėjo elektrinės galia;
 ρ - oro tankis (laipsniais);
 β - atakos kampas (laipsniais);
 R – menties spindulys (metrais);
 V – vėjo greitis (m/s);
 p – generatoriaus polių skaičius;
 U_{ph} - generatoriaus išėjimo įtampa;
 f – rotoriaus dažnis;
 t – apsisukimų skaičius;
 U_0 - buck-boost keitiklio išėjimo įtampa;
 V_W - buck-boost keitiklio įėjimo įtampa;
 P – vėjo galia;
 Ω - rotoriaus greitis;
 Ω_e – generatoriaus fazinė įtampa;
 U_W – lygintuvo išėjimo įtampa;
 D – keitiklio ciklas;
 C_P - vėjo elektrinės galios koeficientas;
 λ - vėjo greitis už vėjo turbinos;
 λ_1 - konstanta;
 Ω - rotoriaus sukimosi greitis (rad/min).

Ivadas

Šiuo metu energetika vaidina didžiulį vaidmenį, įgyvendinant tarpusavyje glaudžiai susijusius ekonominius, socialinius ir aplinkosauginius žmonijos plėtros tikslus. Siekiant darnios energetikos plėtros, reikia kuo efektyviau ir mažiau naudoti iškastinį kurą, stengtis jį pakeisti atsinaujinančiais energijos šaltiniais. Norint tai įgyvendinti, reikia ieškoti ne tik naujų technologijų, bet ir didinti jų efektyvumą. Tai yra priežastis, kodėl atsinaujinantys energijos šaltiniai tampa vis svarbesnė energijos gamybos technologija šių dienų rinkai. Tarp šių atsinaujinančių energijos šaltinių, saulės ir vėjo energija yra sparčiausiai pasaulyje auganti energijos išteklių.

Saulės energija yra plačiai išsisklaidžiusi, jos parametrai kinta plačiose ribose priklausomai nuo paros ir metų laiko. Dėl technologijų tobulėjimo atsirado galimybė išnaudoti saulės energiją efektyviai, darosi vis lengviau realizuoti saulės energijos išteklius. Šie saulės energijos išteklių naudojami pastatų šildymui, karšto vandens ir elektros gamybai. Dėl tokio plataus saulės energijos panaudojimo pasidarė aktualu prognozuoti kiek energijos bus pagaminta.

Kaip ir saulės energija, vėjo elektrinė ir jos parametrai kinta ribose priklausomai nuo paros ir metų laiko. Tačiau pagrindinis skirtumas yra, kad vėjo elektrinės pagamina didžiausius energijos kiekius, kai yra debesuota, ar tuo metų laikotarpiu, kai saulės apšvieta yra mažiausia. Todėl svarbu modeliuoti ir analizuoti tokios hibridinės sistemos veikimą.

Visa hibridinė sistema susideda iš saulės foto modulių ir vėjo sistemų. Šios sistemos vienijantis uždavinys patenkinti apkrovos poreikius. Atsinaujinančių šaltinių sistema su tinklu sudaro bendrą sistemą, todėl galima vadinti hibridine sistema (HS). Hibridinės kartos sistemos, kurios naudoja daugiau nei vieną maitinimo šaltinį gali padidinti energijos poreikius ne tik tiekiamos iš tinklo, iš kurios matinamas objektas, tačiau ir sudaro galimybę tiekti energiją į tinklą, kurdami mikrotinklus.

Šiuo metu yra sukurta daug imitacinių saulės ir vėjo elektrinių modelių, kuriais galima ne tik susimodeliuoti saulės ar vėjo elektrinę, bet keičiant įvairius parametrus modeliuoti skirtingas situacijas ir gauti naujus rezultatus analizei. Tokiu būdu galima parinkti efektyviausią modelį ir parametrus pagal vietovę ar sezoniškumus. Šiame darbe pateikiami imitacinio modelio duomenys ir jų kitimo įtaka gaunamiems rezultatams.

1. Literatūros apžvalga

Darbe bus analizuojamas vėjo ir saulės elektrinių hibridinis modelis. Gaminant energiją iš atsinaujinačių šaltinių padidėja bendras elektros energijos panaudojimo efektyvumas. Moksliniuose straipsniuose apie hibridines sistemas apžvelgiamos simulink saulės ir vėjo sistemų sudedamosios dalys, pagrindiniai parametrai modeliuojant hibridinę sistemą. Analizuojama hibridinės sistemos veikimo principai, užduodami reikalingi modeliavimo parametrai. Pagrindiniai duomenys apie foto celes, modulius ir jų modulių blokus (paneles), taip pat apžvelgiami pagrindiniai foto modulių konstrukcijos, veikimo principai, srovių ir įtampos parametrai. Analizuojami įvairūs MPPT (maksimalios galios valdymo kontrolės) metodai. Vėjo elektrinės sistema, apžvelgiami darbo parametrai, charakteristika ir būdas kaip efektyviai ją pritaikyti hibridinėje sistemoje.

2. Aktualumas

Pastaruoju metu Lietuva didina energetinę nepriklausomybę sujungiant elektros tinklą su Švedija ir Lenkija, kurių projektai: (Nordbalt) - 700 MW HVDC technologija prijungta linija ir (Litpolink) projektas, kuriuo sujungta 500 MW galios viena iš dviejų elektros linijų per HVDC keitiklį. Taip pat didelė dalis energijos yra pagaminama iš biomasės kogeneracinių elektrinių ir vėjo elektrinių. Toks energetinės nepriklausomybės siekimas leidžia rinkai konkuruoti, tačiau didelė dalis yra perkama iš užsienio rinkų. Pagal nacionalinės energetikos nepriklausomybės strategiją iki 2020 m. atsinaujinantys energijos išteklių turi sudaryti 23 proc. galutinio energijos suvartojimo Lietuvoje [1]. Labai svarbu įtraukti visuomenę į atsinaujinačių šaltinių plėtrą Lietuvoje, kuri leistų technologijai vystytis ir tobulėti, kadangi šiuo metu atsinaujinančių šaltinių gaminama energija yra labai brangi. Todėl svarbu sudaryti modelį, kuriuo būtų galima sudaryti sistemą, kuri pagamintų didžiausią įmanoma energijos kiekį individualiam būstui pagal šiuometines technologijas, o paviršinių galią tiekti į bendrą tinklą.

3. Darbo tikslas

Pagrindinis darbo tikslas yra sumodeliuoti ir ištirti saulės ir vėjo elektrinės hibridinės sistemos elektros energijos konversijos procesus. Baigiamajame darbe nagrinėjami uždaviniai:

- Išanalizuoti saulės fotomodulių elektrines charakteristikas;
- Išanalizuoti mažos galios vėjo elektrinės charakteristikas;

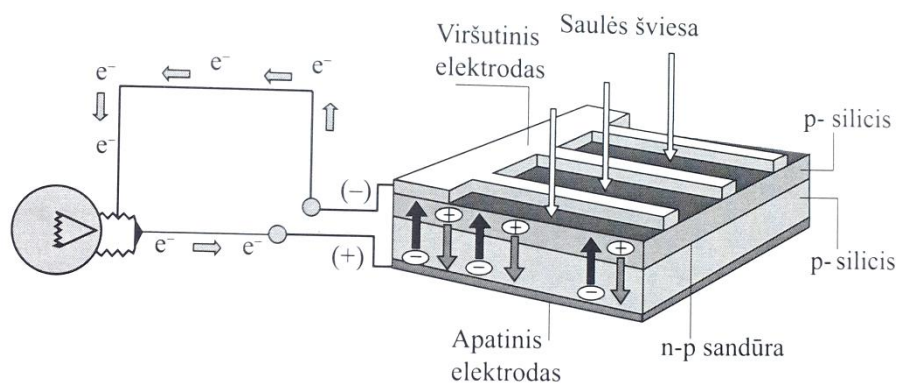
- Sumodeliuoti saulės ir vėjo elektrinių hibridinę sistemą;
- Ištirti hibridinės sistemos veikimą;
- Pavaizduoti darbo charakteristikas;
- Įvertinti visos sistemos veikimo galimybes.

4. Saulės energija

1839 metais prancūzų fizikas Edmund Becquerel nustatė kelis elementus, kurie galėjo pagaminti elektrą panaudojus saulės šviesą. Tačiau Albert Einstein išaiškino fotoelektrinio efekto veikimo principą ir paskelbė 1905 m. Fotoelektrinis efektas atsiranda, kai fotonai ar saulės šviesa krenta į metalo paviršių išmušdamas jame esantį elektroną. Ši teorija leido vystyti fotoelektrinio efekto panaudojimą ateityje. Taip 1954 metais „Bell labs“ laboratorijoje buvo sukurtas pirmasis fotomodulis.

4.1.1 Fotocelės

Saulės elemento konstrukcija panaši į dviejų skirtingo laidumo tipų silicio plokštelių sandūrą (1 pav.). Abi šios medžiagos, atskirai paimtos, yra elektriškai neutralios. Tačiau, jas glaudžiai sujungus, n-p sandūros zonoje atsiranda elektrinis laukas.



1 pav. Saulės elemento konstrukcijos ir veikimo principas [2]

Saulės šviesa krentanti į saulės elementą, jonizuoja silicio atomus. Šie, veikiami p-n sandūros jungties potencialų skirtumo, polirizuoja į dvi priešingo krūvio zonas. Laisvieji elektronai kaupiasi n-sluoksnyje prie viršutinio kontakto, atomai, netekę elektrono, kaupiasi p-sluoksnyje prie apatinės kontaktinės plokštelės. Šiuos sluoksnius sujungus išorine grandine laisvieji elektronai keliauja į p-silicio sluoksnį ir ten rekombinuojasi su skylėmis, išlaisvindami savo krūvio energiją. Elektronų srautas išorinėje grandinėje ir yra elektros srovė, kuri gali atlikti tam tikrą naudingą darbą [2].

4.1.2 Fotomoduliai

Saulės elementai praktiniam naudojimui komplektuojami į modulius, moduliai į plokštes, panelės į saulės elementų laukus. Modulį sudaro keletas lygiagrečiai ir nuosekliai sujungtų saulės elementų pagal reikalaujamą įtampą ir srovę. Taip surinkti elementai laminuojami ir dedami į aliuminio ar nerūdijančio plieno rėmą.

Moduliai savo ruožtu pagal reikalaujamus įtampos ir srovės dydžius surenkami į saulės elementų laukus. Nuolatinei įtampai keisti į kintamą įtampą moduliai komplektuojami su srovės keitikliais.

Modulis, kaip ir SE, nusakomas pikinės galios reikšme W_p . Modulio pikinė galia – ta galia, kurią jis gali išvystyti esant vardiniam saulės šviesos intensyvumui (1000W/m^2) ir nustatytoms darbo sąlygoms. Tipinių modulių pikinės galios skalė apima jos reikšmes nuo dešimties iki kelių šimtų vatų W_p .

Pagal integravimo sistemą į esamą infrakstruktūrą būdą 85% visų saulės elektros įrenginių veikia įjungti į vietinį elektros tinklą, ir tik 15% dirba kaip autonominiai elektros energijos šaltiniai. Visų galimų jungimo variantų bendras bruožas yra tarpinė grandis – srovės keitiklis, kuris saulės elementų nuolatinę srovę paverčia į kintamąją 50 Hz dažnio srovę, tinkamą standartiniams elektriniams prietaisams maitinti ir suderinamą su elektros tiekimo tinklų parametrais.

Autonominis įrenginys, be šių pagrindinių elementų, privalo turėti dar ir elektros akumuliatorių tam tikslui, kad elektros imtuvai galėtų veikti tuo metu, kai saulė nešviečia, arba jos šviesos intensyvumas yra nepakankamas [2].

4.1.3 Fotoelektrinės

Saulės baterijų sistemos yra skirstomos į dvi pagrindines grupes: on-grid – prijungtos prie elektros tinklų, ir off-grid – neprijungtos prie elektros tinklų.

Integruotos saulės elektrinės - naudojamos, siekiant parduoti saulės pagamintą elektrą elektros tinklams. Integruotai saulės elektrinei nereikalingas energijos kaupiklis (akumuliatorių baterija) ir akumuliatorių įkroviklis. Visa pagaminta elektros energija per keitiklį yra tiekama į elektros tinklą. Integruotos saulės elektrinės pagamina daugiau nei 80 procentų visos pasaulio fotoelektros.

Neprijungtos prie tinklų saulės elektrinės. Įrengti saulės energijos sistemą galima beveik kiekviename name. Tereikia atitinkamo ploto ant stogo, fasado, bei šiek tiek vietos įrengti įtampos keitikliams ir akumuliatoriams. Saulės moduliams montuoti tinkamiausias plotas turi

būti nukreiptas į pietus. Galimas tam tikras nuokrypis į rytus ar vakarus, bet tokiu atveju saulės elektrinės metinis pagaminamos energijos kiekis sumažės.

Hibridiniai saulės sistemos sujungia geriausias On-Grid ir Off-Grid saulės elektrinių sistemas. Ši sistema arba gali būti apibūdinta kaip off-grid su atsargine galia, arba on-grid saulės su papildomais elektros energijos kaupikliais.



2 pav. Integruota saulės elektrinė ant pastato [3]

4.1.4 Saulės elektrinės sudedamosios dalys

Saulės elektrines sudaro tokie elementai:

Saulės FV moduliai – vienas iš pagrindinių saulės elektrinės komponentų. Nuo FV modulių kokybės ir ilgaamžiškumo didele dalimi priklauso saulės elektrinės darbo efektyvumas bei Jūsų investicijos sėkmė. Daugiausiai naudojami monokristaliniai ir polikristaliniai moduliai. FV modulių tipo pasirinkimą įtakoja: plotas, kurį galite skirti saulės moduliams įrengti, norima saulės elektrinės galia, planuojama investuoti suma. Svarbiausia pasirinkti kokybiškus, patikimo gamintojo, sertifikuotus gaminius [4].

Inverteris (srovės keitiklis) – antras svarbiausias saulės elektrinės elementas. Jis nuolatinės srovės elektros energiją, generuojamą FV saulės moduliuose, pakeičia į standartinės įtampos ir dažnio kintamosios srovės energiją, kuri gali būti parduodama į ESO tinklą arba naudojama savo reikmėm. Norint saulės elektrinę jungti prie ESO tinklo bei siekiant užtikrinti keliamus aukštus tinklo operatoriaus kokybės reikalavimus, būtina naudoti tik kokybiškus srovės keitikius. Nuo tinkamai parinkto inverterio taip pat priklauso ir energijos nuostolių dydis sistemoje. Inverteris gali būti aprūpintas monitoringo įranga, leidžiančia stebėti ir fiksuoti jėgainės darbo parametrus.

Akumuliatorių baterijos ir jų krovimo įranga – viena iš būtinų autonominės FV saulės jėgainės dalių. Akumuliatoriuose kaupiama šviesiu paros metu generuojama elektros energija, kad vėliau ją galima būtų naudoti tamsiu paros metu, kai saulės moduliai neveikia. Autonominės saulės elektrinės rekomenduojamos tada, kai nėra galimybės užtikrinti elektros energijos tiekimo iš ESO tinklo. Akumuliatorių baterijos yra gana brangi jėgainės dalis. Norint kuo ilgiau

ekspluatuoti baterijas, būtina tinkamai parinkti kokybišką jų krovimo įrangą. Šiuolaikiniai baterijų krovikliai atlieka šias funkcijas: apsaugo akumuliatorių nuo perkrovimo, trumpo jungimo, neleistinai didelės apkrovos bei temperatūros. Tamsiu paros metu apsaugo nuo krūvio nutekėjimo FV generatorių. Automatiškai atjungia apkrovas akumuliatoriui išsikrovus iki minimalios leistinos ribos, atlieka krovimo lygio monitoringą.

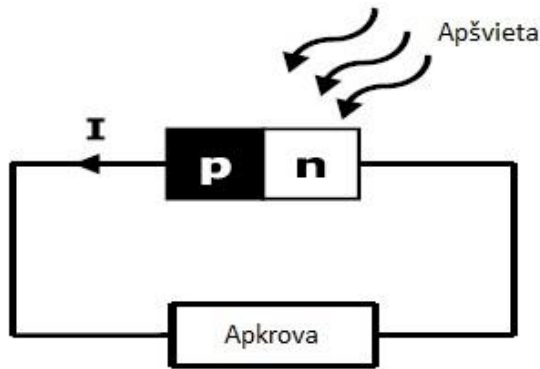
Tvirtinimo, pozicionavimo sistemos – leidžia tinkamai instaliuoti FV saulės modulius ant pastatų stogų, sienų arba žemės. Montuojant saulės modulius ant pastatų stogų, tvirtinimo sistemos parenkamos pagal stogo tipą bei dangą. Pozicionavimo sistemos leidžia užtikrinti optimalų FV modulių pasvirimo kampą į saulę bei išlaikyti šį kampą visos dienos bėgyje. Tai ženkliai padidina saulės elektrinės gaminamos elektros energijos kiekį [4].

1 lentelė. Saulės elektrinių sistemų komponentai.

On – Grid sistema	Off – Grid sistema	Hibridinė sistema
<ul style="list-style-type: none"> ○ Fotovoltinių modulių masyvas ○ Tinklo inverteris ○ Montavimo konstrukcijos ○ Kabeliai jungtys ○ Jėgos spinta su automatika ○ Monitoringas ir el. Skaitiklis 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Saulės modulių masyvas, konstrukcija, kabeliai ir jungtys, jėgos spinta su automatika ○ Įkrovimo valdiklis ○ akumuliatoriai ○ Kabeliai jungtys ○ Automatinis inverteris 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Saulės modulių masyvas, konstrukcija, kabeliai ir jungtys, jėgos spinta su automatika ○ Hibridinis inverteris, pvz., viskas viename; tinkle inverteris, automatinis inverteris, įkrovimo valdiklis, “svičas”
<p>Papildomi elektrinių komponentai</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Monitoringo / el. Kontrolės sistema ○ Modulių darbo optimizatoriai ○ Saulės sekimo sistema 		

4.2. Fotomodulių moduliavimas

Fotomodulių sistema keičia tiesioginę saulės energiją į elektrinę neteršiant aplinkos. Pagrindinis fotoelektrinės aspektas yra pačios fotocelės, iš kurių yra sudarytas fotomodulis, o elektrinė iš fotomodulių grupių jungiant jas nuosekliai ir lygiagrečiai. 3 pav. Pavaizduota principinė fotocelės veikimo principas [5]. Ekvivalentinė schema yra pavaizduota 4 pav.



3 pav. Fotocelės veikimo principas [5]

$$I = I_{PV} - I_0 \left[\exp\left(\frac{U+IR_S}{aU_T}\right) - 1 \right] - \frac{U+IR_S}{R_p} \quad (4.1)$$

I_{PV} – fotomodulio srovė;

I_0 – diodo srovė;

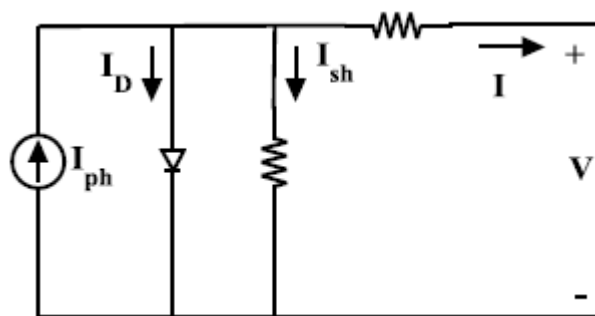
U – per diodą pratekanti įtampa;

a – idealumo faktorius;

U_T – šiluminė įtampa;

R_s – suminė varža;

R_p – šunto varža;



4 pav. Ekvivalentinė fotocelės schema

Fotocelės srovė priklauso nuo saulės apšvietos ir temperatūros, kuri išreiškiama:

$$I_{PV} = (I_{PV_STC} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_{STC}} \quad (4.2)$$

Čia:

K_I – celės srovės temperatūrinis koeficientas;

G – saulės apšvieta W/m^2 ;

G_{STC} – normaliomis darbo sąlygomis saulės apšvieta W/m^2 ;

I_{PV_STC} - šviesos sugeneruota srovė normaliomis darbo sąlygomis;

Diodo srovė skaičiuojama, per kubinę temperatūros funkciją, kuri išreiškiama:

$$I_o = I_{o_STC} \left(\frac{T_{STC}}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{aK} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.3)$$

Čia:

I_{o_STC} – nominali srovė;

E_g – puslaidininkio energija;

T_{STC} – temperatūra normaliomis darbo sąlygomis;

q – elektrono krūvis;

Grįžtamoji srovė taip pat galima apskaičiuoti, kaip temperatūrų pokyčio funkciją, išreiškiama:

$$I_o = \frac{(I_{SC_STC} + K_I \Delta T)}{\exp \left[\frac{(U_{OC_STC} + K_V \Delta T)}{aU_T} \right] - 1} \quad (4.4)$$

I_{SC_STC} – trumpojo jungimo srovė normaliomis darbo sąlygomis;

U_{OC_STC} – trumpojo jungimo įtampa normaliomis darbo sąlygomis;

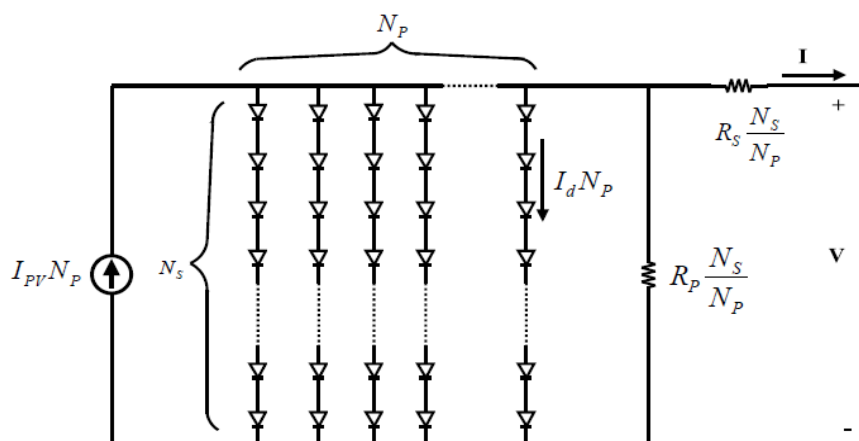
K_V – temperatūros keoficientas tuščios eigos režimu;

Viena fotocelė gali generuoti nedidelę galią, tačiau sujungus jas į vieną bloką galima sudaryti panelę, kurios išraiška pavaizduota 4.5 formule.

$$I = I_{PV} N_P - I_o N_P \left[\exp \left(\frac{U + I R_S \left(\frac{N_S}{N_P} \right)}{a U_T N_S} \right) - 1 \right] - \left(\frac{U + I R_S \left(\frac{N_S}{N_P} \right)}{R_P \left(\frac{N_S}{N_P} \right)} \right) \quad (4.5)$$

N_s – fotocelių skaičius;

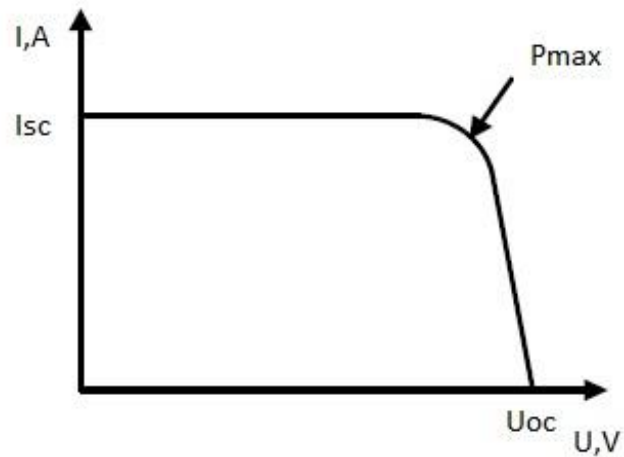
N_p – lygiagrečiai sudėliotų fotocelių skaičius;



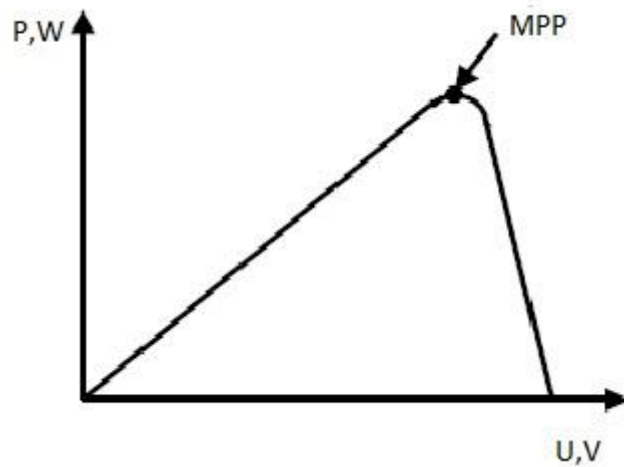
5 pav. Fotomodulio principinė schema

$$I = I_{PV}N_P - I_0N_P \left[\exp \left(\frac{U + IR_S \left(\frac{N_S}{N_P} \right)}{aU_T N_S} \right) - 1 \right] \quad (4.6)$$

6 ir 7 paveiksluose pavaizduota fotomodulio voltamperinė charakteristika.



6 pav. FM voltamperinė charakteristika



7 pav. FM galios priklausomybė nuo įtampos

Maksimalus galios taškas apskaičiuojamas, kaip maksimalios darbinės įtampos ir srovės sandauga.

$$P_{max} = U_{max} I_{max} \quad (4.7)$$

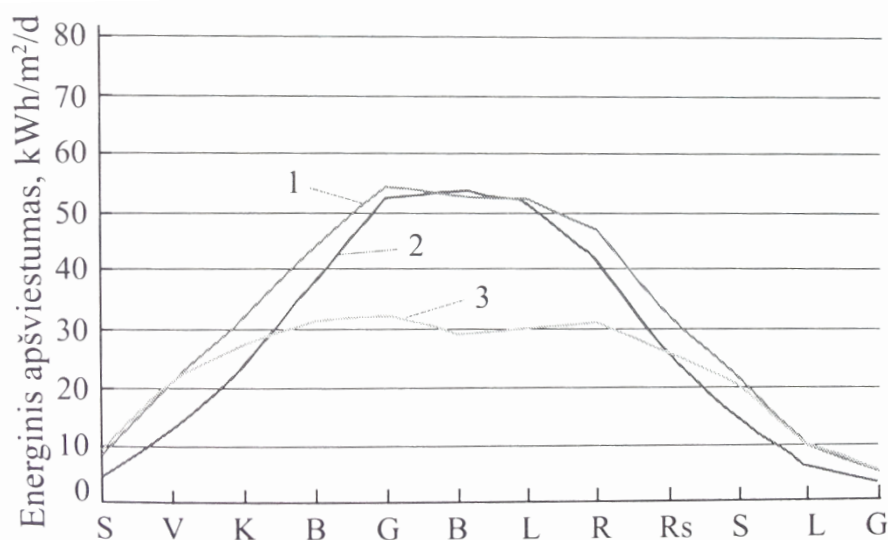
2 lentelė. Moduliavime naudojami saulės fotomodulio parametrai 25 °C, 800 W/m².

Parametrai	Reikšmė
I_{mp}	7.61 A
U_{mp}	26.3 V
I_{sc}	8.21 A
P_{max}	200.143 W
U_{oc}	32.9 V
K_U	-0.1230 V/K
K_i	0.0032 A/K
N_s	54
N_p	4

2 lentelėje pateikta saulės fotomodulio panelės specifikacija, kuri bus naudojama modeliuojant saulės elektrinės bloką.

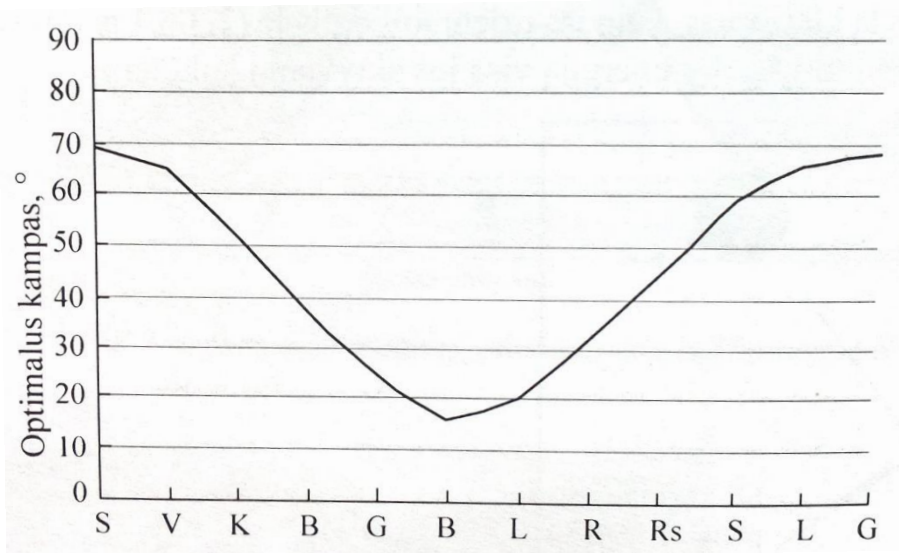
4.3. Saulės elementų orientavimas saulės atžvilgiu

Saulės energijos kiekis, patenkęs į tam tikrą paviršiaus plotą per parą ar per metus, labai priklauso nuo to paviršiaus plokštumos orientavimo saulės atžvilgiu. Akivaizdu, kad maksimalus kiekis patektų, jei to paviršiaus plokštuma būtų nuolat atsukama statmenai į saulės spindulius. Tačiau tai padaryti ne visuomet įmanoma techniškai ir ne visuomet leidžia ekonominės galimybės [2]. Dėl to, įrengiant stacionarias saulės elektros paneles, reikia orientuoti, kad maksimaliai išnaudoti tos vietovės geografinę platumą ir palankiausią metinį kampą 8 pav.



8 pav. Saulės spinduliuojamos energijos į plokštumą priklausomybės nuo orientavimo erdvėje ir metų laiko.

Palyginus saulės spinduliavimo energiją į 2- horizontalią plokštumą, į 3- vertikalią plokštumą ir plokštumą, pasvirusią 37° ir orientuotą į pietus - 3, matyti nemažų skirtumų. Daugiausia energijos tenka į plokštumą, kai ji pasvirusi tam tikru kampu į horizontą ir orientuotą į pietų pusę. Šis kampas vadinamas optimaliu. Optimalus kampas atitinka vietovės geografinę padėtį ir metų laiką. Lietuvos geografinėi platumai optimalus kampo kitimas parodytas 9 pav. Stacionariuose įrenginiuose, nesant galimybės nuolat keisti plokštumos pasvirimo kampą, ieškoma optimalaus visam metų periodui. Lietuvoje toks kampas lygus 37° [2].



9 pav. Optimalaus saulės panelės pasvirimo į horizontalų kampą kitimas priklausomai nuo metų laiko

Akivaizdu, kad maksimalus kiekis patenka, jei paviršiaus plokštuma yra nuolat atsukama į statmenai saulės spindulius. Tačiau tai padaryti ne visuomet įmanoma techniškai ir ne visuomet leidžia ekonominės galimybės. Dėl to, projekte įrengiant stacionarius SF, reikia atsižvelgti į kampą, palankiausią visam metui periodui.

4.4. Maksimalaus galio taško suradimas

Maksimalus galio taško suradimas (MPPT) – tai elektrinė kontrolės sistema, kuri gali apskaičiuoti ir nustatyti maksimalią saulės elektrinės darbo režimą. Tai ne vien mechaninė paieškos sistema, tačiau ji sujungia visą mechaninę ir elektrinę sistemą į vieną. Sistema leidžia nustatyti saulės judėjimo kryptį, taip saulės elektrinės komponentai juda tokiu kampu, kad saulės spindulys kristų statmenai saulės fotomodulio paneli. MPPT kontrolės sistema yra elektroninė nustatymo sistema, kuri išgauna maksimalią galią iš analizuojamų saulės elektrinės padėčių. [6]

4.4.1 Maksimalaus galios taško reikalavimai

Maksimalus galios taškas skaičiuojamas pagal tai, kokia galia ir įtampa išeina iš saulės fotomodulio. Bendroje sistemoje – saulės elektrinėje, maksimalus galios taškas randamas lyginant išėjimo įtampą su užduotąją tai sistemai įtampa, ties kuria yra pasiekiamas sistemos maksimalus galingumas [7]. Todėl maksimalaus galios taško radimas priklauso nuo pasirinkto algoritmo, pagal kurį bus perskaičiuojamas įtampos pokytis, kuris bus įvedamas į Matlab Simulink bloką.

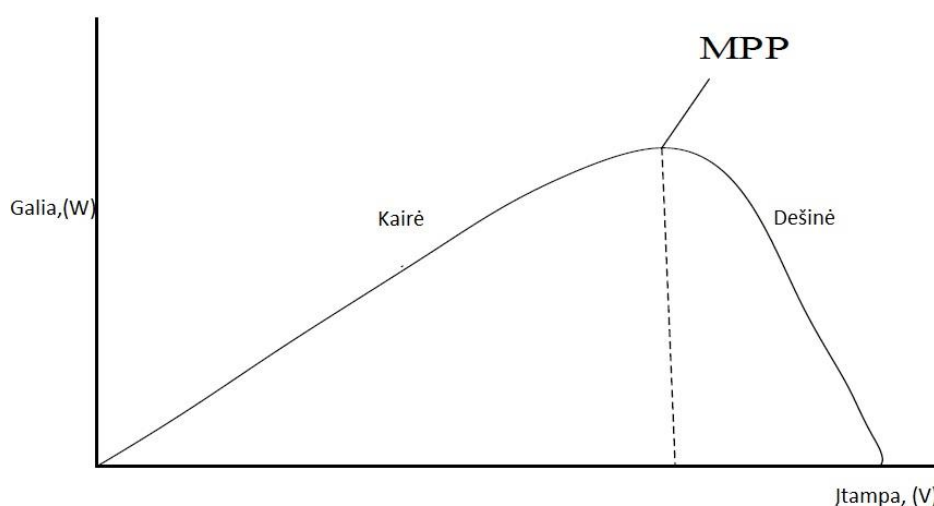
4.4.2 Maksimalaus galio taško algoritmas

Šiuo metu yra sukurta daug algoritmų, leidžiančių surasti saulės fotomodulio maksimalų galios tašką. Keli algoritmai naudojami surasti maksimalų galios tašką:

- a. P&O algoritmas;
- b. IC algoritmas;
- c. Parazitinės talpos;
- d. Įtampos ir galios suradimo (Voltage based peak power tracking);
- e. Srovės ir galios suradimo (Current Based peak power tracking).

4.4.3 Algoritmo pritaikymas modeliui

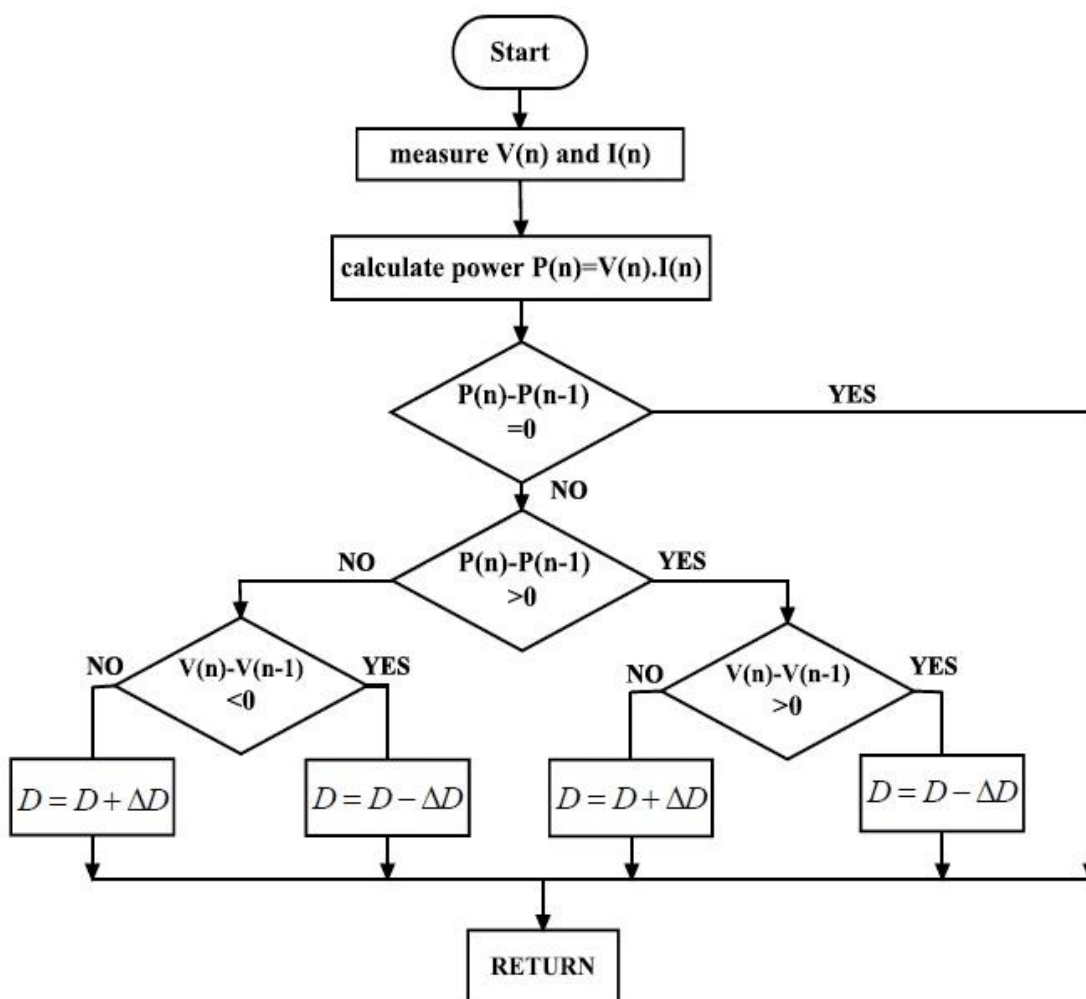
Vienas plačiausiai naudojamų metodų yra Perturb ir Observe (P&O) metodas. Šiam algoritmui pavaizduoti galima pritaikyti veikiančios saulės panelės įtampos ir galios kreivę.



10 pav. Galios priklausomybė nuo įtampos pagal Perturb ir Observe algoritmą

10 paveiksle pavaizduota saulės panelės galios priklausomybė nuo įtampos. Analizuodami charakteristiką galima pastebėti, kad dešinėje maksimalus galios taškas (MPP) surandamas, kai fotomodulis pasiekia darbinę įtampą, o galia priklausomai nuo darbinės įtampos pasiekia

maksimalią tai panelei priklausančią darbinę galią. Tai pagrindinis principas pagal kurį surandamas MPP panaudojus „P&O“ algoritmą, kuris aprašytas 11 paveiksle [8].



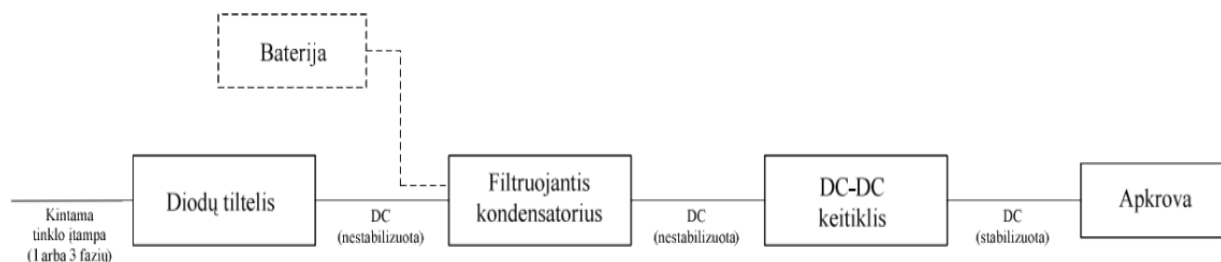
11 pav. Maksimalaus galios taško algoritmas pagal Perturb ir Observe [8]

Šiame algoritme pirmiausia matuojama įtampa ir srovė. Naudodamiesi šiais parametrais apskaičiuojama galia, kuri lyginama su prieš tai duotomis reikšmėmis. Jei rezultatas neatitinka - įtampa yra didinama arba mažinama, kol surandamas keitiklio maksimalus galios taškas.

5. DC-DC keitiklių tipai

Nuolatinės srovės energijos keitikliai (angl. DC-DC converters) plačiai naudojami impulsiniuose nuolatinės srovės maitinimo šaltiniuose bei nuolatinės srovės elektros variklių valdikliuose. 12 pav. pavaizduota nuolatinės srovės keitiklio struktūrinė schema [9]. Keitiklio įėjimo įtampa paprastai yra nestabilizuota nuolatinės srovės įtampa, kuri gaunama išlyginus kintamą tinklo įtampą diodų tilteliu – jos vertė svyruoja dėl tinklo įtampos amplitudės svyravimų. Impulsiniai nuolatinės srovės energijos keitikliai skirti keisti nestabilizuotą

nuolatinės srovės energijos įtampą į stabilizuotą nuolatinės srovės energijos įtampą. Praktikoje nuolatinės srovės keitikliai impulsiniuose maitinimo šaltiniuose dažnai naudojami kartu su skiriamuoju transformatoriumi, o nuolatinės srovės variklių valdikliuose be skiriamojo transformatoriaus.



12 pav. DC-DC keitiklio struktūrinė schema [9]

Šiame darbe aptarti nuolatinės srovės keitikliai be skiriamojo transformatoriaus, nes skiriamasis transformatorius iš esmės nekeičia principinės schemos topologijos. Yra penkios pagrindinės nuolatinės srovės keitiklių rūšys:

1. Žeminantysis (angl. buck) keitiklis;
2. Aukštinantysis (angl. boost) keitiklis;
3. Žeminantysis/aukštinantysis (angl. buck-boost) keitiklis;
4. Čako (angl. Čuk) keitiklis;
5. Pilnojo-tiltelio (angl. full-bridge) keitiklis.

Darbe bus nagrinėjami pirmi trys DC-DC keitikliai. Šių keitiklių schemose raktai laikomi idealiais, induktyviniuose ir talpiniuose elementuose nekreipama dėmesio į nuostolius. Keitiklių įėjimo įtampa laikoma idealiu įtampos šaltiniu (vidinė varža lygi nuliui).

5.1. Žeminantysis (buck) keitiklis

Šio tipo keitiklis skirtas žeminti įėjimo įtampai. Tokie keitikliai taikomi kuriant nuolatinės srovės maitinimo šaltinius bei nuolatinės srovės elektros variklių valdiklius [9]. 13 pav. pavaizduotas žeminantysis keitiklis skirtas aktyvinei apkrovai. Vidutinė išėjimo įtampa gali būti apskaičiuota impulso skvarbos atžvilgiu taip:

$$V_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_0(t) dt = \frac{1}{T_s} (\int_0^{t_{on}} V_d dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 dt) = \frac{t_{on}}{T_s} V_d = DV_d; \quad (5.1)$$

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \approx \frac{v_{valdymo}}{V_{pj}}; \quad (5.2)$$

$$V_o = \frac{V_d}{V_{pj}} v_{valdymo} = k v_{valdymo}; \quad (5.3)$$

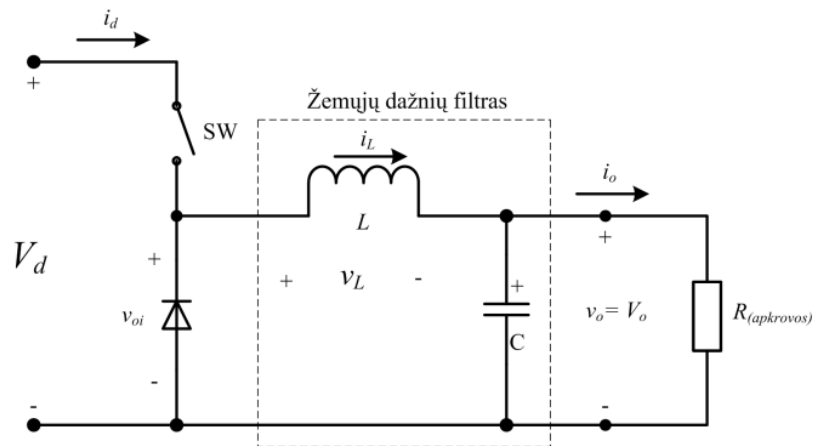
$$k = \frac{V_d}{V_{pj}} = const; \quad (5.4)$$

t_{on} – įjungto rakto veikimo laikas;

T_s – moduliacijos periodas;

$V_{valdymo}$ – paklaidos signalo vertė;

V_{pj} – pjūklinio signalo amplitudė;

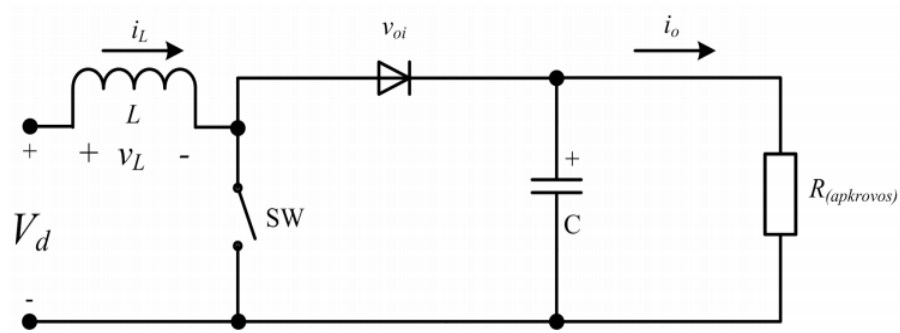


13 pav. Žeminančiojo (buck) keitiklio schema [9]

Keičiant rakto valdymo signalo impulso skvarbą $\frac{t_{on}}{T_s}$, galima reguliuoti išėjimo įtampą V_o . Svarbu pastebėti, kad vidutinė išėjimo įtampa V_o tiesiškai priklauso nuo valdymo įtampos $V_{valdymo}$.

5.2. Aukšinantysis (boost) keitiklis

14 pav. pateikta aukštinančiojo keitiklio schema. Pagrindinės šio keitiklio taikymo sritys yra stabilizuoti impulsiniai maitinimo šaltiniai ir regeneratyviniai nuolatinės srovės variklių stabdymo valdikliai. Iš pavadinimo aišku, jog tokių keitiklių išėjimo įtampa visada didesnė už įėjimo įtampą. Kai raktas yra įjungtas, diodui prijungiama atbulinė įtampa, tokiu būdu izoliuojama išėjimo grandinė. Įėjimas tiekia energiją ritei [9]. Kai raktas išjungtas, apkrova energiją gauna iš įėjimo ir ritės magnetinio lauko. Stacionarioje (nusistovėjusioje) analizėje išėjimo kondensatorius yra pakankamai didelės talpos nekintančiai išėjimo įtampai $v_o(t) \cong V_o$ užtikrinti.



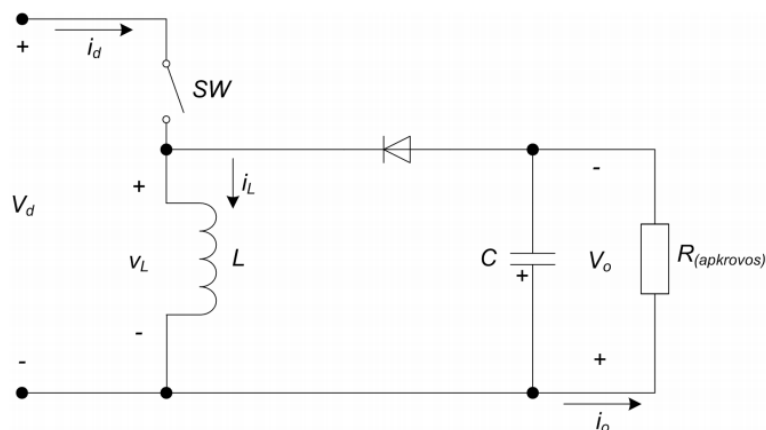
14 pav. Aukštinantysis (boost) nuolatinės srovės keitiklis [9]

5.3. Žeminantysis – aukštinantysis (buck-boost) keitiklis

Pagrindinė žeminančiųjų - aukštinančiųjų keitiklių taikymo sritis - impulsiniai nuolatinės srovės maitinimo šaltiniai. Tokiuose maitinimo šaltiniuose galima gauti teigiamo arba neigiamo poliarumo, didesnę arba mažesnę nei įėjimo, išėjimo įtampą. Nusistovėjusioje būsenoje žeminančiojo - aukštinančiojo keitiklio įtampos perdavimo koeficientas yra sudarytas iš dviejų keitiklių įtampos perdavimo koeficientų.

$$\frac{V_o}{V_d} = D \frac{1}{1-D}; \quad (5.5)$$

Iš šios lygties matyti, kad išėjimo įtampa priklauso nuo impulso skvarbos D vertės ir gali būti didesnė arba mažesnė nei įėjimo įtampa. Žeminančiojo ir aukštinančiojo nuolatinės srovės keitiklių topologijų sujungimas į vientisą schemą pateiktas 15 pav. Kai raktas yra įjungtas, energija iš įėjimo tiekama ritei, o diodui prijungta įtampa yra atbulinė. Kai raktas yra atviras, ritės magnetiniame lauke sukauptą energiją perduodama apkrovai [9].



15 pav. Žeminantysis-aukštinantysis (buck-boost) nuolatinės srovės energijos keitiklis [9]

6. Inverteris

Inverteriai keičia nuolatinę įtampą į kintamąją, dažniausiai sinusinės formos įtampa. Reikiama momentinė išėjimo įtampos vertė nustatoma impulsiniu platuminiu būdu, tai yra parenkant valdymo signalui proporcingą įjungimo impulso trukmę per komutavimo periodą $T_k=1/f_k$. Impulso trukmė komutavimo periodo metu nustatoma vieną kart, todėl visų impulsų pločio moduliacijos būdu veikiančių inverterių darbo režimas yra diskretusis. Kadangi reikiama išėjimo įtampos forma dažniausiai yra sinusinė, tai valdymo signalas taip pat sinusinis [10]:

$$u_m(t) = U_m \sin \omega t \quad (6.1)$$

Inverterio apkrova dažniausiai būna elektros mašina, tai yra RL apkrova, kurios laiko pastovioji $t=L/R$, o srovės fazė atsilieka kampų.

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R} \quad (6.2)$$

Jei apkrovos srovė netrūkioji, momentinė kintamosios apkrovos įtampos vertė po filtro turėtų būti lygi.

$$u_m(t) = U_{0m} \sin(\omega t - \varphi) \quad (6.3)$$

čia:

φ – fazių skirtumas taro valdymo signalo ir apkrovos; U_{0m} – apkrovos įtampos amplitudė, lygi momentinei apkrovos laiko momentu $(\omega t - \varphi) = \pi/2$. Srovės Kadangi generuojamos kintamosios įtampos harmoniniai iškreipimai turi neviršyti leidžiamųjų, komutavimo dažnis ir žemųjų dažnių filtras galėtų pašalinti komutavimo keliamus trukdžius, tai yra turi būti tenkinama sąlyga.

$$\frac{1}{f_0} \gg \tau \gg \frac{1}{f_k} \quad (6.4)$$

čia:

f_0 – generuojamos įtampos dažnis; τ – filtro laiko pastovioji; f_k – komutavimo dažnis. Kadangi filtro laiko pastovioji yra didesnė už inverterio, analoginėse valdymo schemose pakanka taikyti pirmosios eilės filtro perdavimo funkciją, inverterį laikant proporcingu elementu:

$$G(s) = \frac{1}{1+\tau s} \quad (6.5)$$

7. Vėjo elektrinė

7.1. Istorija

Žmonės naudojo vėjo galią bent jau 5 500 metų, kad stumtų į priekį burines valtis ir burlaivius, architektai taip pat panaudojo vėją natūraliai ventiliacijai pastatuose nuo senovinių laikų. Nuo 7-ojo šimtmečio Kristaus metais, vėjo malūnai buvo panaudoti irigacijos pumpavimui ir tam, kad maltų grūdus.

Jungtinėse Valstijose, "vandenį pumpuojančio vėjo malūno išsivystymas" buvo pagrindinis faktorius leidžiantis didelių rajonų ūkininkavimą ir rančų veiklą, kurie neturėjo kitokio prieinamo vandens.

Vėjo siurbliai prisidėjo prie transporto sistemų plėtimo po visą pasaulį, pumpuodamos vandenį iš vandens šulinių garų garvežiams. Daugiaašmenė vėjo elektrinė su viršuje esančiu grotelių bokštu, padarytu iš medienos ar plieno, buvo daugelį metų plytinti įranga visuose Amerikos kaimų peizažuose. Pritaikius generatorius ir akumuliatorių baterijas, mažos vėjo mašinos aprūpino elektra izoliuotus ūkius.

1887 m. liepą, Škotijos dėstytojas, profesorius James Blyth, ėmėsi vėjo galios bandymų, kurie pasiekė kulminacinį tašką Jungtinės Karalystės 1891 patente. Blyth 33 pėdų (10 m) aukščio, audeklu vairuota vėjo turbina buvo įdiegta Marykirk Škotijoje ir buvo panaudota, kad gamintų apšvietimą. Blyth pasiūlė perteklinę elektrą žmonėms Marykirk gatvės apšvietimui, bet nesisekė jo išradimo prekybos vystimasis.

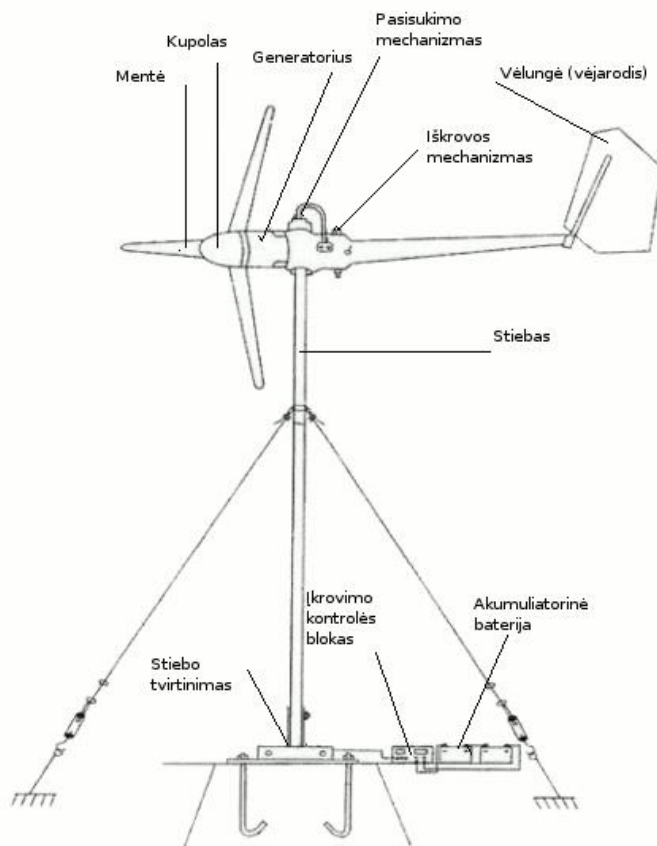
Prasidedant 1887-1888 žiemai, Jungtinėse Valstijose, Charles F. Brush pagamino elektrą, naudodamas vėjo varomą mašiną, kuri gamino elektrą jo namams ir laboratorijai apytiksliai iki 1900 metų.

1890-aisiais, Danijos mokslininkas ir išradėjas Poul la Cour konstravo vėjo elektrines, kad sukurtų elektrą, kuri buvo tada panaudojama, vandenilio gaminimui. Jie buvo pirmi to, kas turėjo tapti šiuolaikine vėjo turbinos forma.

Mažos vėjo jėgainės izoliuotų kaimiškų pastatų apšvietimui buvo plačiai paplitusios pirmoje 20-ojo šimtmečio dalyje. Didesni vienetai, numatyti ryšiui su kompiuterių tinklu, buvo pabandyti keliose vietose, apimdami Jaltą 1931 ir Vermonte 1941 [11]. Šiuolaikinė vėjo jėgainių pramonė prasidėjo 1979 nuo nuoseklios Danijos gamintojų Kuriant, Vestas, Nordtank, ir Bonuso vėjo elektrinių gamybos. Šitos ankstyvos elektrinės pagal šiandienius standartus buvo mažos – kiekviena su 20–30 kW galiomis. Vėjo elektrinių gamybai plečiantis į daugelį šalių, atsirado galimybės pakisti jų dydžiui bei galiai. Pati didžiausia šiuo metu pagaminta vėjo elektrinė priklauso Vestas kompanijai (Vestas V164) ir jos galia siekia net 8 MW. Po jos iškart eina kita vėjo energetikos gigantė Enercon su savo Enercon E 126, kurios galia siekia 7,5 MW [12].

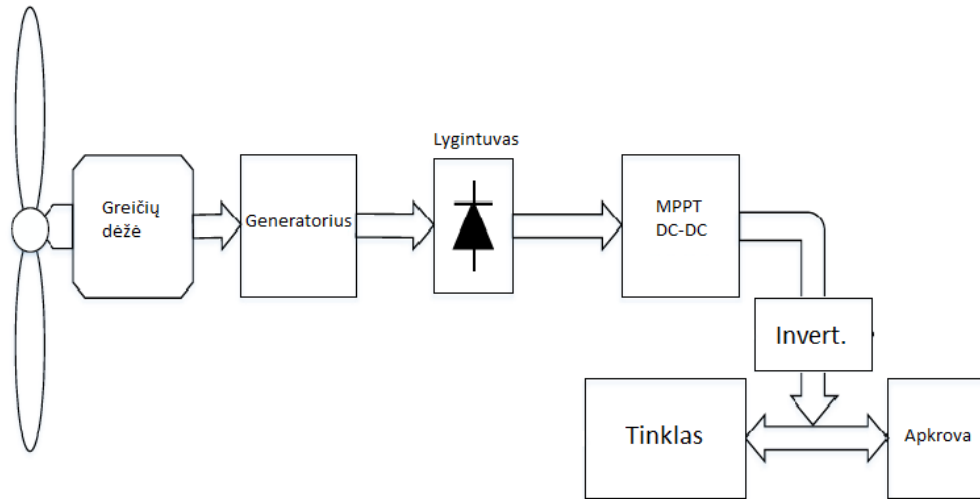
Vėjo ir saulės energija dabar yra labai išvystyta ir vien JAV dabar yra pagaminama 119,789 MWh vėjo energijos per metus. Lietuvoje mes turime taip pat nemažus vėjo išteklius ir, kaip praktika rodo, mums juos visai neblogai pavyksta įsisavinti, kadangi vėjo elektrinių kiekis Lietuvoje vis plečiasi.

7.2. Sistemos principas



16 pav. Mažos galios vėjo turbinos sandara [13]

Pagrindinės dalys sudarančios mažos galios vėjo elektrinė yra: mentės, kurios suka generatoriaus rotorius, generatorius, įstatytas kupole, vėjarodis, kuris nukreipia vėjo elektrinę prieš vėjo sklidimo kryptį, pasisukimo mechanizmas, iškvėpimo mechanizmas, laikantysis stiebas, stiebo tvirtinimas ir autonominei sistemai reikalinga akumuliatorinė baterija su įkrovimo kontrolės bloku.



17 pav. VE blokinė schema

Vėjo elektrinės veikimo principas – vėjo kinetinę energiją keičiama į menčių sukimo momentą, kuri per pavarų dėžę suka generatoriaus rotorių. Generatorius keičia mechaninę energiją į elektrinę, keitiklis iš kintamos įtampos keičia į nuolatinę ir per valdomą MPP DC-DC keitiklį surandamas maksimalus galios taškas, iš kurio išeinanti įtampa paduodama į dvipusį keitiklį akumuliatoriams krauti arba į inverterį, kuris tiekia energiją į tinklą.

7.3. Vėjo turbina

7.3.1 Vėjo turbinos modeliavimas

Vėjo srautas, turi kinetinės energijos, kurią galima keisti į vėjo rato ar kito įrenginio mechaninę energiją. Priklausomai nuo paskirties, mechaninė energija gali būti transformuota į elektros ar suspausto oro potencinę energiją. Vėjo turbinoje modelyje, visa vėjo kinetinė energija yra keičiama į elektrinę, kurią sukuria vėjo turbinoje įstatytas generatorius [14].

Mechaninis vėjo rato galinumas yra vėjo srautas proporcingas skerspjūvio plotui ir greičio kubui.

$$P_M = \frac{1}{2} \pi \rho C_P(\lambda, \beta) R^2 V^3 \quad (7.1)$$

Čia,

P_M – vėjo elektrinės galia;

ρ - oro tankis (laipsniais);

β - atakos kampas (laipsniais);

R – menties spindulys (metrais);

V – vėjo greitis (m/s);

λ – vėjo greitis už vėjo turbino mentės

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V} \quad (7.2)$$

Čia,

Ω - rotoriaus greitis;

Vėjo naudingumo koeficientas C_p priklauso nuo vėjo greičio (λ) už vėjo turbino mentės

$$C_p = \frac{1}{2} \left(\frac{116}{\lambda_1} - 0,4\beta - 5 \right) \exp \frac{-165}{\lambda_1} \quad (7.3)$$

$$\lambda_1 = \left(\frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,089} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}} \right) \quad (7.4)$$

Čia,

C_p - vėjo elektrinės galios koeficientas;

λ - vėjo greitis už vėjo turbino;

λ_1 - konstanta;

7.4. Generatorius

Elektros mašina yra energijos keitiklis. Vienos rūšies energijos keitimas kitos rūšies energija vadinamas energijos mainais. Elektros mašinose vyksta elektros energijos ir mechaninės energijos mainai, todėl į elektros mašiną galima žiūrėti kaip į elektromechaninį energijos keitiklį. Elektros generatorius mechaninę energiją keičia elektros energija, o elektros variklis elektros energiją keičia mechanine energija. Elektros generatorius ir elektros variklis – pats paprasčiausi ir labiausiai paplitę elektromechaniniai keitikliai [15].

7.4.1 Generatorių tipai

Pagal veikimą elektros mašinos skirstomos į induktyviasias, talpines ir induktyviasias-talpines. Induktyviųjų mašinų veikimas pagrįstas elektromagnetine indukcija magnetiniame lauke. Talpinių mašinų procesai paremti indukcijos reiškinais, vykstančiais elektriniame lauke. Induktyviosio ir talpinės mašinos hibridas yra induktyvioji-talpinė mašina, kurios veikimas pagrįstas indukcijos reiškinais, vykstančiais magnetiniame ir elektriniame laukuose [15].

Pagal sukimosi ašį elektros mašinas galima suskirstyti į šitokias:

1. Su horizontalia sukimosi ašimi;

2. Su vertikalia sukimosi ašimi;
3. Su laisva sukimosi ašimi.

Atsižvelgiant į elektros mašinų apsaugą nuo aplinkos poveikio, elektros mašinos skirstomos į:

1. Atvirąsias;
2. Uždarąsias;
3. Apsaugotąsias;
4. Sandariąsias;
5. Atsparias drėgmei;
6. Atsparias šalčiui;
7. Chemiškai atsparias;
8. Tropines.

Elektros mašinoje magnetinį lauką sukuria ryškūs arba neryškūs poliai, kurie įmagnetinami tekant žadinimo apvijoms elektros srovei (elektromagnetinis žadinimas). Jei elektros mašinos poliai nuolatiniai magnetai, tai magnetiniam laukui sukurti nereikalingos apvijos. Tuomet magnetinį lauką kurs nuolatiniai magnetai. Elektros mašinų žadinimas gali būti statoriuje, judamojoje dalyje ir kartu statoriuje ir judamojoje dalyje.

Elektromagnetais žadinamos elektros mašinos skirstomos į nepriklausomojo, lygiagrečiojo, nuosekliojo ir mišriojo žadinimo mašinas.

Elektros mašinos pagal kontaktus skirstomos į bekontaktes ir su slankiaisiais kontaktais.

Prie bekontakčių elektros mašinų priskiriama asinchroninės mašinos su vientisaisiais ir su narveliniais (trumpai sujungtais) rotoriais ir kitos elektros mašinos neturinčios slankiųjų kontaktų.

Prie elektros mašinų su slankiaisiais kontaktais priskiriamos: sinchroninės mašinos, asinchroninės elektros mašinos su kontaktiniais žiedais (su faziniu rotoriumi), nuolatinės ir kintamosios srovės kolektorinės elektros mašinos [15].

7.4.2 Nuolatinių magnetų sinchroninis generatorius

Sinchroninis variklis su nuolatiniais magnetais, tai sinchroninis variklis, kurio induktorius turi nuolatinius magnetus.

Šių variklių induktojų sužadavimo lauką kuria nuolatiniai magnetai. Be to, induktorius turi narvelinę apviją, kuri reikalinga variklio paleidimui. Ši konstrukcija, palyginus su elektromagnetinio žadinimo sinchroninių variklių konstrukcija, žymiai paprastesnė ir patikimesnė. Juose nėra slankiųjų kontaktų ir nereikia nuolatinės srovės tinklo induktojiui žadinti [15]. Toks variklis gali būti naudojamas kaip generatorius, kuris besisukdamas gali sukurti

elektros energiją, kuri tiekama į bendrą sistemą. Sinchroninio generatoriaus elektromagnetinę energiją aprašyta 16 formulėje.

Mažos galios vėjo elektrinėse dažniausiai naudojamos nuolatinių magnetų sinchroniniai generatoriai, kadangi jų konstrukciją yra paprastesnė, kuri gali būti taikoma kaip atsinajinančiųjų šaltinių generavimo rezultatas. Todėl baigiamajame darbe vėjo elektrinės sistema bus modeliuojama su nuolatinių magnetų sinchroniniu generatoriumi.

$$E = 4,44 \cdot f \cdot \varphi \cdot t \quad (7.5)$$

Čia,

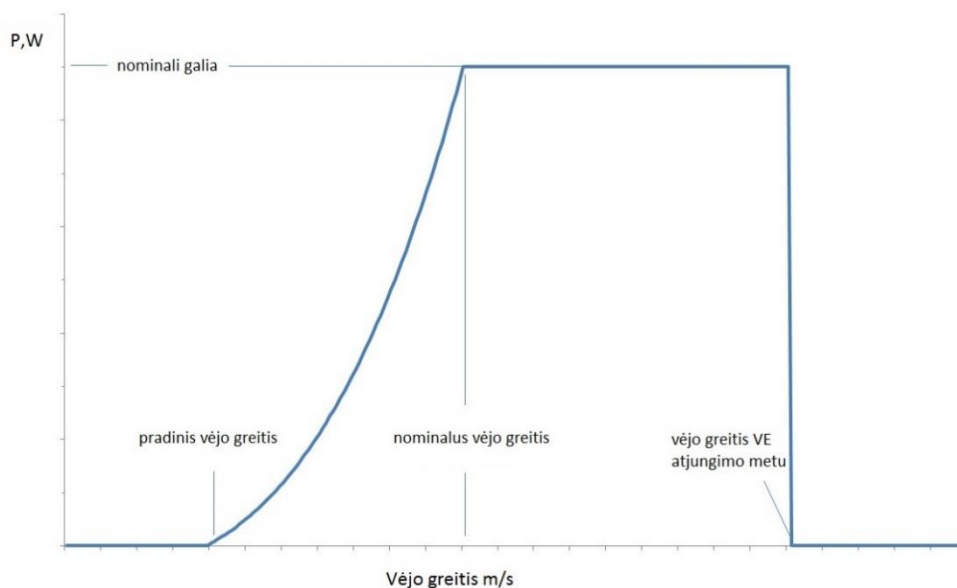
f – rotoriaus dažnis;

Φ - slidimas;

t – apsisukimų skaičius;

7.5. Vėjo elektrinės maksimalus galio taškas

Vėjo galios ir vėjo greičio kitimo charakteristika pavaizduota 18 paveiksle.



18 pav. VE galios ir vėjo greičio priklausomybė

Kai maksimalus galios taškas

$$\frac{dp}{d\Omega} = 0 \quad (7.6)$$

$$\frac{dp}{d\Omega} = \frac{dP}{dD} \times \frac{dD}{dV_W} \times \frac{dV_W}{d\Omega_e} \times \frac{d\Omega_e}{d\Omega} \quad (7.7)$$

Čia,

Ω - rotoriaus greitis;

Ω_e – generatoriaus fazinė įtampa;

U_W – lygintuvo išėjimo įtampa;

D – keitiklio ciklas;

Iš aukšinančio-žeminančios (buck-boost) keitiklio

$$U_0 = \frac{D}{1-D} U_W ; \quad (7.8)$$

$$\frac{dD}{dU_W} = -\frac{D^2}{U_0} ; \quad (7.9)$$

Čia,

U_0 - buck-boost keitiklio išėjimo įtampa;

U_W - buck-boost keitiklio įėjimo įtampa;

Rotoriaus greitis gali būti reguliuojamas keičiant generatoriaus fazės kampą.

$$\Omega_e = p \cdot \Omega ; \quad (7.10)$$

$$\frac{d\Omega_e}{d\Omega} = p > 0 ; \quad (7.11)$$

Čia,

p – generatoriaus polių porų skaičius;

Generatoriaus gnybtų įtampa apskaičiuojama,

$$U_{ph} = 4,44 \cdot f \cdot \varphi \cdot t ; \quad (7.12)$$

$$f \propto \Omega_e ; \quad (7.13)$$

$$\frac{dU_{ph}}{d\Omega_e} > 0 \text{ kai } U_{ph} \propto U_W ; \quad (7.14)$$

$$\frac{dU_{ph}}{d\Omega_e} \approx \frac{dU_W}{d\Omega_e} > 0 ; \quad (7.15)$$

Čia,

U_{ph} - generatoriaus išėjimo įtampa;

f – rotoriaus dažnis;

φ - slidimas;

t – apsisukimų skaičius;

Iš 7.9, 7.11, 7.15 galima pastebėti, kad $\frac{dD}{dU_W}$, $\frac{d\Omega_e}{d\Omega}$ ir $\frac{dU_W}{d\Omega_e}$ negali būti lygus 0. Tai $\frac{dP}{dD} =$

0 gali būti ir tikrai būti, $\frac{dP}{dD}$ lygus 0. Iš formulių galime spręsti, kad įtampa yra priklausoma nuo keitiklio darbinio dažnio [16].

8. Hibridinės sistemos įtaka elektros tinklui

Vėjo elektrinės prijungtos prie Lietuvos elektros energetikos sistemos perdavimo tinklo turi tenkinti elektros kokybės reikalavimus, o elektros kokybės matavimo metodai ir prietaisai vėjo elektrinėje turi atitikti standartus nurodytus „vėjo elektrinių prijungimo prie Lietuvos elektros energetikos sistemos techninėse taisyklėse“. Remiantis šiomis taisyklėmis, galima pritaikyti kokybės reikalavimus hibridinei saulės ir vėjo elektrinei, kuri yra jungiama į tinklą per inverterį. Šiose taisyklėse nurodyti penki įtampos kokybės parametrai:

- nuostoviosios būklės įtampos kitimas;
- staigieji įtampos pokyčiai;
- vėjo elektrinių įprastinio veikimo įtampos sukeltas mirgėjimas;
- perjungimo sukeltas mirgėjimas;
- harmoninės įtampos ir srovės.

Tam, kad plėtojant hibridines sistemas Lietuvoje bendri elektros tinklo įtampos kokybės parametrai neblogėtų, yra keliami reikalavimai, kurie turi atitikti standartus nurodytus Lietuvos elektros energetikos įstatymuose [17].

9. Hibridinės sistemos modeliavimas

Hibridinė maitinimo sistema (HMS) sujungia dvi ar daugiau atsinaujinančių energijos išteklių, kuri veikia kaip vienas maitinimo šaltinis. Atsinaujinančių energijos šaltinių, kaip fotoelektros ir vėjo elektrinės negeneruoja pastovaus dydžio galią, tačiau suderinus galima pagamintą energijos kiekį tiekti į tinklą. Hibridinei sistemai leidžia perteklinę elektros energiją generuoti į tinklą, o atsiradus elektros energijos tūkumui ją vartoti ir taip išlaikyti generuojamos sistemos stabilumą.

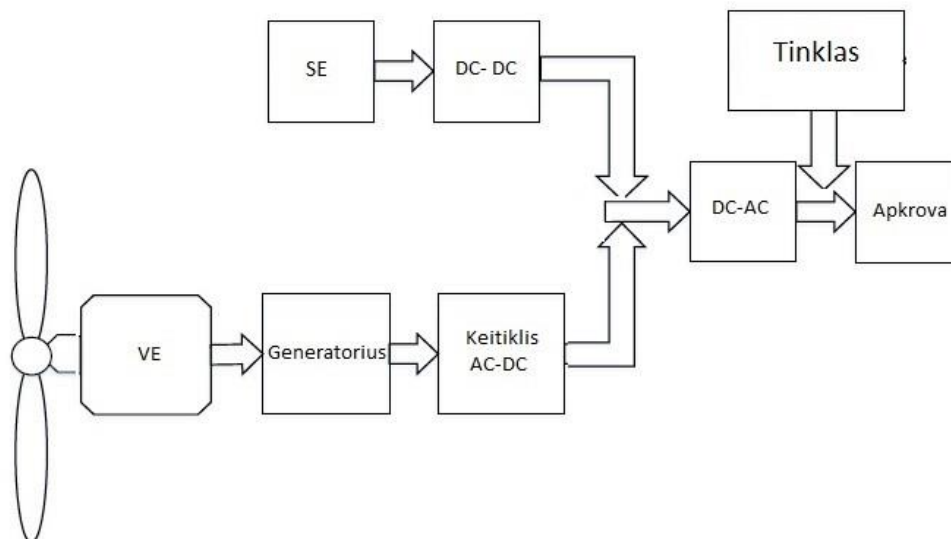
Hibridinės sistemos labiausiai naudojamos atokiose vietovėse, kuriose nėra tiesioginio prisijungimo prie elektros tinklo. Tokiu atveju įdiegiamos akumuliacinės sistemos, kurios yra brangios. Šiuo metu didžiausia atsinaujinančių šaltinių elektros energijos gamintojų parduoda elektros energiją į tinklą už didesnę kWh kainą negu ją patys perka. Tai leidžia susikurti daugiau elektros generuojančių sistemų, kurias ateityje bus galima sujungti į nepriklausomus mikrotinklus. Tokios sistemos įdiegimo tikslas – pagaminti tiek energijos iš atsinaujinančių energijos šaltinių, kad pilnai palaikytų apkrovą. Tokiai sistemai reikalingi papildomi keitikliai, inverteriai, filtrai, krovimo valdikliai.

Pagrindiniai hibridinės sistemos privalumai:

- Energijos šaltinio nepriklausomumas nuo tinklo;
- Kelių generatorių sistema pasiekia didesnę efektyvumą.

Pagrindiniai hibridinės sistemos trūkumai:

- Didelės pradinės investicijos;
- Sudėtinga sistemos priežiūra.

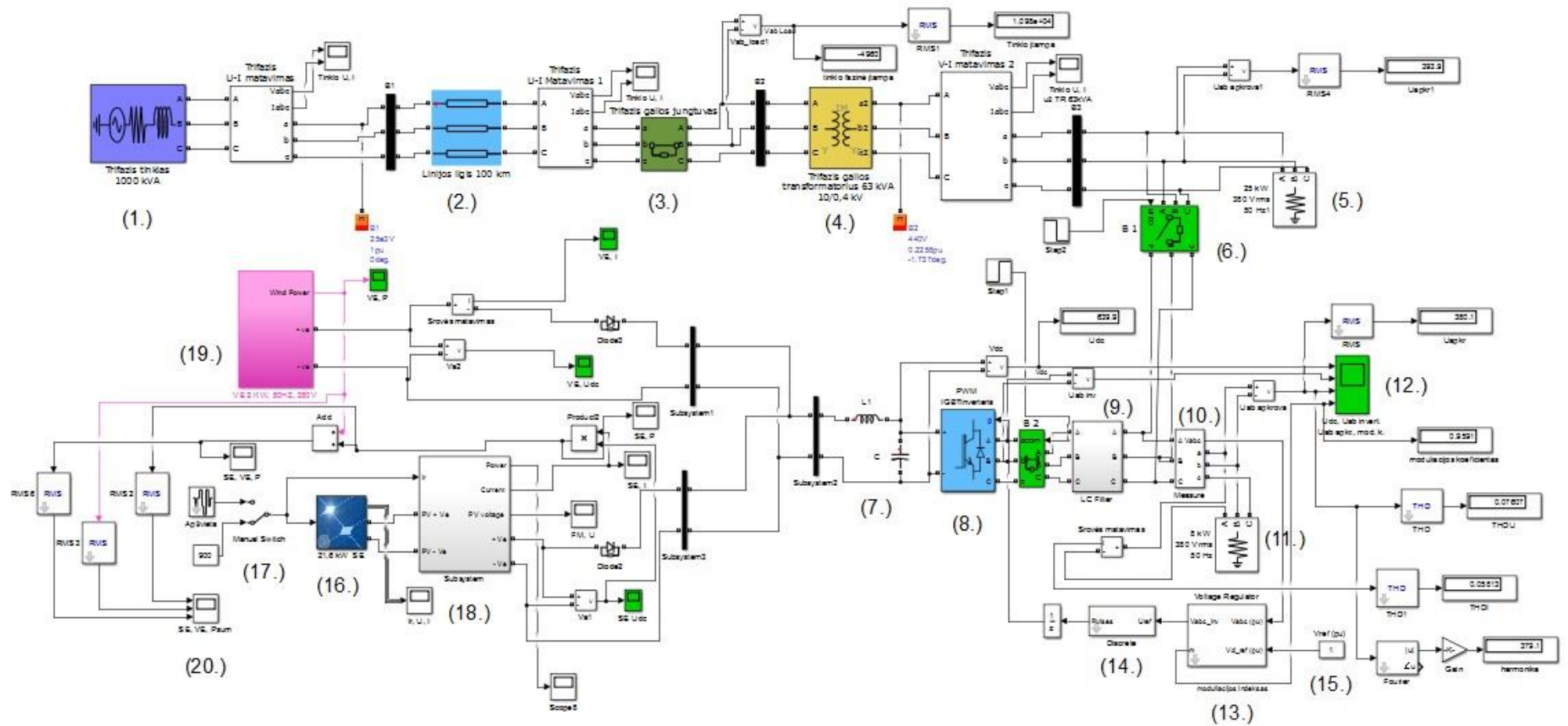


19 pav. Modelyje naudojama hibridinės saulės ir vėjo elektrinės blokinė schema

Hibridinė saulės ir vėjo elektrinė turi dirbti normaliu savo darbo režimu. Normalaus režimo parametrai yra: pastovi įtampa, srovė, neviršijanti leistinų normų, dažnis ($50 \text{ Hz} \pm 0,5 \text{ Hz}$). Įvykus trumpajam jungimui, elektros tinkle staiga krinta įtampa ir išauga srovė. Nuolatinė srovė išauga silpniau (1,2 – 1,4 karto), todėl jos atjungimas reikia parinkti praktiškai žaibiško jungimo apsaugas, nes įprastinėse apsaugose kuo srovė išauga daugiau kartų, tuo greičiau ji yra atjungiamas, o srovei neišaugus bent 3 kartus, jos atjungimas gali trukti per ilgai. Per ilgai veikianti per didelę srovę gali sugadinti prietaisus, taip padarydama didelės žalos. Tačiau apsaugų nuolatinės srovės dalyje parinkinėti nebūtina, kadangi inverteriai jau turi savyje integruotas apsaugas.

Elektros prietaisus gali gadinti ir viršįtampiai. Pavyzdžiui didelis viršįtampis gali sukelti šiluminį puslaidininkio pramušimą ir taip jį nepataisomai sugadinti. Puslaidininkių technika yra gana brangus dalykas, todėl reikia vengti tokių situacijų. Jų išvengti padeda viršįtampių ribotuvai, kurie paprastai turi kibirkštinį tarpelį, kuriuo, padidėjus įtampai, yra suformuojama kibirkštis, nunešanti krūvininkų perteklių į žemę. Taip yra todėl, kad norint prašokti didesnę izoliatoriaus tarpą yra reikalinga didesnė įtampa. Kibirkštis – tai elektros išlydis, susidarantis

tarp skirtingų potencialų. Žemės potencialas yra praktiškai pastovus ir beveik visada yra laikomas 0, todėl susidarius didesnei, nei leidžiama įtampa, kibirkštinis išlydis padeda atstatyti potencialų skirtumą iškraudamas perteklinę energiją į žemę ir taip padėdamas palaikyti tinkle stabilų (ne aukštesnę) 230 V arba 400 V įtampą.



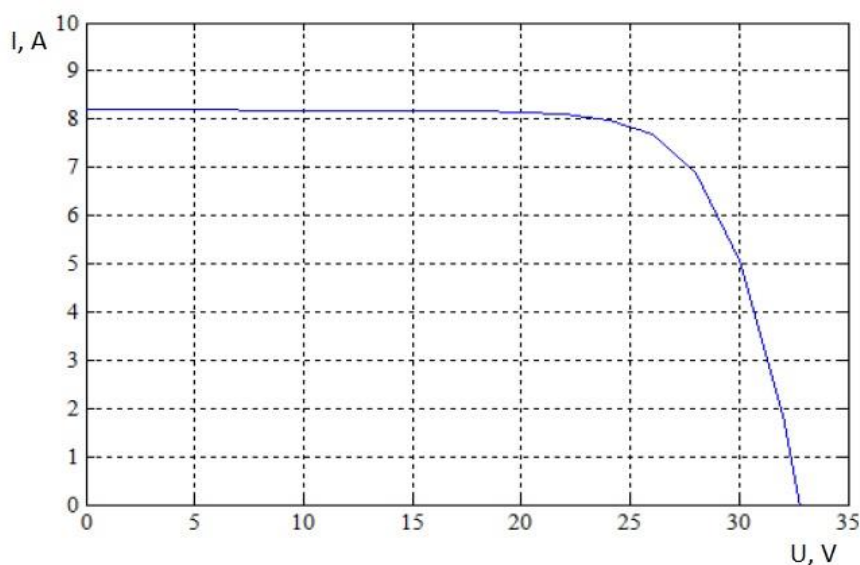
20 pav. Hibridnēs saulēs ir vējō elektrinēs simulink modelis

Sistemos blokas Nr.1 – įtampos šaltinis (generatorius), turintis galimybę keisti generuojamos įtampos dydį, dažnį bei kitus reikalingus parametrus. Modeliavimui parinktas 10 kV elektros tinklas. Blokas Nr. 2 oro linija – 100 km, Nr. 3 galios skyriklis. Sistemos blokas Nr. 4 – transformatorius, keičiantis generatoriaus generuojamą aukštą 10 kV įtampą į 380 V įtampą, kuri paduodama į vartotojų apkrovą Nr. 5. Per nuolatinės srovės intarpą Nr. 7 nuolatinė įtampa paduodama į IGBT (Insolated Gate Bipolar Transistor) inverterį (blokas Nr. 8), kur įtampa yra keičiama į kintamąją. IGBT inverteris naudoja pulsų pločio valdiklį (pulse width modulation (PWM)).

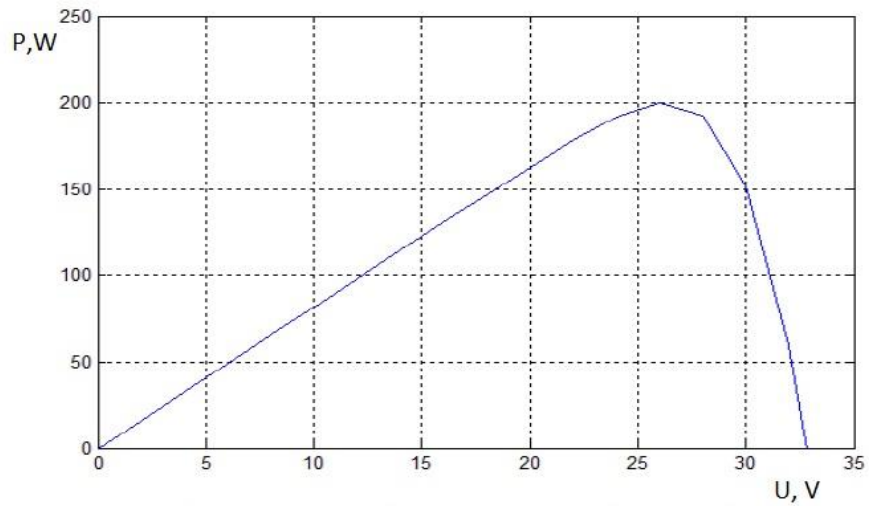
Blokas Nr. 9 yra LC lygintuvas, kuris skirtas sumažinti iš keitiklio išeinančios įtampos harmonikas. Blokas Nr. 10 perduoda invertuotos įtampos parametrus į bloką Nr. 13, kuriame invertuota įtampa lyginama su iš bloko Nr. 15 pateikiama etalonine įtampa. Atsiradus nesutapimams blokas Nr. 14 paduoda reikiamą signalą į IGBT inverterį, kuris atitinkamai keičia invertuojamos įtampos parametrus. Blokas Nr. 11 yra apkrova, su galimybe keisti galią, dažnį, nominalią įtampą ir kitus parametrus, reikalingus modeliavimui. Blokas Nr. 12 skirtas grafiniam procesų stebėjimui. Blokas Nr. 16 yra saulės elektrinės blokas, kuris jungiamas prie bloko Nr.18 – nuolatinės įtampos keitiklio bloko. Vėjo elektrinės blokas pavaizduotas Nr. 19, kuriame modeliuojamas nuolatinių magnetų sinchroninis generatorius su vėjo elektrinės parametrų bloku ir lygintuvu, kur kintamąją VE įtampą keičia į nuolatinę 600 V įtampą. Blokas Nr. 17 – perjungėjas, kuris naudojamas keisti saulės apšvietos vertes prie tam tikro laiko.

10. Tyrimo rezultatų aprašymo dalis

Saulės elektrinės modeliavimo rezultatai

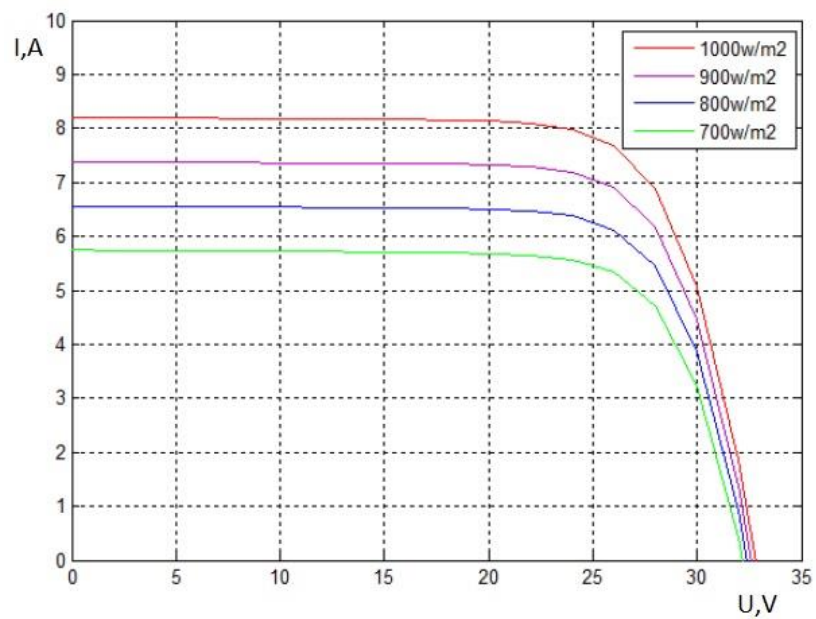


21 pav. Saulės fotomodulio srovės priklausomybė nuo įtampos

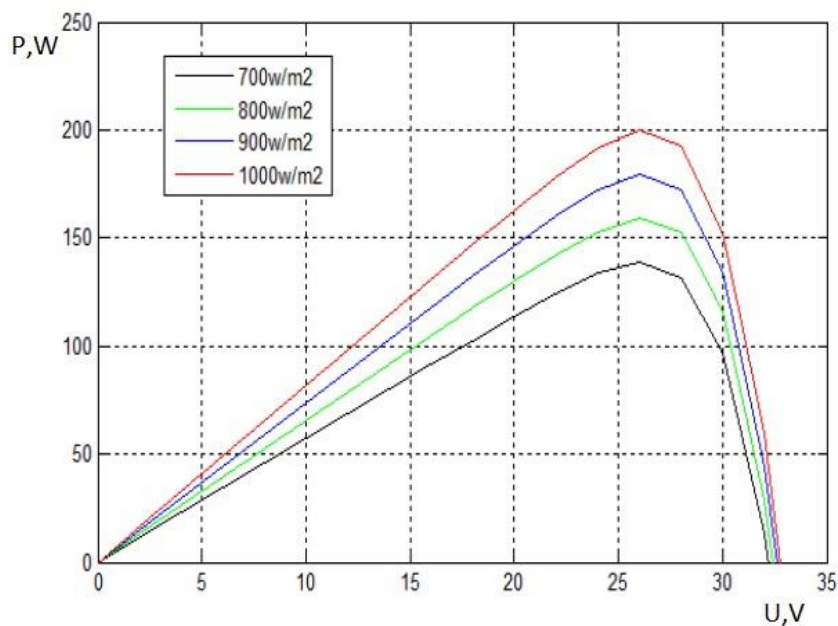


22 pav. Saulės fotomodulio galios priklausomybė nuo įtampos

21 pav. pateikta modeliuojamos saulės fotomodulio srovės priklausomybė nuo įtampos. Galima pastebėti, kad saulės fotomodulio trumpojo jungimo srovė I_{sc} yra 8,2 A, o įtampa siekia 32,9 V. Iš 22 pav. matome, kad fotomodulio maksimalus galios taškas prie 7,61 A srovės ir 26,3 V įtampos yra $P=200$ W.

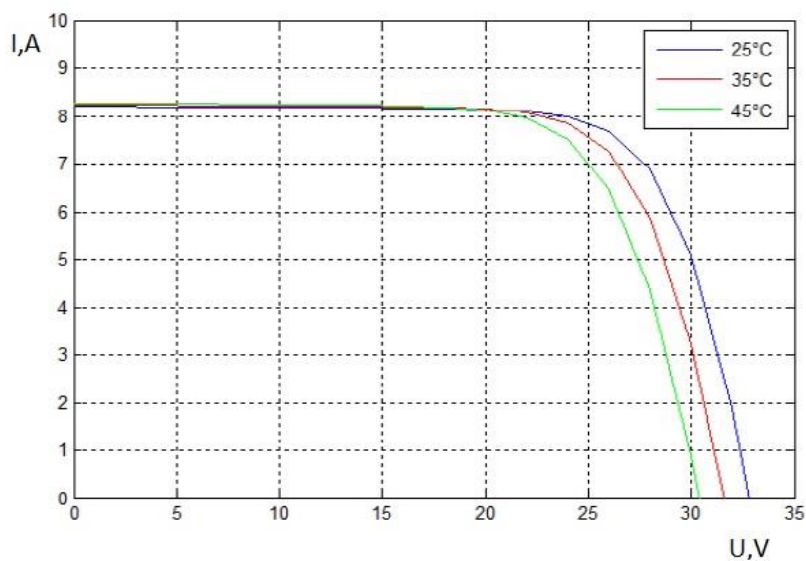


23 pav. Srovės priklausomybė nuo įtampos prie skirtingų apšvietų



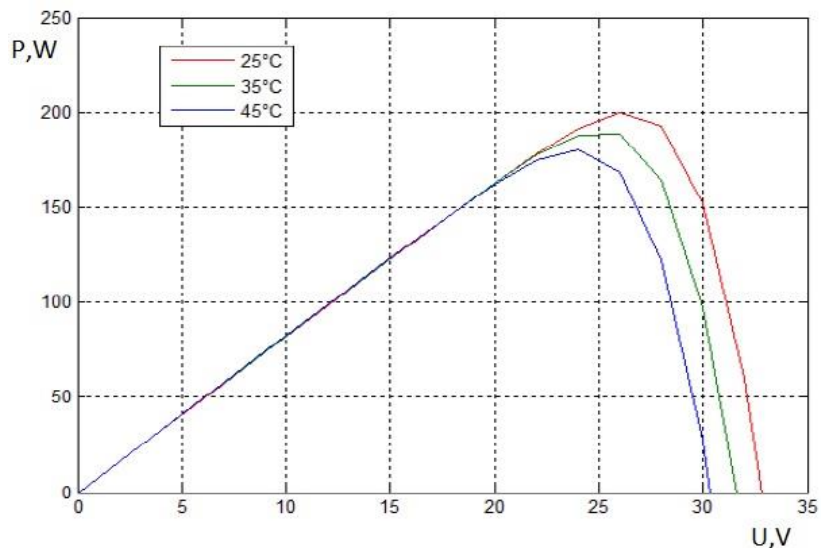
24 pav. Galios priklausomybė nuo įtampos prie skirtingų apšvietų

23 ir 25 paveiksluose galima pastebėti saulės fotomodulio galios ir įtampos kitimą nuo saulės apšvietos. Iš 23 pav. pastebime, kad kai didinant saulės apšvietą trumpojo jungimo srovė didėja. Saulės spindulių svyravimas didžiausią poveikį daro srovei, pastebėdami, kad padidinant saulės apšvietą nuo 700 W/m^2 iki 1000 W/m^2 srovė padidėja nuo $5,7 \text{ A}$ iki $8,2 \text{ A}$, tačiau įtampa kinta mažose ribose, ji išlieka pastovi. 24 pav. parodoma galios ir įtampos priklausomybė nuo apšvietos kitimo, kuriame pastebime, kad didinant saulės apšvietą – galia didėja. Galima daryti išvadą, kad didėjant saulės fotomodulio galiai srovė taip pat didėja, o įtampa lieka nominali.



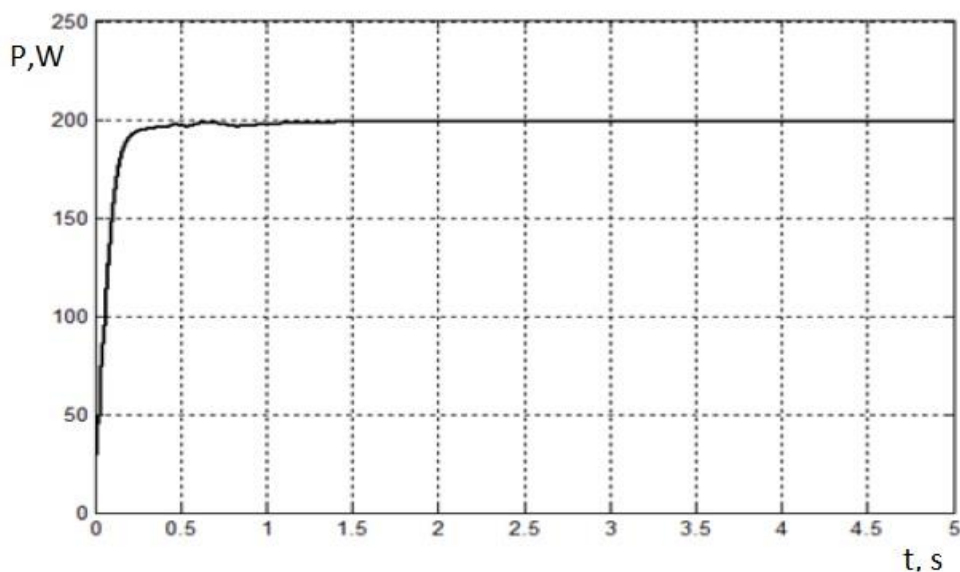
25 pav. Srovės priklausomybė nuo įtampos prie skirtingų temperatūrų

25 pav. galima pastebėti saulės fotomodulio srovės ir įtampos kitimą nuo fotomodulio temperatūros. Kylant temperatūrai, pastebima, kad įtampa mažėja, tačiau srovė lieka nepakitusi. 26 pav. parodoma galios ir įtampos priklausomybė prie skirtingų temperatūrų. Kreivė parodo, kad kylant temperatūrai, dėl įtampos mažėjimo galia taip pat mažėja.

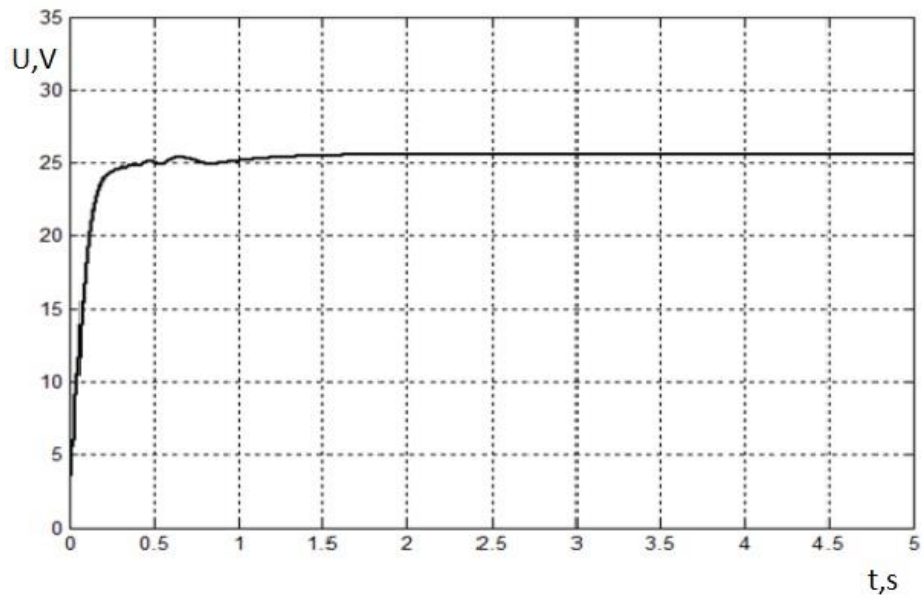


26 pav. Galios priklausomybė nuo įtampos prie skirtingų temperatūrų

Iš 27 pav. ir 28 pav., įdiegiant į sistemą maksimalaus galios taško algoritmą, pagal P&O, pastebima, kad saulės fotomodulio išėjimo įtampa pasiekia 26,3 V ir nusistovi, o galia priklausomai nuo nusistovėjusios įtampos svyruoja nuo 180W - 200W. Tai parodo, kad P&O algoritmas, leidžia pasiekti maksimalų saulės panelės galingumą.



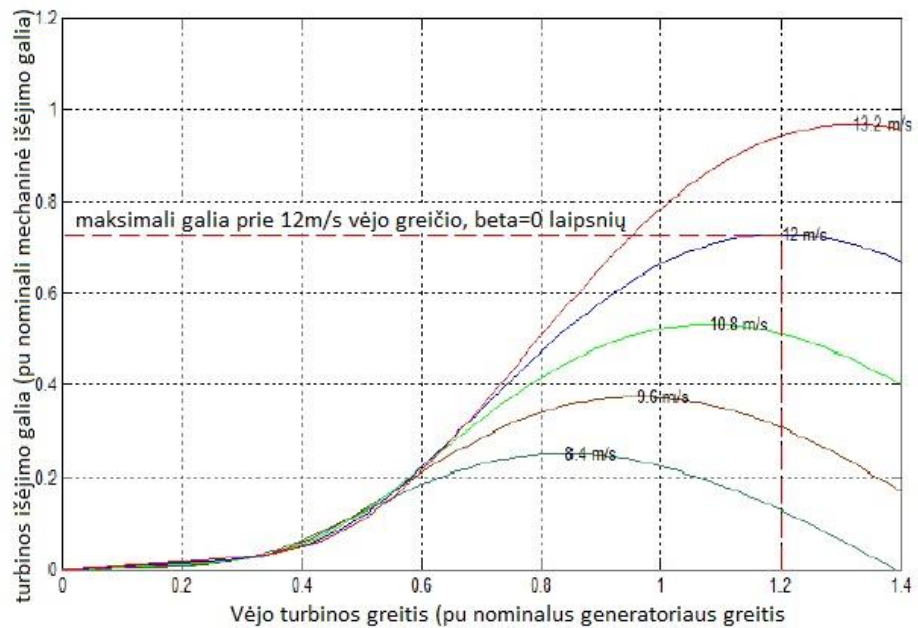
27 pav. Saulės fotomodulio galia modeliuojant su MPPT



28 pav. Saulės fotomodulio įtampa modeliuojant su MPPT

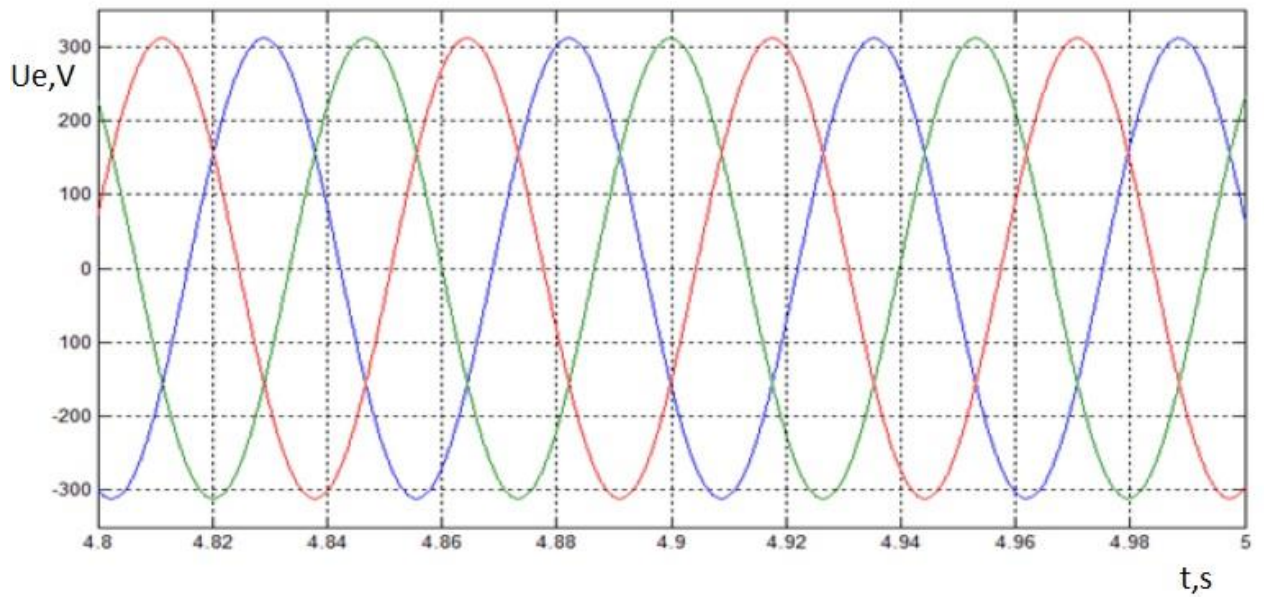
Vėjo elektrinės modeliavimo rezultatai

29 pav. pavaizduota vėjo turbinos galios priklausomybė prie skirtingų vėjo greičių. Pastebima, kad kylant vėjo greičiui vėjo elektrinės galia taip pat padidėja.

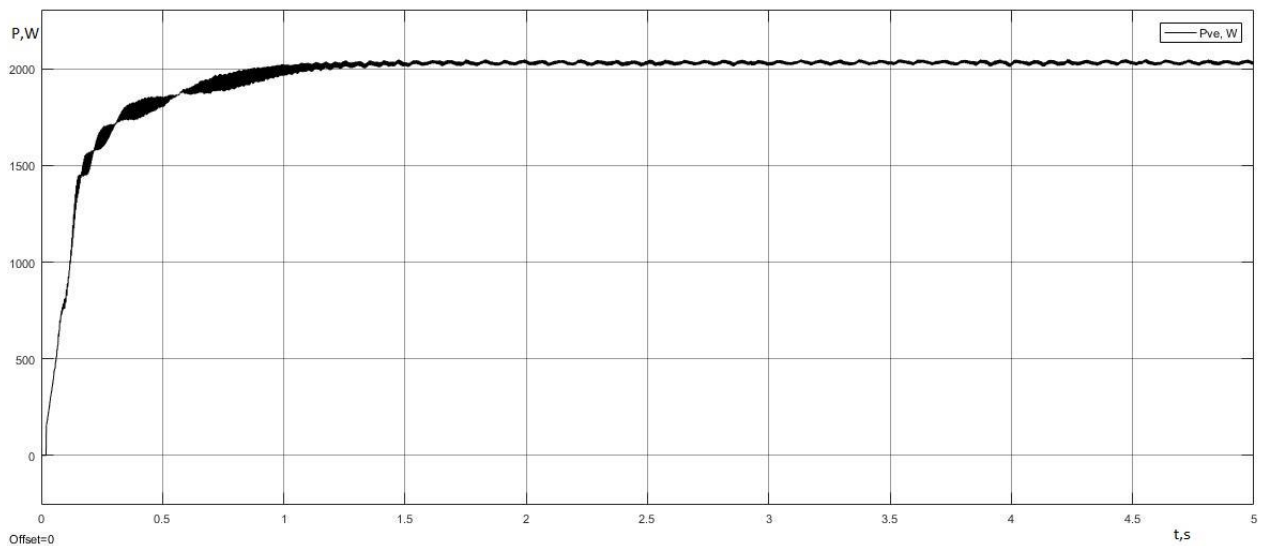


29 pav. Vėjo turbinos galios charakteristika kai (pitch angle = 0^0) [18]

Nuolatinių magnetų sinchroninio generatoriaus išėjimo įtampa pavaizduota 30 pav.



30 pav. Trifazio generatoriaus išėjimo įtampa



31 pav. Vėjo elektrinės generuojama galia

Vėjo elektrinei dirbant prie 12 m/s vėjo greičio, generuoja 2 kW galią. Pastebima, kad 31 pav. pavaizduotoje kreivėje galia nusistovi ties 1,3 s ir vėliau nekinta.

Hibridinės elektrinės modeliavimo rezultatai

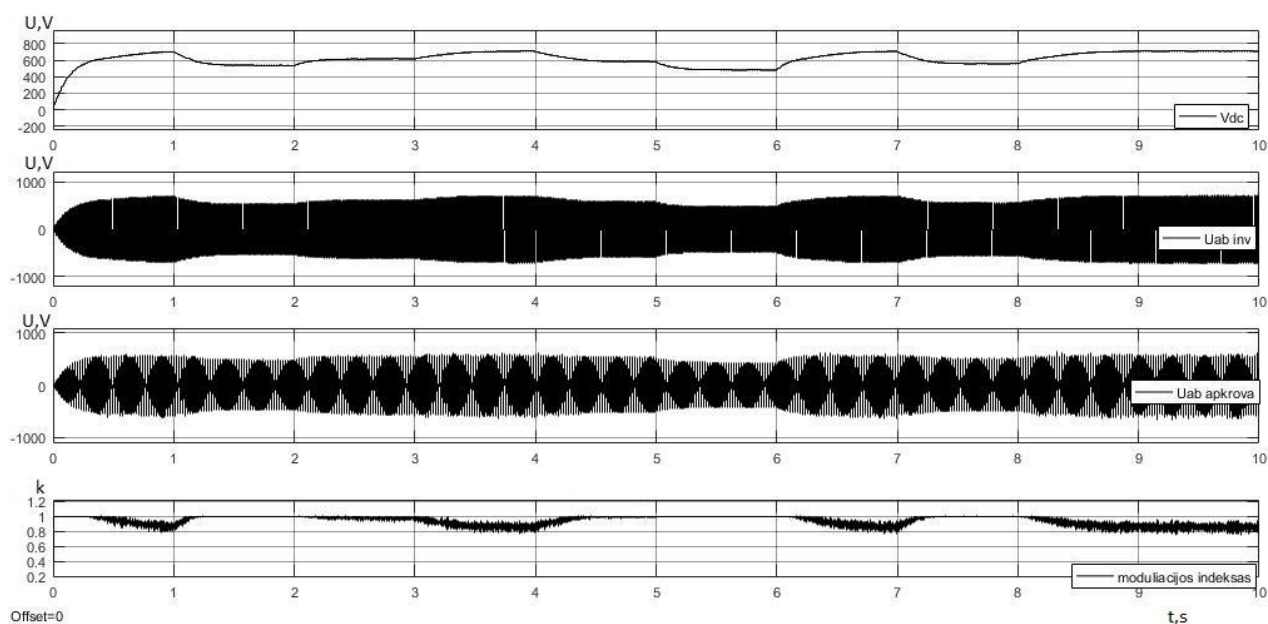
Modeliavimui pasirinkta saulės elektrinė, kurios suminė instaliuota galia yra 21,6 kW, vėjo elektrinė parinkta 2 kW galingumo, kuri sumažėjus apšvietai prie mažos apkrovos turi palaikyti sistemą stabiliai.

Keičiama hibridinės elektrinės šaltinių vėjo greitis ir saulės apšvieta. Saulės elektrinės suminė instaliuota galia 21,6 kW, vėjo generatoriaus galia 2 kW. Nominali apkrovos įtampa 380

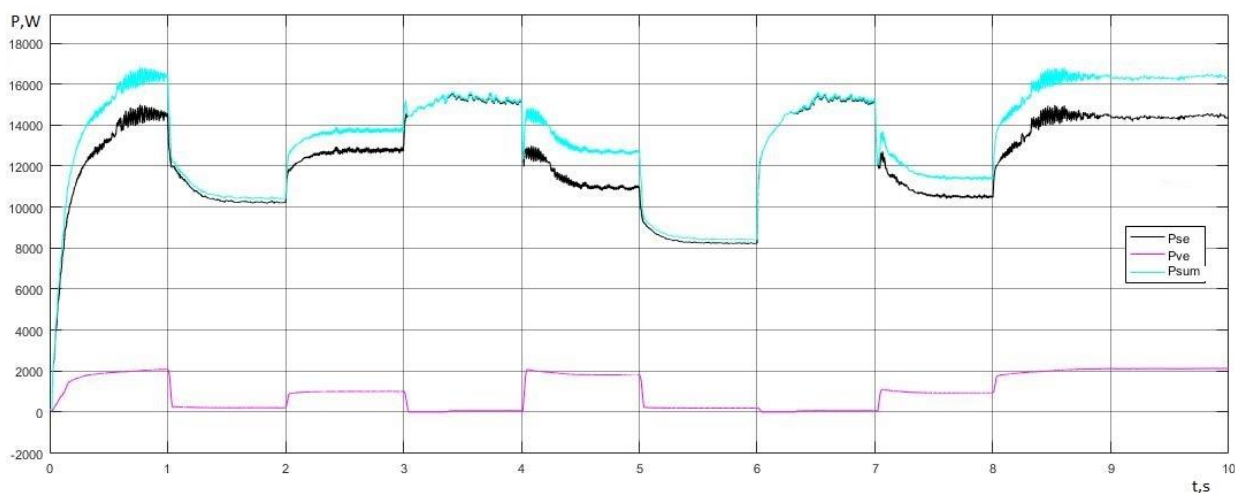
V, vartotojo apkrovos galia 8 kW, dažnis – 50 Hz. Moduliavimo laikas – 10 s. Rezultatai pateikiami 32 pav., 33 pav. ir 3 lentelėje.

3 lentelė. Sistemos parametrai keičiant saulės intensyvumą ir vėjo greitį

Moduliavimo laikas, t, s	Vėjo greitis, v, m/s	Saulės intensyvumas, A, W/m ²	U _a , V	Apkrovos U, THD	Apkrovos I, THD	U _{DC} , V	m _{vid} (moduliacijos koeficientas)
1	12	900	381,8	0,09676	0,07192	694,1	0,8669
2	8	800	342,2	0,05913	0,04791	532,9	1,001
3	10	900	379,9	0,06282	0,06941	621,2	0,9966
4	7	1000	381,9	0,07355	0,07438	706,8	0,8636
5	12	800	363,5	0,05721	0,05011	581,7	0,9987
6	8	700	300,1	0,05956	0,04951	477,8	1,002
7	7	900	380,1	0,06831	0,06754	620,9	0,9764
8	10	800	346,7	0,05684	0,05081	556,6	1,001
9	12	900	382,5	0,08439	0,06748	705,7	0,8557
10	12	900	382,9	0,08623	0,08417	711,5	0,8686



32 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas, keičiant apšvietą ir vėjo greitį (t= 10 s)



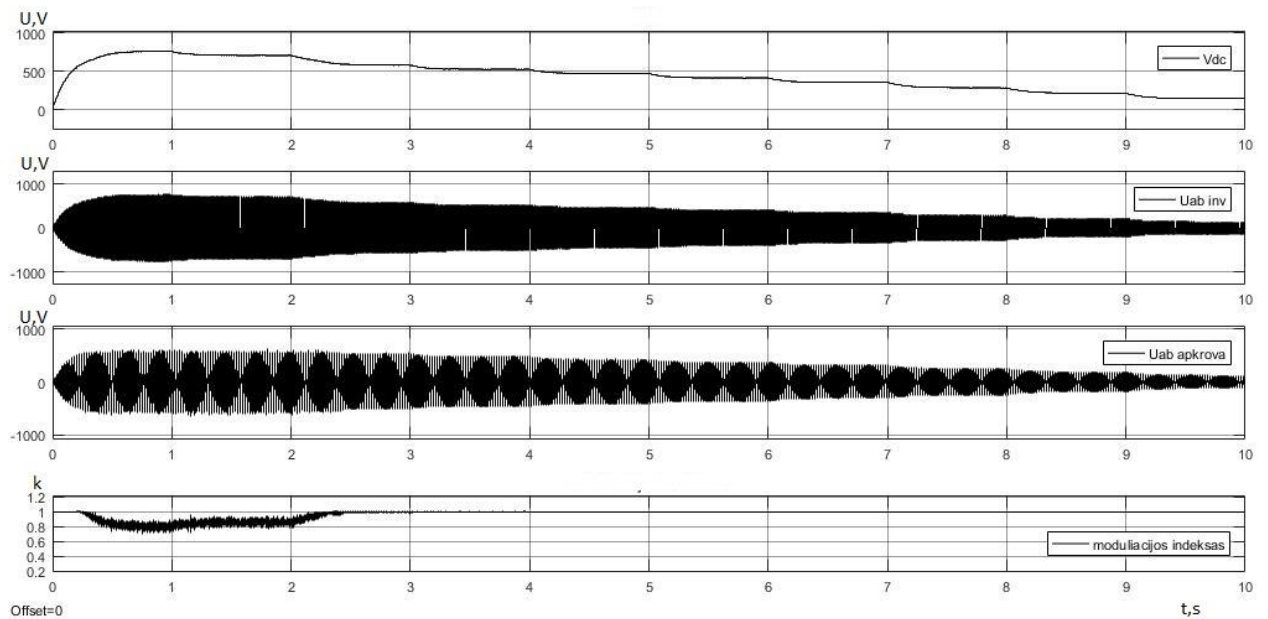
33 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia, keičiant apšvieta ir vėjo greitį ($t = 10$ s)

3 lentelėje pateikti modeliavimo rezultatai ir grafikai parodo, kad hibridinė sistema stabiliausiai dirba, kai saulės apšvieta yra 900 W/m^2 , o vėjo greitis gali kisti tarp $7\text{--}12 \text{ m/s}$. Nestabilumo režimas atsiranda, kai saulės apšvieta nukrenta iki 700 W/m^2 , o vėjo greitis yra mažesnis nei 9 m/s . Moduliacijos koeficientas sumažėja, kai hibridinė sistema generuoja didesnę energiją apkrovai, kuri pilnos energijos nesunaudoja.

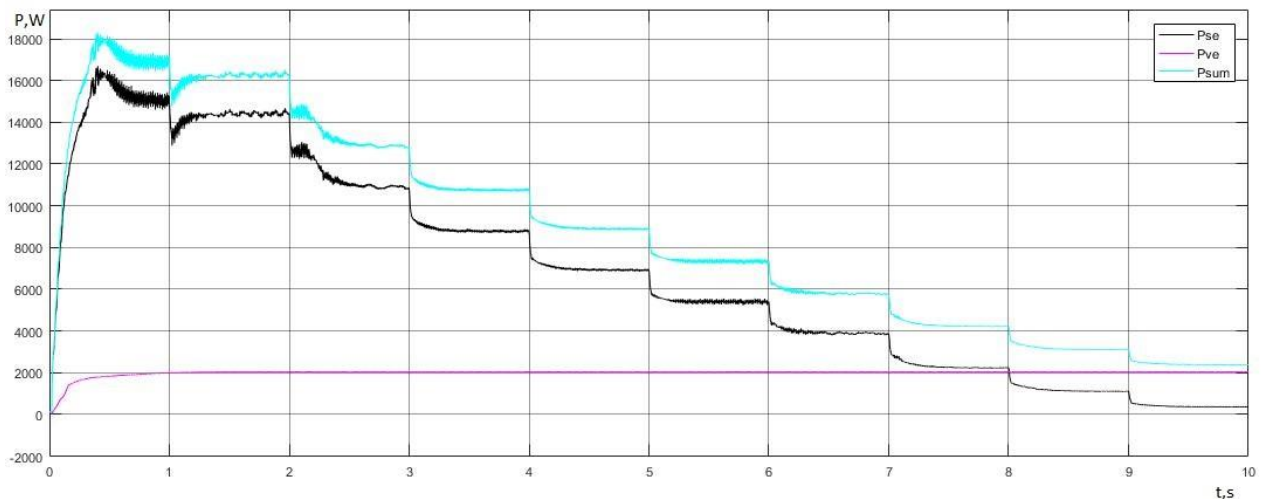
Keičiama hibridinės sistemos šaltinio galia. Saulės elektrinės suminė instaliuota galia $21,6 \text{ kW}$, vėjo generatoriaus galia 2 kW . Vėjo greitis 12 m/s . Keičiamas saulės intensyvumas. Nominali vartotojo apkrovos įtampa 380 V , vartotojo apkrovos galia 8 kW , dažnis – 50 Hz . Moduliavimo laikas – 10 s . Rezultatai pateikiami 34 pav., 35 pav. ir 4 lentelėje.

4 lentelė. Sistemos parametrai keičiant saulės intensyvumą

Moduliavimo laikas, t, s	Vėjo greitis, v, m/s	Saulės intensyvumas, A, W/m^2	U_a , V	Apkrovos U, THD	Apkrovos I, THD	U_{DC} , V	m_{vid} (moduliacijos koeficientas)
1	12	1000	380,6	0,09975	0,08695	759,8	0,8272
2	12	900	382,5	0,08439	0,06748	705,7	0,8557
3	12	800	362,3	0,05759	0,04657	578,0	1,001
4	12	700	327,9	0,05713	0,04736	530,4	1,001
5	12	600	293,6	0,05981	0,04947	473,8	1,001
6	12	500	258,1	0,05126	0,04338	411,0	1,001
7	12	400	220,7	0,06423	0,05291	253,9	1,001
8	12	300	177,7	0,06141	0,05157	282,7	1,001
9	12	200	132,5	0,04761	0,04583	211,2	1,001
10	12	100	87,79	0,05814	0,04944	140,0	1,001



34 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas, keičiant apšvietą ($t= 10$ s)



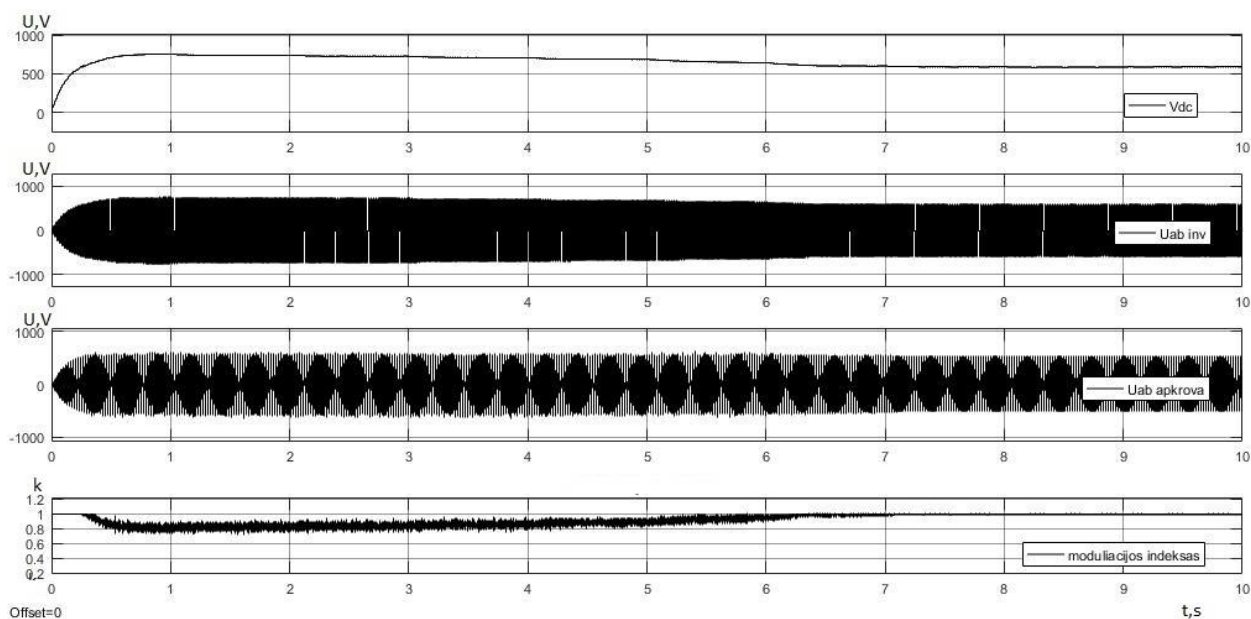
35 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia, keičiant apšvietą ($t= 10$ s)

4 lentelėje pateikti modeliavimo rezultatai ir grafikai parodo, kad hibridinė sistema stabiliausiai dirba, kai saulės apšvietas yra $750-1000 \text{ W/m}^2$. Apkrovos įtampa mažėja, kai saulės apšvietas sumažėja nuo 700 W/m^2 . Tai parodo, kad 8 kW apkrovą aprūpinti, saulės elektrinė turi dirbti prie gerų oro sąlygų, kai apšvietas viršija 750 W/m^2 .

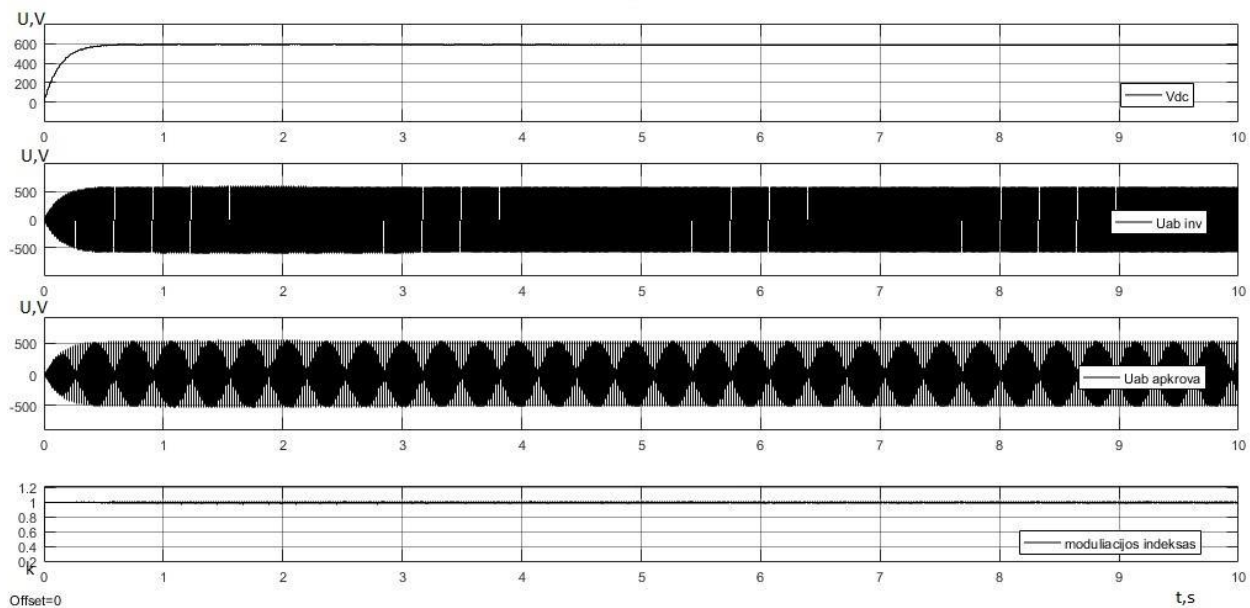
Keičiama hibridinės sistemos šaltinio vėjo greitis. Saulės elektrinės apšvietas 900 W/m^2 . Generatoriaus dažnis nustatytas 50 Hz . Nominali vartotojo apkrovos įtampa 380 V , vartotojo apkrovos galia 8 kW , dažnis – 50 Hz . Moduliavimo laikas – 10 s . Rezultatai pateikiami 36 pav., 37 pav., 38 pav., 39 pav. ir 5 lentelėje.

5 lentelė. Sistemos parametrai keičiant vėjo greitį

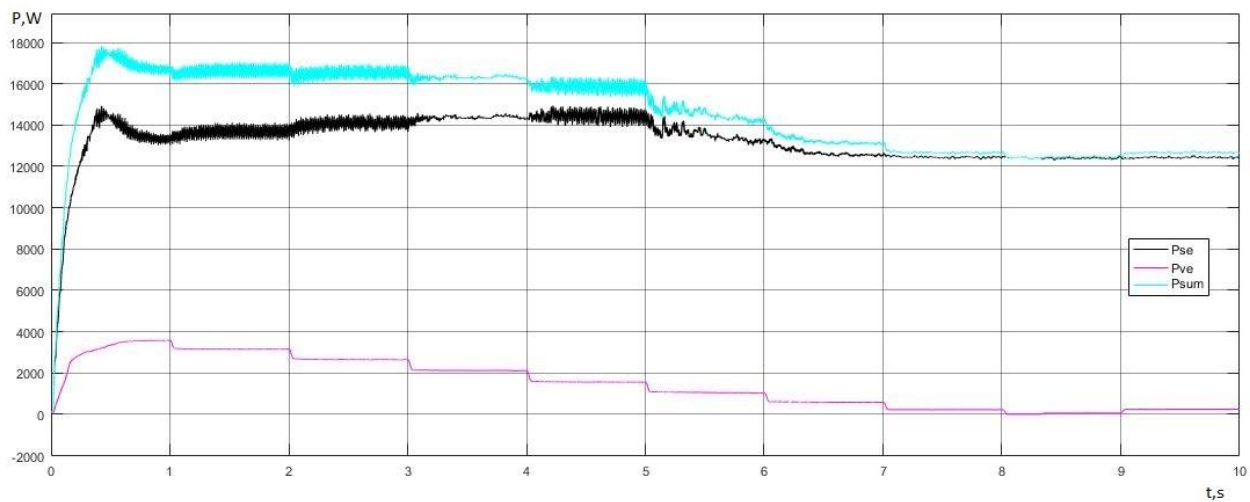
1 dalis: moduliavimo laikas, t, s	Vėjo greitis, v, m/s	Saulės intensyvumas, A, W/m ²	U _a , V	Apkrovos U, THD	Apkrovos I, THD	U _{DC} , V	m _{vid} (moduliacij os koeficientas)
1	15	900	380,5	0,08581	0,07223	752,4	0,8075
2	14	900	379,5	0,09851	0,10500	743,5	0,7904
3	13	900	383,1	0,08446	0,07787	728,4	0,8312
4	12	900	380,3	0,08502	0,08803	706,5	0,8664
5	11	900	381,2	0,08438	0,09010	689,7	0,8867
6	10	900	381,1	0,07009	0,09090	644,1	0,9772
7	9	900	372,9	0,06799	0,04870	604,8	0,9891
8	8	900	367,7	0,06683	0,05734	587,1	1,0020
9	7	900	365,1	0,06662	0,05704	585,3	1,0040
10	6	900	368,4	0,05862	0,05130	587,3	1,0030
2 dalis: moduliavimo laikas, t, s	Vėjo greitis, v, m/s	Saulės intensyvumas, A, W/m ²	U _a , V	Apkrovos U, THD	Apkrovos I, THD	U _{DC} , V	m _{vid} (moduliacij os koeficientas)
1	6	900	368,4	0,05862	0,05130	587,3	1,0030
2	5	900	369,2	0,06677	0,05602	588,7	1,0020
3	4	900	367,1	0,06654	0,05509	590,5	1,0010
4	3	900	367,1	0,06676	0,05535	592,1	1,0000
5	2	900	365,3	0,05896	0,05025	590,3	1,0020
6	1	900	364,3	0,06685	0,05743	589,0	0,9972
7	0	900	364,2	0,06608	0,05729	585,7	1,0020
8	0	900	364,3	0,06482	0,05585	580,4	1,0010
9	0	900	364,1	0,06656	0,05690	582,8	1,0020
10	0	900	364,7	0,05974	0,05219	580,1	1,0000



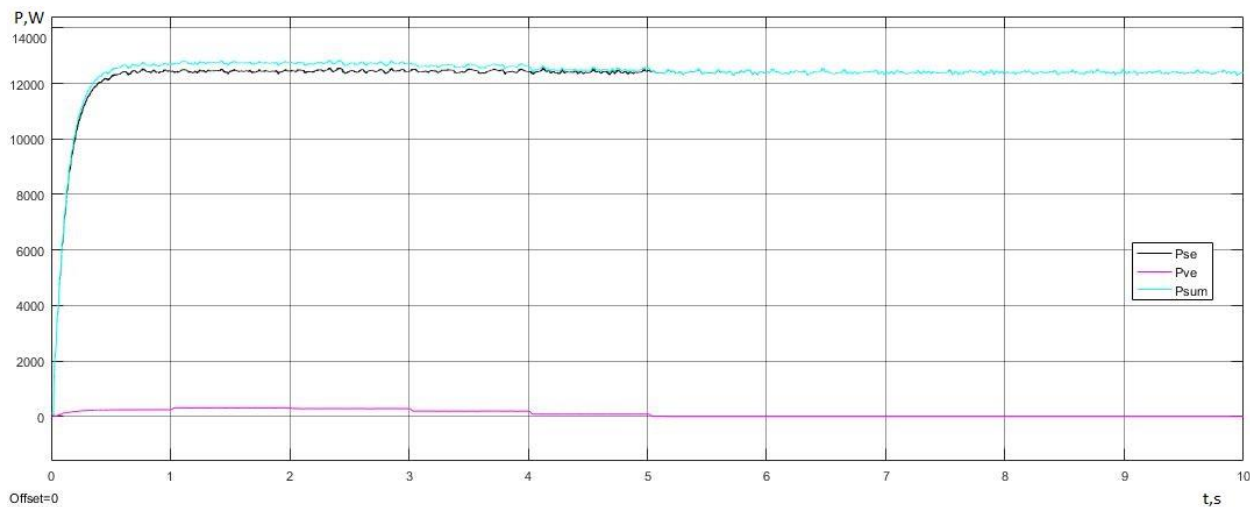
36 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas, keičiant vėjo greitį 1 dalis (t= 10 s)



37 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas, keičiant vėjo greitį 2 dalis ($t = 10$ s)



38 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia, keičiant vėjo greitį 1 dalis ($t = 10$ s)



39 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia, keičiant vėjo greitį 2 dalis ($t = 10$ s)

5 lentelėje pateikti modeliavimo rezultatai ir grafikai parodo, kad hibridinė sistema stabiliai dirba, nepriklausomai vėjo greičiui, kadangi saulės elektrinė pilnai aprūpina 8 kW apkrovą. Kai vėjo greitis nukrenta iki 7 m/s, galima pastebėti, kad nuo tada hibridinė sistema generuoja tik saulės elektrinės generuojamą galią. Atsijungus VE, apkrovos įtampa sumažėja iki 361,4 V.

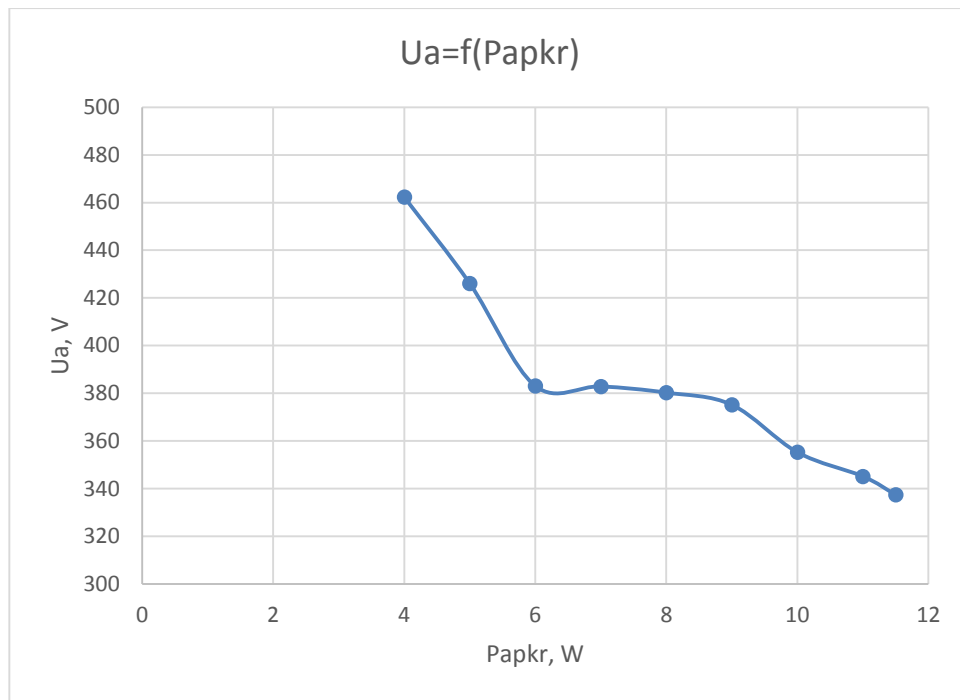
Keičiama vartotojo apkrovos galia. Saulės elektrinės apšvieta 900 W/m^2 , vėjo greitis 12 m/s. Generatoriaus dažnis nustatytas 50 Hz. Nominali vartotojo apkrovos įtampa 380 V, dažnis – 50 Hz. Moduliavimo laikas – 1 s. Rezultatai pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Sistemos parametrai keičiant vartotojo apkrovą

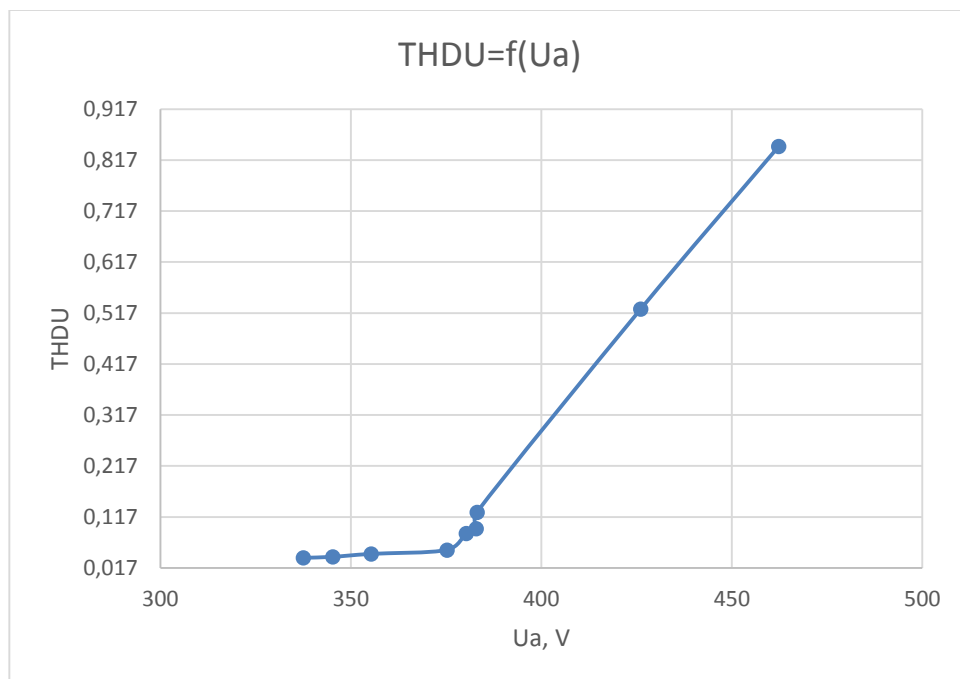
$P_{\text{apkr, kW}}$	Vėjo greitis, v, m/s	Saulės intensyvumas, A, W/m^2	U_a , V	Apkrovos U, THD	Apkrovos I, THD	U_{DC} , V	m_{vid} (moduliacijos koeficientas)
4	12	900	462,3	0,84360	0,74541	681,3	0,5345
5	12	900	426,1	0,52470	0,42340	742,9	0,7509
6	12	900	383,1	0,12640	0,09643	762,2	0,8179
7	12	900	382,9	0,09434	0,09344	740,8	0,8252
8	12	900	380,3	0,08502	0,08803	706,5	0,8664
9	12	900	375,2	0,05239	0,04445	603,7	0,9835
10	12	900	355,3	0,04461	0,04803	573,2	1,001
11	12	900	345,2	0,03886	0,04475	543,1	1,002
11,5	12	900	337,5	0,03685	0,04263	535,2	1,003

Parametras THD (angl. – Total Harmonic Distortion) įvertina srovės ir įtampos harmonikas atsirandančias keičiant nuolatinę srovę ir įtampą į kintamąją. Moduliacijos koeficientas parodo santykį tarp idealios sinusinės įtampos ir invertuotos įtampos išeinančios iš filtrų. Šis koeficientas parodo invertuotos įtampos nuokrypį nuo idealios.

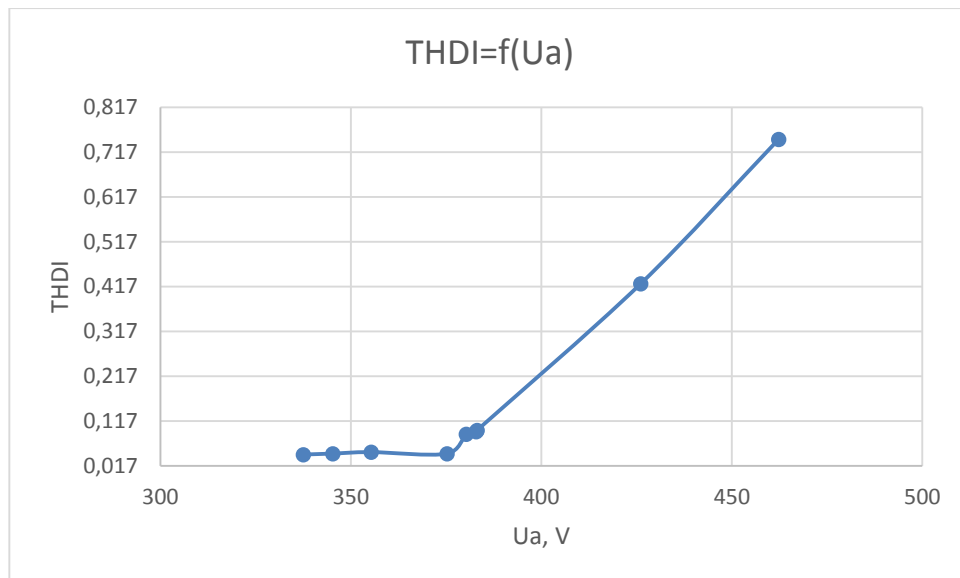
Charakteristikos pavaizduotos grafiškai: $P_{\text{apkr}}=f(U_a)$, $\text{THDU}=f(U_a)$, $\text{THDI}=f(U_a)$, $m_{\text{vid}}=f(U_a)$.



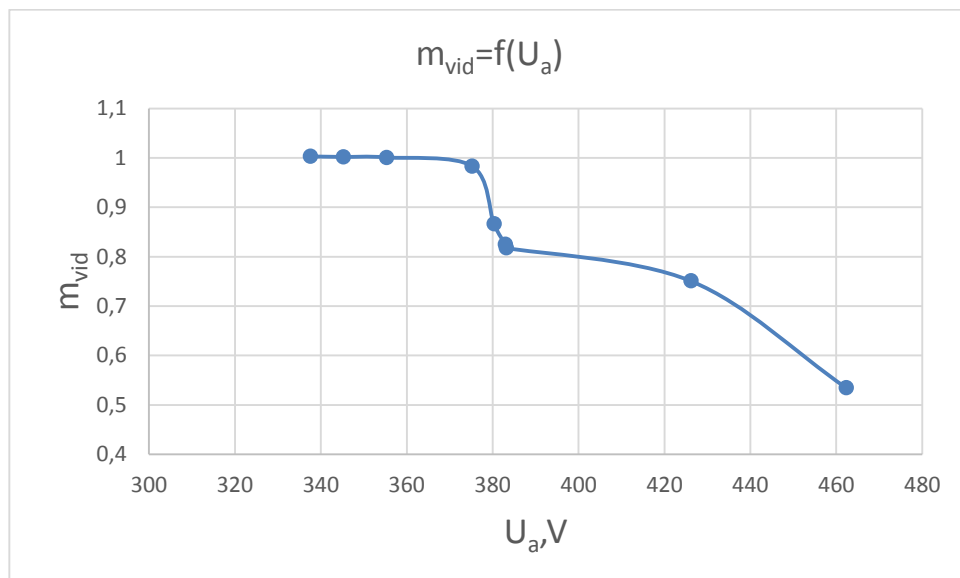
40 pav. Vartotojo galios priklausomybė nuo generuojamos įtampos



41 pav. THDU priklausomybė nuo generuojamos įtampos



42 pav. THDI priklausomybė nuo generuojamos įtampos



43 pav. Moduliacijos koeficiento priklausomybė nuo generuojamos įtampos

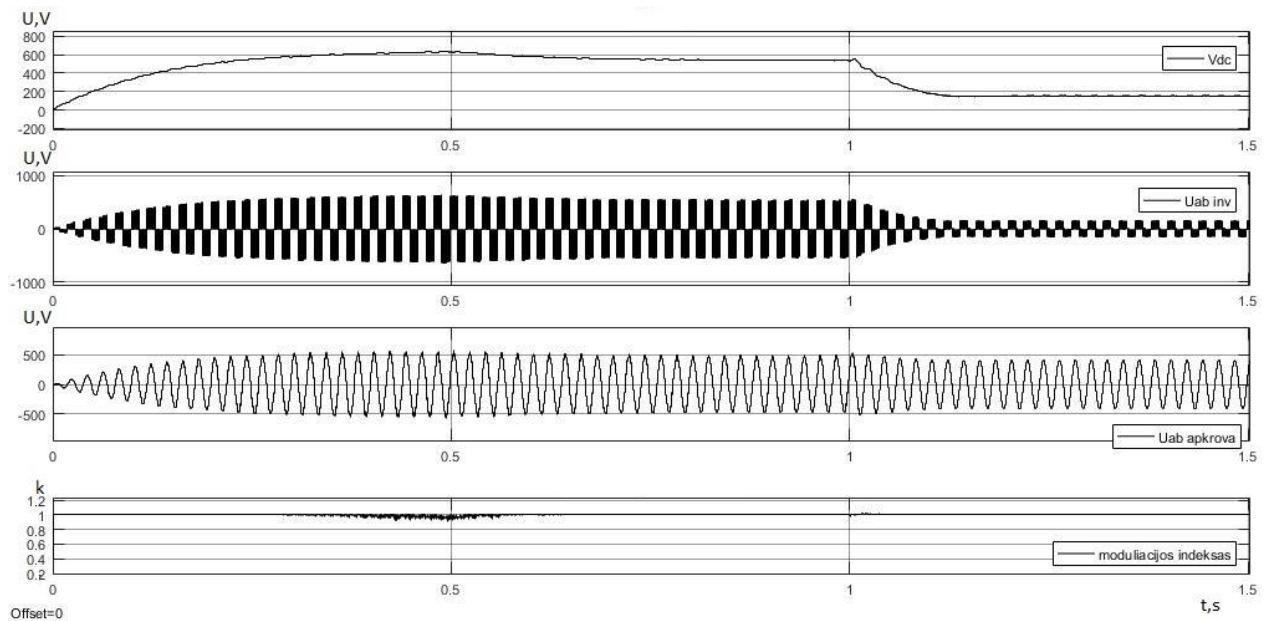
Iš 40 pav. pastebima, kad didinant apkrovos galią, apkrovos įtampa turi tendenciją mažėti. Nagrinėjant pasirinktus įtampos lygius, galime matyti, kad prie 4 kW ir 11,5 kW apkrovos, hibridinės sistemos kuriama įtampa nėra palaikoma $\pm 10\%$ įtampos diapazone. Didėjant HS įtampai iki 762,2 keitiklių sistema pajėgi išlaikyti reikiamą apkrovos įtampą. Taip pat iš 41 pav. ir 42 pav. matoma tendencija, kad didėjant įtampai THD (srovės ir įtampos) sukyla. THD nekinta tik dirbant normaliaame darbo režime, kai apkrova nesiekia $\pm 10\%$ 380 V įtampos. Mažinant apkrovos galią moduliacijos koeficientas 43 pav. taip pat mažėja, o apkrovos įtampa didėja.

Hibridinė elektrinė prijungiama į elektros tinklą. Keičiama saulės apšvieta, vėjo greitis ir vartotojo galia. Parametrai parinkti pagal 6 lentelėje nustatytas nestabilias hibridinės sistemos

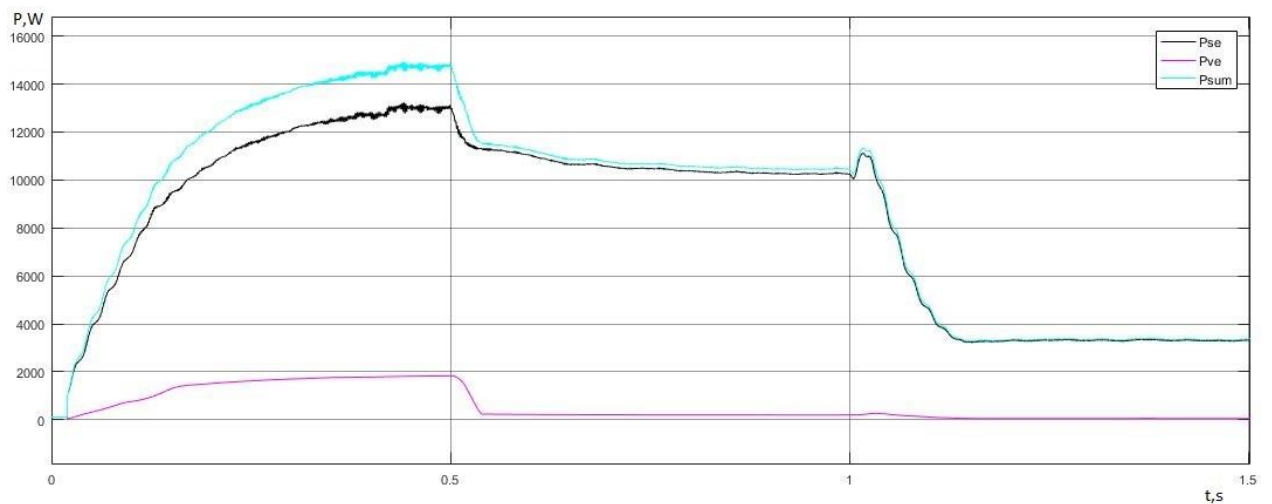
darbo režimus. Nominali vartotojo apkrovos įtampa 380 V, dažnis – 50 Hz. Elektros tinklas prijungiamas po 1 s. Moduliavimo laikas – 1,5 s. Rezultatai pateikiami 7 lentelėje.

7 lentelė. Sistemos parametrai prijungiant elektros tinklą

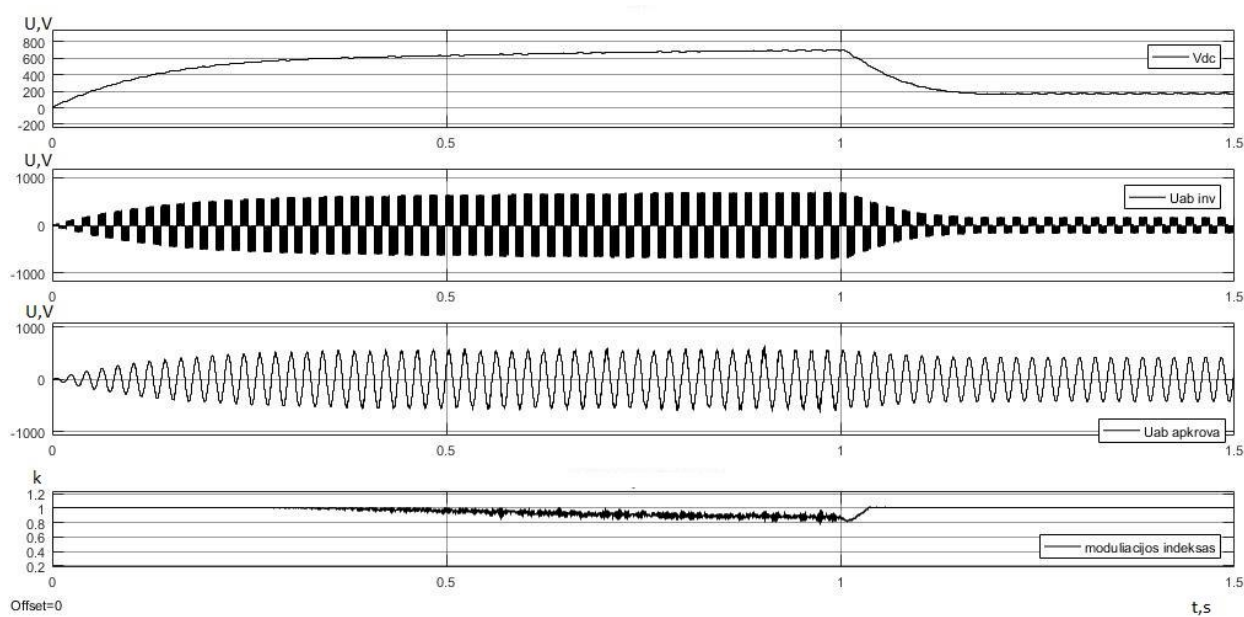
Mod. Nr.	$P_{\text{apkr, kW}}$	Vėjo greitis, v, m/s	Saulės intensyvumas, A, W/m^2	U_a, V	Apkrovos U, THD	Apkrovos I, THD	U_{DC}, V	m_{vid} (moduliacijos koeficientas)
1	8	8	800	381,2	0,01045	0,01056	153,8	1,003
2	8	12	900	380,1	0,01187	0,01184	170,9	1,004
3	5	12	900	380,1	0,01472	0,01505	222,1	1,004
4	11,5	12	900	379,9	0,00835	0,00804	115,9	1,004



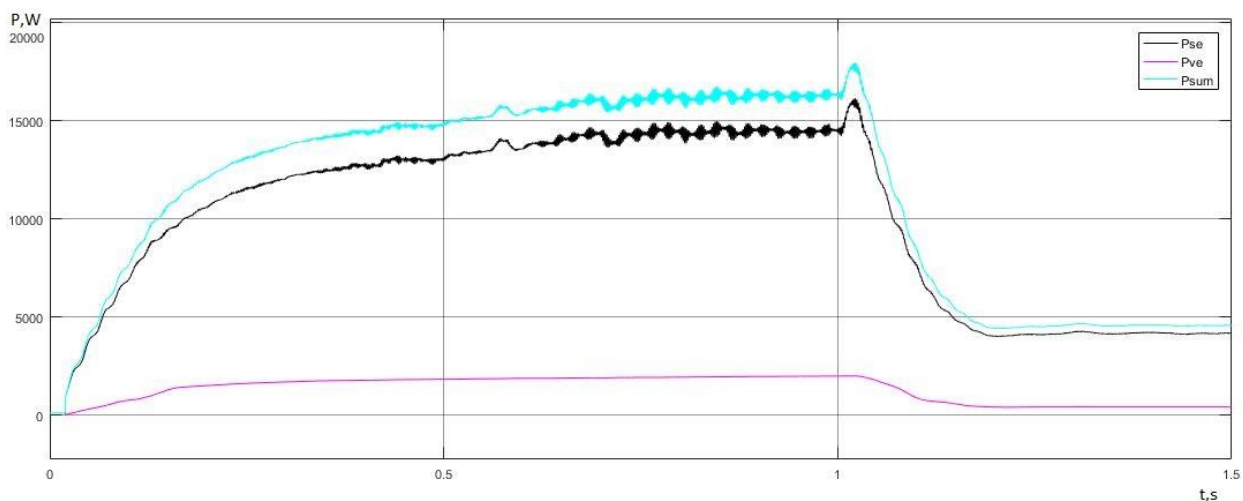
44 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas Nr. 1, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t=10$ s)



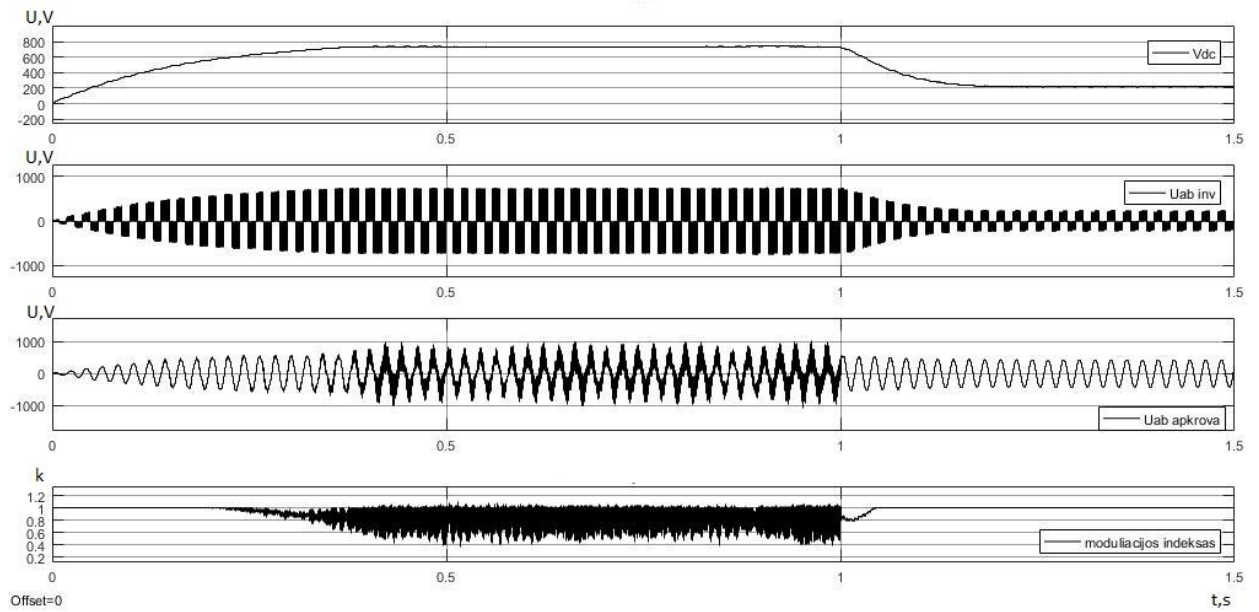
45 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia Nr. 1, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t=10$ s)



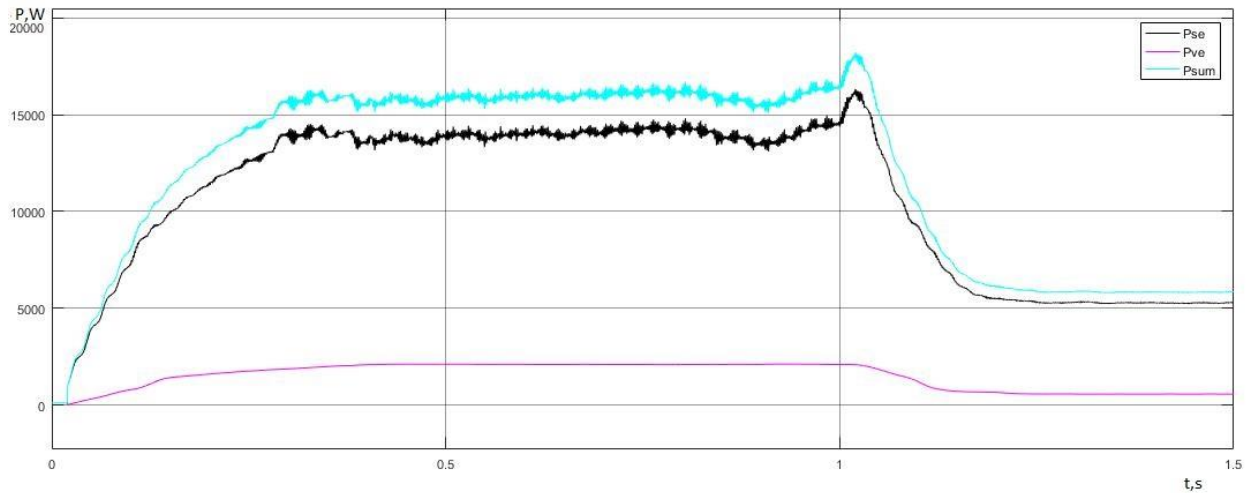
46 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas Nr. 2, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t=10$ s)



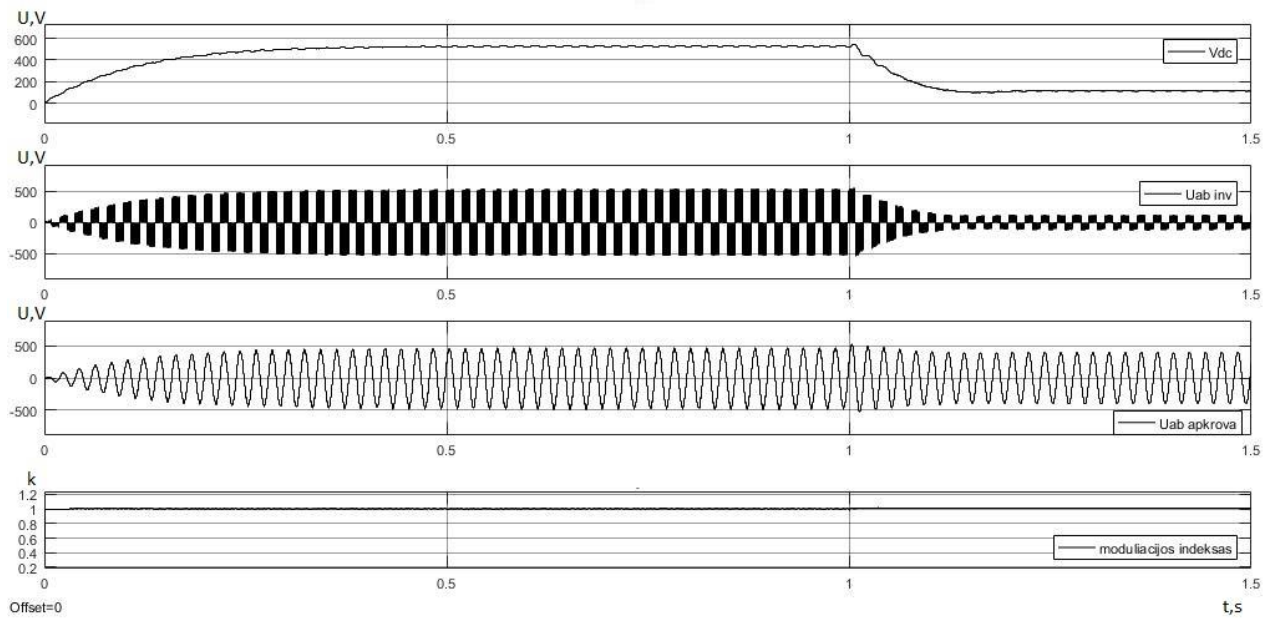
47 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia Nr. 2, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t=10$ s)



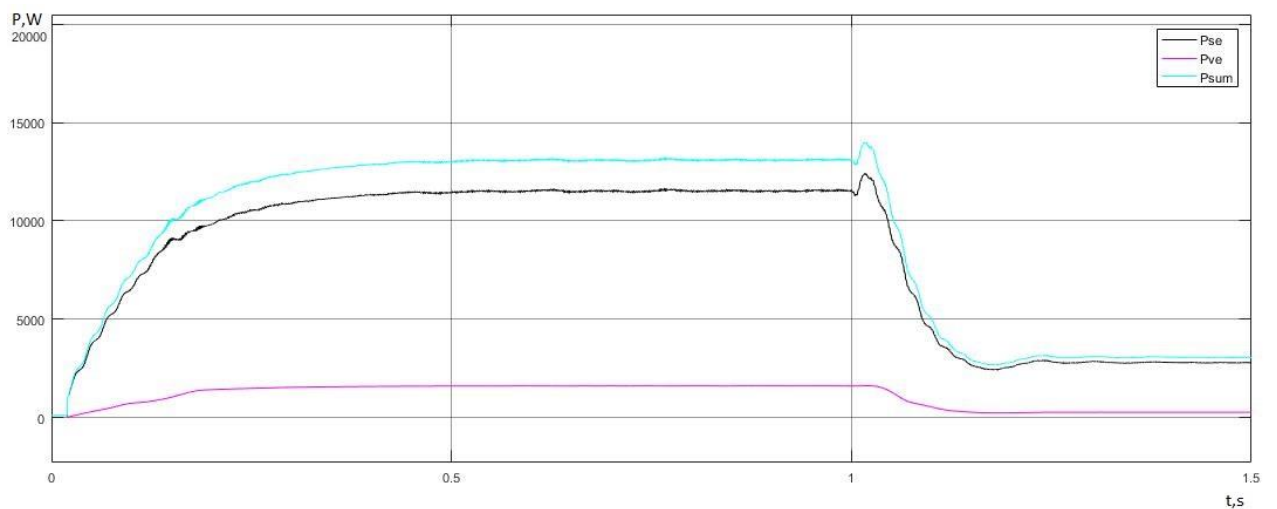
48 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas Nr. 3, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t=10$ s)



49 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia Nr. 3, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t=10$ s)



50 pav. Hibridinės elektrinės modeliavimas Nr. 4, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t=10$ s)



51 pav. Hibridinės elektrinės generuojama suminė galia Nr. 4, keičiant apšvietą, vėjo greitį ir vartotojo apkrovą ($t=10$ s)

7 lentelėje pateikti modeliavimo rezultatai ir grafikai parodo, kad hibridinė sistemai dirbant visais 4 režimais ir prijungiant sistemą į tinklą, įtampa nusistovi, o THDU ir THDI vertės sumažėja iki idealių. Galima pastebėti, kad hibridinės sistemos dalis generuojamos galios yra tiesiogiai paduodama į bendrą tinklą, o apie 4 kW paliekama savosioms reikmėms. Prijungimo momentu moduliacijos koeficientas pasiekia 1, tai parodo, kad inverteris yra pilnai apkrautas keičiant nuolatinę įtampą į kintamąją.

11. Išvados

1. Iširta fotomodulių elektrinės charakteristikos. Nustatyta, kad vieno fotomodulių panelės teorinė galia pasiekia modeliuojamą 200 W galią. Modeliuojant tokios galios saulės panelę jos įtampa $U=26,3$ V, o srovė $I=7,61$ A. Veikiant skirtingai saulės apšvietai iširta, kad saulės fotomodulio galia priklauso nuo apšvietos ir paviršiaus temperatūros.

2. Tyrimo metu buvo analizuojamas mažos galios vėjo generatorius. Pasirinktas 2 kW nuolatinių magnetų sinchroninis generatorius, kuris esant 12 m/s vėjo greičiui pasiekia maksimalų galingumą $P=2$ kW. Optimaliausias VE darbo režimas kai vėjo greitis yra 7-12 m/s.

3. Nustatyta, kad modeliuojamas mažos galios vėjo generatorius, kai vėjo greitis 12 m/s, o saulės apšvieta nukrenta žemiau 700 W/m² negali palaikyti stabilios 8 kW galios apkrovos.

4. Hibridinė saulės ir vėjo elektrinės sistema buvo tiriama Matlab/Simulink programa. Atlikus tyrimą buvo nustatyta, kad geriausia tokios sistemos konfigūracija yra prijungiant elektrinę prie 0,4 kV elektros tinklo, kuri turi palaikyti stabilią vartotojo apkrovą.

5. Tyrimo metu buvo nustatyta, kad sumodeliuotas hibridinės saulės ir vėjo elektrinės optimaliausias darbo režimas prie 8 kW apkrovos yra, kai vėjo greitis 8 - 12 m/s, o saulės apšvieta į panelės paviršių krenta 700 - 1000 W/m².

6. Nustatyta, kad keičiant apkrovos galią atsiranda papildomos THDI ir THDU harmonikos, kurios išbalansuoja idealios sinusinės įtampos ir invertuotos įtampos išeinančios iš filtrų kreives. Didžiausios THDI ir THDU vertės atsiranda apkrovai sumažėjus iki 4 kW galios.

7. Pavaizduotose hibridinės sistemos darbo kreivėse, kai sistema yra prijungta prie tinklo buvo pastebėta, kad nepriklausomai nuo vartotojo apkrovos, hibridinės elektrinės darbo režimas nusitovi. THDI ir THDU vertės sumažėjo, o apkrovos sinusinės kreivės priartėjo prie idealių.

8. Sumodeliuota sistema prie optimaliausių darbo sąlygų gali dirbti neprijungiant prie elektros tinklo, todėl tokią sistemą galima laikyti autonomine. Tačiau tokiai sistemai reikalinga papildoma įranga kaupti perviršinę energiją į akumuliatorių baterijas, kurias vėliau būtų galima panaudoti išlaikant stabilią apkrovą.

12. Literatūra

1. Dėl nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijos patvirtinimo 2012 m. birželio 26 d. Nr. XI-2133.
2. KYTRA S. Atsinaujinantys energijos šaltiniai: monografija. Kaunas. Technologija, 2006. 299 p. ISBN 9955-25-159-X.
3. Saulės elektrinės. [interaktyvus] [žiūrėta 2016-04-05]. Prieiga per internetą: <http://www.staltika.lt/saules-energijos-sistemas/fotovoltines-elektrines/fotoelektros-sistemas/>
4. Saulės elektrinės. [interaktyvus] [žiūrėta 2016-04-05]. Prieiga per internetą: <http://saulesenergijoscentras.lt/sistemossprendimai/komponentai/>
5. SALMI T., M. BOUZGUENDA, A. GAGTLI. MATLAB/Simulink based modeling of solar photovoltaic cell, International journal of renewable energy research, vol.2, no.2, 2012.
6. XUESONG Z., Song DAICHUN, Ma YOUJIE, Chen DESHU. The simulation and design for MPPT of PV system based on Incremental conductance method, Wase International conference on information engineering, 2010.
7. SAFARI A., Saad MEKHILEF. Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter. IEEE transaction on industrial electronics, vol. 58, no. 4, april 2011.
8. ROSU-HAMZESCU M., Sergiu OPREA. Practical guide to implementing Solar panel MPPT algorithm, Microchip technology Inc, 2013.
9. PLAKAITIS A., Nuolatinės srovės keitiklio alternatyviniams energijos šaltiniams kūrimas ir tyrimas. Magistro darbas. VGTU Elektronikos fakultetas, 2010.
10. UDRYS D., Elektroniniai galios keitikliai. Vilnius. Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. 158 p. ISBN 9955-25-20-288-2.
11. GULES R., Juliano DE PELLEGRIN PACHECO. Maximum power point tracking system with Parallel connection for PV stand-alone application. IEEE transaction on industrial electronics, vol.55, no.7, July 2008.
12. RAHMANI S., Ab. HAMADI, A. NDTOUNGOU. Performance evaluation of a PMSG-based variable speed wind generation system using maximum power point tracking. IEEE electrical power and energy conference 2012.
13. Vėjo elektrinės sandara. [interaktyvus] [žiūrėta 2016-05-01]. Prieiga per internetą: <http://apekom.com/lt/v%C4%97jo-j%C4%97gain%C4%97s-sandara.html>
14. HASAN ALI M. Wind energy systems Solutions for Power Quality and Stabilization. 2012.

15. GEČYS S., Artūras KALVAITIS, Pranas SMOLSKAS, Elektromechanika. Kaunas. Technologija, 2011. 230 p. 978-9955-25-873-5.
16. TAFTICHTAT T., K. Agbossou, Output power maximization of a permanent magnet synchronous generator based stand-alone wind turbine system. IEEE ISIE July 9-6 2006.
17. Vėjo elektrinių prijungimo prie Lietuvos elektros energetikos sistemos techninės taisyklės. Lietuvos Respublikos ūkio ministro priimta 2004 m. balandžio 6 d. įsakymu Nr. 4-102. [interaktyvus] [žiūrėta 2015-08-14]. Prieiga per internetą: http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.dok_priedas?p_id=5586.
18. Simulink modeliai [interaktyvus] [žiūrėta 2015-08-14]. Prieiga per internetą: <http://se.mathworks.com/products/simulink/model>.
19. PATEL J., Gaurag SHARMA. International Journal of Research in Engineering and Technology, “ modeling and simulation of solar photovoltaic module using matlab / simulink“.
20. DUBEY C., Yogesh TIWARI. To design solar (photovoltaic) - Wind hybrid power generation system. International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science.
21. DALI M., Jamel BELHADJ, Xavier ROBOAM. To design solar (photovoltaic) - Wind hybrid power generation system.
22. LAKSHMAN RAO S. P., Dr. Ciji Pearl Kurian SMIEEE, Dr. B.K.SINGH, V. ATHULYA JYOTHI. International Journal of Research in Engineering and Technology, Simulation and Control of DC/DC Converter for MPPT Based Hybrid PV/Wind Power System.
23. REKIOUA R, Ernest MATAGNE, Optimization of Photovoltaic Power Systems Modelization Simulation and Control. 2012 m.
24. Vėjo elektrinių prijungimo prie Lietuvos elektros energetikos sistemos techninės taisyklės. Lietuvos Respublikos ūkio ministro priimta 2004 m. balandžio 6 d. įsakymu Nr. 4-102. http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.dok_priedas?p_id=5586.
25. ADOMAVIČIUS V. Mažosios atsinaujinančiųjų išteklių energijos sistemos: monografija. Kaunas. Technologija, 2013. 288 p. ISBN 978-609-02-0945-5.
26. ADOMAVIČIUS V., P. BALČIŪNAS, N. ŽDANKUS. Atsinaujinančių šaltinių panaudojimas sodyboms aprūpinti elektros energija = Employment of renewable sources for farmsteads electric energy supply: kolektyvinė monografija. Kaunas. Technologija, 2000. 176 p. ISBN 9986138213.
27. SVINKŪNAS G., A. NAVICKAS. Elektros energetikos pagrindai. Kolektyvinė monografija: Kaunas. Technologija, 2011. 204 p. [interaktyvus] [žiūrėta 2015-03-20]. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/164/elektros-energetikos-pagrindai/>.

28. Lietuvos Respublikos Atsinaujinančių Išteklių Energetikos Įstatymo 2, 11, 13, 14, 16, 20, 21 straipsnių pakeitimo ir papildymo įstatymas. Valstybė žinios, Nr.. 62-2936, 2011; Nr. 76-3939, 2012.

29. Saulės elementų technologija. [interaktyvus] [žiūrėta 2016-01-20]. Prieiga per internetą: <http://rtn.elektronika.lt/rtn/9904/saulelem.html>

30. Saulės modulių tipai. [interaktyvus] [žiūrėta 2015-05-21]. Prieiga per internetą: <http://sauleselektrines.lt/lt/saules-energija>

31. Saulės elementai. [interaktyvus] [žiūrėta 2016-03-22]. Prieiga per internetą: <http://www.sumtp.lt/saules-elementai/>

32. Saulės moduliai. [interaktyvus] [žiūrėta 2016-03-22]. Prieiga per internetą: <http://www.zaliaideja.lt/zh/saule/saules-moduliai/>

33. Saulės jėgainės. [interaktyvus] [žiūrėta 2016-03-22]. Prieiga per internetą: <http://saulesenergijoscentras.lt/sistemospredimai/komponentai/>

34. Saulės elektrinių tipai. [interaktyvus] [žiūrėta 2016-03-22]. Prieiga per internetą: <http://www.seia.org/policy/solar-technology/>.