



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Mikrotinklo režimų tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Mantas Plienis

Projekto autorius

Prof. dr. Saulius Gudžius

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Mikrotinklo režimų tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Mantas Plienis

Projekto autorius

Prof. dr. Saulius Gudžius

Vadovas

Asist. Artūras Baronas

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Mantas Plienis

Mikrotinklo režimų tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

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

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Plienys, Mantas. Mikrotinklo režimų tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas/ vadovas Prof. dr. Saulius Gudžius ; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektros inžinerija, inžinerijos mokslai

Reikšminiai žodžiai: mikrotinklas, kokybė, inverteris, atsinaujinantys.

Kaunas, 2019. 69 p.

Santrauka

Šio tyrimo tikslas aptarti vėjo ir saulės energijos šaltinių integravimo į elektros mikrotinklus problemas, bei jų sprendimo būdus. Išnagrinėti pagrindines kokybės problemas (įtampos ir dažnio svyravimus, harmonikas), apibendrinti esamas modernias su jais susijusias technologijas, bei įvertinti mikrotinklo stabilumą kritiniais režimais.

Plienis, Mantas. Analysis of Operation Modes in a Microgrid. Master's Final Degree Project / supervisor Prof. Dr Saulius Gudzius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electrical and Electronics Engineering, Engineering sciences

Keywords: microgrid, quality, inverter, renewables.

Kaunas, 2019. 69 p.

Summary

The aim of this research is to discuss the problems of integration of wind and solar energy sources into the micro-grids of electricity and their solutions. To analyze the main quality problems (voltage and frequency fluctuations, harmonics), to summarize the existing modern technologies related to them, and to evaluate the stability of the microgrid in critical modes.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	10
1. Elektros tinklo kokybės parametrai.	11
1.1. Energijos tiekimo kokybės klasifikacija.....	14
1.1.1. Pereinamieji procesai.....	15
1.1.2. Trumpalaikiai įtampos svyravimai	17
1.1.3. Ilgalaikiai įtampos svyravimai	19
1.2. Harmoniniai iškraipymai	20
2. Atsinaujančių energijos šaltinių įtaką elektros tinklo parametrams.	22
2.1. Vėjo generacijos įtaka elektros tinklo parametrams.....	23
2.2. Saulės generacijos įtaka elektros tinklo parametrams.....	24
3. Elektros tinklo kokybės gerinimo metodai.....	26
3.1. Virtualios sinchroninės mašinos metodas	27
3.2. Energijos kaupimas	31
3.3. Harmoninių iškraipymų mažinimas	33
4. Modeliavimas	36
4.1. Valdymo metodai	36
4.2. Inverterių valdymo metodai.....	37
4.2.1. P/Q valdymas.....	38
4.2.2. <i>Droop</i> valdymas	39
4.2.3. Vac/f valdymas	41
4.3. Inverterio modeliavimas EMTP aplinkoje	41
4.3.1. 1MW inverterio charakteristikos	54
4.4. Mikrotinklo modeliavimas	56
Išvados	66
Literatūros sąrašas	67

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Įtampinių harmonikų ribos pagal EN 50160	11
2 lentelė. Įtampinių harmonikų ribos pagal IEEE Std 519	12
3 lentelė. Srovinių harmonikų ribos tinkluose nuo 120 V iki 69 kV pagal IEEE Std 519.....	12
4 lentelė. Srovinių harmonikų ribos tinkluose nuo 69 kV iki 161 kV pagal IEEE Std 519.....	13
5 lentelė. Srovinių harmonikų ribos tinkluose Virš 161 kV pagal IEEE Std 519.....	14
6 lentelė. Energijos kaupikliai [8]	31
7 lentelė. Tipiniai žemos įtampos, vidutinės įtampos ir aukštos įtampos linijų parametrai.....	50
8 lentelė. Matlab aplinkoje gauti atsinaujinančių energijos šaltinių prieinamumo ir kintamos apkrovos sausio mėnesio duomenys	63
9 lentelė. Sausio mėnesio kritiniu momentu atjungto tinklo simuliacija EMTP aplinkoje duomenys	64
10 lentelė. Visų metų duomenys	65

Paveikslų sąrašas

1 pav. Energijos įvykių klasifikavimas pagal IEC 61000–2–5	15
2 pav. Impulsinis pereinamasis procesas	16
3 pav. Švytuojantis pereinamasis procesas	16
4 pav. Feromagnetinis rezonansas.....	17
5 pav. Tiekimo nutrūkimas	18
6 pav. Įtampos kritimas	18
7 pav. Viršįtampis	19
8 pav. Netiesinė apkrova	21
9 pav. Atsinaujinančios energijos gamybos augimas [1].....	22
10 pav. Saulės ir vėjo generacijos augimas.....	22
11 pav. Saulės energijos gamybos pikas [3]	25
12 pav. Specialioji vėjo turbinų galios kreivė.....	26
13 pav. Galima variacijos pokytis vėjo greičiui 5 ir 10 vėjo jėgainių naudojimo metu [5].....	27
14 pav. Elektrinių pricipai [10]	28
15 pav. Sistemos valdymo reakcijos trukmė[14]	29
16 pav. Virtualios inercijos valdymo algoritmas[14].....	30
17 pav. Droop valdymo principas	30
18 pav. Energijos kaupiklių įkrovimo/iškrovimo laikas ir galia.....	33
19 pav. Atsinaujinančios energijos konversijos su harmonikų filtravimu schema	35
20 pav. Fazės užrakto kilpos blokinė schema	38
21 pav. P/Q valdymo metodika.....	39
22 pav. <i>Droop</i> valdymo principas.....	39
23 pav. <i>Droop</i> valdymo metodas	40
24 pav. Dq0 konversija	42
25 pav. Tipinis PV inverterio sujungimas su tinklu ir vietine apkrova.....	44
26 pav. 1 modelis EMTP aplinkoje.....	45
27 pav. Inverterio ir tinklo generavimo grafikas.....	45
28 pav. Inverterio ir tinklo reaktyviosios galios generavimo grafikas.....	46
29 pav. Įtampos ir dažnio grafikai, kai $\Delta P = \Delta Q = 0$	47
30 pav. Principinė linijos blokinė schema	47
31 pav. Įtampos ir dažnio grafikai, kai aktyvioji apkrova mažesnė, nei generacija	49
32 pav. Įtampos ir dažnio grafikai, kai aktyvioji apkrova didesnė, nei generacija	49
33 pav. Įtampos ir dažnio grafikai, kai induktyvinė apkrova didesnė, nei generacija	50
34 pav. Įtampos ir dažnio grafikai, kai induktyvinė apkrova mažesnė, nei generacija.....	50
35 pav. Įtampos ir dažnio grafikas inverteriui generuojant 2,5 MW, o apkrova 2,5 MW ir 2,48 MVAr	51
36 pav. 1 EMTP modelis naudojant išorinį inverterio valdymą	52
37 pav. P kontrolės ir Vac/f kontrolė palyginimas atjungus tinklą.....	52
38 pav. Inverterio ir tinklo reaktyvios galios generavimo grafikas	53
39 pav. Neigiamos sekos grafikas prieš ir po tinklo atjungimo	53
41 pav. Įtampos priklausomybė nuo apkrovos.....	54
42 pav. Įtampinio THD priklausomybė nuo apkrovos.....	55
43 pav. Srovinio THD priklausomybė nuo apkrovos	55
44 pav. THD priklausomybė nuo moduliacijos dažnio.....	56

45 pav. PV elektrinės generavimo priklausomybė nuo apšvietos.....	56
46 pav. Vėjo elektrinės generavimo priklausomybė nuo vėjo greičio	57
47 pav. 2 Modelis EMTP aplinkoje	57
48 pav. 2 modelio įtampos grafikas atjungimo momentu, kai galios faktorius 1 ir 0.8.....	58
49 pav. 2 modelio dažnio grafikas atjungimo momentu, kai galios faktorius 1 ir 0.8.....	59
50 pav. ΔP ir ΔQ ribos kuriose mikrotinklas gali dirbti stabiliai, bei atitikti EN 50160 reikalavimus	60
51 pav. Įtampos ir dažnio pokyčiai keičiant apkrovą.....	61
52 pav. Kintamos apkrovos valdymas Matlab Simulink aplinkoje	62
53 pav. Matlab aplinkoje gauti atsinaujinančių energijos šaltinių generacijos ir kintamos apkrovos sausio mėnesio duomenys	62
54 pav. Matlab aplinkoje gauti atsinaujinančių energijos šaltinių prieinamumo ir kintamos apkrovos sausio mėnesio duomenys	63
55 pav. Sausio mėnesio kritiniu momentu atjungto tinklo simuliacija EMTP aplinkoje grafikas....	64

Įvadas

Atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimas stipriai išaugo po pirmosios naftos krizės 7-tojo dešimtmečio pabaigoje. Tuo metu, svarbiausia buvo ekonominės problemos, todėl, sumažėjus naftos kainoms, taip pat sumažėjo susidomėjimas atsinaujinančiais energijos šaltiniais. Padidėjęs susidomėjimas atsinaujinančiais energijos šaltiniais paremtas poreikiu sumažinti iškastinio kuro sistemų poveikį gamtai. Pagrindinė problema su šiais energijos šaltiniais yra lėšos ir prieinamumas: vėjo ir saulės energija nėra visada prieinama ten, kur jos reikia ir kada jos reikia. Ateities energijos tvarumas priklauso nuo artimiausiais dešimtmečiais priimtų sprendimų. Mikrotinklai vis dažniau naudojami atsinaujinančių energijos šaltinių integracijai, bet jie turi įveikti daugybę techninių uždavinių tam, kad galėtų naudoti atsinaujinančius energijos šaltinius reikšmingais kiekiais. Kontrolė – tai vienas iš veiksmų įgalinantis atsinaujinančių energijos šaltinių diegimą. Saulės ir vėjo energija reikalauja efektyvaus naudojimo pažangių kontrolės sistemų.

Darbo tikslas – išnagrinėti vėjo ir saulės energijos šaltinių integravimo į elektros mikrotinklus problemas, jų sprendimų būdus, bei įvertinti inverteriais grįsto mikrotinklo stabilumą.

Darbo uždaviniai:

- išanalizuoti literatūrą susijusią su atsinaujinančių energijos šaltinių keliamomis problemomis elektros tinklo kokybės parametrams;
- ištirti inverterių įtaką elektros tinklo kokybės parametrams, bei jų charakteristikas.
- sumodeliuoti elektros mikrotinklą pasitelkiant metinius vėjo ir saulės energijos prieinamumo duomenis;
- ištirti inverteriais grįsto mikrotinklo stabilumo problemas.
- ištirti sąlygas, kuriomis mikrotinklas gali dirbti savarankiškai atitinkant energijos kokybės reikalavimus;
- įvertinti, ar mikrotinklas gali išlikti stabilus praradus susijungimą su didžiuoju tinklu kritiniais momentais.

Tyrimo metodai – mokslinės literatūros analizė, modeliavimas naudojant EMTP–RV ir Matlab Simulink programinius paketus.

1. Elektros tinklo kokybės parametrai.

Lietuvoje elektros kokybę aprašo įtampos charakteristikų standartas “Skirstomųjų elektros tinklų įtampos charakteristikos LST EN 50160“. Šis standartas reglamentuoja įtampos parametrus ir jų leistinus pokyčius vartotojo prijungimo taške, žemoje ir vidutinėje įtampoje. Energijos tiekimo parametrai turi atitikti keliamus reikalavimus 95 % laiko.

- maksimalus leistinas bendro harmonikų disbalanso limitas yra 8 %;
- įtampų disbalansas gali siekti tik 3 %;
- įtampos amplitudės kitimas ± 1 %;
- dažnio kitimas ± 1 %;
- įtampos kritimas $< 1 \text{ s} < 60$ %.

1 lentelė. Įtampinių harmonikų ribos pagal EN 50160

Nelyginės harmonikos				Lyginės harmonikos	
Ne 3 kartotinės		3 kartotinės			
Eilė	Santykis, %	Eilė	Santykis, %	Eilė	Santykis, %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6 – 24	0,5
13	3	21	0,5	–	–
17	2	–	–	–	–
19	1,5	–	–	–	–
23	1,5	–	–	–	–
25	1,5	–	–	–	–

Harmonikų limitai pagal IEEE Std 519

Elektros energijos sistemos harmonikų valdymas laikomas bendra atsakomybe, susijusią tiek su galutiniais, tiek sistemos savininkais ar operatoriais. Šių rekomenduojamų ribinių verčių pagrindinė prielaida yra ta, kad apribodama naudotojų įvestą harmoningą srovę, įtampos iškraipymas gali būti mažesnis už nepageidaujama lygį. Jei vien tik harmoninių srovių ribojimas nepadaro priimtino įtampos iškreipimo lygio, sistemos savininkai ar operatoriai turėtų imtis veiksmų, kad pakeistų sistemos charakteristikas, kad įtampos iškraipymo lygiai būtų priimtini. Šiame skyriuje rekomenduojami apribojimai taikomi tik bendrojo sujungimo taške (PCC), todėl jie neturėtų būti taikomi nei atskiriems įrenginiams, nei naudotojo įrenginių vietose.

Prijungimo vietoje (PCC) sistemos savininkai ar operatoriai turėtų apriboti fazines įtampos harmonikas taip:

- kasdienis 99 % labai trumpo harmonikų matavimų (3 s) vertės turi būti mažesnės 1,5 karto, nei vertės pateiktos 2 lentelėje;
- savaitinis 95 % trumpo harmonikų matavimo (10 min) vertės turi būti mažesnės, nei vertės pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Įtampinių harmonikų ribos pagal IEEE Std 519

Šynų įtampa (PCC), V	Individuali harmonika, (%)	Bendras harmonikų disbalansas THD, (%)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1,0 \text{ kV} \leq V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} \leq V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5*

*aukštos įtampos sistemose gali būti iki 2 % THD, kai priežastis yra HVDC terminalas.

Rekomenduojami srovinių harmonikų iškraipymai tinkle nuo 120 V iki 69 kV.

Šioje kategorijoje nurodytos ribos taikomos vartotojams, prijungtiems prie sistemų, kurių nominali įtampa yra nuo 120 V iki 69 kV. Prijungimo taške vartotojai turėtų apriboti harmonikų srovę taip:

- kasdienio, 99 % labai trumpo laiko matavimo (3 s) harmonikų srovė turi būti mažesnė 2 kartus, nei vertės pateiktos 3 lentelėje;
- savaitinio, 99 % trumpojo laiko matavimo (10 min) harmonikų srovė turi būti mažesnė 1,5 karto, nei vertės pateiktos 3 lentelėje;
- savaitinis, 95 % trumpojo laiko matavimo (10 min.) harmonikų srovė turi būti mažesnė už pateiktas vertes 3 lentelėje.

Visos vertės turėtų būti išreikštos procentais nuo didžiausios poreikio srovės I_L . Ši, dabartinė vertė, nustatoma prijungimo taške ir turėtų būti laikoma srovių, atitinkančių didžiausią paklausą per kiekvieną iš dvylikos ankstesnių mėnesių, suma. Žemiau esanti lentelė taikoma harmoningoms srovėms, kurių dažniai yra nešančiojo dažnio kartotiniai.

3 lentelė. Srovinių harmonikų ribos tinkluose nuo 120 V iki 69 kV pagal IEEE Std 519

Maksimalus srovinių harmonikų disbalansas, santykinai nuo didžiausios poreikio srovės I_L						
Individualios harmonikų eilės (Nelyginės harmonikos) ^a						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$<20^b$	4	2	1,5	0,6	0,3	5
$20 < 50$	7	3,5	2,5	1	0,5	8
$50 < 100$	10	4,5	4	1,5	0,7	12
$100 < 1000$	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

^a – lyginės harmonikos riba yra 25 %, nuo aukščiau nurodytų nelyginių harmonikų ribos;

^b – visa elektros energijos gamybos įranga ribojama šiomis iškraipymo vertėmis, nepriklausomai nuo faktinio I_{sc} / I_L . kur I_{sc} = didžiausia trumpojo jungimo srovė PCC I_L = didžiausia paklausos apkrovos srovė (pagrindinė dažnio dalis) PCC normaliomis apkrovos sąlygomis.

Dėl tarpharmoninių srovės komponentų su dažniais, kurie nėra sveiki nešančiojo dažnio kartotiniai, vartotojai turėtų riboti komponentus pakankamai žemu lygiu, kad nebūtų nepageidaujamo poveikio elektros energijos sistemai ir prijungtai įrangai.

Rekomenduojami srovinių harmonikų iškraipymai tinkle nuo 69 kV iki 161 kV.

Šioje kategorijoje nurodytos ribos taikomos vartotojams, prijungtiems prie sistemų, kurių nominali įtampa yra PCC 69V iki 161 kV. PCC vartotojai turėtų apriboti jų harmonikų srovę taip:

- kasdienio, 99 % labai trumpo laiko matavimo (3 s) harmonikų srovė turi būti mažesnė 2 kartus nei vertės pateiktos 4 lentelėje;
- savaitinio, 99 % trumpojo laiko matavimo (10 min) harmonikų srovė turi būti mažesnis 1,5 karto nei vertės pateiktos 4 lentelėje;
- savaitinis, 95 % trumpojo laiko matavimo (10 min.) harmonikų srovė turi būti mažesnė už pateiktas vertes 4 lentelėje.

Visos vertės turėtų būti išreikštos procentais nuo didžiausios poreikio srovės I_L . Ši, dabartinė vertė, nustatoma PCC ir turėtų būti laikoma srovių, atitinkančių didžiausią paklausą per kiekvieną iš dvylikos ankstesnių mėnesių, sumą. Žemiau esanti lentelė taikoma harmoningoms srovėms, kurių dažniai yra nešančiojo dažnio kartotiniai.

4 lentelė. Srovinių harmonikų ribos tinkluose nuo 69 kV iki 161 kV pagal IEEE Std 519

Maksimalus srovinių harmonikų disbalansas, santykinai nuo didžiausios poreikio srovės I_L						
Individualios harmonikų eilės (Nelyginės harmonikos) ^a						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
<20 ^b	2	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50<100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100<1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,1	10

^a – lyginės harmonikos riba yra 25 %, nuo aukščiau nurodytų nelyginių harmonikų ribos;

^b – visa elektros energijos gamybos įranga ribojama šiomis iškraipymo vertėmis, nepriklausomai nuo faktinio I_{sc} / I_L . kur I_{sc} = didžiausia trumpojo jungimo srovė PCC I_L = didžiausia paklausos apkrovos srovė (pagrindinė dažnio dalis) PCC normaliomis apkrovos sąlygomis.

Dėl tarpharmoninių srovės komponentų su dažniais, kurie nėra sveiki nešančiojo dažnio kartotiniai, vartotojai turėtų riboti komponentus pakankamai žemu lygiu, kad nebūtų nepageidaujamo poveikio elektros energijos sistemai ir prijungtai įrangai.

Rekomenduojami srovinių harmonikų iškraipymai tinkle virš 161 kV.

Šioje kategorijoje nurodytos ribos taikomos vartotojams, prijungtiems prie sistemų, kurių nominali įtampa yra PCC virš 161 kV. PCC vartotojai turėtų apriboti jų harmonikų srovę taip:

- kasdienio, 99 % labai trumpo laiko matavimo (3 s) harmonikų srovė turi būti mažesnė 2 kartus, nei vertės pateiktos 5 lentelėje;
- savaitinio, 99 % trumpojo laiko matavimo (10 min) harmonikų srovė turi būti mažesnė 1,5 karto ,nei vertės pateiktos 5 lentelėje;
- savaitinis, 95 % trumpojo laiko matavimo (10 min.) harmonikų srovė turi būti mažesnė už pateiktas vertes 5 lentelėje.

Visos vertės turėtų būti išreikštos procentais nuo didžiausios poreikio srovės I_L . Ši, dabartinė vertė, nustatoma prijungimo taške ir turėtų būti laikoma srovių, atitinkančių didžiausią paklausą per

kiekvieną iš dvylikos ankstesnių mėnesių, sumą. Žemiau esanti lentelė taikoma harmoningoms srovėms, kurių dažniai yra nešančiojo dažnio kartotiniai.

5 lentelė. Srovinių harmonikų ribos tinkluose Virš 161 kV pagal IEEE Std 519

Maksimalus srovinių harmonikų disbalansas, santykinai nuo didžiausios poreikio srovės I_L						
Individualios harmonikų eilės (Nelyginės harmonikos) ^a						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
<25 ^b	1	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
25<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3	1,5	1,15	0,45	0,2	3,75

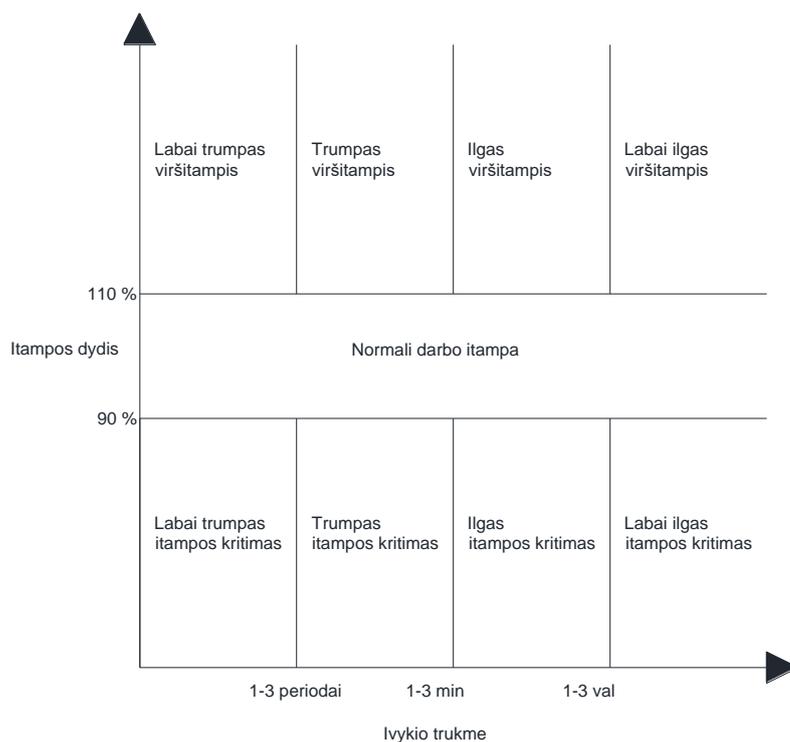
^a – lyginės harmonikos riba yra 25 %, nuo aukščiau nurodytų nelyginių harmonikų ribos.

^b – visa elektros energijos gamybos įranga ribojama šiomis iškraipymo vertėmis, nepriklausomai nuo faktinio I_{sc} / I_L . kur I_{sc} = didžiausia trumpojo jungimo srovė PCC I_L = didžiausia paklausos apkrovos srovė (pagrindinė dažnio dalis) PCC normaliomis apkrovos sąlygomis

Dėl tarpharmoninių srovės komponentų su dažniais, kurie nėra sveiki nešančiojo dažnio kartotiniai, vartotojai turėtų riboti komponentus pakankamai žemu lygiu, kad nebūtų nepageidaujamo poveikio elektros energijos sistemai ir prijungtai įrangai.

1.1. Energijos tiekimo kokybės klasifikacija

Skirtingos energijos tiekimo kokybės standartai pateikia skirtingas klasifikacijas, standartas ANSI C84.1 klasifikuoja pagal trukmę, IEEE–519 pagal dydį ir trukmę, o IEC klasifikuoja pagal dažnį. IEC 61000–2–5 naudoja dažnių diapazoną ir padalija problemas į tris pagrindines kategorijas: žemas dažnis (<9 kHz), aukštas dažnis (> 9 kHz) ir elektrostatiniai iškrovų reiškiniai. Įvykio dydis ir trukmė irgi gali būti naudojami klasifikuoti energijos kokybės trikdžius kaip pavaizduota 1 paveiksle.



1 pav. Energijos įvykių klasifikavimas pagal IEC 61000–2–5

Šie įvykiai išskirti į keturias kategorijas, labai trumpi, trumpi, ilgi ir labai ilgi.

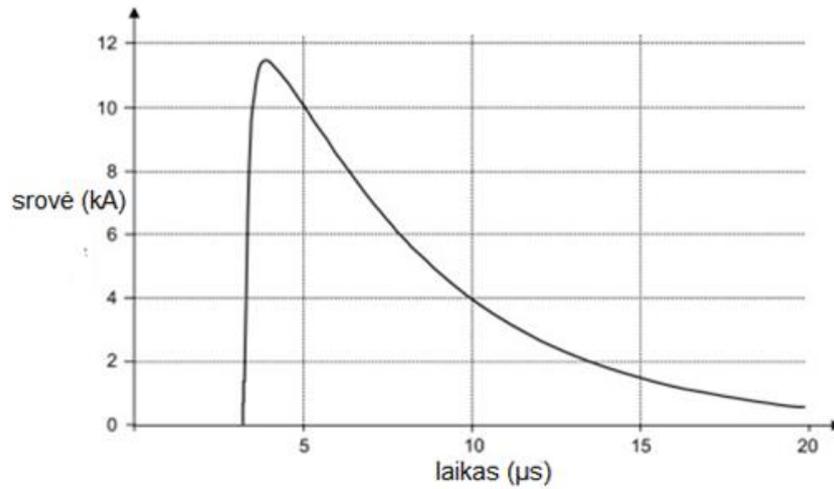
1.1.1. Pereinamieji procesai.

Energijos sistemoje pereinamieji procesai yra nepageidaujami, trumpalaikiai įvykiai, kurie sukelia iškreipimus. Jų charakteristikos ir bangos forma priklauso nuo tinklo parametrų (varžos, induktyvumo ir talpumo). Viršitampis dažnai laikomas pereinamojo proceso sinonimu.

Pereinamieji procesai gali būti klasifikuojami pagal daugelį būdingų komponentų, tokių kaip amplitudė, trukmė, pakilimo trukmė, švytavimo dažnis. Pereinamieji procesai dažnai klasifikuojami į dvi kategorijas: impulsiniai ir švytuojantys.

Impulsinis pereinamasis procesas

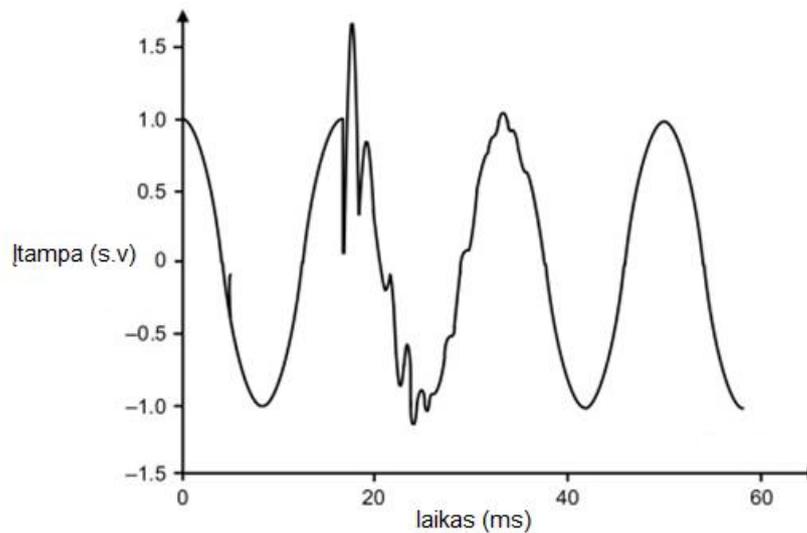
Impulsinis pereinamasis procesas yra staigus įtampos ar srovės (arba abiejų) pakilimas, kuris yra vienareikšmiškas pagal poliškumą. Dažniausiai impulsinių pereinamųjų procesų priežastis yra žaibo iškrova. Impulsiniai pereinamieji procesai gali sukelti tinklo įtampą. Impulsinio pereinamojo proceso pavyzdys pateiktas 2 paveiksle.



2 pav. Impulsinis pereinamasis procesas

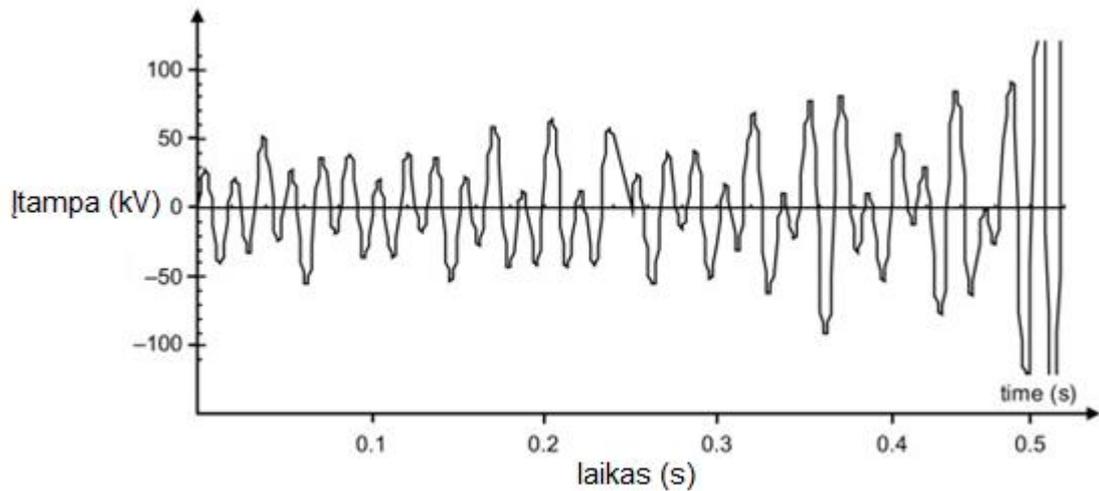
Švytuojantis pereinamasis procesas

Švytuojantis pereinamasis procesas yra staigus įtampos, srovės (ar abiejų) dažnio pasikeitimas, apimantis tiek teigiamą tiek neigiamą poliškumą. Šis pereinamasis procesas atsiranda dėl skirtingų priežasčių, tokių kaip staigus apkrovos perjungimas. Švytuojančio pereinamojo proceso pavyzdys pateikiamas 3 paveiksle.



3 pav. Švytuojantis pereinamasis procesas

Feromagnetinis rezonansas irgi gali būti švytuojančio viršįtampio priežastis. Feromagnetinio pereinamojo proceso pavyzdys pateiktas 4 paveiksle.



4 pav. Feromagnetinis rezonansas

1.1.2. Trumpalaikiai įtampos svyravimai

Ši kategorija apima „įtampos kritimo“ ir „trumpų pertrūkių“ IEC kategoriją. Pagal IEEE–1159 klasifikaciją yra trys skirtingi trumpalaikių įvykių tipai:

- momentiniai;
- trumpalaikiai;
- laikini.

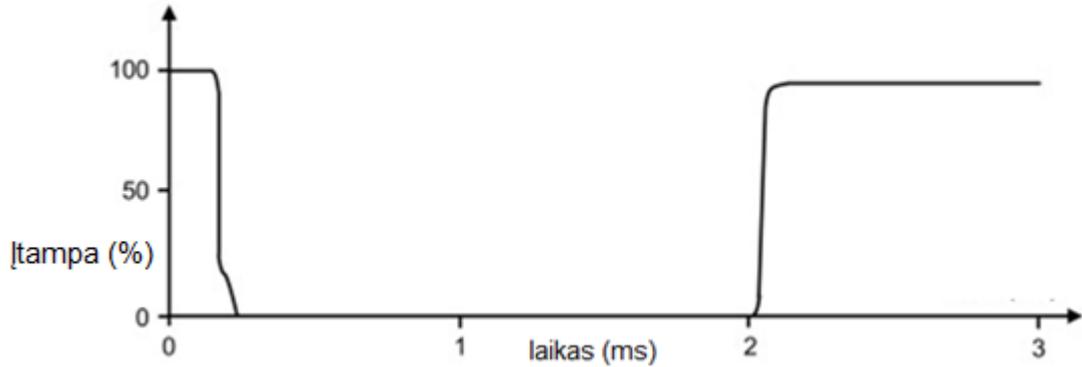
Kiekviena kategorija yra padalinta į:

- tiekimo nutrūkimas;
- viršįtampis;
- įtampos kritimas.

Tiekimo nutrūkimas

Tiekimo nutrūkimas įvyksta tada, kai maitinimo įtampa (arba apkrovos srovė) nukrenta iki mažiau nei 0.1 s.v., kaip parodyta 5 paveiksle. Tiekimo nutrūkimo priežastys gali būti įvairūs:

- įrangos gedimas;
- valdymo gedimas;
- sudegęs saugiklis;
- skyriklio atidarymas.



5 pav. Tiekimo nutrūkimas

Skirtumas tarp ilgalaikio tiekimo nutrūkimo ir trumpalaikio tiekimo nutrūkimo pagal EN 50160:

- trumpalaikis nutrūkimas yra iki 3 minučių;
- ilgalaikis nutrūkimas yra ilgesnis nei 3 minutės.

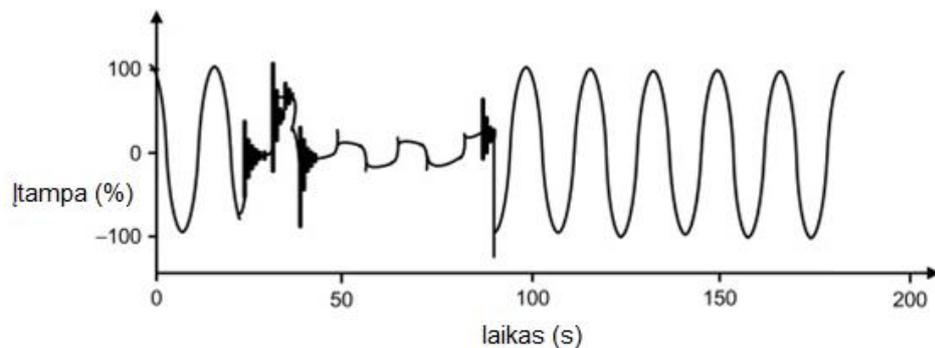
Pagal IEE–1250 standartą tiekimo nutrūkimai skirstomi į keturias kategorijas:

- momentinis nutrūkimas yra nuo 0,5 iki 30 ciklų;
- trumpalaikis nutrūkimas yra nuo 30 ciklų iki 2 sekundžių;
- laikinas nutrūkimas yra nuo 2 sekundžių iki 2 minučių;
- ilgalaikis nutrūkimas yra ilgesnis nei 2 minutės.

Įtampos kritimas

Įtampos kritimas yra įvykis, kai įtampa krenta nuo 0,1 s.v. – 0.9 s.v., kaip parodyta 6 paveiksle. Nėra tikslaus laiko apibrėžimo, bet dažniausiai laikoma, kad tai yra nuo 0,5 ciklo iki 1 minutes. Įtampos kritimas dažniausiai yra sukliamas šių veiksnių:

- didelių apkrovų prijungimas;
- didelių asinchroninių variklių paleidimas;
- vienfazis įžemėjimas;
- apkrovos perjungimas iš vieno šaltinio į kitą.



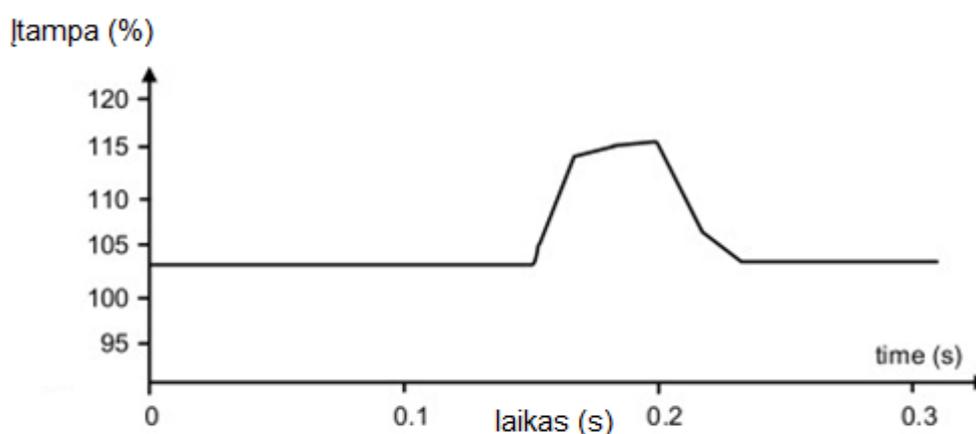
6 pav. Įtampos kritimas

Įtampos kritimai yra pagrindinė elektros įrenginių gedimų priežastis žemoje įtampoje. Tam, kad nuo jų apsisaugoti, instaliuojami nepertraukiami maitinimo šaltiniai.

Viršįtampiai

Įtampos dydžio padidėjimas tarp 1,1 – 1,8 s.v. yra vadinamas viršįtampiu, kaip parodyta 7 paveiksle. Dažniausiai pasitaikantis bangos ilgis yra nuo 0,5 ciklų iki 1 minutės. Viršįtampiai nėra tokie dažni kaip įtampos kritimai. Pagrindinės viršįtampių priežastys yra:

- didelės apkrovos išjungimas;
- kondensatorių baterijų prijungimas;
- nepažeistų fazių įtampos padidėjimas vykstant vienfaziam įžemėjimui.



7 pav. Viršįtampis

1.1.3. Ilgalaikiai įtampos svyravimai

Remiantis IEEE–1159 ir ANSI–C84.1 standartais, įtampos efektinės reikšmės nuokrypis nuo nominalios reikšmės, ilgesnis nei 1 minutė, yra ilgalaikis įtampos svyravimas. Pagrindinės ilgalaikio įtampos svyravimų priežastys yra apkrovos svyravimai ir sistemos perjungimo operacijos. IEEE–1159 šiuos įvykius suskirsto į tris kategorijas:

- ilgalaikis energijos tiekimo nutrūkimas;
- ilgalaikis viršįtampis;
- ilgalaikis įtampos kritimas.

Ilgalaikis energijos tiekimo nutrūkimas

Ilgalaikis nutrūkimas yra pats sunkiausias ir seniausias energijos tiekimo kokybės sutrikimas, kai įtampa nukrenta iki nulio ir automatiškai negrįžta. Pagal IEC apibrėžimą, ilgalaikio pertraukimo trukmė yra daugiau kaip 3 minutes, bet pagal IEEE apibrėžimą, trukmė yra ilgesnė nei 1 minutė. Ilgų nutrūkimų skaičius ir trukmė yra labai svarbios charakteristikos, vertinant energetikos sistemos galimybes teikti paslaugas klientams. Pagrindinės ilgalaikio energijos tiekimo nutrūkimo priežastys:

- avarija energetikos sistemos dalyje, be rezervo;
- neteisingas relinės apsaugos suveikimas;
- planuotas nutraukimas dėl elektros darbų;
- stichinės nelaimės.

Ilgalaikis įtampos kritimas

Ilgalaikiu įtampos kritimu vadinamas reiškinys kai efektinė įtampos reikšmė krenta iki 0.8 – 0.9 s.v. ilgiau nei minutei.

Ilgalaikis viršįtampis

Ilgalaikis viršįtampis apibrėžiamas kaip efektinės įtampos padidėjimas iki 1.1 – 1.2 s.v., ilgiau nei minutei. Pagrindiniai gedimai sukeltantys viršįtampus:

- viršįtampiai generuojami dėl izoliacijos defekto;
- gedimai susiję su kintamosios srovės regulatoriumi;
- gedimai susiję su transformatoriaus pavardomis;
- perkompensavimas;
- žaibo viršįtampiai;
- elektros tinklo perjungimai, ypač prijungiant energijos saugyklas.

Įtampų disbalansas

Kai trifazės sistemos įtampos yra ne vienodo dydžio ir/arba kampai tarp fazių nėra lygus 120°, atsiranda įtampos disbalansas. Yra du būdai apskaičiuoti įtampų disbalansą:

- didžiausio įtampos nukritimo nuo įtampos vidurkio padalinimas iš įtampos vidurkio;
- nulinės sekos santykio su teigiamos sekos santykio apskaičiavimas.

Pagrindinės įtampų disbalanso priežastys yra:

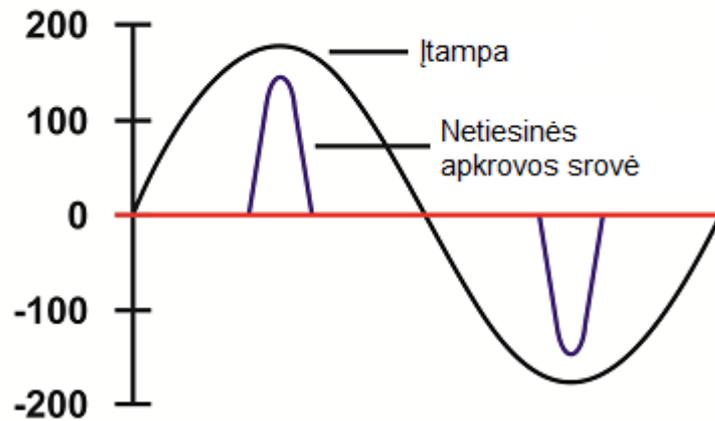
- nesubalansuotos vienfazės apkrovos trifazėje sistemoje;
- sudegęs vienas saugiklių bloko lydukas, prieš trifazę kondensatorių bateriją.

1.2. Harmoniniai iškraipymai

Harmonika – periodinio signalo sinusinė dedamoji, kurios dažnis nuo pagrindinio dažnio skiriasi sveikuoju daugikliu. elektos[24]. Elektrotechnikoje terminas harmonikos yra naudojamas apibrėžti įtampai arba srovei, kurios dažnis yra pagrindinio tinklo dažnio kartotinis. Originalioji sinusoidė yra vadinama pirmąją harmonika, sekančios harmonikos yra vadinamos aukštesniosiomis harmonikomis. Visų aukštesniųjų harmonikų periodiškumas yra pirmosios harmonikos periodo kartotiniai. Kaip pavyzdį galima naudoti mūsų tinklą, kurio dažnis yra 50 Hz, tai reiškia, kad antrosios harmonikos dažnis bus 100 Hz, trečiosios 150 Hz, ketvirtosios 200 Hz ir t.t. Harmoninių iškraipymų šaltinis yra netiesinės apkrovos.

Apkrova yra netiesinė, jei jos varža kinta kartu su naudojama įtampa. Kintanti varža reiškia tai, jog srovė tekanti per netiesinę apkrovą bus ne sinusoidės formos, netgi jei yra prijungta prie sinusoidinio maitinimo šaltinio, kaip pateikta 8 paveiksle. Šios, harmoninės srovės, gali turėti įtakos tiek paskirstymo tinklui, tiek prijungtiems įrenginiams. Netiesinės apkrovos dažniausiai sutinkamos mūsų

buityje yra kompiuteriai (jų maitinimo blokai), faksai, spausdintuvai, programuojami valdikliai, televizoriai.



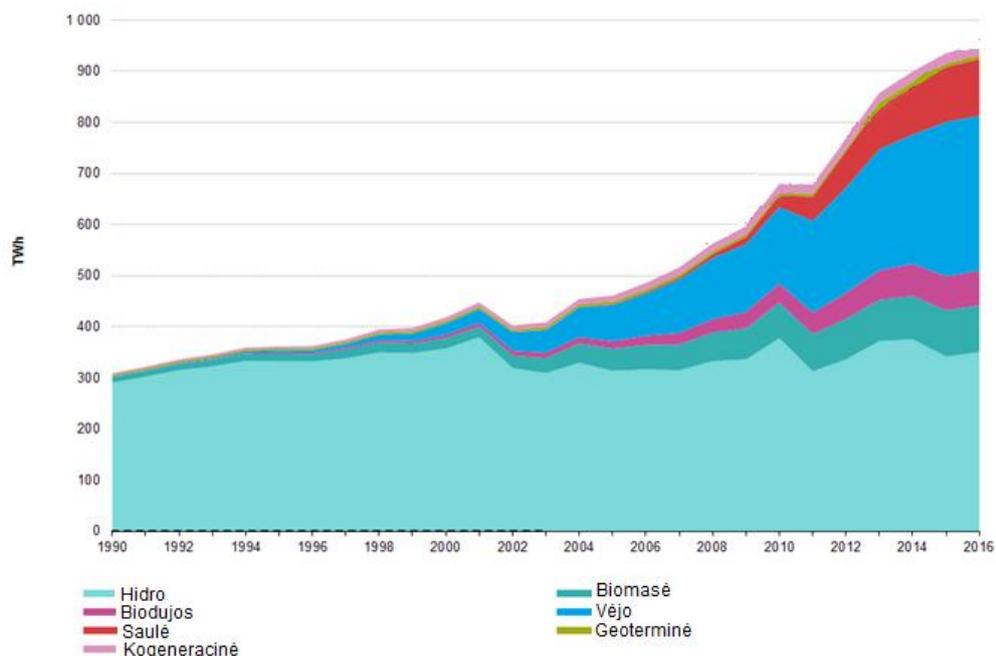
8 pav. Netiesinė apkrova

Harmonikų neigiami padariniai:

- sumažina elektros energijos tiekimo kokybę;
- ryšių sistemų trikdžiai;
- problemos kompiuterizuotuose procesuose;
- padidina elektros energijos nuostolius perdavimo tinkluose;
- padidina efektingą ir maksimalią galią;
- perdavimo ir komutacijos įrenginių kaitimas;
- pasikeičia vardinė įtampa;
- klaidos elektros apskaitoje, galimos išaugusios sąskaitos;
- sumažina įrenginių veikimo laiką.

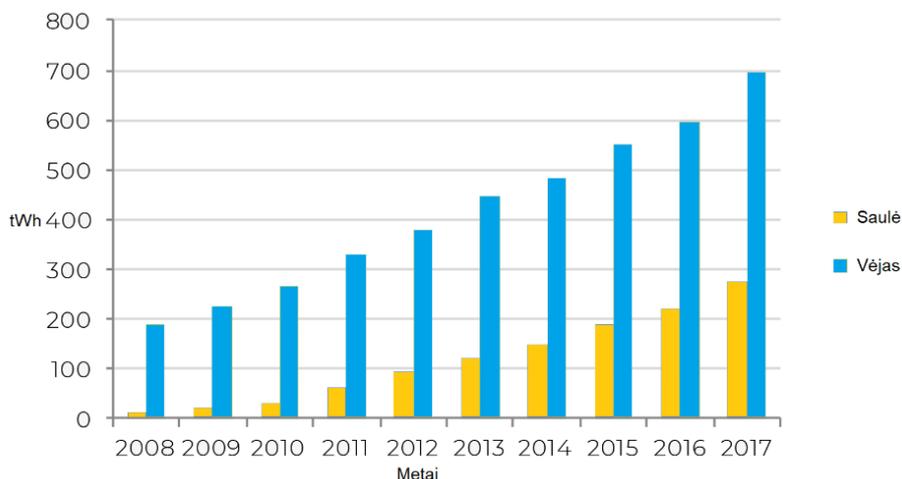
2. Atsinaujančių energijos šaltinių įtaką elektros tinklo parametrams.

Daug atsinaujinančios energetikos resursų yra įdiegiama į energetikos tinklus siekiant realizuoti mažai anglies dioksido į aplinką išskiriančią elektros energijos gamybą. Vis daugiau ir daugiau atsinaujinančių energetikos šaltinių bus instaliuota visame pasaulyje. Pavyzdžiui, Japonijoje fotovoltinių (FV) elektrinių galia 2030 metais turėtų būti 10 kartų didesnė, nei 2012 metais. Atsinaujinančios energijos gamybos augimas pavaizduotas 9 paveiksle.



9 pav. Atsinaujinančios energijos gamybos augimas [1]

Atsinaujinanti energija, pvz., vėjo jėgainės ir saulės fotovoltinės (FV) sistemos, naudoja gamtos išteklius ir teikia pageidautiną žalią energiją. Atsinaujinančios energijos skverbtis visame pasaulyje didėja, kaip matoma 10 paveiksle ypatingai didėja energijos gamyba iš saulės ir vėjo energijos. Atsinaujinančios energijos pažanga yra įdomi, tačiau taip pat sukuria didelius techninius iššūkius energetikai.



10 pav. Saulės ir vėjo generacijos augimas

Mūsų tradicinė energijos gamybos sistema sukurta su didelėmis centralizuotai valdomomis elektrinėmis. Tačiau, atsinaujinanti energija yra paskirstyta ir savarankiškai kontroliuojama. Todėl elektros tinklų pritaikymas patikimai veikti su atsinaujinančiais energijos šaltiniais gali būti labai sudėtingas. Buvo pripažinta, kad elektros energijos tinklų sujungimas su atsinaujinančia energija suteiktų elektros energijos kokybės problemų. Kadangi laikui bėgant atsinaujinančių energijos šaltinių lygis didėja, tokie dideli generacijos svyravimai kelia rimtų energijos kokybės problemų. Elektros tinklo pusėje tinklo trikdžiai, kaip trumpojo jungimo sukelti trumpalaikiai įtampos kritimai ir dažnio svyravimai, atsirandantys dėl apkrovos ir generacijos pokyčio, sąveikautų su tarpusavyje sujungtais atsinaujinančiais energijos šaltiniais, kurie sukurtų sudėtingesnes ir neapibrėžtas veikimo sąlygas. Buvo pateikta daug mokslinių tyrimų rezultatų, susijusių su skirtingais energijos kokybės iššūkiais ir sprendimais, dėl atsinaujinančios energijos integracijos. Šiame darbe siekiama pateikti išsamią literatūros apžvalgą apie kylančias energijos kokybės problemas, susijusias su atsinaujinančių energijos šaltinių integravimu į elektros tinklą.

Didelis atsinaujinančių energijos šaltinių, ypač vėjo ir saulės energijos kiekis, kuris yra susijęs su galutiniais vartotojais, gali sukelti didelių energijos svyravimų, dėl kurių gali sutrikti elektros energijos tiekimas. Pagrindinė energijos kokybės problema, susijusi su atsinaujinančių energetikos šaltinių integracijai, yra įtampos ir dažnio svyravimai, kurie yra sukeliama dėl nekontroliuojamos elektros energijos generacijos, bei harmonikos kurios atsiranda dėl inverterių, kurie yra naudojami atsinaujinančios energetikos konversijos sistemose. Kaip nustatyta elektros energijos tiekimo standarte IEEE Standard 929–2000, įtampa, harmonikos, dažnis ir disbalansas yra keturi pagrindiniai parametrai fotovoltinėse sistemose. Parametrų nuokrypis nuo nustatytų normų, turėtų privesti prie konverterio atjungimo nuo tinklo[2].

Nenuspėjama ir nekontroliuojama elektros energijos gamyba gali sukelti dažnio ar įtampos kritimą ar kilimą elektros energijos perdavimo linijose. Toks galios srauto svyravimas reikalauja papildomų elektros energijos generacijos šaltinių, kad būtų galima betarpiškai suderinti elektros energijos gamybą su elektros energijos paklausa tuo metu[3]. Vėjo ir saulės apšviestumo prieinamumas yra iš dalies neprognozuojamas. Tačiau, tokį nuspėjamumą galima pagerinti gerinant orų prognozavimo ir energijos gamybos prognozavimo technologijas, kurių tikslas – tiksliau numatyti vėjo ir saulės išteklius. Tinklo pusėje elektros energijos tiekimo kokybė daro įtaką atsinaujinančių energijos šaltinių integracijai dėl elektros energijos tinklo sutrikimų. Siekiant užtikrinti patikimą energetikos sistemos veikimą, atsinaujinančių elektrinių tinklų sujungimo su elektros energijos perdavimo sistema reikalavimai yra nuolat tobulinami. Energijos sistemoje įtampos variacija yra susijusi su reaktyviosios galios srautu, o dažnio pokyčius lemia galios poreikio pokytis. Taigi, įtampos ir dažnio svyravimų išlyginimas gali būti pasiektas atitinkamai valdant reaktyviosios galios srautą ir aktyviosios galios poreikį.

2.1. Vėjo generacijos įtaka elektros tinklo parametrams.

Vėjo energijos panaudojimas elektros gamybai didžiausias privalumas yra tai, jog neteršiama aplinka, bet jų gamyba nėra tiksliai prognozuojama. Tai apsunkina nuolatinį generacijos ir vartojimo balanso sistemoje užtikrinimą:

- sunkiai prognozuojamo vėjo sukelti galių srautai veikia kaimynines energetikos sistemas ir sumažina tarpusisteminių galių prekybos galimybes;

- vėjo elektrinių integracijai į energetikos sistemas reikia plėtoti elektros tinklų infrastruktūrą, kad nepasireikštų elektros tinklų pralaidumų ribojimai. Vėjo elektrinės statomos ten, kur didesnis vėjo greitis. Dažniausia toli nuo apkrovos centrų;
- tradicinės elektrinės nėra atjungiamos, net ir įvykus rimtiems gedimams – jos yra perjungiamos savųjų reikmių aprūpinimui ir taip palaikomas papildomos elektros tinklų paslaugas. Tuo metu, vėjo elektrinės atsijungia, atsiradus įtampos trikdžiams;
- vėjo elektrinių elektros gamybos kasdieninių prognozių galimybės yra ribotos, tačiau reikia nuolat palaikyti elektros gamybos ir vartojimo balansą. Balansavimo galios reikmės didėja proporcingai vėjo elektrinių galiai;
- didelė vėjo elektrinių gamyba sukelia regioninių elektros perdavimo linijų perkrovas.

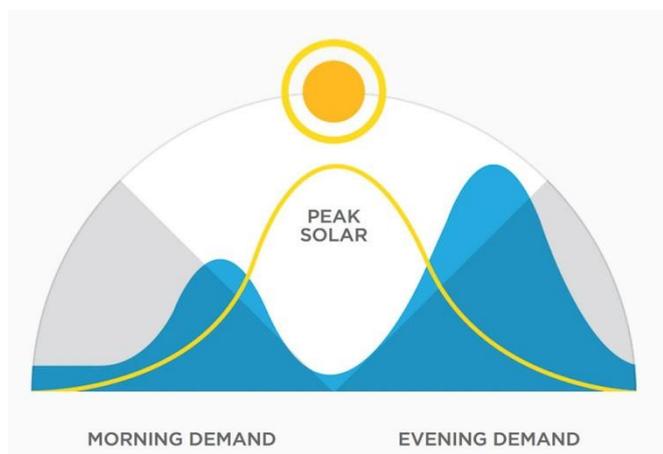
Energijos kokybė lemia energijos tiekimo sąnaudas keliais būdais. Pavyzdžiui, prasta elektros energijos kokybė gali pareikalauti papildomų investicijų į elektros linijas, arba gali apriboti tinklo tiekiamą elektros energiją. Dėl ilgalaikio ir trumpalaikio energijos išteklių kintamumo ir sąveikos su elektros tinklu, vėjo gamybos įrenginiai paprastai laikomi prastos kokybės tiekėjais. Todėl, kuriant kontrolės sistemą, turi būti atsižvelgiama į galios reguliavimą. Šis kontrolės reikalavimas vis labiau aktualus, nes vėjo elektrinių instaliuota galia visame pasaulyje didėja. Energijos kokybė vertinama pagal įtampos ir dažnio stabilumą.

Elektros energijos tinklo dažnio svyravimai atsiranda dėl galios disbalanso. Pavyzdžiui, generatoriai pagreitėja, kai tiekiamą galia viršija suvartojimą, todėl padidėja dažnis. Analogiškai, generatoriai sulėtėja, kai jie negali padengti elektros galios poreikio, todėl dažnis mažėja. Paprastai, prijungus juos prie masinio tinklo, vienos vėjo jėgainės ar nedidelio masto vėjo jėgainės nepaveikia dažnio. Tačiau, taip nėra, kai vėjo turbina yra izoliuotos elektros energijos sistemos dalis arba kai susiduriame su didelio masto vėjo jėgainėmis. Tokiais atvejais gali atsitikti, kad reikia reguliuoti bendrą vėjo energijos gamybos įrenginių tiekiamą galią

Vėjo jėgainių sąveika su elektros tinklu turi įtakos tinklo įtampoms. Viena vertus, lėtas įtampos kitimas vyksta, kai vėjo energijos konversijos sistemoje išgaunama energija keičiasi dėl vidutinio vėjo greičio kitimo. Šių variacijų amplitudė glaudžiai priklauso nuo elektros tinklo varžos jungties taške ir aktyviosios bei reaktyviosios galios srautų. Šių įtampos svyravimų sušvelninimo būdas, nedarant įtakos energijos generacijai, yra valdyti reaktyviosios galios srautą. Tai buvo įprastai įvykdyta, pavyzdžiui, naudojant kondensatorių baterijas arba sinchronines mašinas, kurios suvartoja arba tiekia reaktyviąją galią. Nepaisant to, šiuolaikinės vėjo jėgainės prijungiamos prie elektros tinklo per elektros energijos konverterius, todėl, dabartinė tendencija yra pasinaudoti galios elektronikos teikiamu valdymo lankstumu. Reaktyviąją galią, galios koeficientą arba tiesiogiai įtampos reguliavimą galima atlikti tinkamai valdant elektroninius keitiklius. Bet kuri iš šių kontrolės schemų gali būti įgyvendinama nepriklausomai nuo likusios vėjo energijos konversijos sistemos kontrolės.

2.2. Saulės generacijos įtaka elektros tinklo parametrams.

Prie tinklo prijungta FV elektrinė gali sukelti problemų su įtampos reguliavimu, tokių kaip įtampos padidėjimas. Tradicinis tinklas veikia pagal vienpusį ar radialinį srautą. Tačiau, į tinklą tiekiamą elektros energija padidina įtampą ir gali paveikti tinklą taip, jog jis nebetenkintų įtampos reikalavimų.



11 pav. Saulės energijos gamybos pikas [3]

Viena iš didžiausių problemų susijusių su FV elektrinėmis yra ta, jog jų generacijos pikas nesutampa su energijos vartojimo rytiniu ar vakariniu piku. Saulės energijos gamybos pikas ir vartojimo pikai pateikti 11 paveiksle.

Atgalinis galios srautas

Galios srautas tradicinėje energijos paskirstymo sistemoje yra vienpusis, t.y., galia teka iš vidutinės įtampos tinklo į žemos įtampos tinklą. Kai FV elektrinės gamyba yra didesnė, nei vietinis vartojimas, tuomet atsiranda atgalinis galios srautas tekantis iš žemos įtampos į vidutinės ar aukštos įtampos tinklą. Atgalinis galios srautas apsunkina įtampos reguliatorių valdymą. Esant tam tikroms sąlygoms atsiranda būtinybė modifikuoti esančias apsaugas, nes dauguma tinklo apsaugos elementų yra skirti vienos krypties galios srautų tinklui.

Įtampos padidėjimas

Priklausomai nuo galingumo, FV elektrinių generacija gali sumažinti perdavimo tinklo apkrovas bei pagerinti jo naudingumą, sumažinant elektros energijos perdavimo nuostolius. Kita vertus, didelės galios FV elektrinė gali turėti neigiamą poveikį paskirstymo tinklo energijos kokybei, dėl sukeltos įtampos, ypač tuo atveju, kai FV elektrinė generavimas yra didesnis, nei vietinis vartojimas.

Energijos kokybės problemos

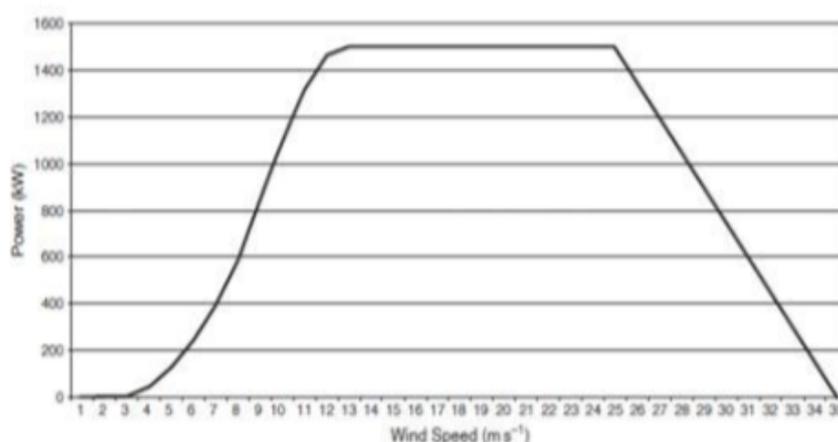
Energijos kokybės problemos, tokios kaip harmoninis iškreipymas, yra viena iš pagrindinių problemų elektros tinkle. Toks iškreipymas atsiranda dėl galios elektroniką naudojančių inverterių, kurie plačiai naudojami atsinaujinančių energijos šaltinių konversijos sistemose. Harmoninis iškreipymas gali sukelti perkaitimus kondensatoriuose, transformatoriuose ir kituose įrenginiuose, taip pat gali sukelti klaidingus apsaugos įrenginių suveikimus.

3. Elektros tinklo kokybės gerinimo metodai

Norint užtikrinti tinkamą tiekiamos elektros energijos kokybę taikomos įvairiausios metodikos. Daugiausiai tyrimų atliekama siekiant optimizuoti elektrinių valdymo algoritmus bei kontroliuoti reaktyviosios galios srautus.

Galios kreivės modifikacija

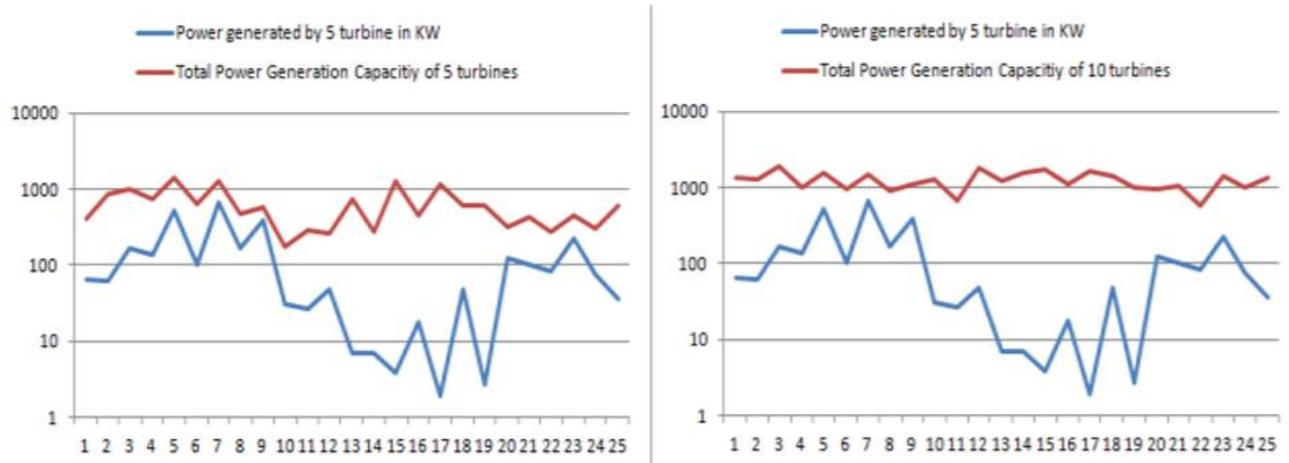
Kai kurie vėjo turbinų gamintojai siūlo vėjo turbinas su specialiosios galios kreive, kaip parodyta 12 paveiksle. Šiose turbinose, vietoj staigaus išjungimo, energijos generavimas yra mažinamas žingsnis po žingsnio didėjant vėjo greičiui virš ribinio greičio. Tai neabejotinai sumažina galimą neigiamą poveikį, kurį gali turėti labai didelis vėjo greitis energijos sistemos veikimui.



12 pav. Specialioji vėjo turbinų galios kreivė

Vėjo turbinų sujungimas

Vėjo jėgainių sujungimas teigiamai veikia energijos sistemos veikimą ir energijos kokybę. Padidinus vėjo jėgainių skaičių vėjo jėgainių parke, sumažinamas turbulencijos piko poveikis, todėl, kad gūsis nepaveikia visų jėgainių vienu metu. Taigi, norint pasiekti išlyginimo efektą, nereikia drastiškai didinti vėjo jėgainių skaičių. 13 paveiksle parodomas galimos gamybos variacijos pokyčio nuo vėjo greičio esant 5 ir 10 vėjo jėgainių naudojimo atveju. Pastebima, kad galios svyravimai dešimties vėjo jėgainių naudojimo metu yra mažesni, nei penkių. Galutinė 10 vėjo jėgainių galia yra sklandesnė, palyginti su 5 turbinomis



13 pav. Galima variacijos pokytis vėjo greičiui 5 ir 10 vėjo jėgainių naudojimo metu [5]

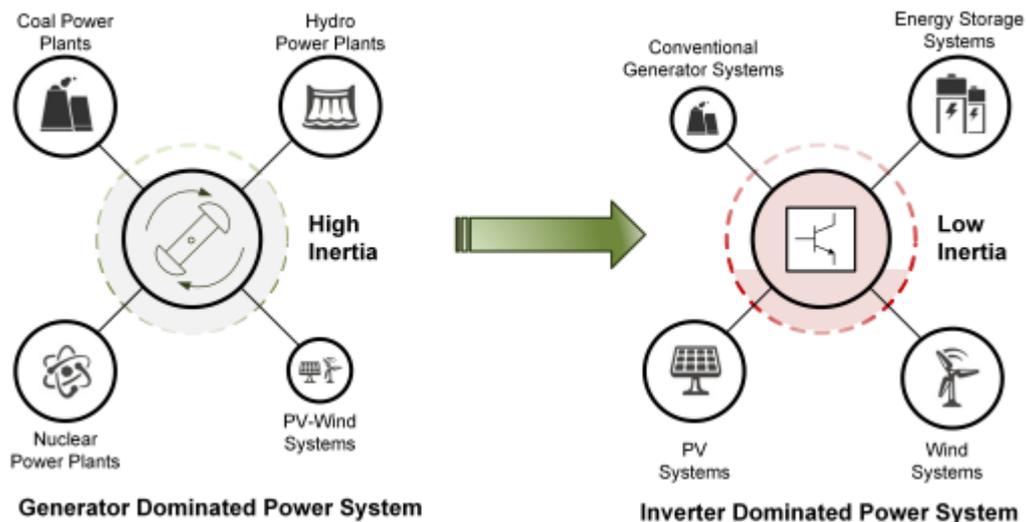
Vėjo jėgainių energetikos sistemoje, IEC standartas 61400–21 rekomenduoja, kad 10 minučių vidutinė įtampos svyravimai būtų $\pm 5\%$ nuo nominalios vertės[5].

Reaktyviosios galios kompensavimas

Reaktyviosios galios kompensavimas yra veiksmingas įtampos valdymo metodas. Remiantis pažangiomis galios elektronikos technologijomis ir naujoviškomis konstrukcijomis, kintamosios srovės perdavimo sistemos įranga gali būti naudojama siekiant pagerinti kintamosios srovės perdavimo pajėgumus, stabilumą ir lankstumą, todėl jis gali perduoti didelio galingumo atsinaujinančią energiją. Tiristoriais valdomi kompensatoriai gali būti įrengti perdavimo linijose, siekiant sumažinti sistemos parametrų svyravimus. Standartiškai SVC, sinchroninis kompensatorius arba reguliuojamas šunto reaktorius gali būti šuntuojami ant pastočių šynų, kad būtų išspręstos reaktyviosios galios kompensavimo ir įtampos tikrinimo problemos atsinaujinančios energijos integracijai[4]. Kaip alternatyva standartinei kompensacijai, STATCOM yra problemų sprendimas vėjo jėgainėse su fiksuoto greičio generatoriais. Vėjo energijos integravimas į esamą energetikos sistemą yra techninis iššūkis, todėl, reikia atsižvelgti į įtampos reguliavimą, stabilumą ir galios kokybės problemas. Fiksuoto greičio vėjo jėgainės veikimo metu visi vėjo greičio svyravimai perduodami kaip mechaninio sukimo momento svyravimai, todėl, kinta ir elektros energijos gamyba ir sukelia didelius įtampos svyravimus.

3.1. Virtualios sinchroninės mašinos metodas

Įprastos generacijos jėgainės gali palaikyti ir reguliuoti įtampą ir dažnį, esant trikdžiams, nes sinchroninis generatorius dėl inercijos kaupia didelį kinetinės energijos kiekį, o ši kinetinė energija gali būti išleidžiama arba absorbuojama, kad kompensuotų generatoriaus elektrinės ir mechaninės galios pusiausvyrą. Elektrinių principai pavaizduoti 14 paveiksle. Elektros tinkle, dideli sinchroninių generatorių rotaciniai masyvai, gali reikšti inertiškumą[5]. Kai sistemoje įvyksta apkrovos pasikeitimas, energijos sistemos inercinis rezervas pristabdo dažnio kitimą.[6] Galios elektronikos inverteriai, kaip sąsaja, tarp atsinaujinančios energetikos šaltinio ir tinklo, neturi besisukančių elementų ir tai lemia tik labai nežymią inerciją. Maža inercija tinkle sumažina tinklo dažnio stabilumą, dėl to, kad dažnis yra atvirkščiai proporcingas sistemos inercijai. Šiuo atveju gali atsirasti dideli dažnio svyravimai.

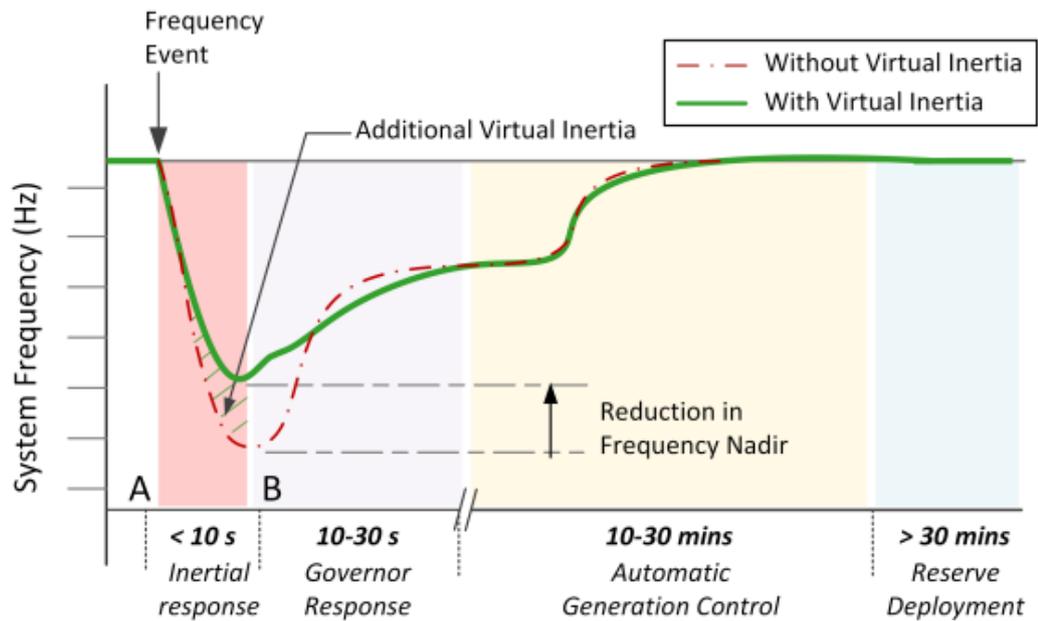


14 pav. Elektrinių picipai [10]

Naujausios ataskaitos ir tyrimai parodė, kad dažnio stabilumas yra svarbus dalykas dėl to, kad trūksta inertiško atsakymo iš AEI. Nepriklausomas sistemos operatorius, Elektros patikimumo Teksase taryba (ERCOT) pranešė, kad nuosekliai mažėja jos sistemos inercinis atsakas ir rekomenduoja papildomą inercinį atsaką [7],[8]. 15 paveiksle iliustruojamas dažnio pokyčio įtaka energijos gamybai. Nuostoliai kasmet didėja ir ši tendencija labai koreliuoja su padidėjusia AES per tą patį laikotarpį. Panašiai ir Europos perdavimo sistemos tinklas. Elektros energijos operatoriai (ENTSO–E) pranešė apie dažniau pasitaikančius pažeidimus šiaurės šalių tinkle susijusius su padidėjusiu AES įsiskverbimu[9]. Dėl to, inercinis atsakas iš vėjo turbinų ir PV elektrinių dabar yra privalomas daugelyje šalių [10],[11]. Todėl, yra didelis praktinis poreikis tirti virtualios inercijos sistemas.

Siekiant išspręsti šią problemą ir didinti energetinės sistemos stabilumą, buvo pasiūlytas VSM (virtuali sinchroninė mašina) metodas[12],siekiant sumažinti įtampos ir dažnio svyravimus bei pagerinti atsinaujinančios energijos integraciją. VSM principas grindžiamas šiandieninių dinaminių elektroninių keitiklių technologijos privalumų derinimu su sinchroninių mašinų statinėmis ir dinaminėmis veikimo savybėmis.

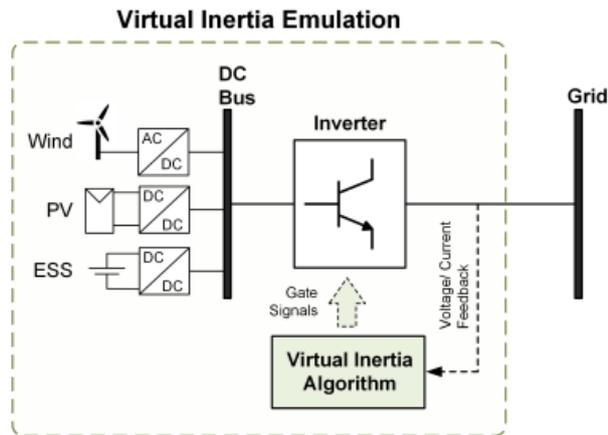
Siekiant išlaikyti elektros energijos gamybos ir apkrovos pusiausvyrą, yra įvairūs valdymo būdai įdiegti į energijos sistemą per kelis laiko intervalus, kaip pavaizduota 16 paveiksle. Operatoriaus atsakymas yra pagrindinis kontrolės veiksmas, kuris vyksta per pirmąsias kelias sekundes (dažniausiai 10 – 30 s).



15 pav. Sistemos valdymo reakcijos trukmė[14]

Automatinė generavimo kontrolė yra antrinis valdymo veiksmas, kuris vyksta per kelias minutes (paprastai 10 – 30 min). Taip atkuriamas sistemos dažnis atgal į nominalią vertę. Trečiojo valdymo veiksmas yra atsarginio rezervo įjungimas. Kinetinė energija sukaupta rotorijoje yra atsakinga už dažnio disbalanso neutralizavimą laikotarpyje iki operatoriaus veiksmų. Kadangi, tradiciniai generatoriai yra pakeičiami į AEŠ, tai inercinis atsakymas taip pat mažėja. Dėl to padidėja dažnio pokytis per labai trumpą laiką. Šis laikotarpis yra pabrėžiamas 15 paveiksle kaip AB skyrius. Iš paveikslo matyti, kad sistemose su mažesne inercija, dažnis yra žemesnis. Tokios situacijos gali sukelti dažnio relių išjungimą ir blogiausiu atveju gali sukelti kaskadinį išjungimą[13],[14]. Tokių scenarijų sprendimas yra pridėti virtualios inercijos sistemoje. Pagrindiniai virtualios inercijos sistemos reikalavimai yra tai, kad ji turi veikti labai trumpai – laiko intervalais (paprastai mažiau nei 10 s) ir savarankiškai. Tinkamai dislokuotos, virtualios inercijos sistemos padidintų sistemos stabilumą ir padidintų AEŠ įsiskverbimą.

Virtualioji sinchroninė mašina yra valdymo algoritmų kombinacija, kurios rezultatai primena tradicinės energijos sistemos inerciją[15]. 16 paveiksle apibendrinama virtualios inercijos sąvoka – sistemos branduolys yra virtualios inercijos algoritmas.

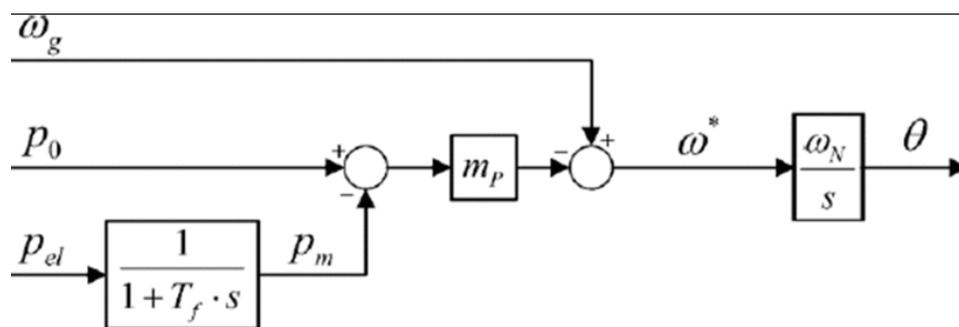


16 pav. Virtualios inercijos valdymo algoritmas[14]

[16] pasiūlytas savarankiškas VSM metodas, skirtas palaikyti dinaminį dažnio valdymą dyzelinėje – hibridinėje sistemoje. Šis metodas valdo energijos kaupimo sistemos ir elektros tinklo sąsajos konverterį, kad imituotų sinchroninio generatoriaus inercijos atsaką ir slopinimo galią. Savireguliacijos algoritmai yra sukurti ir naudojami siekiant nuolat ieškoti optimalių parametru VSM valdymo metu, kad būtų sumažintas dažnio svyravimų ir energijos srauto per energijos kaupimą amplitudė ir greitis. Pasiūlyto metodo principinė schema pateikta 16 paveiksle.

Dažnio kontrolė naudojant *droop* kontrolę.

Droop pagrindu sukurtos schemas tapo pageidaujama sprendimu įtampos šaltinių keitiklių (VSC) valdymui, kurie gali užtikrinti savarankišką valdymą ir apkrovų pasiskirstymą tarp lygiagrečiai prijungtų VSC įrenginių, pastovioje būsenoje ir pereinamųjų procesų metu, panašiai kaip tradicinės sinchroninės mašinos. Valdiklio principas parodytas blokinėje schemoje esančioje 17 paveiksle.



17 pav. Droop valdymo principas

čia: P_{el} – išmatuota aktyvioji galia; P_m – išmatuota aktyvioji galia po aukštų dažnių nufiltravimo; P_0 – aktyviosios galios nurodymas; ω_g – išmatuotas tinklo kampinis dažnis; m_p – *droop* kontrolės koeficientas aktyviajai galiai; ω^* – kampinio dažnio nurodymas; ω_N – nominalus kampinis dažnis; θ – fazės kampas.

Aktyvioji galia P_{el} , matuojama galios elektroninio konverterio ir elektros tinklo sąsajoje, yra nufiltruojami aukšti dažniai prieš perduodant ją kaip matavimo grįžtamojo ryšio signalą P_m . Šie filtrai yra būtini valdymo kilpų stabilizavimui. Panašiai kaip ir VSM metodas, momentinė įtampos fazinio kampo nuoroda, gauta iš *droop* valdiklio, pateikiama dažnio atskaitos integralu.

3.2. Energijos kaupimas

Elektros energijos kaupimas gali būti naudojamas šiems tikslams:

- mažinti elektros energijos sąnaudas, saugant elektros energiją, gautą ne piko valandomis, kai jos kaina yra mažesnė ir ją naudoti piko valandomis, o ne naudoti brangiau įsigytą elektros energiją;
- palaiko klientus, kai atsiranda elektros tinklo nepakankamumas, siekiant pagerinti energijos tiekimo patikimumą;
- išlaikyti ir pagerinti energijos tiekimo kokybę.

Pagrindiniai perdavimo tinklo reikalavimai yra tiekti elektros energiją atitinkančią įtampą ir dažnio tolerancijos standartus. Kita vertus, atsinaujinančios energijos našumas yra nepagrįstas dėl besikeičiančių oro sąlygų. Dėl atsinaujinančios energijos generavimo išėjimo svyravimų sunku reguliuoti sistemos dažnį, o elektros energijos saugojimas gali suteikti dažnio valdymo funkcijas, kad būtų pasiekta veiksminga dažnių kontrolė. Energijos kaupiklis taip pat gali pagerinti tiekiamos elektros energijos įtampą, instaliavus kaupiklį linijos galia, galima kompensuoti įtampos kritimą [17].

Mažiams, izoliuotiems elektros tinklams, tokiems kaip sala, elektros energijos saugojimas leidžia vartotojams tiekti stabilią energiją vartotojams, kuriuose paprastai naudojami dyzeliniai generatoriai ir atsinaujinančios energijos šaltiniai. Energijos kaupikliai gali būti derinami su pažangiomis kontrolės sistemomis, kad pagerėtų atsinaujinančios energijos integracijos stabilumas, patikimumas ir energijos kokybė. Kaupiklių tipai pateikti lentelėje 6.

6 lentelė. Energijos kaupikliai [8]

Tipas	Tipinė galia	Tipinė energija	Iškrovos trukmė	Ciklo naudingumo faktorius	Darbo amžius	Kaina galios vienetui	Kaina talpos vienetui
	MW	MWh	H,s	%	Metai, h, ciklai	€/W	€/kWh
Ilgos iškrovos trukmės energijos kaupyklos							
Hidroakumuliacinės elektrinės	100 – 4 000	500 – 15 000	4 – 12 h	70 – 80	40 m.	0,4 – 1,2	35 – 70
Suslėgto oro energijos kaupyklos	25 – 3000	200 – 10 000	1 – 20 h	75	30 m.	0,4 – 0,7	10 – 70
Gravitacinės energijos kaupyklos	100 – 3 000	200 – 10 000	1 – 30 h	86	50 m.	0,2 – 0,7	20 – 40
Vidutinės iškrovos trukmės energijos kaupyklos							
Rūgštinės švino, NiCd, NiMH, GST Zn–oro, Li–jonų baterijos	0,01 – 5	1 – 100	1 – 8 h	50 – 90	10 ⁴ –10 ⁵ ciklų	~1	70 – 400
Srautinės baterijos	0,05 – 10	1 – 100	10 h	70 – 80	10 000 ciklų	1,2 – 1,5	250
Vandenilio kaupyklos	1 – 10	Neribotas	>5 h	30 – 63	10 000 h	1 – 1,5	15 – 50
Trumpos iškrovos trukmės kaupikliai							
SEK	0,5 – 1	0,1 – 1	< 300 s	90	10 ⁶ ciklų	1 – 1,5	240
SMEK	0,01 – 400	0,01 – 20	60 – 1800 s	95		0,5 – 1,6	800 – 8000

Švino rūgšties baterijos

Švino rūgšties baterija, kurią 1859 m. Sukūrė Gaston Plante, yra seniausias ir plačiausiai naudojamas įkraunamas elektrocheminis įrenginys automobilių, nepertraukiamo maitinimo šaltinio (UPS) ir atsarginių sistemų telekomunikacijoms ir t.t. Toks įtaisas veikia per chemines reakcijas, kuriose dalyvauja švino dioksidas (katodo elektrodas), švinas (anodo elektrodas) ir sieros rūgštis (elektrolitas). Švino rūgšties akumuliatoriai turi didelį efektyvumą ir yra pigūs bei lengvai montuojami. Tokio tipo akumuliatorius, atsinaujinančios energijos sektoriuje, dominuoja dėl kainos ir prieinamumo. Taip pat gerai žinoma, kad švino rūgšties akumuliatoriai turi mažą energijos tankį ir mažą tarnavimo ciklą kiekį, bei yra toksiški dėl sieros rūgšties naudojimo ir yra pavojingi aplinkai. Šie trūkumai reiškia tam tikrus šio tipo akumuliatoriaus apribojimus.

Ličio jonų baterija (Li-Ion)

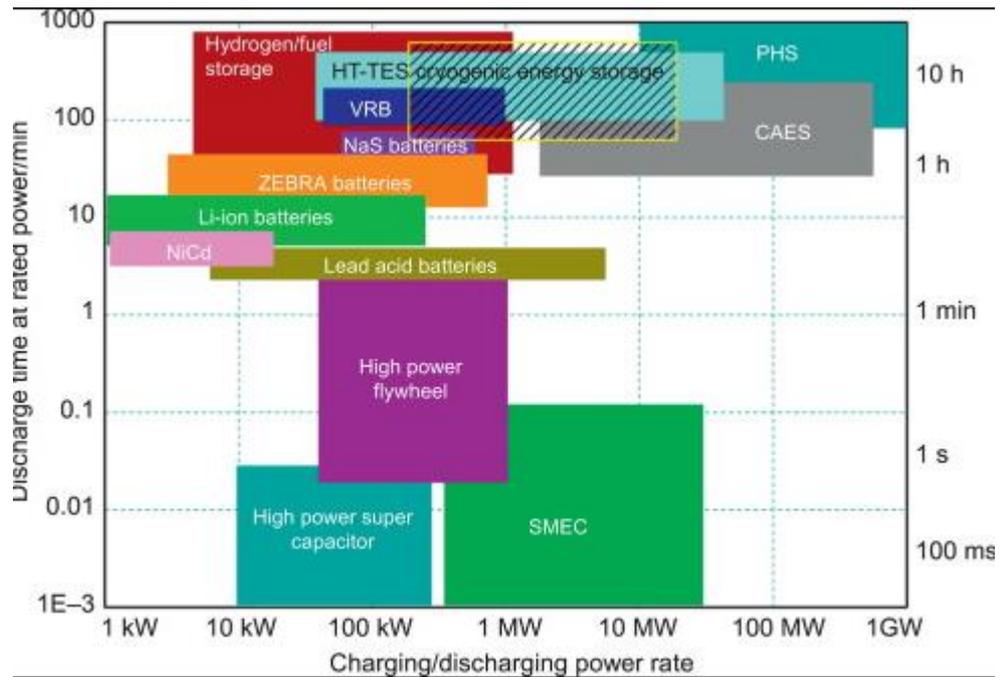
Pirmoji ličio baterija buvo sukurta 1979 m. Ličio baterijos ankstyvosiomis dienomis nukentėjo nuo blogo tarnavimo ciklo kiekio ir saugos problemų. Tai buvo ličio–kobalto baterijų kūrimas, turinčių anglies, kaip neigiamą elektrodą, dėl kurių „Sony“ 1990 m. sėkmingai komercializavo šias baterijas. Terminas „ličio baterijos“ iš tikrųjų reiškia dešimtis skirtingų baterijų technologijų, pagrįstų judančiu ličiu. Dėl reakcijų pobūdžio ir elektrodų struktūros, ličio jonų baterijos turi daug ilgesnį ciklo tarnavimo laiką nei švino rūgšties baterijos. Ličio baterijos turi didelį efektyvumą, didelį energijos ir galios tankį, mažą savaiminio išsikrovimo greitį ir yra plačiai naudojamos nešiojamoje elektronikoje. Didelis galios tankis taip pat leidžia ličio jonų baterijoms maitinti elektros transporto priemones. Taip pat buvo stengiamasi išplėsti taikymo sritį iki saulės energijos saugojimo

Nikelio pagrindu pagaminta baterija

Nikelio pagrindu pagamintos baterijos daugiausia susijusios su nikelio–kadmio (Ni–Cd), nikelio–metalo hidrido (Ni–MH) ir nikelio–cinko (Ni–Zn) baterijomis. Tokių baterijų privalumai yra atsparumas visiškiems iškrovimams, ilgas ciklo tarnavimo laikas, temperatūros toleravimas ir didelis energijos tankis (lyginant su švino rūgšties baterijomis). Tačiau kadmio, naudojamas Ni–Cd baterijose, yra labai toksiškas. Dėl to atsiranda Ni–MH baterijų, kurios yra daug labiau aplinką tausojančios, tačiau jos turi didelį savaiminio išsikrovimo lygį. Nepaisant įvairių pokyčių, tik „Ni–Cd“ baterijos UPS sistemose atrado komercinį taikymą. Neseniai Ni–Cd baterijos tapo viena iš populiariausių energijos kaupimo technologijų fotovoltinėms elektrinėms, nes jos gali atlaikyti aukštą temperatūrą, nors didelės pradinės Ni–Cd baterijų sistemos investicijos gali trukdyti plačiai taikyti į šį sektorių.

Natrio–sieros baterija

Natrio–sieros (NaS) akumuliatorių technologijos kūrimas jau vyksta daugiau nei 50 metų. Japonijos NGK buvo pirmoji, kuri sėkmingai komercializavo technologiją. NaS baterijos susideda iš skystos (lydytos) sieros teigiamame elektrode ir skysto (išlydyto) natrio neigiamame elektrode, kaip aktyvios medžiagos, atskirtos kietu beta aliuminio oksido keraminiu elektrolitu. Jie pasižymi dideliu energijos tankiu, ilgaamžiškumu ir dideliu energijos vartojimo efektyvumu. Dėl šių savybių technologija yra tinkama apkrovos išlyginimui, energijos kokybei ir galios poreikio pikų sušvelninimui paskirstytose energijos sistemose, įskaitant saulės energiją. Tiesą sakant, dabartiniai pasauliniai NaS baterijų įrenginiai viršija 300 MW, nepaisant neseniai atsiradusio susirūpinimo dėl saugos aspektų.



18 pav. Energijos kaupiklių įkrovimo/iškrovimo laikas ir galia.

Apibendrinanti informacija apie energijos kaupiklių įkrovimo ir iškrovimo laiką, bei galią, pateikta 18 paveiksle.

3.3. Harmoninių iškraipymų mažinimas

Dėl galios elektroninių keitiklių / inverterių pritaikymo, atsinaujinančios energijos konversijos sistemos tiekia ir daug harmonikų į tinklą. Dažniausiai, harmonikų sumažinimui naudojami aktyvieji harmonikų filtrai, bet daug dėmesio skiriama į inovatyvios sąsajos kūrimą tarp tinklo ir atsinaujinančio energijos šaltinio, negeneruojančio harmonikų.

Filtravimas

Žemo dažnio filtras yra filtras, kuris praleidžia žemo dažnio signalus ir blokuoja ar užkerta kelią aukšto dažnio signalams. Kitaip tariant, žemo dažnio signalams tenka mažiau pasipriešinimo, o aukšto dažnio signalams kelias tampa sunkesnis, todėl tai yra žemo dažnio filtras. Žemo dažnio filtrus galima sukurti naudojant rezistorius su kondensatoriais arba induktoriais. Žemų dažnių filtras, sudarytas iš rezistoriaus ir kondensatoriaus, vadinamas žemo dažnio RC filtras. Ir žemos įtampos filtras su rezistoriumi ir induktoriumi vadinamas žemo dažnio RL filtru.

RC filtras

RC filtras sudarytas iš rezistoriaus ir kondensatoriaus, kuris praleidžia žemo dažnio signalus ir blokuoja aukštojo dažnio signalus. Tam, kad sukurti RC filtrą rezistorius instaliuojamas nuosekliai, o kondensatorius lygiagrečiai.

Kadangi kondensatorius yra reaktyvusis elementas, jo varža priklauso nuo dažnio. Jo varža labai didelė mažo dažnio signalams ir nuolatinei srovei, o jo varža maža didelio dažnio signalams.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1)$$

čia X_C – talpuminė varža; f – sistemos dažnis; C – talpumas.

RL filtras

Skirtingai nuo rezistoriaus, kuris yra nereaktyvus įrenginys, induktyvinės varžos reikšmė kinta prie skirtingų dažnių signalams, kaip ir kondensatorių. Tačiau, skirtingai nuo kondensatorių, induktoriai labai atsparūs aukšto dažnio signalams ir užtikrina nedidelį atsparumą žemo dažnio signalams.

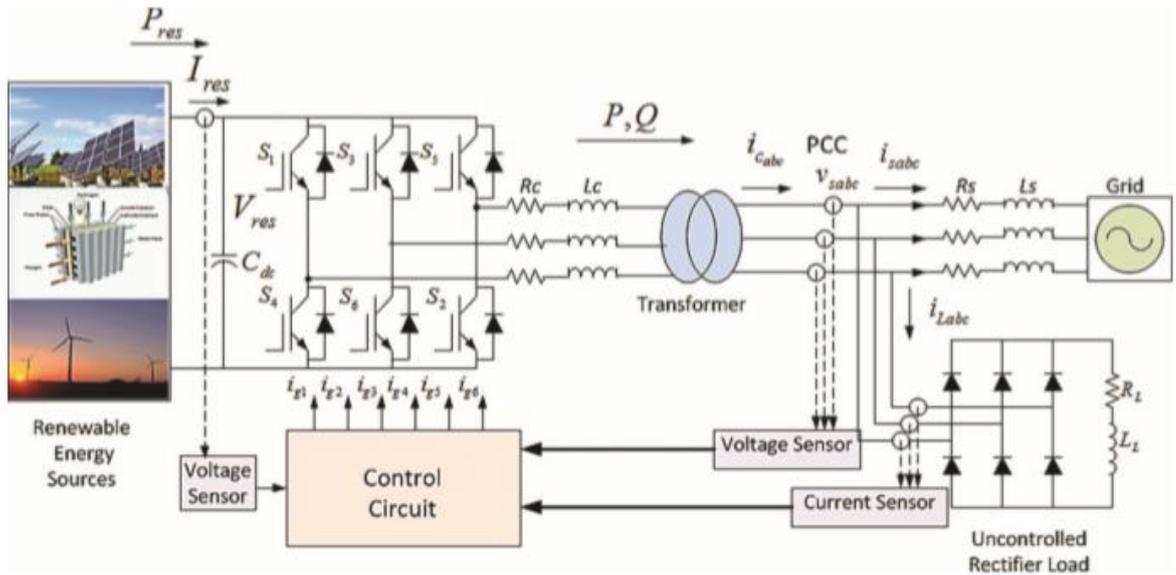
$$X_L = 2\pi f L \quad (2)$$

čia X_L – induktyvinė varža; f – sistemos dažnis; L – induktyvumas.

Kadangi kondensatorius veikia atvirkščiai, tai rezistorių išdėstymas atvirkščias RC ir RL filtro grandinėmis. Taigi, remiantis tuo, anksčiau minėtas RL grandis efektyviai veikia kaip žemo dažnio filtras. Jis blokuoja aukštų dažnių signalus ir praleidžia žemų dažnių signalus be kliūčių.

Pastaraisiais metais buvos sukurtos įvairios technologijos kompensuoti netiesinių elementų harmonikas ir reaktyviąją galią pavyzdžiui: šuntinis aktyviosios galios filtras (SAPF) pagrįstas srovės impulsų pločio moduliavimu (PWM) ir įtampos šaltiniu (VSI) yra labai efektyvus metodas, net ir labai netiesinėms apkrovoms.

Siekiant sumažinti išlaidas ir padidinti efektyvumą, siūloma vieno etapo, trijų fazių paskirstytos generacijos sistema su aktyviąją filtracija [19],[20]. Siūlomą paskirstytos generacijos sistemą sudaro: paskirstytos generacijos šaltinis prijungtas prie tinklo per nuolatinės įtampos inverterį. Šiame metode inverteris kontroliuojamas taip, kad tiekėtų aktyviąją elektros energiją iš generacijos šaltinio į tinklą. Jei prijungta apkrova yra nelinejinė arba nesubalansuota, pateiktas metodas kompensuoja harmonikas ir disbalansą, net esant iškraipytoms įtampos tiekimo sąlygoms. Taigi, tinklo sąsajos inverteris yra veiksmingai naudojamas kompensuoti apkrovos reaktyviajai galiai, srovės disbalansui ir srovinėms harmonikoms, kad tiekiamą elektros energiją būtų kokybiška.



19 pav. Atsinaujinančios energijos konversijos su harmonikų filtravimu schema

19 paveiksle pavaizduota paskirstytos generacijos grandinė susidedanti iš atsinaujinančios energetikos šaltinio, susieto su tinklu per energijos kaupimo kondensatorių (C_{dc}). Induktyvinis filtras prijungtas kintamos įtampos pusėje. Aukštinantis transformatorius naudojamas paaukštinti įtampą prieš bendrą prijungimo tašką (PCC). Nekontroliuojamas diodinis lygintuvas, kaip netiesinė apkrova, yra prijungtas prie bendro prijungimo taško (PCC). Inverterio valdiklis skirtas kompensuoti apkrovos srovines harmonikas ir galios faktorių bei kontroliuoti elektros energijos tekėjimą iš paskirstytos generacijos šaltinio.

4. Modeliavimas

Centralizuotos ir išskastinio kuro pagrindu veikiančios tradicinės elektrinės kenčiančios nuo tolimojo perdavimo, mažo efektyvumo / patikimumo, didelės taršos ir energijos išteklių trūkumo, palaipsniui pakeičiamos paskirstytomis ir atsinaujinančiomis elektros energijos elektrinėmis. Didėjantis atsinaujinančių energijos šaltinių įsiskverbimas į įprastinę elektros sistemą skatina naujus iššūkius, tokius kaip: inercijos praradimas, mažas trumpojo jungimo santykis, energijos saugojimas ir salos režimas. Mikrotinklas (MG) yra vienas iš tinkamų atsakymų į šiuos iššūkius, susijusius su atsinaujinančiais energijos šaltiniais. MG metodas ne tik integruoja paskirstytos generacijos (DG) privalumus, bet ir suteikia naujų techninių būdų, kaip plačiai taikyti su tinklu sujungtą atsinaujinančios energijos gamybą. Pažanga galios elektronikoje leidžia panaudoti atsinaujinančią energiją ir tiekti elektrą į elektros tinklą. Nepaisant to, kartu su daugelio privalumų, kyla iššūkių dėl mikrotinklo patikimumo. Kai kurie techniniai MG iššūkiai yra stabilumo klausimai, perėjimo iš su tinklu sujungto darbo režimo į salos režimą, bei ilgas darbo laikas būnant salos režime. Taip pat yra tam tikrų stabilumo problemų dėl to, kad skirtingai nuo tradicinės elektros energijos sistemos, kurioje yra daug generatorių, MG sistemoje daugiausiai elektros energijos gamina atsinaujinantys šaltiniai. Šie atsinaujinantys ištekliai yra integruojami į tinklą naudojant galios elektroniką, kuri dažniausiai yra mažiau inertiška ir sukelia problemų elektros energijos sistemos stabilumui. Siekiant įveikti šią stabilumo problemą, valdymo architektūra turi suteikti dinamišką sprendimą ir reaguoti į MG pakitimus.

4.1. Valdymo metodai

Inverterių veikimas, yra labai svarbus, kai vertinama galios kokybė kaip pagrindinis MG elementas. Inverteris leidžia įdiegti pažangius valdymo sprendimus, kurie pagerintų elektros sistemos veikimą MG [21].

Inverteriai, naudojamas kaip tarpė atsinaujinančių energijos šaltinių sujungimui su MG, naudojamas valdyti aktyvios ir reaktyviosios galios srautą savarankiškai. Jis gali būti prijungtas prie MG, bet kuriame iš trijų režimų, kurie yra:

- tinklą maitinantis inverteris;
- tinklą formuojantis inverteris.

Tinklą maitinantis inverteris yra valdomas pagal aktyvios ir reaktyviosios galios (PQ) valdymo strategija. Inverteris yra srovės valdomas įtampos šaltinis, skirtas valdyti gaminamos elektros energijos kiekį (aktyvų ir reaktyvų) į tinklą. Kai kuriuose literatūros šaltiniuose jie taip pat vadinami tinklo konverteriais. Tinklą maitinantys inverteriai neturi galimybės valdyti tinklo įtampos ir dažnio.

Tinklą formuojantis inverteris kontroliuojamas, kaip įtampos šaltinius, nustatantis fazės kampą ir išėjimo įtampos dydį. Inverteris paprastai maitinamas nuolatinės srovės šaltiniu, turinčiu energijos kaupimo galimybes, kaip ir baterijų atveju. Jame taip pat gali būti įtampos ir dažnio reguliavimo tinklo palaikymo funkcija. Jie naudojami įtampai ir dažniui nustatyti, kai MG veikia salos režime.

Paprastai inverteriai naudojami sujungti paskirstytuosius generatorius lygiagrečiai su tinklu ar kitais šaltiniais, tačiau gali būti naudinga, kad inverteriai toliau veiktų savarankišku režimu, kai kiti šaltiniai tampa neprieinami, kad būtų tiekiama energija kritinėms apkrovoms. Su baterijomis ar kitais energijos kaupimo įrenginiais prijungti keitikliai taip pat turi būti dvikrypčiai, kad šie energijos kaupimo įrenginiai būtų įkrauti ir iškrauti.

Prijungto prie tinklo režimas

Šiuo veikimo režimu keitiklis sujungia maitinimo šaltinį lygiagrečiai su kitais šaltiniais, kad tiektų energiją į vietines apkrovas ir galbūt tiektų energiją į pagrindinį tinklą. Lygiagrečiai prijungtų generatorių prijungimą reglamentuoja nacionaliniai standartai. Standartuose reikalaujama, kad prijungtas generatorius neturėtų reguliuoti ar priešintis įtampai bendrojo prijungimo taške ir, kad į tinklą tiekiamą srovė turėtų būti aukštos kokybės ir neviršytų bendro harmoninio iškraipymo ribos (THD).

Praktikoje, konverterio išėjimo srovė arba įtampa turi būti sinchronizuota su tinklu, kuris paprastai pasiekiamas naudojant *phase-locked-loop* arba tinklo įtampos nulinį kryžminį aptikimą. Standartuose taip pat reikalaujama, kad įterptieji generatoriai, įskaitant elektros energijos keitiklius, turi turėti apsaugos nuo salos režimo funkciją, kad jie būtų atjungti nuo bendro prijungimo taško, kai netenka tinklo galios. Yra daug salos režimo aptikimo metodų, dažniausiai – pagal dažnio kitimo greitį (RoCoF).

Salos režimas

Gali būti pageidautina, kad konverteris toliau teiktų galia į kritinę vietinę apkrovą, kai pagrindinį tinklą atjungia, pavyzdžiui, apsaugos nuo salos režimo sistema. Šiame autonominiame režime konverteris turi išlaikyti pastovią įtampą ir dažnį, nepriklausomai nuo apkrovos disbalanso ar srovės kokybės, kuri gali būti labai iškreipta, jei apkrova yra netiesinė

Gali kilti situacija, kai mikrotinklas, atjungtas nuo pagrindinio tinklo, kai du ar daugiau galios elektroninių keitiklių persijungia į savarankišką režimą, kad būtų tiekiamą energija. Tokiu atveju, šie keitikliai turi dalintis apkrova teisingai. Norint, kad lygiagrečiai prijungtiems konverteriams, veikiant savarankišku režimu, būtų tinkamai paskirstoma apkrova, reikia papildomos kontrolės. Yra keletas lygiagrečių jungčių metodų, kurie gali būti suskirstyti į dvi kategorijas: dažnio ir įtampos kritimo metodas ir *slave-master* metodas, kai vienas iš keitiklių veikia kaip pagrindinis, nustatant dažnį įtampa ir komunikuoja su kitais keitikliais tam, kad išdalinti apkrovas.

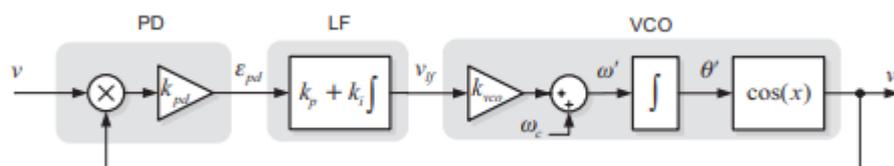
Baterijų krovimo režimas

Mikrotinkle reikalingos baterijos ar kiti energijos kaupikliai, kad būtų galima valdyti trikdžius ir greitai keisti apkrovą. Kitaip tariant, energijos kaupimas reikalingas tam, kad būtų galima pritaikyti galimą energijos gamybą ir paklausą, taip pagerinant mikrotinklo patikimumą. Tada, galios elektroninis keitiklis gali būti naudojamas kaip akumuliatoriaus įkroviklis.

4.2. Inverterių valdymo metodai metodai

Tam, jog inverteris būti sinchronizuotas su tinklu, naudojama fazės užrakto kilpa (PLL)

Elementariojo PLL bloko funkcinė schema pateikta 20 paveiksle.



20 pav. Fazės užrakto kilpos blokinė schema

Jei šiai sistemai pateiktas įvesties signalas yra :

$$v = V\sin(\theta) = V\sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

čia v – įvesties signalas; θ – pradinis fazės kampas; ω – kampinis dažnis; t – laikas.

O signalas, kurį generuoja įtampos kontrolės osciliatorius (VCO):

$$v' = \cos(\theta') = V\sin(\omega' t + \varphi') \quad (4)$$

čia v' – signalas kurį generuoja VCO; θ' – pradinis fazės kampas (VCO); ω' – kampinis dažnis(VCO).

Kadangi PD klaidos signalo aukšto dažnio komponentai bus nufiltruoti LF, nuo šiol bus svarstomas tik žemo dažnio sąlyga. Todėl, atliekant šią analizę, reikia atsižvelgti į PD klaidos signalą

$$\varepsilon_{pd} = \frac{Vkp_d}{2} \sin((\omega - \omega')t + (\varphi - \varphi')) \quad (5)$$

čia ε_{pd} – klaidos signalas; Vkp_d – įvesties signalas po daugybos su k_{pd} coef.; φ' – fazės kampas (VCO); ω' – kampinis dažnis (VCO); φ – fazės kampas; ω – kampinis dažnis.

Jei daroma prielaida, kad VCO yra gerai sureguliuotas į įvesties dažnį, t.y. su $\omega' \approx \omega$, fazės klaidos signalo DC terminą nurodo:

$$\varepsilon_{pd} = \sin(\varphi - \varphi') \quad (6)$$

čia ε_{pd} – klaidos signalas; φ – fazės kampas; φ' – fazės kampas (VCO).

Galima pastebėti, kad daugiklis PD sukuria netiesinį fazės nustatymą dėl sinusoidinės funkcijos. Tačiau, kai fazės paklaida yra labai maža, ty kai $\varphi' \approx \varphi$, daugiklio koeficientas PD gali būti linearizuojamas netoli tokio veikimo taško, nes $\sin(\varphi - \varphi') \approx \sin(\theta - \theta') \approx (\theta - \theta')$. Todėl, kai PLL yra užrakintas, atitinkamą fazės klaidos signalo terminą pateikia pagal formulę (7).

$$\varepsilon_{pd} = \frac{Vkp_d}{2} = \sin(\theta - \theta') \quad (7)$$

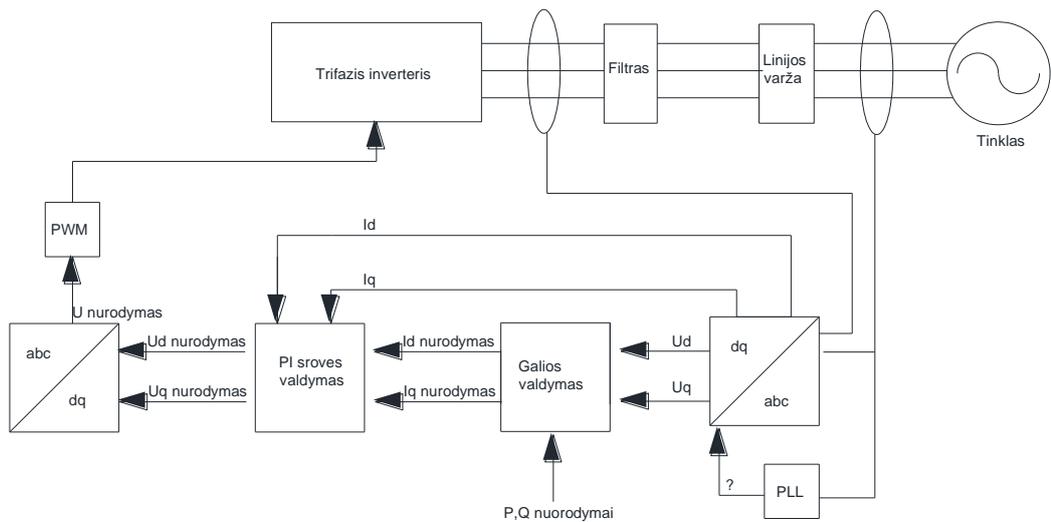
čia Vkp_d – įvesties signalas po daugybos su k_{pd} coef.; ε_{pd} – klaidos signalas; θ – pradinis fazės kampas; θ' – pradinis fazės kampas (VCO).

4.2.1. P/Q valdymas

P/Q kontrolė naudojama tada, kai mikrotinklas yra prijungtas prie tinklo. Prijungto prie tinklo režimu, mikrotinklo įtampa ir dažnis tampa lygus tinklo įtampai ir dažniui, todėl valdikliui nebereikia naudoti V-f kontrolės strategijos. Tada, inverteris stengiasi maksimaliai išnaudoti savo galią ir tiekti į tinklą

maksimalų galios kiekį tam, kad įvykdytų saulės elektrinių ekonomines užduotis, kaip aprašyta straipsniuose [30] ir [31]. Moksliniame straipsnyje [32], pasiūlyti du skirtingi valdymo metodai, bet šiuo atveju bus naudojamas metodas su MPPT, kuris tieks maksimalia aktyviają galią į tinklą, todėl reaktyviosios galios bus nedaug.

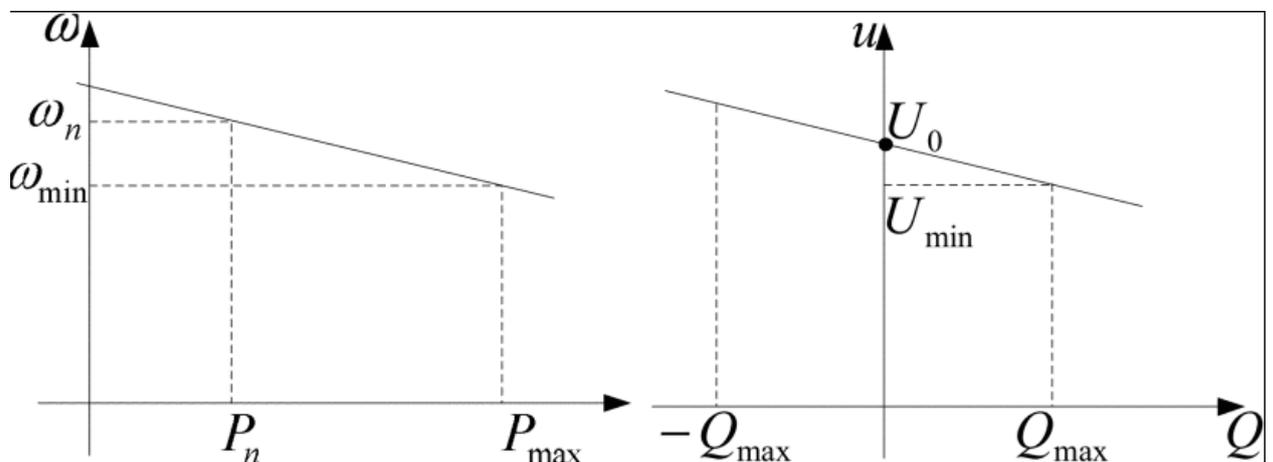
Reguliuojant įtampą, generatoriaus išėjimo įtampos amplitudė ir fazė yra reguliuojama siekiant sureguliuoti galios srautus. Aktyviosios ir reaktyviosios galios valdikliai sugeneruoja nurodymą kampui tarp srovės ir įtampos. P/Q valdymo metodika parodyta 21 paveiksle.



21 pav. P/Q valdymo metodika

4.2.2. Droop valdymas

Šis metodas veikia pagal įtampos ir dažnio kritimo charakteristiką, kaip pateikta 22 paveiksle. Kai aktyviosios energijos vartojimas padidėja, padidėja ir kampinis dažnis, o padidėjus reaktyviosios galios poreikiui krenta sistemos įtampa.



22 pav. Droop valdymo principas

$$\omega = \omega_n M \cdot (P - P_n) \quad (8)$$

čia ω – kampinis greitis; ω_n – nominalus kampinis greitis; M – droop valdymo koef. apskaičiuojamas pagal formulę (11); P – aktyvioji galia; P_n – nominalioji aktyvioji galia.

$$u = U_0 - N \cdot Q \quad (9)$$

čia u – įtampa; U_0 – nominali įtampa; N – droop valdymo koef. apskaičiuojamas pagal formulę (10); Q – reaktyvioji galia.

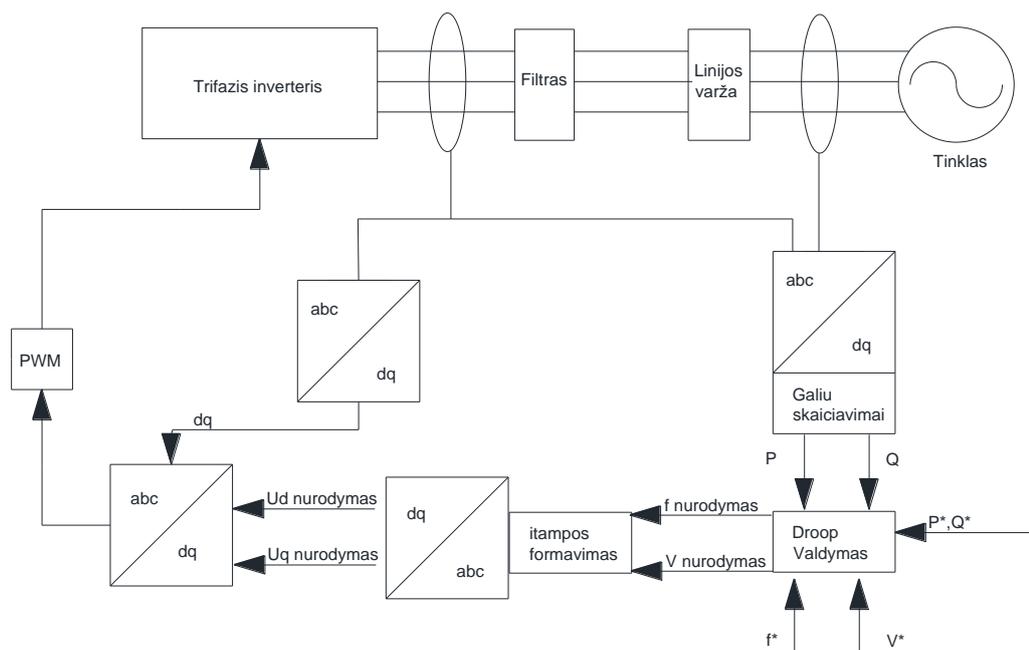
$$N = \frac{\Delta U}{Q_{max}} \quad (10)$$

čia N – droop valdymo koef.; ΔU – didžiausias leistinas įtampos nukrypimas; Q_{max} – maksimali reaktyvioji galia.

$$M = \frac{\Delta \omega}{P_{max}} \quad (11)$$

čia M – droop valdymo koef.; $\Delta \omega$ – didžiausias leistinas dažnio nukrypimas; P_{max} – maksimali aktyvioji galia.

P_{max} ir Q_{max} yra maksimalios galios kurias inverteris gali tiekti. $\Delta \omega$ ir ΔU yra didžiausi leistini dažnio ir įtampos nukrypimai. N ir M droop valdymo koeficientai. ω_n ir U_0 yra nominalus dažnis ir nominali įtampa. ω_{min} ir U_m atitinkamai yra minimalus dažnis ir minimali įtampa, o kai reaktyvioji galia padidėja, terminalo įtampa krenta [23]. Valdymo metodo principinė schema pateikta 23 paveiksle.



23 pav. Droop valdymo metodas

4.2.3. Vac/f valdymas

Šis kontrolės metodas naudojamas, kai inverteris yra prijungtas prie AC sistemos su pasyvia apkrova arba asinchroniniu generatoriumi. Iš funkcinės pusės žiūrint, vienas pagrindinių skirtumų tarp šio metodo ir ne salos kontrolės metodo, tai yra fazės nurodymo kilmė. Ne salos režimu, fazės kampo nurodymas ateina iš PLL bloko, o salos režimu, fazės kampo nurodymas sugeneruojamas vidinio osciliatoriaus.

4.3. Inverterio modeliavimas EMTP aplinkoje

Elektros energetikos srityje, sisteminiai vienetai yra išraiška, kaip apibrėžto bazinio vieneto santykis. Skaičiavimai yra supaprastinti, nes iš vienos pusės išreikšti kiekiai nesikeičia, kai jie persiunčiami iš vienos transformatoriaus pusės į kitą. Tai gali būti ryškus privalumas elektros energijos sistemos analizėje, kai susiduriama su daug transformatorių. Žinant bazinę įtampą ir pilnutinę galia, perskaičiuojami visi dydžiai į bazinę išraišką.

$$I_{baz.} = \frac{S_{baz.}}{V_{baz.}\sqrt{3}} = 1 \text{ s. } v. \quad (12)$$

čia $I_{baz.}$ – bazinė srovė; $S_{baz.}$ – bazinė pilnutinė galia; $V_{baz.}$ – bazinė įtampa.

$$Z_{baz.} = \frac{V_{baz.}}{I_{baz.}\sqrt{3}} = \frac{V_{baz.}^2}{S_{baz.}} = 1 \text{ s. } v. \quad (13)$$

čia $I_{baz.}$ – bazinė srovė; $S_{baz.}$ – bazinė pilnutinė galia; $V_{baz.}$ – bazinė įtampa; $Z_{baz.}$ – bazinė varža.

$$Y_{baz.} = \frac{1}{Z_{baz.}} = 1 \text{ s. } v. \quad (14)$$

čia $Y_{baz.}$ – bazinis laidis; $Z_{baz.}$ – bazinė varža.

Klarko transformacija

Elektros inžinerijoje alfa–beta transformacija ($\alpha\beta\gamma$), tai matematinė transformacija, naudojama supaprastinti trifazę sistemą. Konceptualiai ji yra panaši į dq0 transformaciją. Vienas labai naudingas transformacijos pritaikymas – tai trijų fazių inverterių erdvinių vektorių moduliavimo valdymo pagrindinio signalo generavimas. Alfa–beta transformacija pritaikyta trijų fazių sistemos srovėms:

$$i_{abc}(t) = T^{-1}i_{\alpha\beta\gamma}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \\ i_{\gamma}(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

čia i_{abc} – trijų fazių srovė; $i_{\alpha\beta\gamma}$ – transformuota trifazė srovė.

Atvirkštinė transformacija:

$$i_{i_{\alpha\beta\gamma}}(t) = T^{-1}i_{abc}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

čia i_{abc} – trijų fazių srovė; $i_{\alpha\beta\gamma}$ – transformuota trifazė srovė.

Aukščiau minėta Clarke transformacija išsaugo elektrinių kintamųjų, kuriems ji taikoma, amplitudę.

$$i_a(t) = \sqrt{2}I\cos\theta(t) \quad (17)$$

čia I – efektinė srovės vertė.

$$i_b(t) = \sqrt{2}I\cos(\theta(t) - \frac{2}{3}\pi) \quad (18)$$

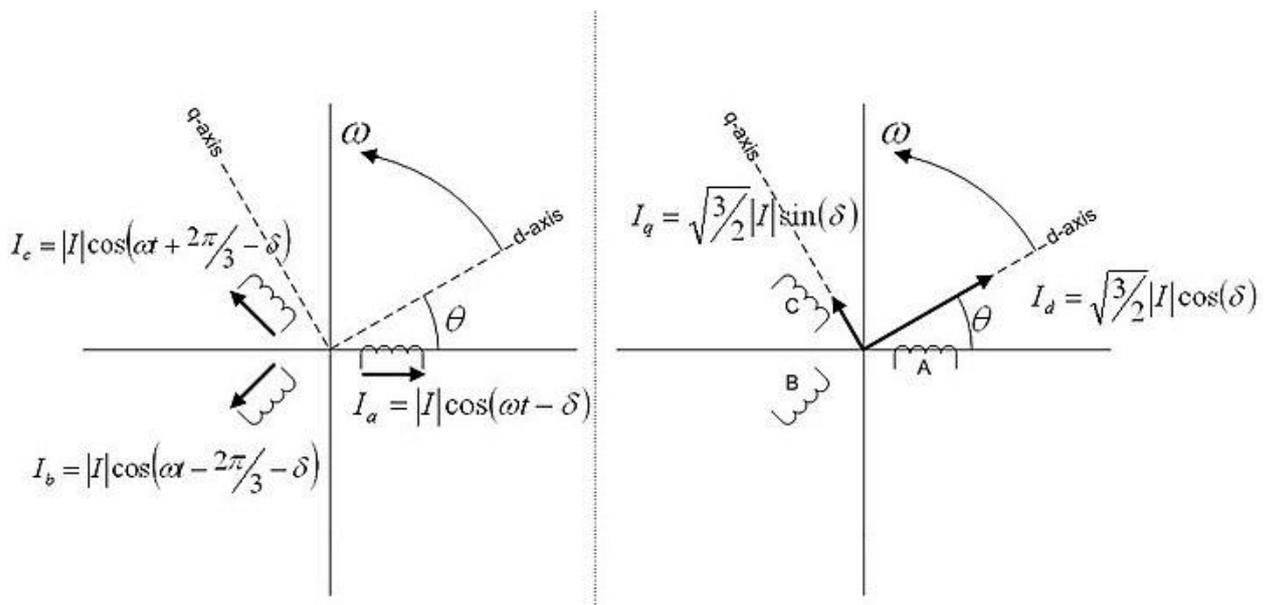
čia I – efektinė srovės vertė.

$$i_c(t) = \sqrt{2}I\cos(\theta(t) + \frac{2}{3}\pi) \quad (19)$$

čia I – efektinė srovės vertė.

Dq0 transformacija

Dq0 transformacija yra būdas supaprastinti analizę – paversti trijų fazių reikšmes į vektoriaus atskaitos rėmą arba trijų elementų matricą. Dq0 transformacija yra Clarko transformacijos ir Parko transformacijos produktas, kurį 1929 m. Pirmą kartą pasiūlė Robert H. Park



24 pav. Dq0 konversija

Dq0 transformacija dažnai naudojama elektrotechnikos kontekste su trifazėmis grandinėmis. Pavyzdžiui, dq0 transformacija dažnai naudojama norint supaprastinti trifazių sinchroninių mašinų analizę arba supaprastinti trifazių inverterių valdymo skaičiavimus. Analizuojant trifazių sinchroninių mašinų transformaciją, paverčia trijų fazių statoriaus ir rotoriaus kiekius į vieną, rotacinę atskaitos rėmą (pavyzdys pateiktas 24 paveiksle).

Parko transformacija

Parko transformacijos q ašis yra priekyje d ašies:

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

čia θ – kampas tarp fazės A ir q ašies.

Atvirkštinė transformacija:

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

čia θ – kampas tarp fazės A ir q ašies.

Klarko ir Parko transformacijos kartu naudojamos pilnai ABC į dq0 transformacijai:

$$K_{CP} = K_P \cdot K_C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

čia θ – kampas tarp fazės A ir q ašies.

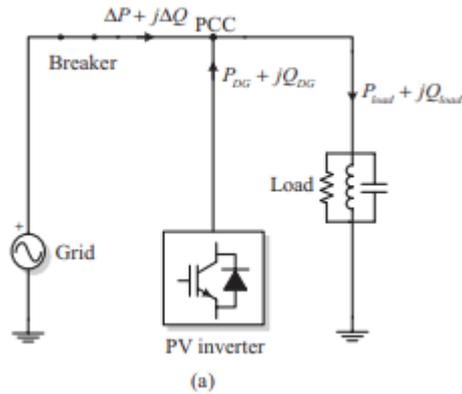
Atvirkštinė transformacija:

$$K_{CP}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

čia θ – kampas tarp fazės A ir q ašies.

Salos režimo detektavimas

Didesnė paskirstytų energijos gamybos sistemų (DPGS) skvarba, apimanti tiek tradicines, tiek atsinaujinančios energetikos technologijas, keičia elektros energijos sistemos veidą. Aiškiai vystosi aktyvūs tinklai, kurie gali apimti didelį kiekį energijos saugojimo sistemų ir galėtų veikti salos režimu, ir galėtų būti prijungti per lanksčias perdavimo sistemas. Šis sudėtingas scenarijus turės skirtingus reikalavimus DPGS įrenginiams, priklausomai nuo jų dydžio ir jų integravimo su elektros sistema lygio. Taigi, tinklo būklės stebėjimas visuomet bus esminis DPGS įrenginių kiekviename lygmenyje, bruožas. Galimos salos režimo nustatymas visada bus svarbus elektros energijos sistemoje, turinčioje didelį kiekį DPGS. 25 paveiksle parodytas tipinis PV inverterio sujungimas su tinklu ir vietine apkrova:



25 pav. Tipinis PV inverterio sujungimas su tinklu ir vietine apkrova

čia ΔP yra aktyvioji tinklo galia; ΔQ yra tinklo reaktyvioji galia; P_{DG} yra aktyvioji PV galia; Q_{DG} yra reaktyvioji PV galia; P_{load} – apkrovos aktyvioji galia; Q_{load} yra apkrovos reaktyvioji galia. Taigi yra galios balansas:

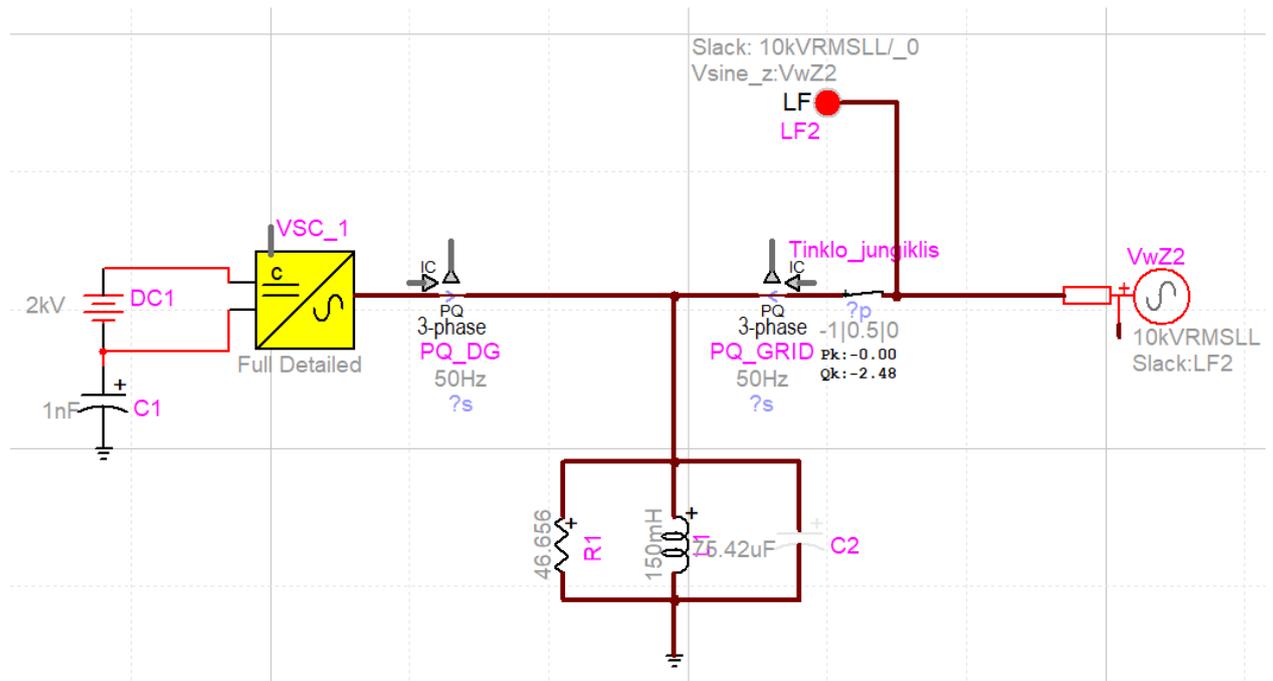
$$P_{apkrova} = P_{Gamyba} + \Delta P \quad (24)$$

čia $P_{apkrova}$ – aktyvioji sistemos apkrova; P_{Gamyba} – aktyviosios galios generacija; ΔP – aktyviosios galios skirtumas tarp aktyviosios apkrovos ir vietinės generacijos.

$$Q_{apkrova} = Q_{Gamyba} + \Delta Q \quad (25)$$

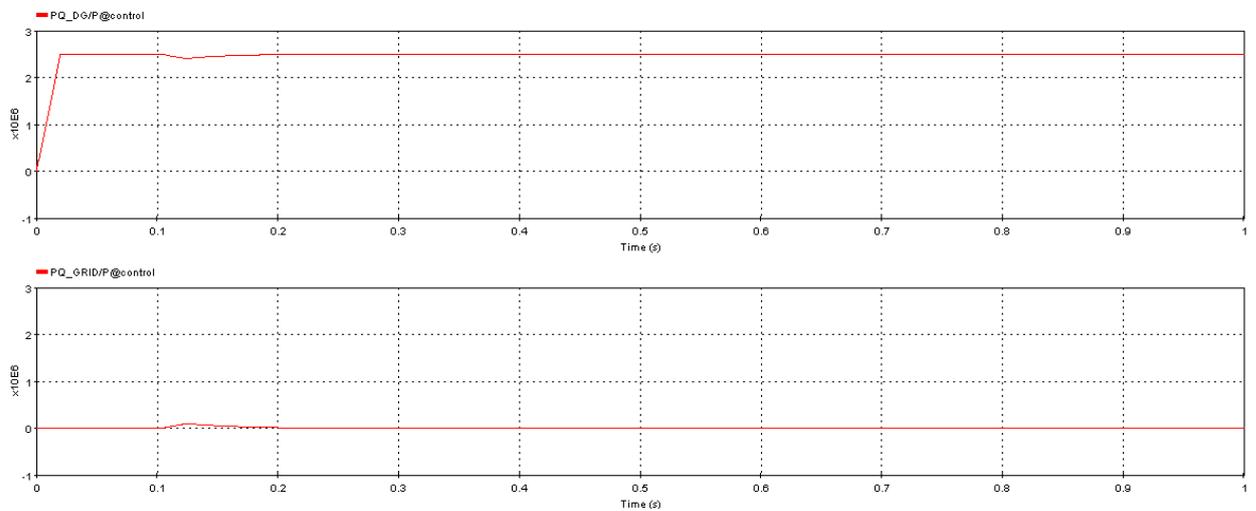
čia $Q_{apkrova}$ – reaktyvioji sistemos apkrova; Q_{Gamyba} – reaktyviosios galios generacija; ΔQ – reaktyviosios galios skirtumas tarp aktyviosios apkrovos ir vietinės generacijos.

Jei $P_{apkrova} = P_{generacija}$ vadinasi – nėra aktyviosios galios neatitikimo tarp mikrotinklo generacijos ir apkrovos, ir iš tinklo energija nėra tiekiamas, jei $Q_{apkrova} = Q_{generacija}$ vadinasi nėra reaktyviosios galios neatitikimo tarp mikrotinklo generacijos ir apkrovos, ir iš tinklo energija nėra tiekiamas.



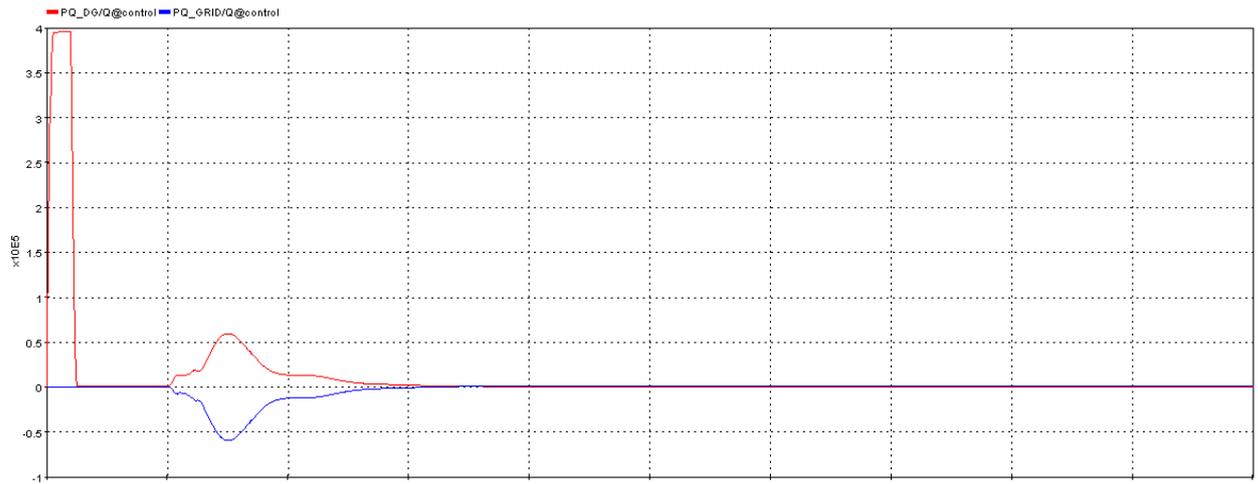
26 pav. 1 modelis EMTP aplinkoje

Bandymui panaudotas modelis kuris pateiktas 26 paveiksle. Naudojant 2 kV nuolatinės įtampos šaltinį ir 2,5 MW inverterį, prie jo prijungiama 2,5 MW apkrova. Įvykdžius simuliaciją, matoma, jog iš tinklo nėra tiekiami, nei aktyvioji, nei reaktyvioji galia.



27 pav. Inverterio ir tinklo generavimo grafikas

27 paveiksle matoma, jog neskaitant pereinamojo proceso, visa energija imama iš inverterio (grafikas viršuje), o ne iš tinklo (grafikas apačioje).



28 pav. Inverterio ir tinklo reaktyviosios galios generavimo grafikas

28 paveiksle matoma, jog reaktyvioji galia, neskaitant pereinamojo proceso, nenaudojama nei iš inverterio pusės, nei iš tinklo. Sistemos veikimas atjungimo metu priklausys nuo ΔP ir ΔQ tuo metu, kai jungiklis atsidarys, kad suformuotų salą. Jei RLC apkrovos rezonansinis dažnis yra toks pat, kaip ir tinklo linijos dažnis, tiesinė apkrova negeneruoja arba nevartoja reaktyviosios galios. Aktyvi galia yra tiesiogiai proporcinga įtampai. Atjungus tinklą, aktyvi apkrovos galia yra priversta būti tokia pati, kaip ir PV sistemos sukurta galia; taigi tinklo įtampa keičiasi į:

$$V' = KV \quad (26)$$

čia V' – įtampos pokytis; K – koeficientas tarp gamybos ir apkrovos apskaičiuojamas pagal formulę (27); V – nominali įtampa.

$$K = \sqrt{\frac{P_{gamyba}}{P_{apkrova}}} \quad (27)$$

čia K – koeficientas tarp gamybos ir apkrovos; P_{gamyba} – aktyviosios energijos gamyba; $P_{apkrova}$ – aktyvioji apkrova.

Kai $P_{gamyba} > P_{apkrova}$, padidėja įtampos amplitudė ir, jei $P_{gamyba} < P_{apkrova}$, sumažėja amplitudė. Reaktyvioji galia yra susijusi su įtampos dažniu ir amplitude:

$$Q'_{apkrova} = Q'_{gamyba} = \left(\frac{1}{\omega' L} - \omega' C \right) V'^2 \quad (28)$$

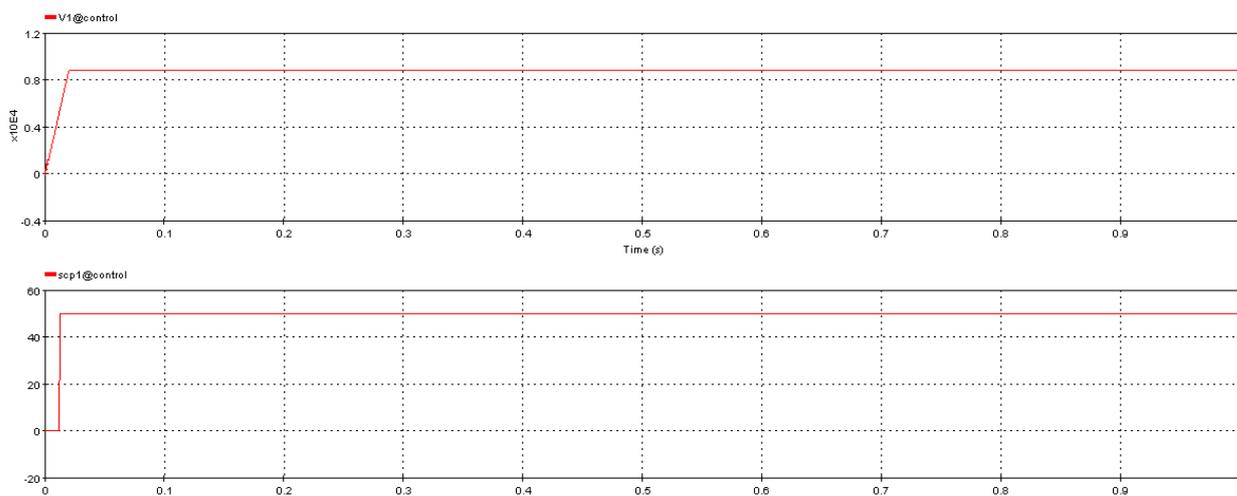
čia $Q'_{apkrova}$ – reaktyvioji apkrova; Q_{gamyba} – reaktyviosios energijos gamyba; ω' – kampinio greičio pokytis; L – induktyvumas; C – talpumas; V' – įtampos pokytis.

Tokiu būdu galima apskaičiuoti kampinio dažnio pulsacijas salos režime:

$$\omega' = \frac{-\frac{Q'_{gamyba}}{CV'^2} + \sqrt{\left(\frac{Q'_{gamyba}}{CV'^2} \right)^2 + \frac{4}{LC}}}{2} \quad (29)$$

čia Q_{gamyba} – reaktyviosios energijos gamyba; ω' – kampinio dažnio pulsacija salos režime; L – induktyvumas; C – talpumas; V' – įtampos pokytis.

Kadangi $\Delta P = \Delta Q = 0$, tai nustačius modelį taip, kad po 0,5 sekundės tinklas atsijungtų, grafikuose nėra matoma jokių pasikeitimų. Grafikai pateikti 29 paveiksle.



29 pav. Įtampos ir dažnio grafikai, kai $\Delta P = \Delta Q = 0$

Aukštos įtampos tinkluose, kai aktyviosios galios vartojimas yra didesnis nei generavimas, krenta dažnis, o kai reaktyviosios galios vartojimas didesnis už generavimą – krenta įtampa. Ši principą galima paaiškinti žiūrint į galios perdavimą tarp dviejų linijos dalių, jungiančių inverterį ir tinklą.

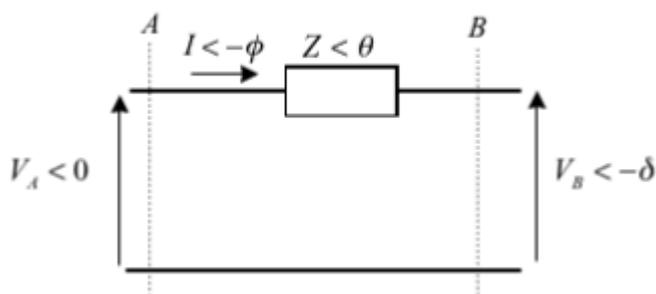
Toliau, pateikta formulė galioja tiek vienfazėms, tiek subalansuotoms trifazėms sistemoms. Atsižvelgiant į 30 paveiksle pateiktą schemą, aktyviosios ir reaktyviosios galios, tekančios į A sekcijos liniją, yra:

$$P_A = \frac{V_A^2}{Z} \cos\theta - \frac{V_A V_B}{Z} \cos(\theta + \delta) \quad (30)$$

čia P_A – aktyvioji galia taške A; V_A – įtampa taške A; V_B – įtampa taške B; Z – pilnutinė varža; θ – galios faktorius.

$$Q_A = \frac{V_A^2}{Z} \sin\theta - \frac{V_A V_B}{Z} \sin(\theta + \delta) \quad (31)$$

čia Q – reaktyvioji galia taške A; V_A – įtampa taške A; V_B – įtampa taške B; Z – pilnutinė varža; θ – galios faktorius.



30 pav. Principinė linijos blokinė schema

$$P_A = \frac{V_A}{R^2 X^2} [R(V_A - V_B \cos \delta) + X V_B \sin \delta] \quad (32)$$

čia P_A – aktyvioji galia taške A; V_A – įtampa taške A; V_B – įtampa taške B; R – aktyvioji varža; X – reaktyvioji varža; δ – fazės kampas.

$$Q_A = \frac{V_A}{R^2 X^2} [-R V_B \sin \delta + X(V_A - V_B) \cos \delta] \quad (33)$$

čia Q_A – reaktyvioji galia taške A; V_A – įtampa taške A; V_B – įtampa taške B; R – aktyvioji varža; X – reaktyvioji varža; δ – fazės kampas.

Kai inverteris prijungiamas prie tinklo, per induktyvinio pobūdžio linijas $X \gg R$, tai aktyvioji varža gali būti nepaisoma, todėl formulės gali būti supaprastintos:

$$\delta \approx \frac{X P_A}{V_A V_B} \quad (34)$$

čia P_A – aktyvioji galia taške A; V_A – įtampa taške A; V_B – įtampa taške B; X – reaktyvioji varža; δ – fazės kampas.

$$V_A - V_B \approx \frac{X P Q_A}{V_A} \quad (35)$$

čia Q_A – reaktyvioji galia taške A; V_A – įtampa taške A; V_B – įtampa taške B; X – reaktyvioji varža; δ – fazės kampas.

$X \gg R$ atveju mažas kampas δ ir mažas skirtumas $V_A - V_B$, lygtys (34) ir (35) rodo, kad galios kampas daugiausia priklauso nuo aktyviosios galios, o įtampos skirtumas daugiausia priklauso nuo reaktyviosios galios. Kitaip tariant, kampas δ arba dažnis f gali būti valdomas reguliuojant aktyviąją galią P, o inverterio įtampa V_A yra valdoma per reaktyviąją galią Q.

$$f - f_0 = -k_p (P - P_{gamyba}) \quad (36)$$

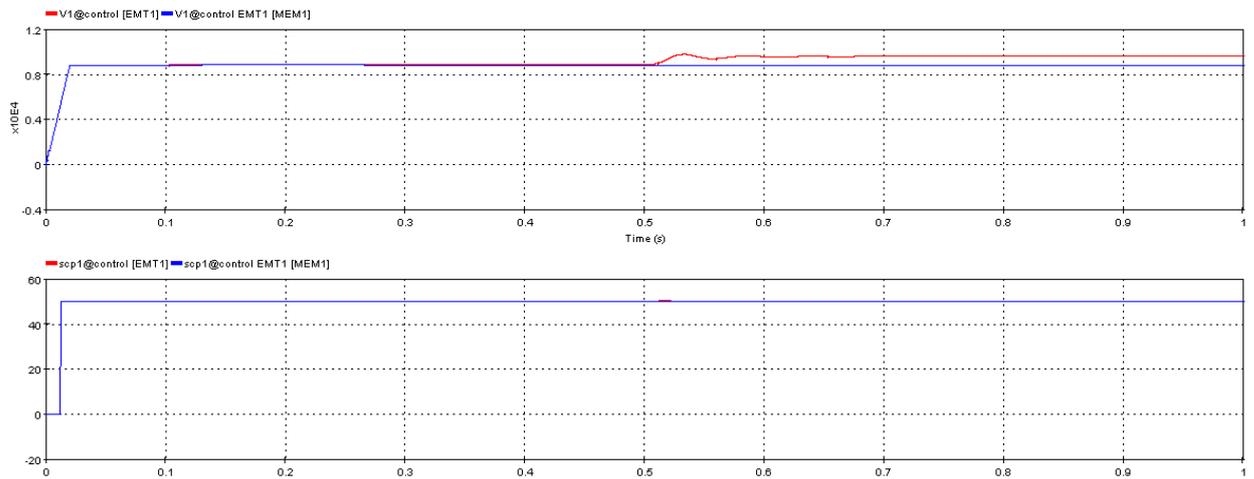
čia f_0 – vardinis dažnis; P_{gamyba} – mikrotinklo generuojama galia; k_p – aktyviosios galios koef..

$$V - V_0 = -k_q (Q - Q_{gamyba}) \quad (37)$$

čia V_0 – vardinė įtampa; Q_{gamyba} – mikrotinklo generuojama reaktyvioji galia; k_q – reaktyviosios galios koef..

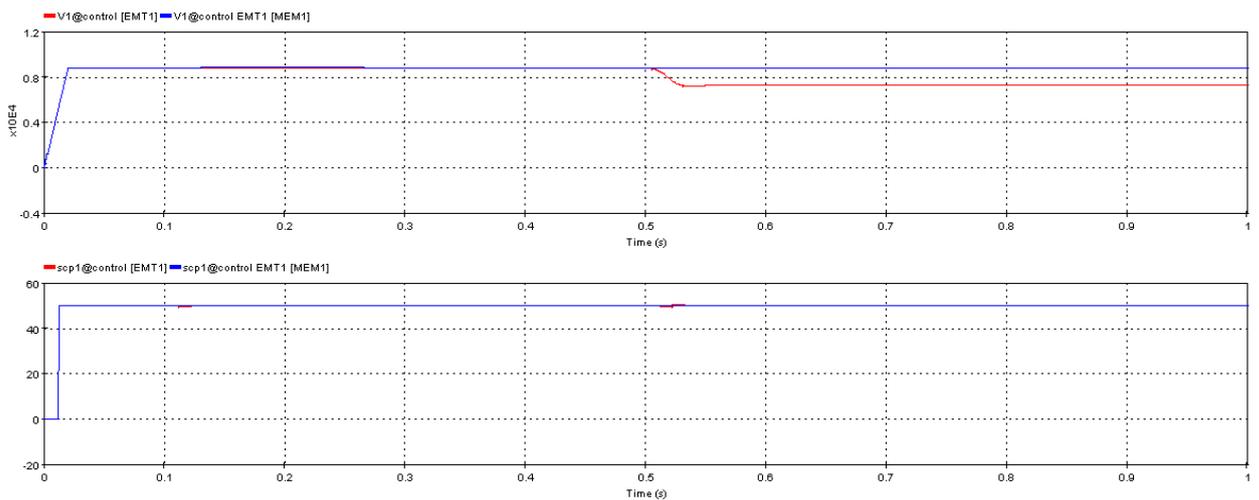
f_0 ir V_0 yra atitinkamai vardinis dažnis ir įtampa, o P_0 ir Q_0 yra aktyviųjų ir reaktyviųjų DG generuojama galia. Mikrotinklas suras darbo tašką, atitinkantį V, f sąlygas, kuris priverčia DG blokus maitinti P, Q priklausomai nuo priimtų koeficientų k_p ir k_q . Žemos įtampos tinkluose vyrauja aktyvioji varža, todėl varža R nebegali būti nepaisoma, nes aktyvioji galia P įtakoja įtampą, o reaktyvioji galia įtakoja dažnį.

Padidinus aktyviąją apkrovos varžą nuo 46.656 Ω iki 55 Ω , matoma, kaip po atjungimo momento pradeda kilti įtampa, nes generacija yra didesnė nei vartojimas. (grafike mėlyna kreivė išsaugota nuo simuliacijos kai apkrova atitinka gamybą, tam jog matytųsi skirtumas). Grafikai pateikti 31 paveiksle.



31 pav. Įtampos ir dažnio grafikai, kai aktyvioji apkrova mažesnė, nei generacija

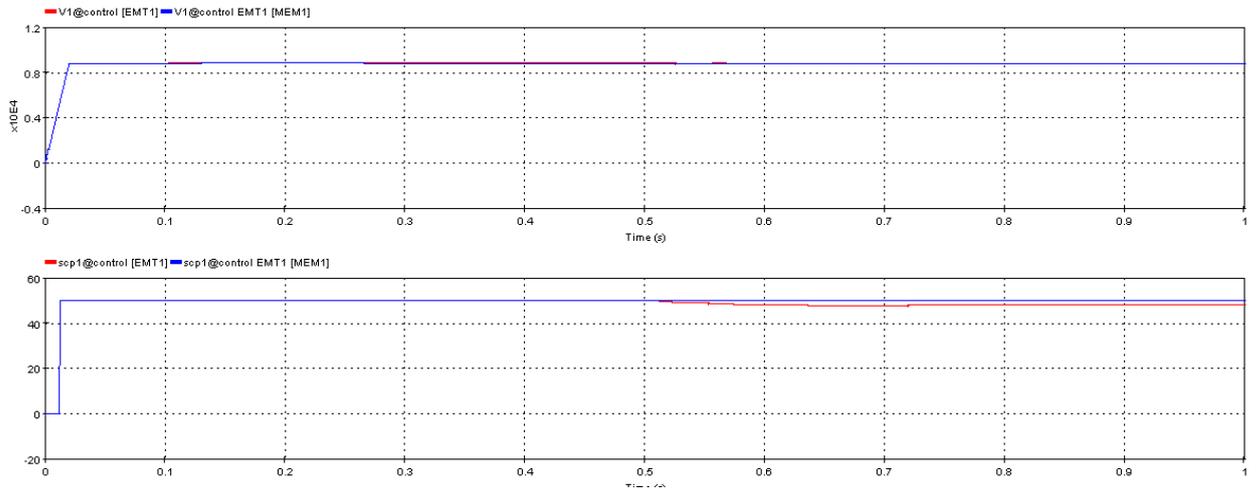
Sumažinus apkrovos aktyviąją varžą nuo 46.656Ω iki 35Ω , kai vartojimas didesnis, nei gamyba tai įtampa krenta lyginant su subalansuotu režimu. Įtampos ir dažnio grafikas pateiktas 32 paveiksle.



32 pav. Įtampos ir dažnio grafikai, kai aktyvioji apkrova didesnė, nei generacija

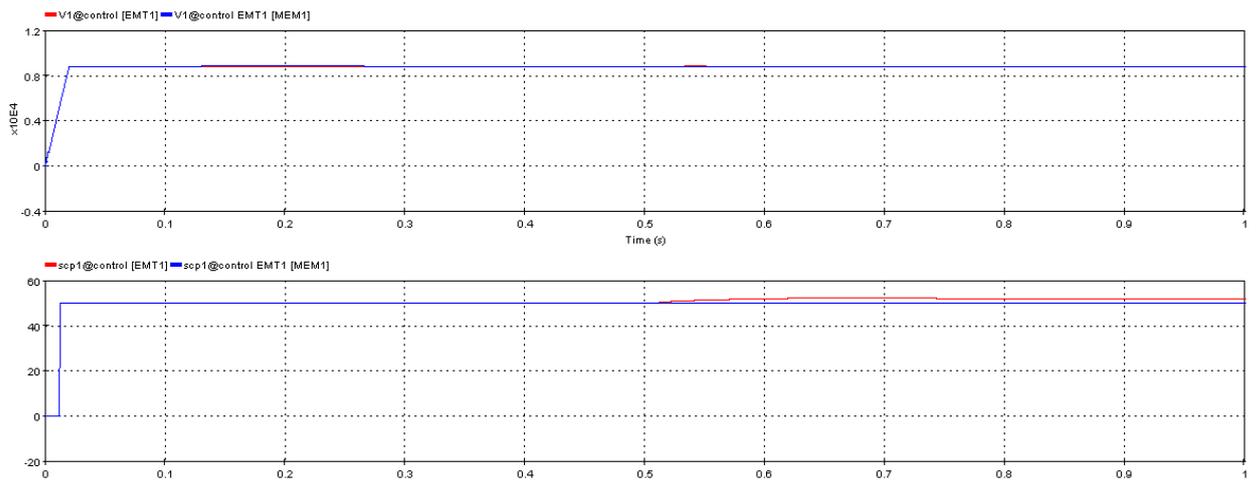
Abiem atvejais matoma, jog aktyvioji apkrova neturi įtakos dažniui, aktyvioji apkrova įtakoja tik įtampą.

Sugražinus aktyviąją varžą į subalansuotą režimą, modeliuojama keičiant induktyvumą iš 134.28 mH į 145 mH . Sumodeliavus grafike matoma, kad induktyvumo padidinimas turi įtakos dažnio kritimu, kai tinklas atsijungia.



33 pav. Įtampos ir dažnio grafikai, kai induktyvinė apkrova didesnė, nei generacija

Modeliuojant atvirkščią variantą kai induktyvumas sumažinamas iki 125 mH, 33 paveiksle matoma jog po atjungimo dažnis pakyla, o įtampai tai irgi neturi reikšmės.



34 pav. Įtampos ir dažnio grafikai, kai induktyvinė apkrova mažesnė, nei generacija

Kitaip, nei aukštos įtampos paskirstymo tinklas, mikrotinklas gali būti pagrįstas linijomis kurios pagrindas yra aktyvioji varža ($R \gg X$). Todėl 4.2.2. skyrelyje paminėtas dažnio ir įtampos valdymo principas, neveikia žemos įtampos tinkle. 7 lentelėje pateikiami tipiniai žemos įtampos, vidutinės įtampos ir aukštos įtampos linijų parametrai.

7 lentelė. Tipiniai žemos įtampos, vidutinės įtampos ir aukštos įtampos linijų parametrai.

Linijos tipas	R(Ω /km)	X(Ω /km)	R/X
Žemos įtampos linija	0,642	0,083	7,7
Vidutinės įtampos linija	0,161	0,190	0,85
Auštos įtampos linija	0,06	0,191	0,31

Todėl supaprastinimai, padaryti formuojant (34) ir (34) lygtis iš (32) ir (33), nėra tinkami žemos įtampos tinkle, kai $R \gg X$ tuomet (32) ir (33) lygtis galima paprastinti į lygtis (38) ir (39), kur priimama jog reaktyvioji varža X yra maža todėl $\sin(\varphi) = \varphi$, o $\cos(\varphi) = 1$ [15].

$$P_A = \frac{V_A^2}{R} - \frac{V_A V_B}{R} \quad (38)$$

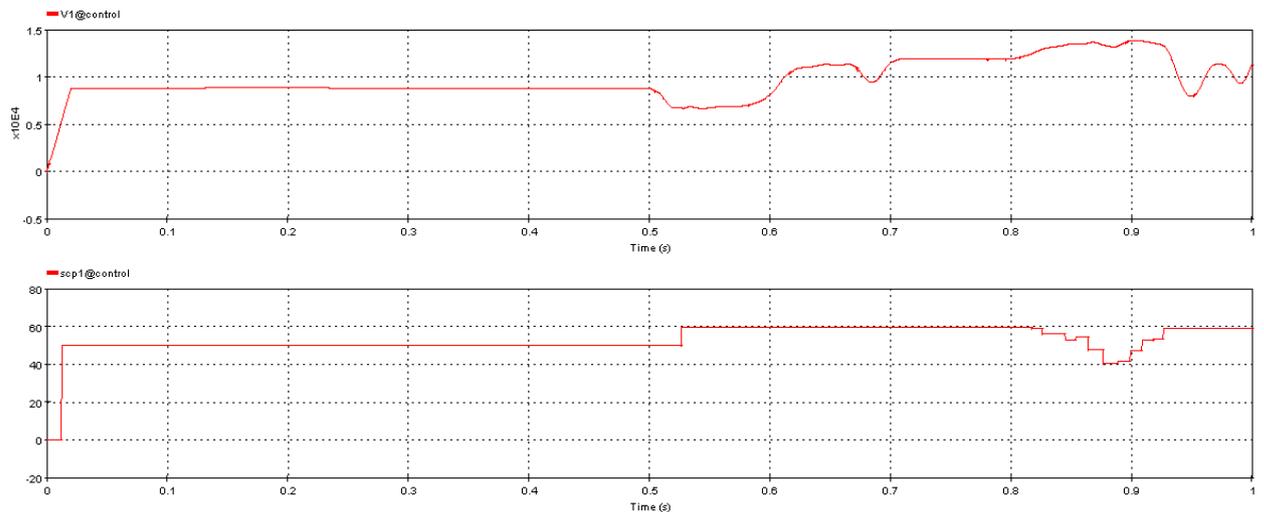
čia P_A – aktyvioji galia taške A; V_A – įtampa taške A; V_B – įtampa taške B; R – aktyvioji varža.

$$Q_A = - \frac{V_A V_B}{R} \varphi \quad (39)$$

čia Q_A – reaktyvioji galia taške A; V_A – įtampa taške A; V_B – įtampa taške B; R – aktyvioji varža; φ – galios kampas.

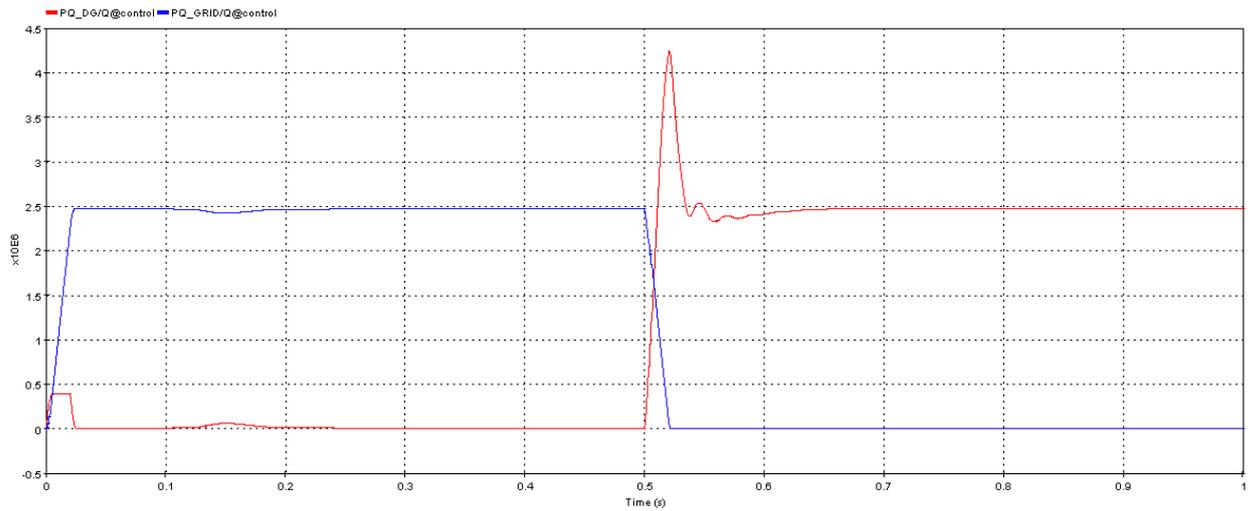
Iš (38) ir (39) lygčių matyti, kad linijoms $R \gg X$ su mažu galios kampu φ ir mažu įtampos skirtumu $U_A - U_B$, įtampos skirtumas $U_A - U_B$ daugiausia priklauso nuo aktyviosios galios P , o galios kampas φ ir dažnis f daugiausia priklauso nuo reaktyviosios galios Q . Dėl šios priežasties tradicinis dažnio *droop* valdymas per aktyviosios galios srautą ir įtampos *droop* valdymas per reaktyviają galią, kuris naudojamas aukštesnėse įtampos lygiuose, neveikia mikrotinkle. Vietoj to, įtampos valdymas turėtų būti vykdomas keičiant aktyviosios galios srautą, o dažnio valdymas turėtų vykti keičiant reaktyviosios galios srautą.

Pakeičiamas modelis panaikinant talpuminę varžą, tam jog iš tinklo būtų vartojama 2,48 MVar reaktyvioji galia. Simuliacijos rezultatas pateiktas 35 paveiksle, matoma, jog iš tinklo yra vartojama reaktyvioji galia, todėl tinklui atsijungus – mikrotinklas tampa nestabilus.



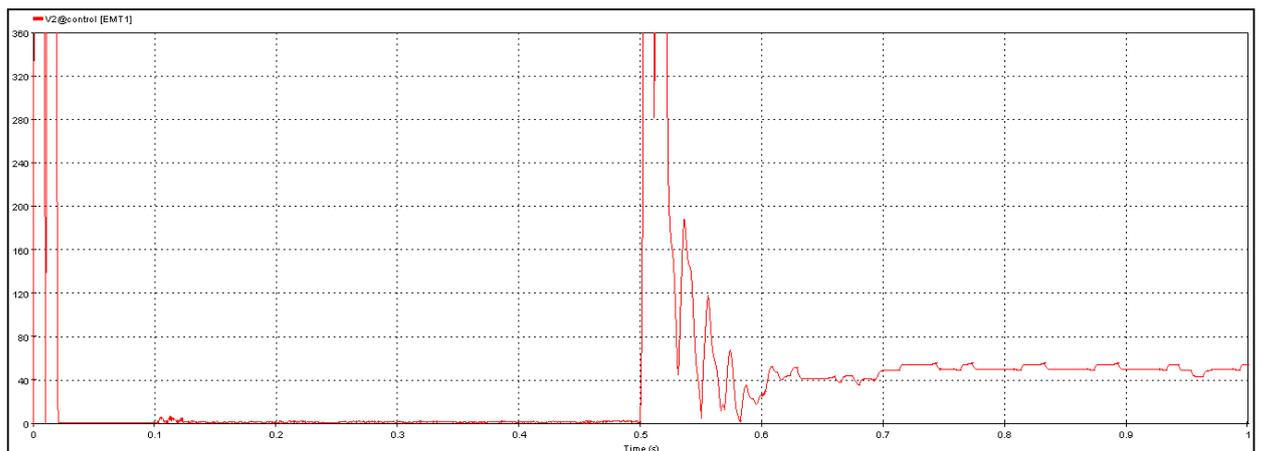
35 pav. Įtampos ir dažnio grafikas inverteriui generuojant 2,5 MW, o apkrova 2,5 MW ir 2,48 MVar

Norint, kad atsijungus tinklui ir tinklas išliktu stabilus, reikia pakeisti inverterio valdymą iš P kontrolės į V/F kontrolę. Ir inverterio valdymo būdas pakeičiamas iš P kontrolės į „Reference from input bundle“, taip inverteris bus valdomas išoriniu būdu.



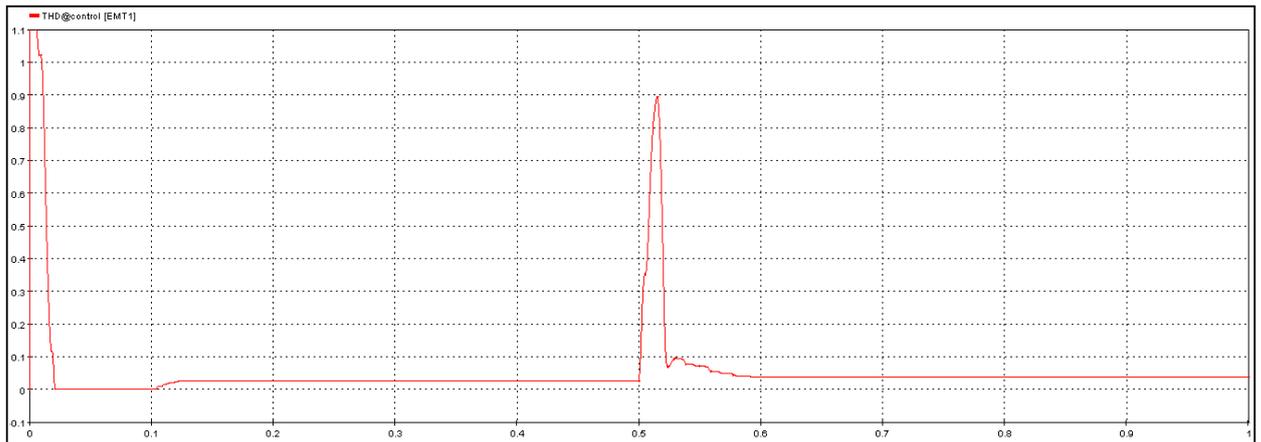
38 pav. Inverterio ir tinklo reaktyvios galios generavimo grafikas

38 paveikslo grafike matoma, kad po tinklo atjungimo inverteris pradeda generuoti reikiamą reaktyviosios galios kiekį. Inverterio modeliavimo tipas pakeičiamas iš Average į Full detailed tam jog pasirodytų bendras harmonikų disbalansas ir neigiamos sekos įtampos sukeltos inverterio, kai prarandamas tinklas 39 paveiksle matoma kaip pasikeičia neigiama seka po tinklo atjungimo.



39 pav. Neigiamos sekos grafikas prieš ir po tinklo atjungimo

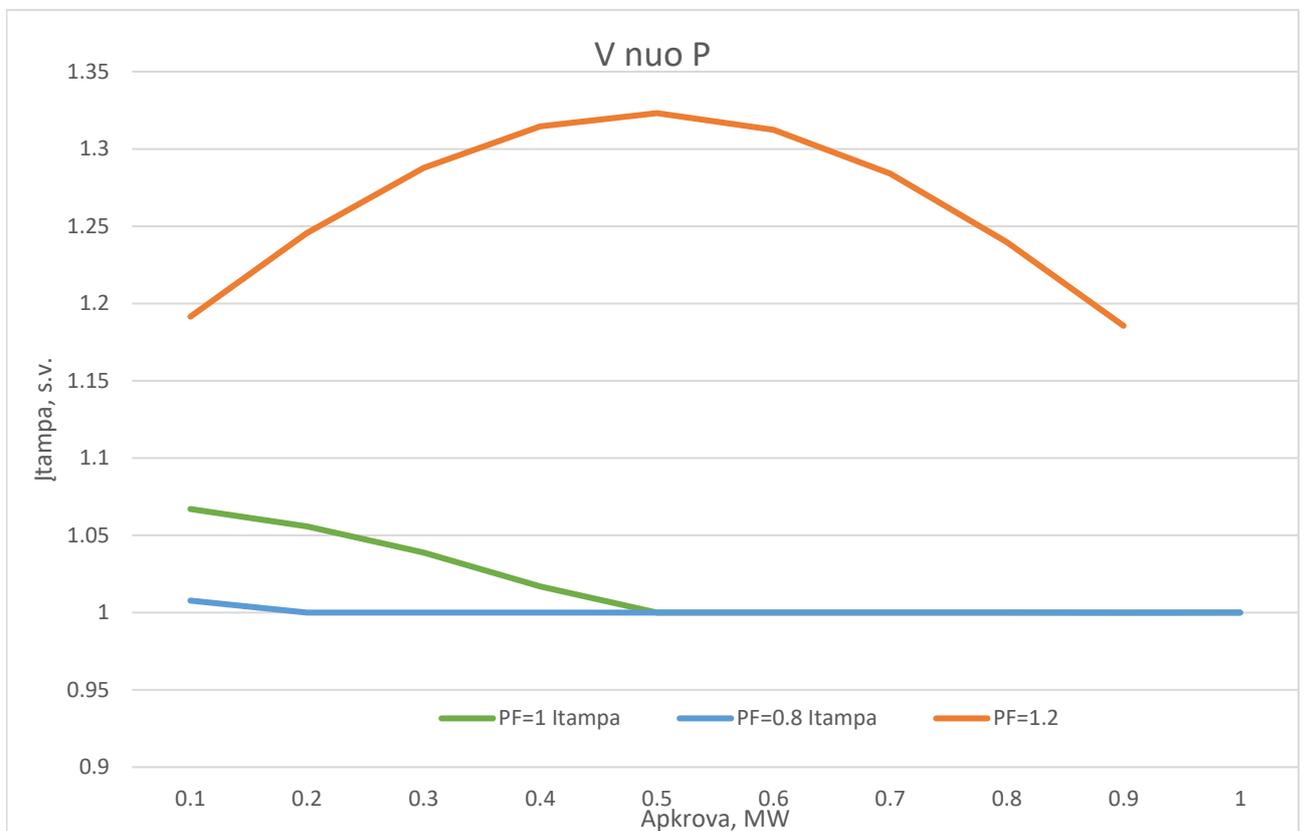
Taip pat padidėja ir bendras įtampinių harmonikų disbalansas nuo 2,6proc iki 3,8 proc. Įtampinių harmonikų disbalanso pokytis pateiktas 40 paveiksle.



40 pav. Bendro harmonikų disbalanso grafikas prieš ir po tinklo atjungimo

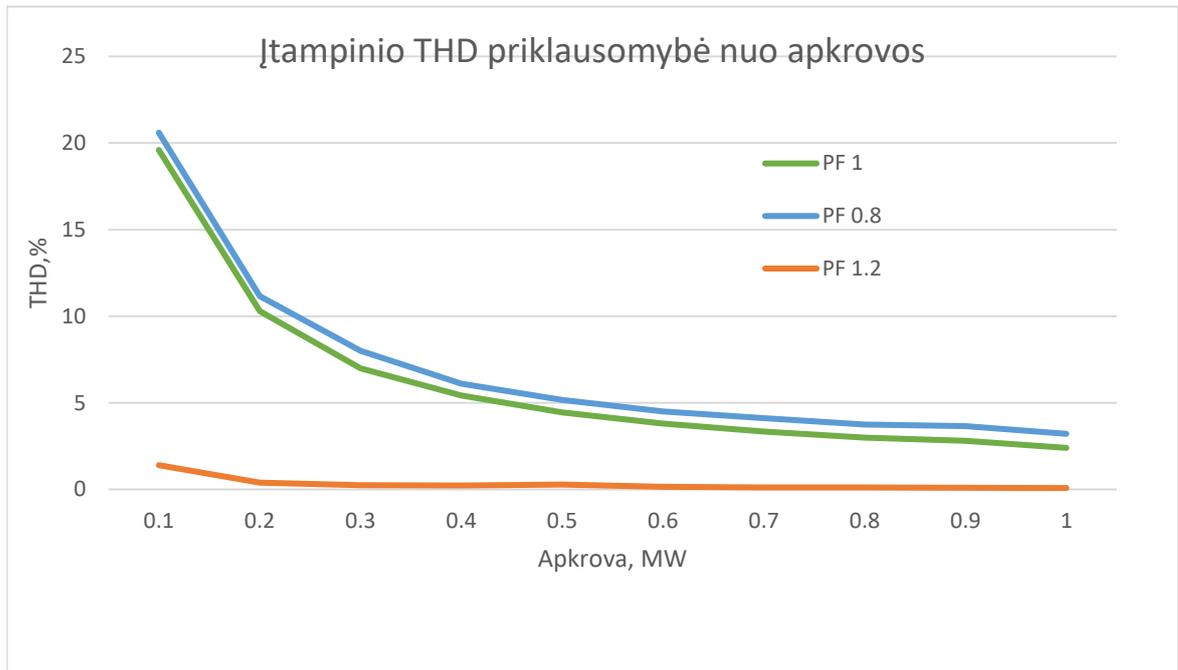
Sunkiausias salos režimo aptikimo atvejis yra aktyviosios ir reaktyviosios galios pusiausvyros sąlyga, kurioje nėra amplitudės ir dažnio pokyčių, t.y. $\Delta P = 0$ ir $\Delta Q = 0$. NDZ plotą galima apskaičiuoti iš aktyviosios ir reaktyviosios galios neatitikimų ir nustatyti įtampos dažnio ir amplitudės slenksčio vertes. Tikimybė, kad ΔP ir ΔQ pateks į OUV / OUF NDZ (įtampos ir dažnio viršijimas / sumažėjimas), gali būti reikšminga. Dėl šio susirūpinimo standartiniai apsaugos nuo įtampos ir dažnio apsaugos įtaisai paprastai laikomi nepakankama apsauga nuo salos režimo, todėl jie turi būti derinami su kitais salos režimo aptikimo metodais.

4.3.1. 1MW inverterio charakteristikos



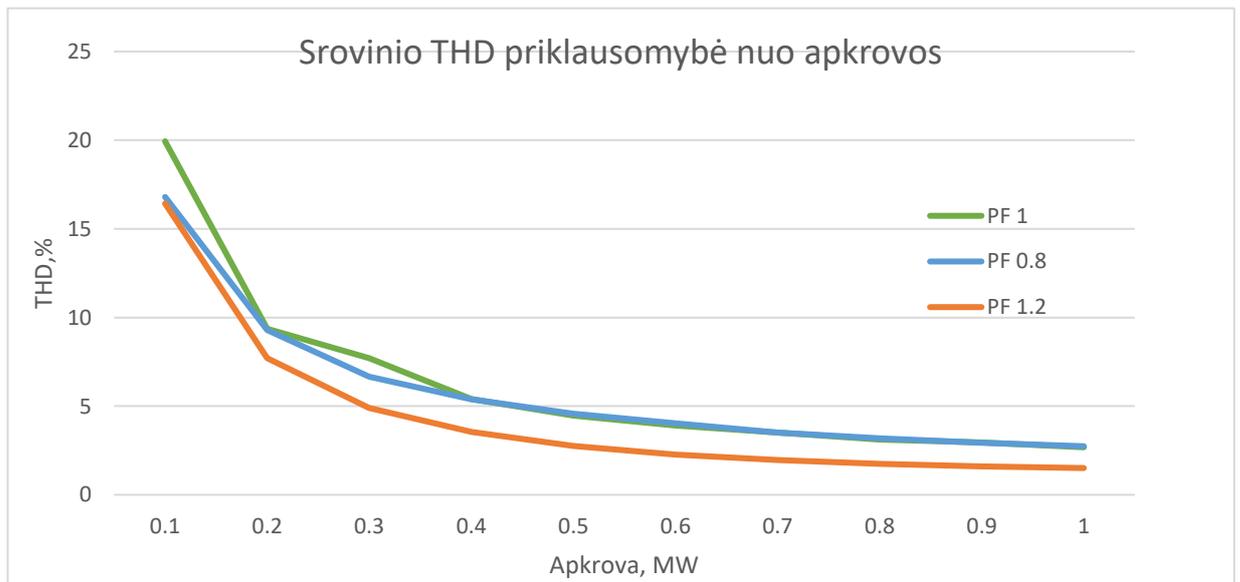
41 pav. Įtampos priklausomybė nuo apkrovos

41 pav. pateikta charakteristika, kaip Vac/f metodu dirbančio 1 MW galios inverterio įtampa kinta nuo apkrovos dydžio ir jos pobūdžio.



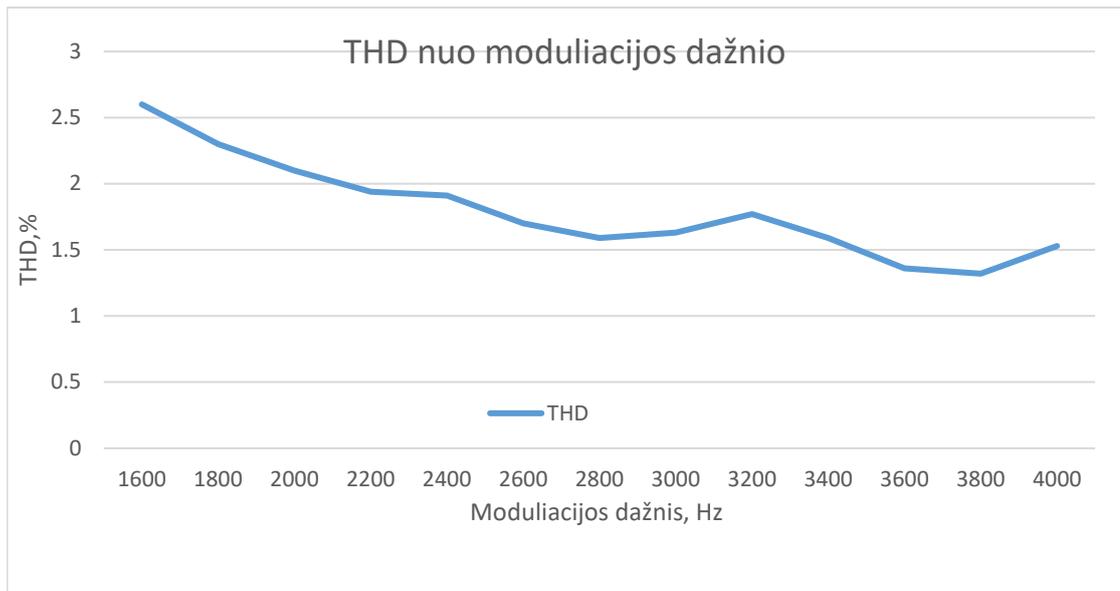
42 pav. Įtampinio THD priklausomybė nuo apkrovos

Sudaryta charakteristika, ir pateikta 42 paveiksle, kaip Vac/f metodu dirbančio 1 MW galios inverterio bendras harmonikų disbalansas kinta nuo apkrovos dydžio ir jos pobūdžio. 42 paveiksle matoma kaip talpuminė apkrova nufiltruoja harmoninius iškraipymus.



43 pav. Srovinio THD priklausomybė nuo apkrovos

43 paveiksle pateikta priklausomybė, kaip kinta bendras srovinių harmonikų disbalansas, kintant apkrovai.

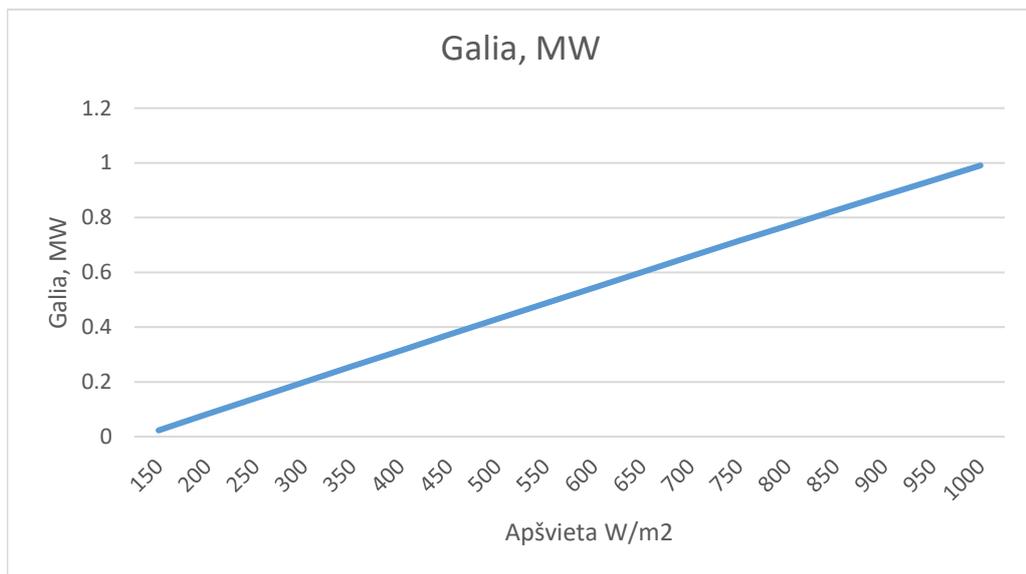


44 pav. THD priklausomybė nuo moduliacijos dažnio

44 paveiksle pateikta charakteristika kaip V_{ac}/f metodu dirbančio 1 MW galios inverterio bendras harmonikų disbalansas kinta naudojant skirtingą PWM moduliacijos dažnį.

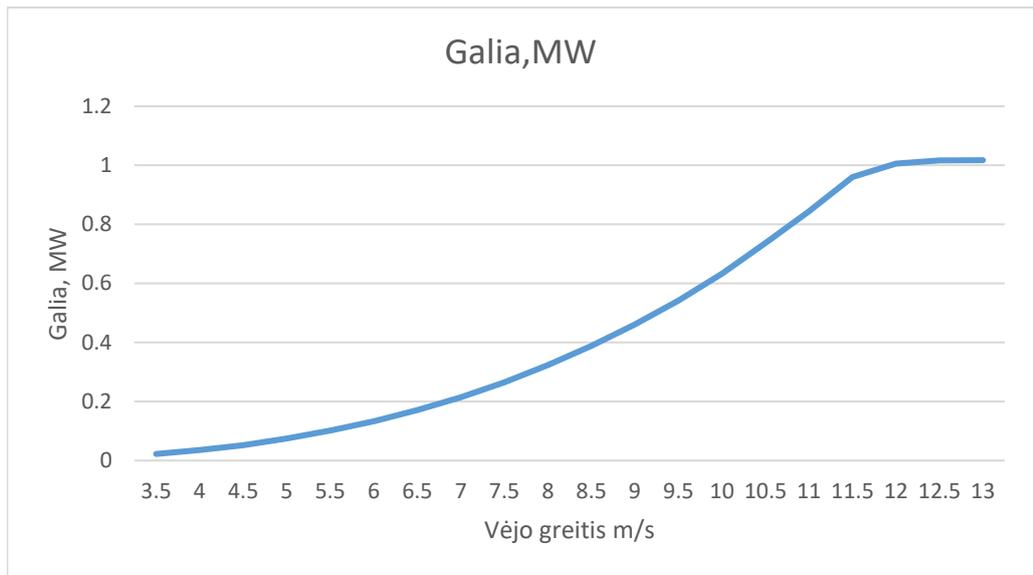
4.4. Mikrotinklo modeliavimas

Pereinamiesiems procesams tyrinėti naudota EMTP– RV programa. Sudarytas 1MW fotovoltinės elektrinės generacijos priklausomybės grafikas nuo saulės apšvietos ir pateiktas 45 paveiksle.



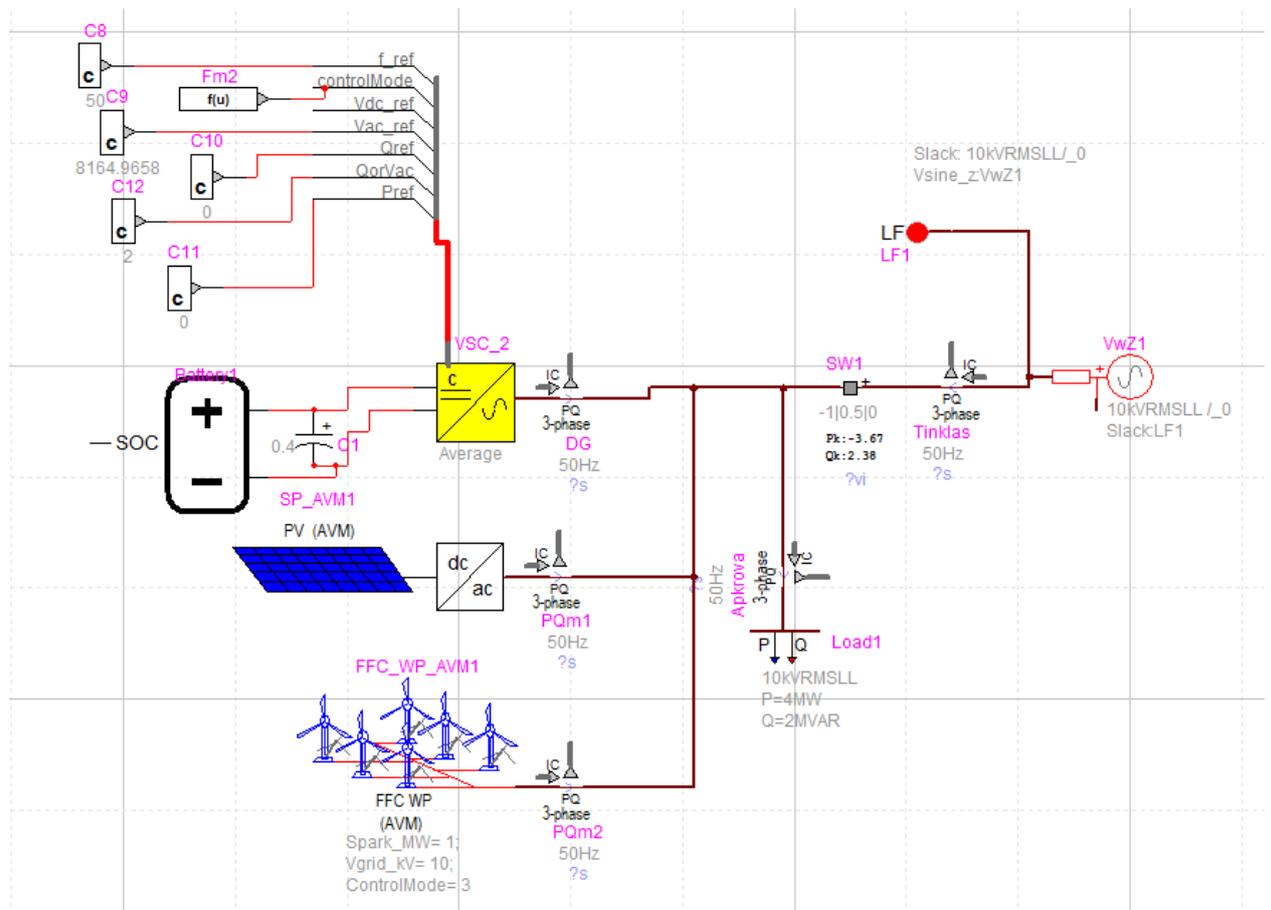
45 pav. PV elektrinės generavimo priklausomybė nuo apšvietos

Sudarytas 1MW vėjo elektrinės, generacijos priklausomybės nuo vėjo greičio, grafikas ir pateiktas 46 paveiksle.



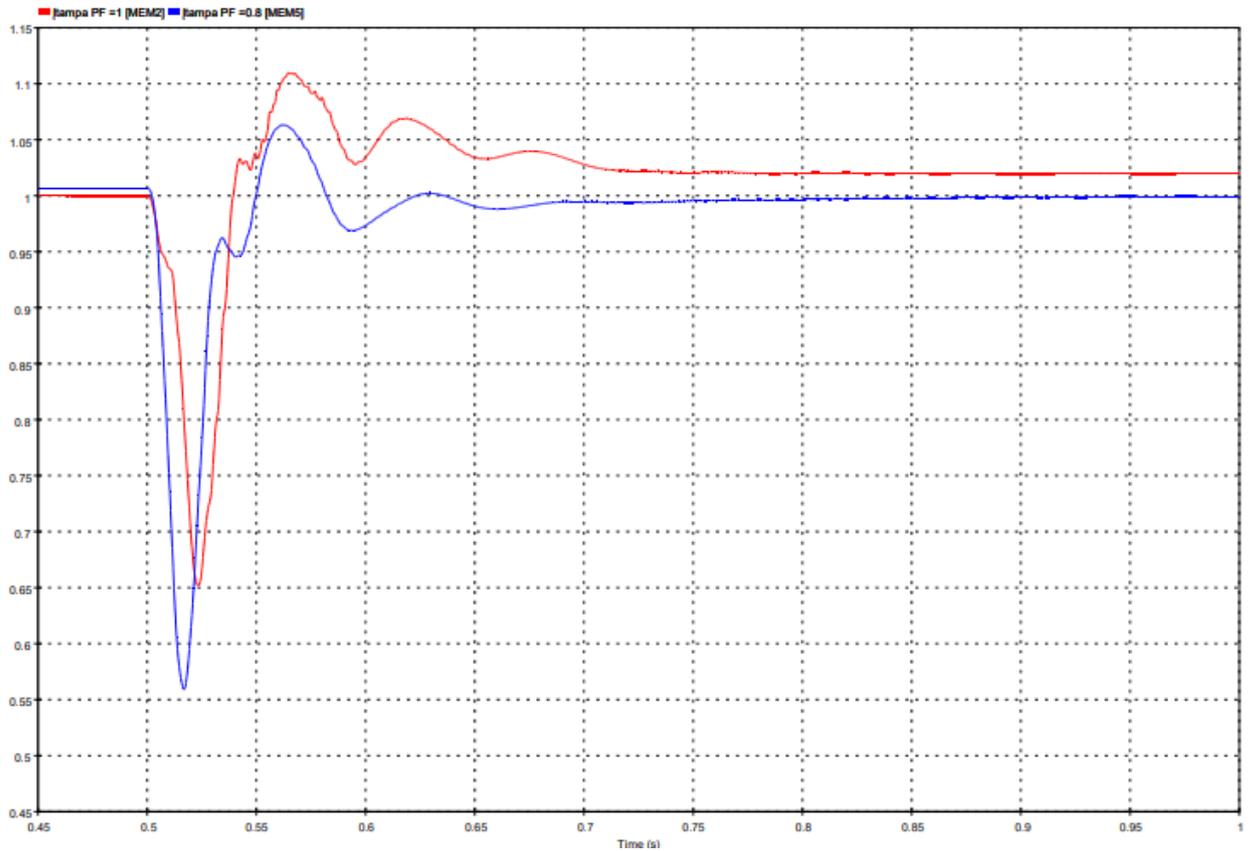
46 pav. Vėjo elektrinės generavimo priklausomybė nuo vėjo greičio

Sudarant modelį panaudotas ličio jonų energijos kaupiklis su tinklu susietas naudojant 2,5MW inverterį, 1MW fotovoltinė saulės elektrinė ir 1MW vėjo elektrinė. Modelis pateiktas 47 paveiksle.



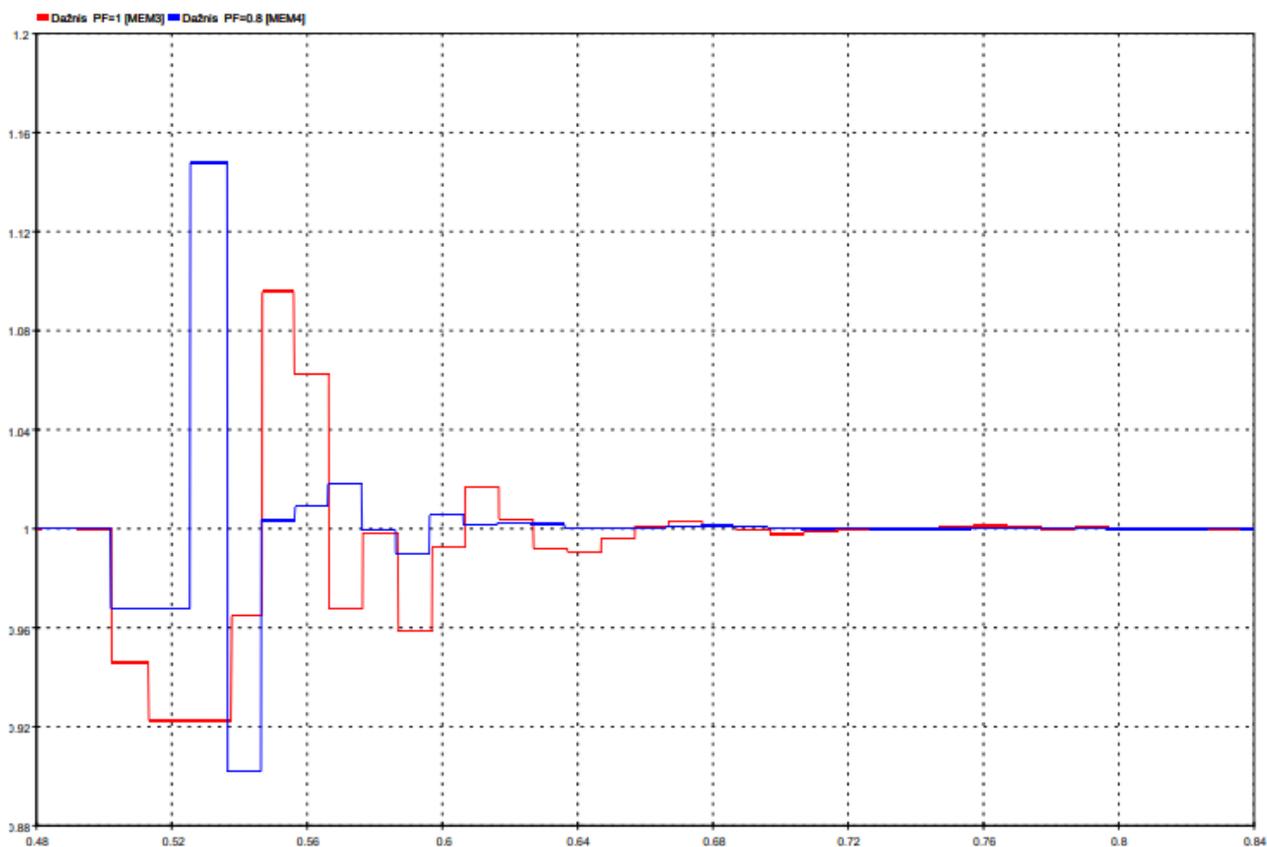
47 pav. 2 Modelis EMTP aplinkoje

Valdomas tinklo jungiklis SW1 nustatomas, jog tinklas būtų atjungiamas po 0.5 s.



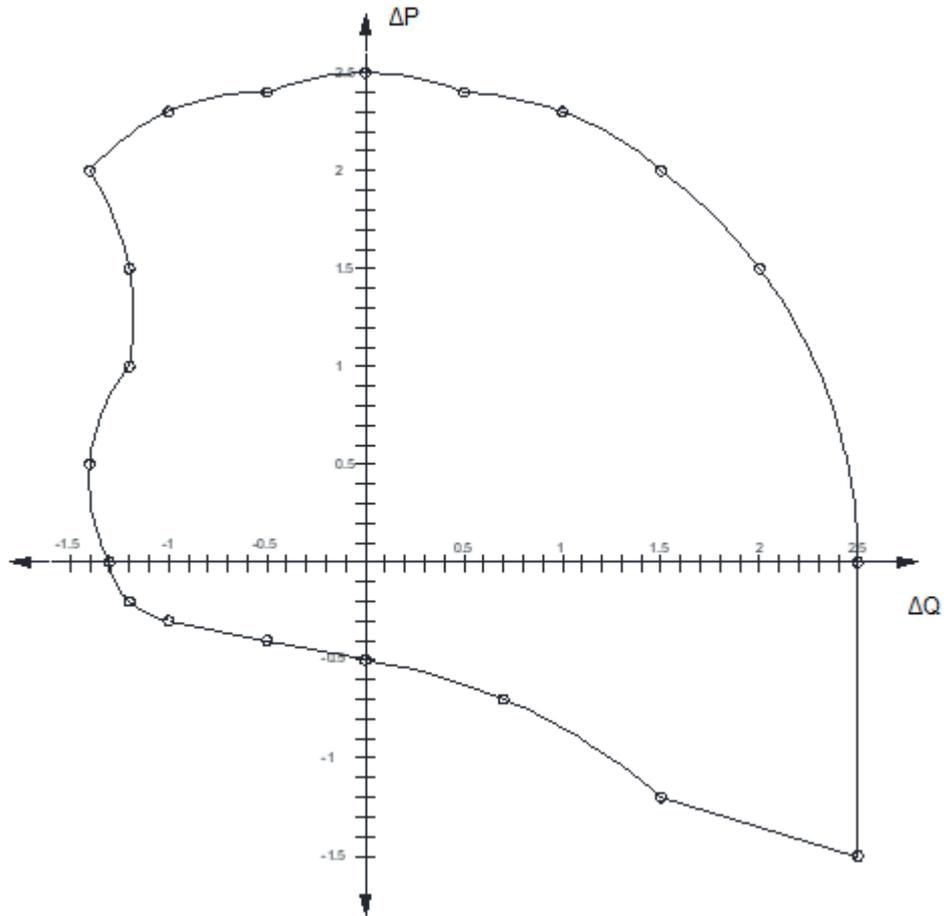
48 pav. 2 modelio įtampos grafikas atjungimo momentu, kai galios faktorius 1 ir 0.8

48 paveiksle parodyta kaip atsijungimo momento įtampos kritimą įtakoja induktyvinė apkrova. Nors ir įtampos kritimas atjungimo momentu didesnis, bet esant induktyviajai apkrovai pereinamasis procesas greitesnis, ir įtampa nusistovi greičiau. 49 paveiksle parodyta dažnio priklausomybė nuo apkrovos pobūdžio, esant žemesniam galios faktoriui, dažnio švytavimo amplitudė didesnė, bet pereinamasis procesas greičiau baigiasi



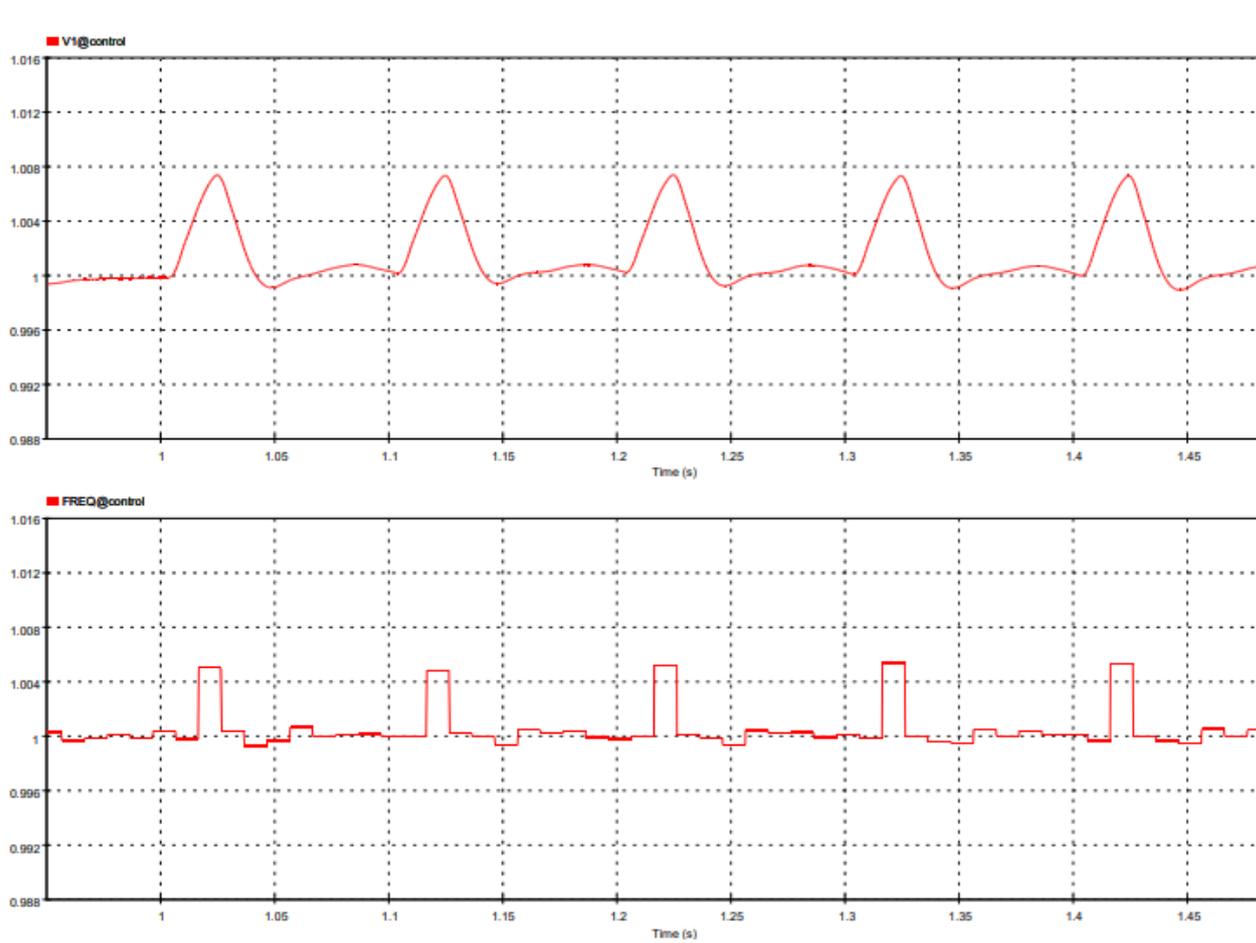
49 pav. 2 modelio dažnio grafikas atjungimo momentu, kai galios faktorius 1 ir 0.8

Naudojantis EMTP–RV aplinkoje sudarytu modeliu, apibrėžtos ΔP ir ΔQ ribos kuriose mikrotinklas gali dirbti stabiliai, bei atitikti EN 50160 reikalavimus. Ribos pateiktas 50 paveiksle. ΔP ir ΔQ apskaičiuojama atitinkamai pagal (24) ir (25) formules.



50 pav. ΔP ir ΔQ ribos kuriose mikrotinklas gali dirbti stabiliai, bei atitikti EN 50160 reikalavimus

51 paveiksle pateikti įtampos ir dažnio grafikai, esant salos režime ir kas 0,1s mažinant apkrovą po 0,1 MW.



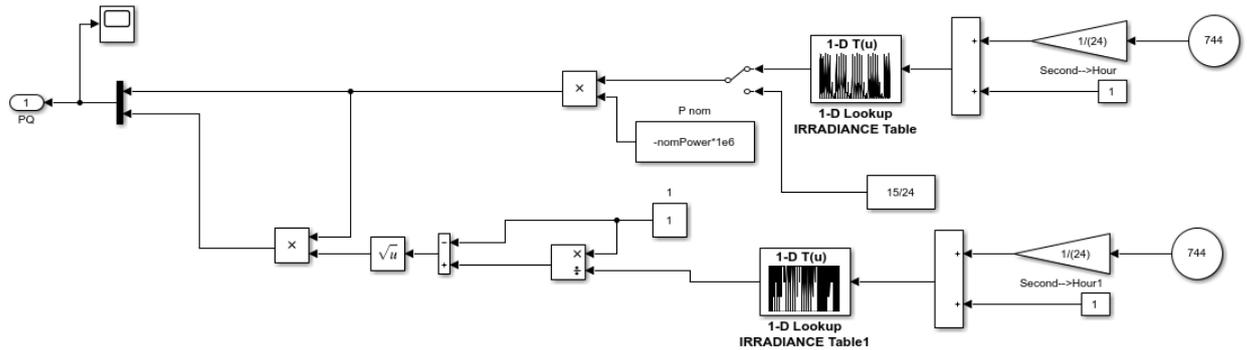
51 pav. Įtampos ir dažnio pokyčiai keičiant apkrovą

Matlab aplinkoje sukuriama programa, jog būtų įgalintas duomenų nuskaitymas iš .xls formato failų.

```
data = xlsread('Skirtuko_pavadinimas', 'failo_pavadinimas');
vejas = data(1,2:end);
laikas = data(2,2:end);
saule = data(3,2:end);
apkrova = data(4,2:end);
kosinusas = data(5,2:end);
```

Šie duomenys panaudojami Matlab Simulink aplinkoje skaičiavimams.

Kintama apkrova yra apskaičiuojama pagal pateiktą galios koeficientą ir galios faktorių. Kintamos apkrovos valdymas Matlab Simulink aplinkoje pateikiamas 52 paveiksle.

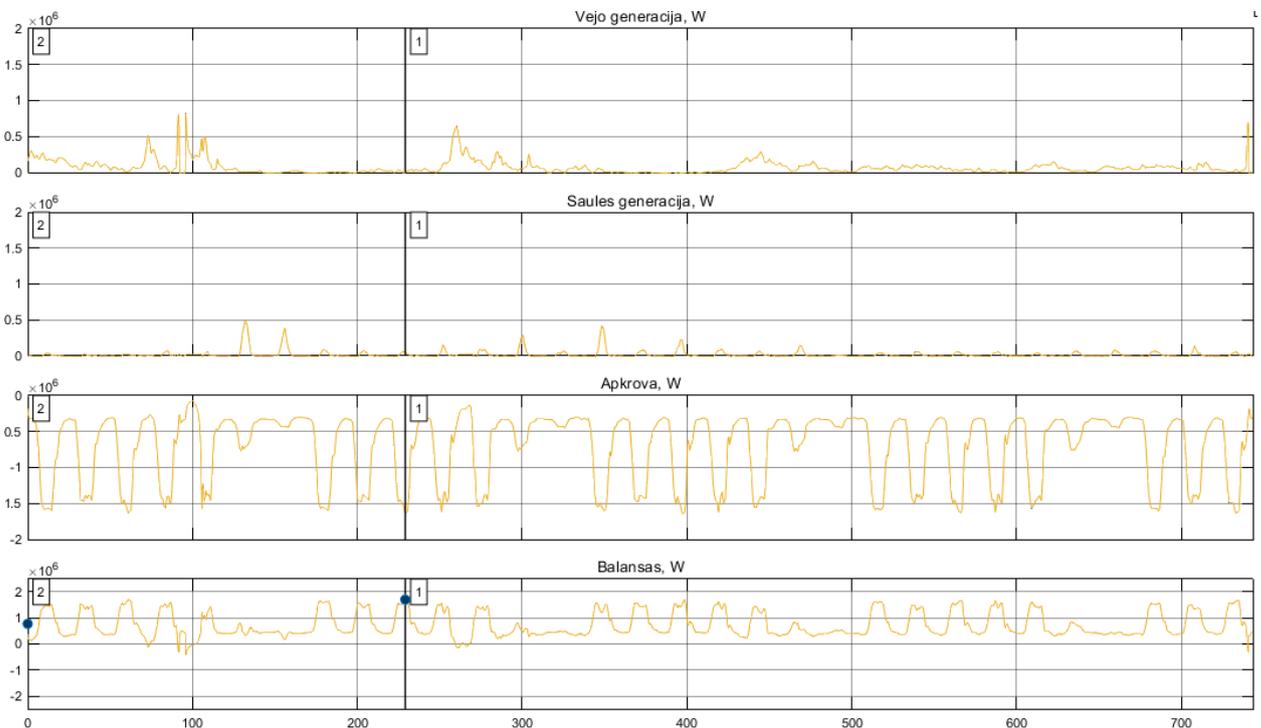


52 pav. Kintamos apkrovos valdymas Matlab Simulink aplinkoje

Panašiu būdu įvedami vėjo greičio ir saulės apšvietos duomenys.

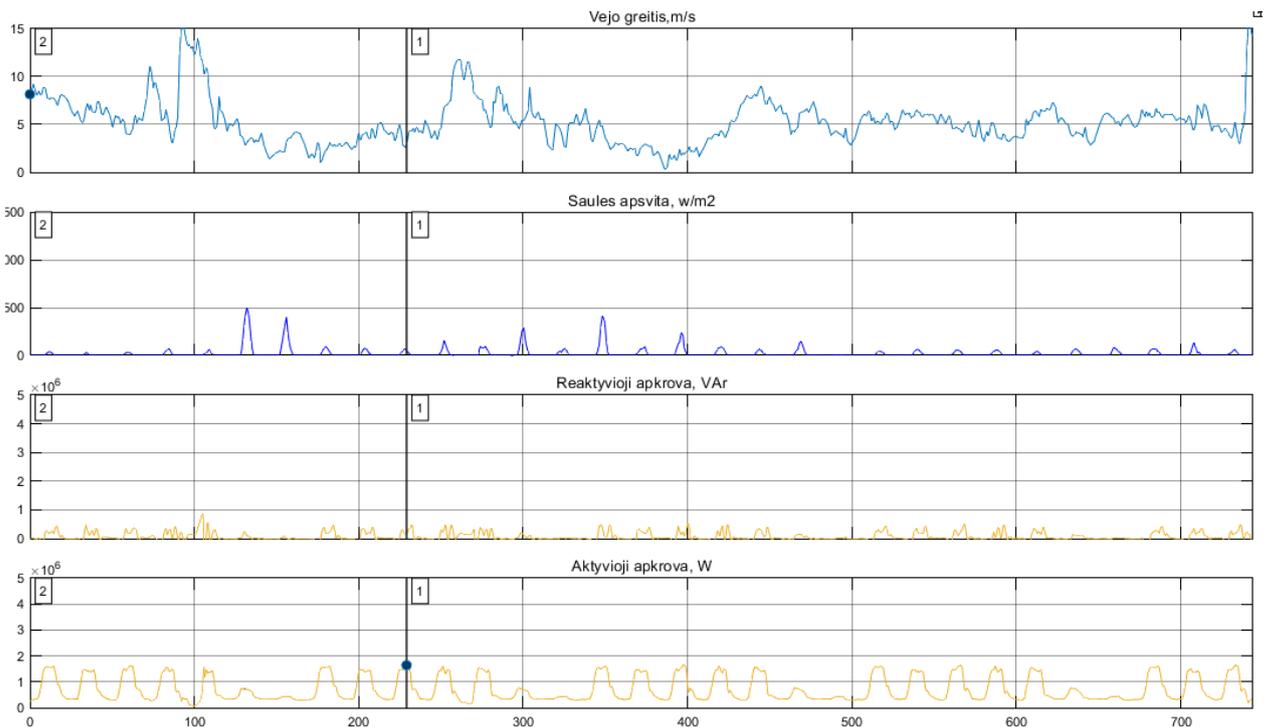
Sausis

Paleidus simuliaciją gaunami mėnesio duomenys apie fotovoltinės elektrinės ir vėjo elektrinės generaciją, bei apkrovos kitimą. Balanso grafikas sudaromas $P_{\text{apkrova}} - P_{\text{gamyba}}$. Gauti duomenys pateikti 53 paveiksle.



53 pav. Matlab aplinkoje gauti atsinaujinančių energijos šaltinių generacijos ir kintamos apkrovos sausio mėnesio duomenys

Balanso grafike surandama mėnesio balanso maksimali reikšmė, tai reiškia, kad tuo metu energijos poreikis iš tinklo poreikis yra didžiausias, todėl jei tinklas tuo metu būtų prarastas, mikrotinklas susidurtų su didžiausiais sunkumais. Tolimesniai analizei EMTP-RV programiniame pakete naudojami duomenys pateikti 54 paveiksle.



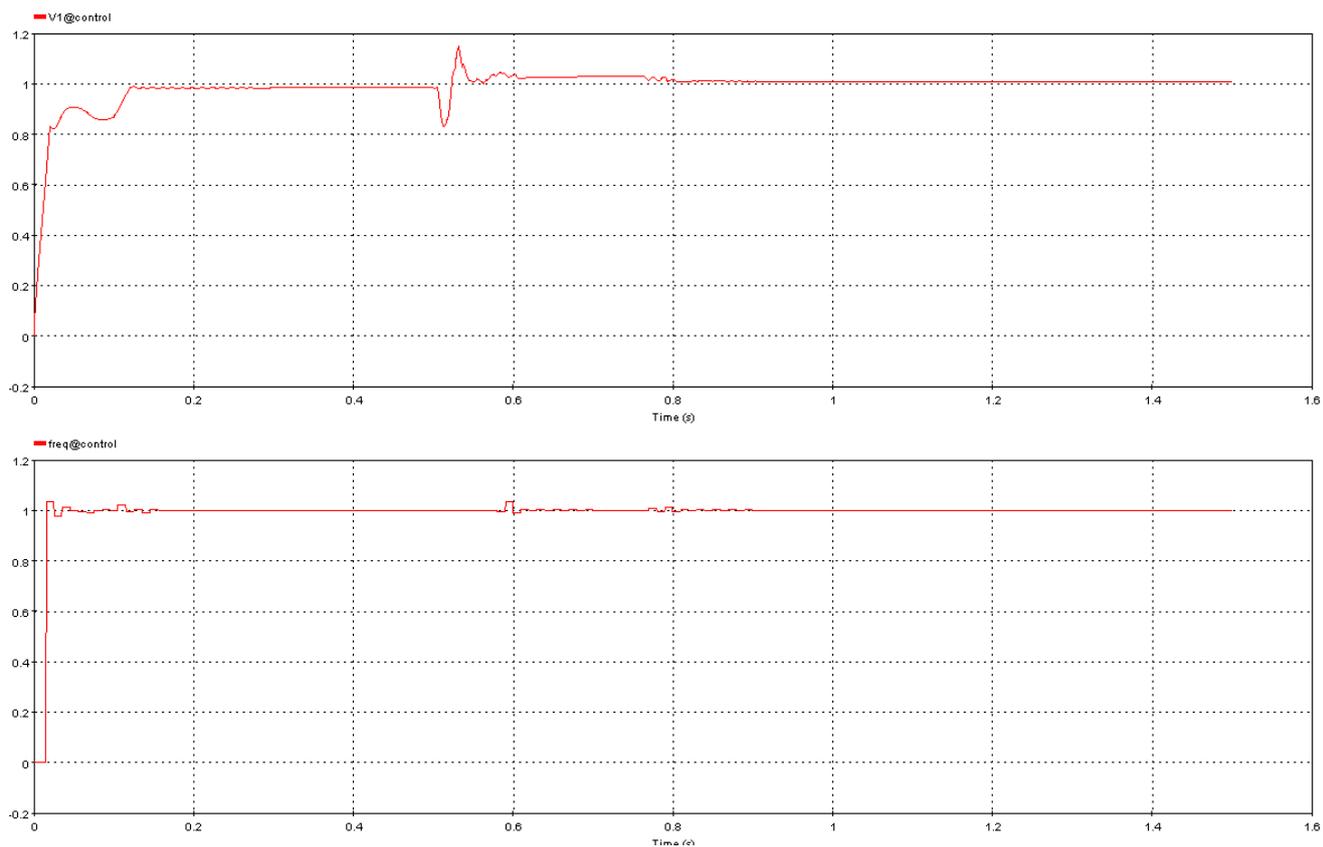
54 pav. Matlab aplinkoje gauti atsinaujinančių energijos šaltinių prieinamumo ir kintamos apkrovos sausio mėnesio duomenys

Didžiausio tinklo poreikio metu duomenys pateikti 8 lentelėje. Duomenys pbus naudojami tolimesnei analizei EMTP – RV aplinkoje.

8 lentelė. Matlab aplinkoje gauti atsinaujinančių energijos šaltinių prieinamumo ir kintamos apkrovos sausio mėnesio duomenys

Vėjo greitis m/s	Saulės apšvita W/m2	Reaktyvioji apkrova MVar	Aktyvioji apkrova MW
2,891	49,98	0,1426	1,642

Naudojant atsinaujinančių šaltinių generacijos ir apkrovos duomenis EMTP aplinkoje suimituojamas tinklo atjungimas, gauti duomenys pateikiami 55 paveiksle.



55 pav. Sausio mėnesio kritiniu momentu atjungto tinklo simuliacija EMTP aplinkoje grafikas

Nusistovėjusio režimo vertės pateiktos 9 lentelėje.

9 lentelė. Sausio mėnesio kritiniu momentu atjungto tinklo simuliacija EMTP aplinkoje duomenys

Įtampa, s.v.	Dažnis, s.v.	THD, %
1,007	1,0002	4,59

10 lentelė. Visų metų duomenys

Mėnuo	Matlab aplinkoje gauti duomenys				EMTP aplinkoje gauti duomenys		
	Vėjo greitis m/s	Saulės apšvita W/m ²	Reaktyvioji apkrova MVar	Aktyvioji apkrova MW	Įtampa, s.v	Dažnis,s.v	THD, %
Sausis	2,891	49,98	0,1426	1,642	1,007	1,0002	4,59
Vasaris	4,8	35,39	0,185	1,6	1,08727	0,999982	4,04
Kovas	3,119	34,6	0,1705	1,56	1,00204	1,00107	5,8
Balandis	1,25	122	0,1751	1,627	1,00658	1,00063	4,9
Gegužis	3,166	111,4	0,1634	1,569	1,000392	0,999957	5
Birželis	3,922	97,22	0,1851	1,511	1,00434	1,00023	5,6
Liepa	2,411	170	0	1,633	1,01406	0,999666	4,7
Rugpjūtis	2,46	79,23	0,02	1,512	1,01708	0,999922	5,8
Rugsėjis	3,462	43,91	0,2418	1,571	1,1542	0,999772	6,5
Spalis	4,155	21,23	0,004	1,55	1,0275	0,995816	4,9
Lapkritis	3,728	41,42	0,24	1,638	1,01272	0,999683	4,8
Gruodis	2,74	37,86	0,111	1,645	1,00197	1,00088	4

10 lentelėje pateikiami duomenys gauti įvykdžius simuliaciją kiekvieno mėnesio kritiniu momentu.

Išvados

1. Dėl tobulėjančių bei pingančių atsinaujinančios energijos šaltinių konversijos sistemų, jų integracija sparčiai auga ir pagal pateiktus ilgalaikius planus augimas vis didės, todėl tyrimai šioje temoje yra labai tikslingi.
2. Išanalizavus esamą mokslinę literatūrą, daugumoje straipsnių kaip didžiausia problema įvardijama tai, jog dėl neprognozuojamo atsinaujinančių energijos šaltinių prieinamumo, apsunkinamas elektros tinklo balansavimas tarp paklausos ir elektros energijos gamybos.
3. Tradiciniai apsaugos elementai, tokie kaip įtampos padidėjimo/pamažėjimo ar dažnio padidėjimo/pamažėjimo apsaugos, nėra efektyvios aptikti salos režimą, dėl to jog kaip parodyta 29 paveiksle esant sąlygai $\Delta P = \Delta Q = 0$ tinklo įtampa ir dažnis išlieka stabilūs, bet kaip pateikta 39 paveiksle tam tikslui gali būti naudojama apsauga pagrįsta įtampos neigiama seka.
4. Dėl to, jog mikrotinklas grįstas galios elektronika, praradus tinklą padidėja bendras harmonikų disbalansas (40 paveikslas), taip pat jis yra priklausomas nuo moduliacijos dažnio (44 paveikslas) ir nuo esančios apkrovos (42 ir 43 paveikslai).
5. Kaip pavaizduota 35 paveiksle, inverteris negali dirbti P valdymo režime praradus tinklą dėl to, jog jis gauną įtampos ir dažnio nurodymą iš tinklo, kuris nėra stabilus, todėl inverteris salos režime turi naudoti Vac/f valdymo režimą, kuriame įtampos ir dažnio nurodymai yra generuojami vidinio oscilatoriaus.
6. 48 paveiksle parodyta, kaip atsijungimo momento įtampos kritimą įtakoja induktyvinė apkrova. Nors ir įtampos kritimas atjungimo momentu didesnis, bet esant induktyviajai apkrovai pereinamasis procesas greitesnis, ir įtampa nusistovi greičiau.
7. 50 paveiksle pateiktos ΔP ir ΔQ ribos, kuriose mikrotinklas gali dirbti stabiliai bei atitikti EN 50160 reikalavimus. Jos yra tiesiogiai proporcingos inverterio galiai – kuo inverteris galingesnis, tuo jis gali kompensuoti didesni energijos generacijos trukumą bei absorbuoti didesnę energijos perteklių.
8. Kitaip, nei aukštos įtampos paskirstymo tinklas, mikrotinklas gali būti pagrįstas linijomis kurios pagrindas yra aktyvioji varža todėl tradicinis dažnio *droop* valdymas, per aktyviosios galios srautą ir įtampos *droop* valdymas per reaktyviąją galią, kuris naudojamas aukštesnėse įtampos lygiuose, neveikia mikrotinkle.

Literatūros sąrašas

1. EUROSTAT „Renewable energy statistics“ [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable energy statistics#Renewable energy produced in the EU increased by two thirds in 2007-2017](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics#Renewable_energy_produced_in_the_EU_increased_by_two_thirds_in_2007-2017)
2. C. ROSELUND and J. BERNHARDT, “Lessons learned along Europe’s road to renewables,” IEEE Spectrum, May 4, 2015“ [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <https://spectrum.ieee.org/energy/renewables/lessons-learned-along-europes-road-to-renewables>
3. X. LIANG and B. BAGEN, “Probabilistic planning and risk analysis for renewable power generation system,” [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/311680686 Probabilistic Planning and Risk Analysis for Renewable Power Generation System](https://www.researchgate.net/publication/311680686_Probabilistic_Planning_and_Risk_Analysis_for_Renewable_Power_Generation_System)
4. B.GUDIMETLA, S.TELEKE, and J.CASTANEDA, “Application of energy storage and STATCOM for grid quality issues” in Proc. 2011 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., 2011, pp. 1–8. [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6039409/>
5. Y. V. P. KUMAR and R. BHIMASINGU, “Improving resiliency in renewable energy based green microgrids using virtual synchronous machines controlled inverter,” [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7387178/>
6. UJJWOL TAMRAKAR, DIPESH SHRESTHA, MANISHA MAHARJAN, BISHNU P. BHATTARAI, TIMOTHY M. HANSEN and REINALDO TONKOSKI „Virtual Inertia: Current Trends and Future Directions“ [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2076-3417/7/7/654/pdf>
7. ELECTRICITY RELIABILITY COUNCIL OF TEXAS (ERCOT). „Future Ancillary Services in ERCOT“ žiūrėta [2018-05-20] prieiga per internetą: [http://www.ercot.com/content/news/presentations/2014/ERCOT AS Concept Paper Version 1.1 as of 11-01-13 1445_black.pdf](http://www.ercot.com/content/news/presentations/2014/ERCOT_AS_Concept_Paper_Version_1.1_as_of_11-01-13_1445_black.pdf) (accessed on 21 June 2017)
8. MATEVOSYAN, J.; SHARMA, S.; HUANG, S.H.; WOODFIN, D.; RAGSDALE, K.; MOORTY, S.; WATTLES, P.; LI, W. „Proposed future Ancillary Services in Electric Reliability Council of Texas“. [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7232743/>
9. POOLLA, B.K.; BOLOGNANI, S.; DORFLER, F. „Optimal placement of virtual inertia in power grids“. [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <http://acc2016.a2c2.org/>
10. DE VYVER, J.V. KOONING, J.D.M.D.; MEERSMAN, B.; VANDEVELDE, L.; VANDOORN, T.L. “ Droop Control as an Alternative Inertial Response Strategy for the Synthetic Inertia on Wind Turbines“. IEEE Trans. Power Syst. 2016, 31, 1129–1138 [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7104170/>
11. THIESEN, H. JAUCH, C. GLOE. „A. Design of a System Substituting Today’s Inherent Inertia in the European Continental Synchronous Area“ [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/305694832 Design of a System Substituting Today's Inherent Inertia in the European Continental Synchronous Area](https://www.researchgate.net/publication/305694832_Design_of_a_System_Substituting_Today's_Inherent_Inertia_in_the_European_Continental_Synchronous_Area)
12. U.TAMRAKAR, D.GALIPEAU, R.TONKOSKI and I.TAMRAKAR “Improving transient stability of photovoltaic-hydromicrogrids using virtual synchronous machines,” [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7232663/>

13. GURUNG, A.; GALIPEAU, D.; TONKOSKI, R.; TAMRAKAR, I. FEASIBILITY. „*Study of Photovoltaic-hydropower microgrids*“. [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: https://books.google.lt/books?id=EMxSDwAAQBAJ&pg=PA166&lpg=PA166&dq=Feasibility+study+of+Photovoltaic-hydropower+microgrids.+In+Proceedings+of+the+5th+International+Conference+on+Power+and+Energy+Systems&source=bl&ots=Of4P_XgoRD&sig=Uj5hFj2ahe54xLY4_V_3AOphKLk&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwjj_dKHvcHbAhVC_SwKHcWEACQQ6AEIJzAA
14. TAMRAKAR, U.; GALIPEAU, D.; TONKOSKI, R.; TAMRAKAR, I. „*Improving transient stability of photovoltaic-hydro microgrids using virtual synchronous machines*“. [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: https://books.google.lt/books?id=EMxSDwAAQBAJ&pg=PA167&lpg=PA167&dq=Improving+transient+stability+of+photovoltaic-hydro+microgrids+using+virtual+synchronous+machines.+In+Proceedings+of+the+IEEE+Eindhoven+PowerTech,+Eindhoven,+The+Netherlands,&source=bl&ots=Of4P_XgoTA&sig=TFGS_e0Uf_uAdGEgWOxH9yBszZ_0&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwi98OWPvcHbAhVMBiwKHUNBA7AQ6AEIJzAA
H. LAAKSONEN; P. SAARI; R. KOMULAINEN. „*Voltage and frequency control of inverter based weak LV network microgrid*“. [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee.org.ezproxy.ktu.edu/document/1600566>
15. MIGUEL A. TORRES L. ; LUIZ A. C. LOPES ; LUIS A. MORÁN T. ; JOSÉ R. ESPINOZA C „*Self-tuning virtual synchronous machine: A control strategy for energy storage systems to support dynamic frequency control*“, [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <https://ezproxy.ktu.edu/login?url=https://ieeexplore.ieee.org/document/6940306>
16. „*Grid Integration of Large-Capacity Renewable Energy Sources and Use of Large-Capacity Electrical Energy Storage*“ [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-gridintegrationlargecapacity-LR-en.pdf>
17. VYTAUTAS ADOMAVIČIUS „*Elektros energijos kaupimo priemonių šiuolaikine būkle ir pletros perspektyvos*“ [Peržiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/profile/Vytautas_Adomavicius/publication/303315906_Elektros_energijos_kaupimo_priemoniu_siuolaikine_bukle_ir_pletros_perspektyvos/links/573cc32308ae298602e58fd5/Elektros-energijos-kaupimo-priemoniu-siuolaikine-bukle-ir-pletros-perspektyvos.pdf
[https://www.researchgate.net/profile/Vytautas_Adomavicius/publication/303315906_Elektros_energijos_kaupimo_priemoniu_siuolaikine_bukle_ir_pletros_perspektyvos/link/s/573cc32308ae298602e58fd5/Elektros-energijos-kaupimo-priemoniu-siuolaikine-bukle-ir-pletros-perspektyvos.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vytautas_Adomavicius/publication/303315906_Elektros_energijos_kaupimo_priemoniu_siuolaikine_bukle_ir_pletros_perspektyvos/links/573cc32308ae298602e58fd5/Elektros-energijos-kaupimo-priemoniu-siuolaikine-bukle-ir-pletros-perspektyvos.pdf)
18. B SINGH, K AL-HADDAD, AND A CHANDRA, “*A new control approach to three-phase active filter for harmonics and reactive power compensation* [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/651624/>
19. S K JAIN, P AGARWAL, AND H O GUPTA, “*A Control Algorithm for Compensation of Customer-Generated Harmonics and Reactive Power,*” [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/61/28109/01256400.pdf>
20. ZMOOD, D.N ; HOLMES, D.G „*Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error*“ [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee.org.ezproxy.ktu.edu/document/1198060>

21. XUE-SONG Z, LI-QIANG C, YOU-JIE M. „*Research on control of micro grid, In: Proceedings of the IEEE Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*“ [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/5721391>
22. REN B, TONG X, TAN S, SUN X. „*Research on the control strategy of inverters in the microgrid*“ [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <https://linkinghub-elsevier-com.ezproxy.ktu.edu/retrieve/pii/S2405896317316403>
23. PENG FZ, LI YW, TOLBERT LM. „*Control and protection of power electronics interfaced distributed generation systems in a customer driven microgrid*“ [žiūrėta 2018-05-20] prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/5275191>
24. Rimantas Jonas Mukulis ir kt. „*Aiškinamasis elektrotechnikos terminų žodynas*“ 1999 m.