



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Mikrotinklo režimų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Gediminas Augustis

Projekto autorius

Prof. Saulius Gudžius

Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Mikrotinklo režimų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Gediminas Augustis

Projekto autorius

Prof. Saulius Gudžius

Vadovas

Doc. Gytis Svinkūnas

Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Gediminas Augustis

Mikrotinklo režimų tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Gediminas Augustis

Patvirtinta elektroniniu būdu

Augustis, Gediminas. Mikrotinklo režimų tyrimas. Magistro 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, salos režimas, dažnis, harmonikos.

Kaunas, 2025. 59 p.

Santrauka

Magistro baigiamajame tyrime nagrinėjamas salos režimu veikiančio mikrotinklo elektros energijos kokybės užtikrinimas, pasitelkiant pažangius valdymo metodus ir galios elektronikos priemones. Aktualumą lemia didėjanti paskirstytos generacijos dalis elektros energetikos sistemose, taip pat būtinybė užtikrinti stabilų ir kokybišką tiekimą veikiant nepriklausomai nuo pagrindinio tinklo. Tiriamas mikrotinklas su integruotais fotovoltinės ir vėjo energijos šaltiniais, dyzeliniu generatoriumi, baterijų kaupikliu bei vieningu elektros energijos kokybės reguliatoriumi (UPQC). Tyrimo tikslas – nustatyti metodus, leidžiančius užtikrinti stabilią įtampą ir sumažinti harmoninius iškraipymus salos režimu. Iškelti uždaviniai apima kokybės trikdžių analizę, valdiklių įvertinimą, šaltinių sąveikos analizę, galios elektronikos svarbos išnagrinėjimą, modeliavimo atlikimą ir rezultatų interpretavimą. Tyrimo metodui taikytas modeliavimo principas MATLAB/Simulink aplinkoje, kur sukurta sistema leido vertinti įtampos ir harmonikų parametrus su ir be UPQC. Rezultatai parodė, kad įtampos dydis visose fazėse artėja prie vardinių verčių, o bendrasis harmoninis iškraipymas, kai inverteris dirba tinklo formuojančiu režimu sumažėjo nuo 5,87 % iki 2,33 %, o nusistovėjusioje būsenoje – iki 2,87–3,34 %

Augustis, Gediminas. Research of Microgrid Operation Modes. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Saulius Gudžius; Faculty of Electrical and Electronical Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electrical engineering, engineering sciences.

Keywords: microgrid, island operation, frequency, harmonics.

Kaunas, 2025. 59 p.

Summary

The master thesis investigates the power quality assurance of an islanded microgrid using advanced control techniques and power electronics. The relevance is driven by the increasing share of distributed generation in power systems, as well as the need to ensure a stable and high quality supply when operating independently of the main grid. A microgrid with integrated photovoltaic and wind power sources, a diesel generator, a battery storage and a unified power quality controller is under investigation. The objective of the study is to identify methods to ensure a stable voltage and to reduce harmonic distortion in islanded mode. The objectives include analysis of quality disturbances, evaluation of the controllers, analysis of the interaction of the sources, examination of the importance of the power electronics, carrying out simulations and interpretation of the results. The approach of the study was based on a simulation approach in MATLAB/Simulink environment, where the developed system allowed the evaluation of voltage and harmonic parameters with and without UPQC. The results showed that the voltage magnitude in all phases is approaching the nominal values, and the total harmonic distortion has decreased from 5.87% to 2.33% when the inverter operates in the grid-forming mode, and to 2.87% to 3.34% in steady state.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	10
1. Atsinaujinančių energijos šaltinių įtaka tinklui.....	11
1.1. Įtampos ir dažnio stabilumo iššūkiai	11
1.2. Harmoniniai iškraipymai ir elektros energijos kokybės problemos	13
1.3. Energijos kaupimo sistemų funkcija	15
2. Pažangios valdymo strategijos.....	18
2.1. Galios elektronikos prietaisai	22
3. Salos tipo mikrotinklo modeliavimas.....	26
3.1. PV energijos sistemos modeliavimas	28
3.2. Vėjo energijos sistemos modeliavimas	31
3.3. Dyzelinių generatorių integracija	36
3.4. Baterijos energijos saugojimo sistema	38
3.5. Galios elektronikos keitikliai ir valdikliai	40
3.6. Vieningas elektros energijos kokybės reguliatorius	46
4. Modeliavimo rezultatai ir analizė	49
Išvados	57
Literatūros sąrašas	58
Priedai.....	60
1 priedas. Mikrotinklo modelis.....	60

Lentelių sąrašas

1 lentelė Energijos kaupimo technologijos.....	17
2 lentelė Generatoriaus parametrai	36
3 lentelė Žadinimo parametrai	36
4 lentelė LCL filras.....	44

Paveikslų sąrašas

1 pav. Gaminančių vartotojų plėtra [3].....	11
2 pav. Įtampos ir dažnio kritimas padidėjus apkrovai	12
3 pav. AC su harmoniniais iškraipymais	14
4 pav. Skirtingų energijos kaupimo įrenginių energijos tankio ir galios tankio palyginimas [8].....	16
5 pav. Dažnio ir įtampos įprastos kritimo kreivės pavyzdys. [10]	19
6 pav. MPC pagrindinis valdymo ciklas [10].....	21
7 pav. FLC informacinė struktūra. [16].....	22
8 pav. Vieningas elektros energijos kokybės reguliatorius [21].....	25
9 pav. PV tinklo konfigūracija „Simulink“ programoje su nustatytais modulių parametrais	28
10 pav. Apšvietos ir temperatūros įvesties duomenys, naudojami PV modelyje.....	28
11 pav. Fuzzy MPPT valdiklio struktūra.....	30
12 pav. PV MPPT valdymas ir stiprinimo keitiklio grandinė	31
13 pav. Vėjo turbinos-PMSG su posvyrio kampo valdymu.....	32
14 pav. Vėjo turbinos modelio parametrų nustatymai.....	33
15 pav. Stiprinimo keitiklis su „Fuzzy MPPT“ integracija	35
16 pav. Neraiškos logikos MPPT valdiklio nustatymai	35
17 pav. Relės suveikimo pavyzdys.....	37
18 pav. dyzelinio generatoriaus posistemis	38
19 pav. BESS neraiškasis valdiklis	39
20 pav. Funkcijos bloko kodas	39
21 pav. Baterijų energijos kaupimo sistema.....	40
22 pav. Keitiklio valdymo grandinė	41
23 pav. PLL blokas.....	41
24 pav. Nuolatinės įtampos reguliatoriaus blokas	42
25 pav. Srovės valdiklio blokas	43
26 pav. Įtampos nuorodos generavimo blokas	43
27 pav. PWM keitiklis.....	44
28 pav. VSC keitiklis.....	45
29 pav. Pilna UPQC modeliavimo blokinė schema	46
30 pav. Šunto keitiklio valdymo sistema.....	46
31 pav. Šunto dq valdymo ir moduliavimo sistema	47
32 pav. Nuoseklaus keitiklio valdymo sistema	47
33 pav. Trijų pakopų NPC keitikliai.....	48
34 pav. Mikrotinklo dažnis be UPQC	49
35 pav. Mikrotinklo dažnis be UPQC	49
36 pav. C fazės įtampos harmonikų diapazonas 1,5s be UPQC.....	50
37 pav. C fazės įtampos harmonikų diapazonas 4 s be UPQC.....	50
38 pav. B fazės įtampos harmonikų diapazonas 1,5s be UPQC.....	51
39 pav. B fazės įtampos harmonikų diapazonas 4 s be UPQC.....	51
40 pav. A fazės įtampos harmonikų diapazonas 1,5s be UPQC	52
41 pav. A fazės įtampos harmonikų diapazonas 4 s be UPQC	52
42 pav. C fazės įtampos harmonikų diapazonas 1,5s su UPQC	53
43 pav. C fazės įtampos harmonikų diapazonas 4s su UPQC	53

44 pav. B fazės įtampos harmonikų diapazonas 1,5s su UPQC	54
45 pav. B fazės įtampos harmonikų diapazonas 4s su UPQC	54
46 pav. A fazės įtampos harmonikų diapazonas 1,5s su UPQC.....	55
47 pav. A fazės įtampos harmonikų diapazonas 4s su UPQC.....	55

Įvadas

Mikrotinklai, kaip lokalizuoti tinklai, kurie gali veikti nepriklausomai arba kartu su pagrindiniu tinklu, – tai lankstus ir atsparus šiuolaikinių energijos poreikių sprendimas. Šis lankstumas ypač svarbus, nes energijos suvartojimas nuolat auga, vis labiau integruojami atsinaujinantys energijos šaltiniai, o patikimesnio ir tvaresnio elektros energijos tiekimo poreikis didėja. Tačiau norint užtikrinti aukštos kokybės elektros energijos tiekimą mikrotinkluose, kyla keletas techninių problemų, kurias būtina išspręsti, kad būtų galima visapusiškai išnaudoti jų potencialą.

Elektros energijos kokybei mikrotinkluose įtakos turi įvairūs veiksniai, įskaitant įtampos stabilumą, dažnio stabilumą, harmoninius iškraipymus, galios koeficientą ir bendrą sistemos patikimumą. Įtampos svyravimai gali turėti įtakos elektros įrangos veikimui ir ilgaamžiškumui, o dažnio nestabilumas gali sukelti tinklo sinchronizavimo problemų. Harmoniniai iškraipymai, atsirandantys dėl netiesinių apkrovų, gali sumažinti sistemos efektyvumą ir sukelti elektros komponentų perkaitimą. Be to, norint efektyviai panaudoti energiją ir sumažinti nuostolius, būtina išlaikyti aukštą galios koeficientą. Patikimumas ir atsparumas taip pat labai svarbūs, ypač dirbant salose, kai mikrotinklas turi veikti nepriklausomai nuo pagrindinio tinklo.

Vienas iš svarbiausių mikrotinklų uždavinių yra stabilumo išlaikymas pereinant nuo prie tinklo prijungto režimo prie autonominio veikimo. Šio perėjimo metu staigūs elektros energijos tiekimo ir paklausos pokyčiai gali lemti įtampos ir dažnio nuokrypius, todėl stabilumui užtikrinti reikia veiksmingos valdymo strategijos.

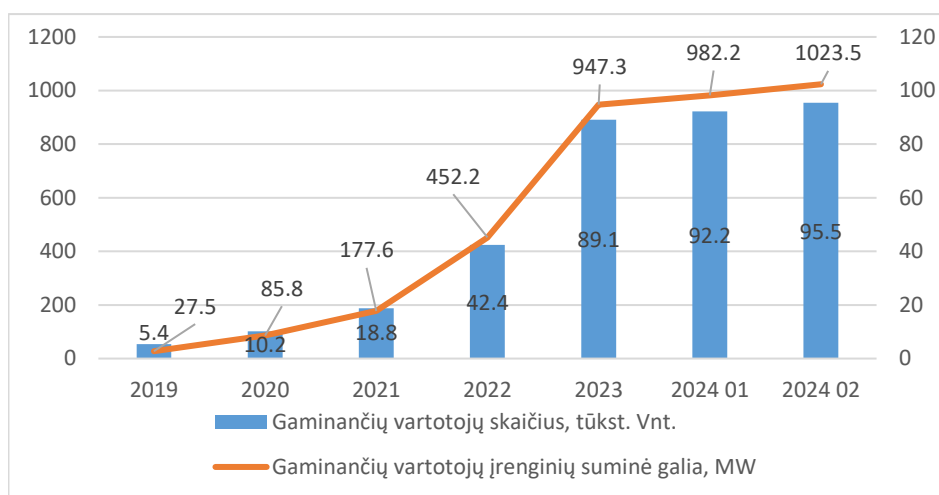
Darbo tikslas – išsiaiškinti ir nustatyti metodus, kaip pagerinti elektros energijos kokybę mikrotinklo režimuose.

Darbo uždaviniai:

1. Nustatyti ir išanalizuoti pagrindinius iššūkius, turinčius įtakos elektros energijos kokybei mikrotinklų režimuose.
2. Įvertinti valdymo logikos valdiklius kaip pažangią valdymo strategiją, skirtą mikrotinklo stabilumui pagerinti, kai veikia salos režimu.
3. Ištirti atsinaujinančių energijos šaltinių ir energijos kaupimo sistemų integravimą į mikrotinklus, analizuojant jų poveikį įtampos ir dažnio reguliavimui.
4. Išnagrinėti galios elektronikos prietaisų svarbą gerinant mikrotinklo stabilumą.
5. Sumodeliuoti mikrotinklą, kad būtų galima patvirtinti siūlomus metodus.
6. Išanalizuoti modeliavimo rezultatus.

1. Atsinaujinančių energijos šaltinių įtaka tinklui

Išmanieji tinklai tampa svarbiu klausimu šiandienos ir ateities elektros energijos sistemų tinklų konfigūracijose. Nauji modernūs elektros tinklai suteikia galimybę gauti išsamią informaciją apie elektros tinklą realiuoju laiku, greitai analizuoti gedimus, taip pat suteikia galimybę prie elektros sistemos prijungti didelį kiekį atsinaujinančių energijos išteklių. Spartus pasaulinės pramonės ir verslo augimas sukėlė didelį prieinamos energijos trūkumą.[1] Dėl tiekimo saugumo, taip pat dėl aplinkosaugos problemų investicijos į mažai anglies dioksido į aplinką išskiriančias elektros energijos gamybos technologijas tapo vienu iš prioritetų daugelio pasaulio šalių energetikos darbotvarkėse, todėl elektros energijos gamyba iš atsinaujinančių energijos išteklių yra perspektyvi galimybė, kuri ne tik patenkins didėjančią energijos poreikį, bet ir rūpinsis aplinka.[2]



1 pav. Gaminančių vartotojų plėtra [3]

Lietuvoje pastaraisiais metais, mažėjant priklausomybei nuo užsienio energijos išteklių, padaugėjo gaminančių vartotojų. Kaip matyti iš 1 pav., gaminančių vartotojų skaičius nuolat didėja lyginant su 2022 m. ir 2023 m. padidėjo daugiau nei 2 kartus.

1.1. Įtampos ir dažnio stabilumo iššūkiai

Vienas realus pavyzdys – 2017 m. Puerto Rike po uragano „Maria“, kai dėl įtampos ir dažnio nestabilumo sutriko mikrotinklas. Urganui sugriovus pagrindinį elektros energijos tiekimo tinklą, daugelis bendruomenių ir svarbių objektų rėmėsi salų mikrotinklais, maitinamais saulės fotovoltiniais elementais (PV) ir dyzeliniais generatoriais. Tačiau šie mikrotinklai susidūrė su dideliu įtampos ir dažnio nestabilumu dėl šių priežasčių:

- didelės nepastovios saulės energijos skvarbos be pakankamo energijos kaupimo, kad būtų galima sušvelninti svyravimus.
- staigių apkrovos svyravimų, sukeliančių staigų įtampos kritimą ir dažnio nuokrypius.
- tinkamų dažnio kontrolės mechanizmų trūkumo, todėl viršijus dažnio ribas mikrotinklo sekcijos buvo atjungiamos.

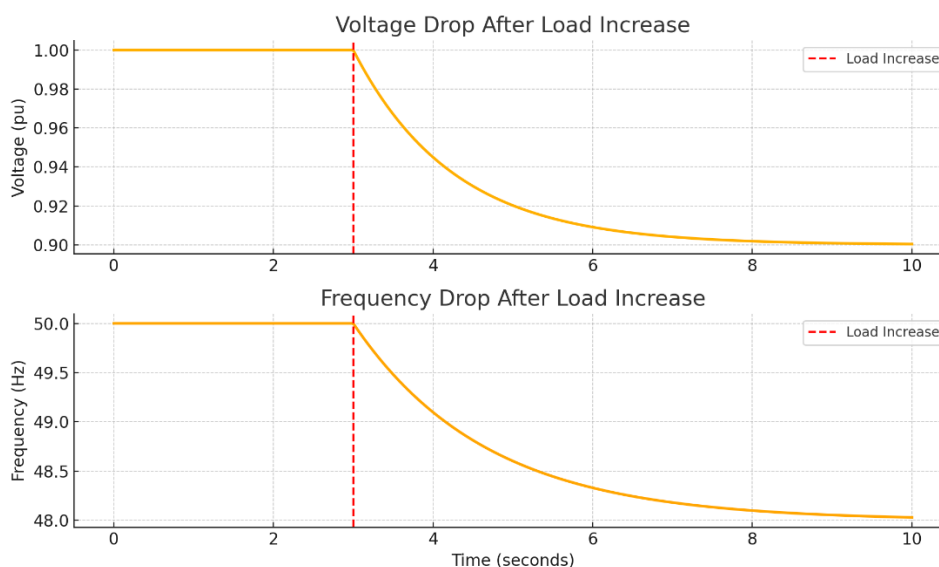
Vienu užfiksuotu atveju nukentėjusio regiono ligoninė patyrė daugybę elektros energijos tiekimo sutrikimų, nors ir buvo įdiegtas mikrotinklas. Pagrindinė priežastis – prastas dažnio reguliavimas: kai debesys staiga sumažino saulės energiją, dažnis nukrito žemiau leistinos ribos, todėl suveikdavo

apsauginės relės. Panašiai, kai saulės energijos perteklius buvo generuojamas be pakankamos apkrovos, dažnis šoktelėdavo, o tai sukeldavo nestabilumą. Teigiama, kad „didelė žala, logistiniai apribojimai ir salos orografija buvo svarbūs veiksniai, lėmę itin lėtą atstatymo procesą, dėl kurio salos elektros tinklas buvo labai mažai atsparus“.[4]

Siekiant sušvelninti šias problemas, vėliau Puerto Rike buvo diegiami mikrosistemų įrenginiai:

- energijos kaupimo sistemos (ESS), kad būtų išlyginti svyravimai.
- Pažangios dažnio valdymo strategijos, pavyzdžiui, „droop“ valdymas ir „fuzzy logic“ valdikliai, kad būtų galima dinamiškai stabilizuoti mikrotinklą.
- tinklą formuojantys inverteriai, kurie padėjo reguliuoti įtampą ir dažnį net ir nesant tradicinės sinchroninės generacijos.

Įtampos ir dažnio stabilumas yra labai svarbūs mikrotinklo veikimo aspektai, ypač integruojant atsinaujinančius energijos išteklius (AEI). Skirtingai nei įprastinės elektrinės, kurios remiasi dideliais besisukančiais generatoriais, užtikrinančiais būdingą inerciją ir stabilumą, mikrotinklai su AEI susiduria su didesniu kintamumu dėl jų priklausomybės nuo aplinkos sąlygų. PV sistemos gamina energiją, priklausomai nuo saulės šviesos, o vėjo turbinos priklauso nuo vėjo greičio, todėl jų galia iš esmės svyruoja. Šie svyravimai daro tiesioginę įtaką įtampos lygiui ir sistemos dažniui, o tai kelia didelių problemų stabiliam darbui.



2 pav. Įtampos ir dažnio kritimas padidėjus apkrovai

Viena iš pagrindinių problemų, darančių įtaką įtampos stabilumui, yra dinamiškas elektros energijos gamybos pobūdis AEI pagrindu veikiančiuose mikrotinkluose. Staigūs saulės šviesos intensyvumo ar vėjo greičio pokyčiai gali sukelti staigius įtampos svyravimus kaip parodyta 2pav., kurie, jei nėra tinkamai kontroliuojami, gali sukelti sistemos nestabilumą. Sinchroninių generatorių nebuvimas taip pat riboja sistemos galimybes užtikrinti reaktyviosios galios palaikymą, kuris yra būtinas įtampos stabilumui palaikyti. Šiems uždaviniams spręsti taikomi įvairūs įtampos reguliavimo metodai, įskaitant automatinius įtampos reguliatorius (AVR), statinius VAR kompensatorius (SVC) ir lanksčias kintamosios srovės perdavimo sistemas. Šios sistemos padeda valdyti įtampos svyravimus, prireikus įleisdamos arba absorbuodamos reaktyviąją galią.[5]

Dažnio stabilumas mikrotinkluose taip pat labai svarbus, nes nukrypimai nuo vardinio dažnio gali lemti sistemos gedimus arba apkrovų atjungimą. Tradicinėse elektros energijos sistemose dažnio stabilumą palaiko didelių generatorių inercija, kuri slopina dažnio svyravimus. Tačiau atsinaujinančiais energijos ištekliais grindžiamuose mikrotinkluose tokios momento inercijos nėra, todėl jie yra jautresni staigiems dažnio nuokrypiams. Pavyzdžiui, jei virš saulės energijos parko praslinko debesis, staiga sumažėjusi elektros energijos gamyba gali sukelti dažnio kritimą. Nesant tinkamos kompensacijos, gali suveikti apsauginiai mechanizmai, dėl kurių izoliuojamos mikrotinklo dalys arba visiškai sugenda sistema.

Siekiant sumažinti dažnio nestabilumą, mikrotinkluose taikomos įvairios valdymo strategijos. Pirminis dažnio valdymas dažnai pasiekiamas taikant droop valdymą, kai generavimo galia reguliuojama reaguojant į dažnio pokyčius. Pažangesni metodai, pavyzdžiui, apkrovos dažnio valdymas, taikomi antriniam dažnio valdymui, siekiant atkurti sistemos dažnį iki nominaliosios vertės. Be to, energijos kaupimo sistemos (ESS), pavyzdžiui, baterijų energijos kaupimo sistemos (BESS) ir superkondensatoriai, atlieka svarbią funkciją užtikrinant greitą dažnio atsaką, nes prireikus tiekia arba absorbuoja energiją. Šios kaupimo sistemos veikia kaip virtuali inercija, imituojanti įprastinių generatorių stabilizuojantį poveikį ir padedanti išlaikyti dažnio stabilumą, kai nėra besisukančios masės.

Dar vienas svarbus dažnio stabilumo valdymo metodas – naudoti tinklą formuojančius inverterius, kurie nustato mikrotinklo etaloninę įtampą ir dažnį. Skirtingai nuo tradicinių tinklą stebinčių inverterių, kurie priklauso nuo išorinio tinklo signalo, tinklą formuojantys inverteriai veikia nepriklausomai ir gali stabilizuoti sistemą dirbant salose. Pažangaus inverterių valdymo, ESS ir dažnio reguliavimo strategijų derinys užtikrina, kad mikrotinklai gali išlaikyti stabilumą net ir atsijungę nuo pagrindinio tinklo.

1.2. Harmoniniai iškraipymai ir elektros energijos kokybės problemos

Harmoniniai iškraipymai kelia nemažai problemų mikrotinkluose, kuriuose integruojami atsinaujinantieji energijos šaltiniai, visų pirma dėl plačiai naudojamų galios elektroninių keitiklių. Šie keitikliai, ypač inverteriai, naudojami PV ir vėjo energijos sistemose, į elektros sistemą įneša harmonikų, iškraipiančių įtampos ir srovės kreives. Skirtingai nuo tradicinių sinchroninių generatorių, kurie natūraliai sukuria sinusines įtampas, galios elektroniniai keitikliai veikia greito perjungimo būdu, todėl atsiranda aukšto dažnio iškraipymų. Ši problema dar labiau paastrėja, kai mikrotinklai veikia salų režimu, kai nėra stipraus tinklo atskaitos, todėl harmonikų mažinimas tampa dar sudėtingesnis.

Harmoniniai iškraipymai kiekybiškai įvertinami naudojant bendrąjį harmoninį iškraipymą (THD) - harmoninio turinio procentinį santykį su pagrindiniu dažniu. Europos standartuose, pavyzdžiui, EN 50160 ir IEC 61000-3-6, apibrėžiamos priimtinos harmoninių iškraipymų elektros tinkluose ribos, kad būtų išvengta pernelyg didelių įtampos ir srovės iškraipymų. Standarte EN 50160 nurodoma, kad normaliomis sąlygomis įtampos THD neturėtų būti aukštesnis nei 8 % žemos įtampos tinkluose ir 5% vidutinės įtampos tinkluose, kad būtų užtikrintas tinkamas prijungtos įrangos veikimas.

Atsinaujinančiais energijos ištekliais pagrįstuose mikrotinkluose harmoninius iškraipymus lemia keli veiksniai:

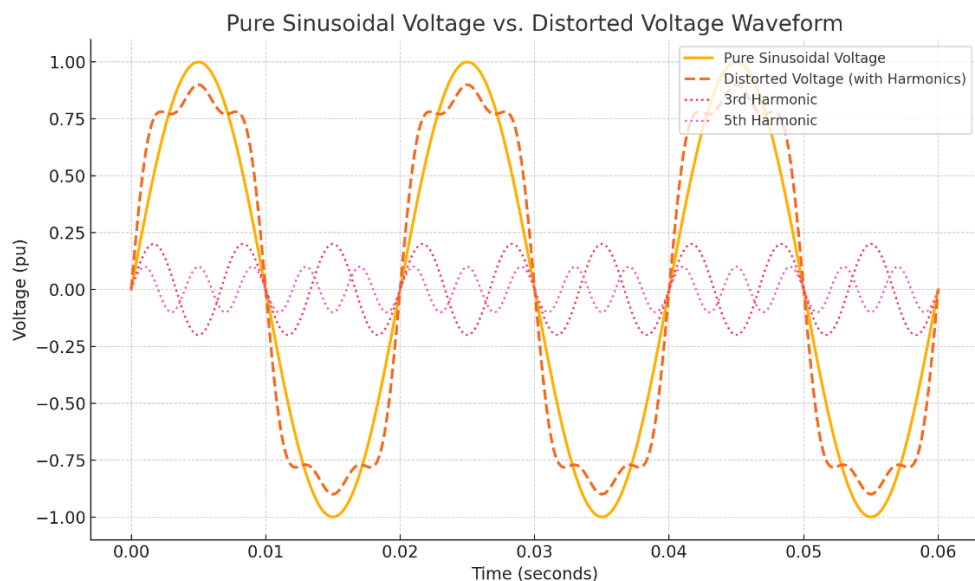
- Galios elektroniniai keitikliai: dėl greito keitiklių ir lygintuvų perjungimo atsiranda aukšto dažnio harmonikų, kurios iškraipo bangų formas.

- Netiesinės apkrovos: elektromobilių įkrovikliai, LED apšvietimas ir pramoninių variklių pavaros vartoja nesusoidines sroves ir taip didina harmoninę taršą.
- Silpnos tinklo sąlygos: kai mikrotinklas veikia izoliuotu režimu, dėl didesnės impedanso varžos jis tampa jautresnis harmoniniams iškraipymams.
- Rezonanso poveikis: tam tikros tinklo konfigūracijos gali sustiprinti tam tikrus harmoninius dažnius, todėl atsiranda pernelyg dideli įtampos iškraipymai.

Pernelyg didelės harmonikos turi keletą neigiamų pasekmių mikrotinklo veikimui, įskaitant:

- Didesnius sistemos nuostolius dėl transformatorių, kabelių ir galios elektroninių prietaisų perkaitimo.
- Apsauginių relių veikimo sutrikimai, dėl kurių gali klaidingai suveikti arba nepavykti aptikti tikrųjų gedimų.
- Elektromagnetiniai trikdžiai (EMI), trikdančios ryšių sistemas ir darantys poveikį jautriems elektroniniams prietaisams.
- Sumažėjęs galios koeficientas, dėl kurio neefektyviai vartojama energija ir padidėja reaktyviosios galios poreikis.
- Spartesnis elektros įrangos nusidėvėjimas, trumpėjantis eksploatavimo laikas ir didėjančios techninės priežiūros išlaidos.

Harmonikų pavyzdys pateiktas 3 pav.



3 pav. AC su harmoniniais iškraipymais

Siekiant palaikyti elektros energijos kokybę, mikrotinkluose taikomos įvairios harmonikų mažinimo strategijos:

- Aktyvieji galios filtrai (APF): jie dinamiškai įleidžia kompensacines sroves, kad neutralizuotų harmonikas realiuoju laiku.
- Pasyvieji galios filtrai (PPF): tai suderinti LC filtrai, kurie sugeria tam tikrus harmoninių dažnius, kad jie neturėtų įtakos tinklui.
- Išplėstinė impulsų pločio moduliacija (PWM): tokie metodai, kaip erdvinė vektorinė PWM ir sinusinė PWM, padeda sumažinti harmonikų injekciją šaltinyje.

- Tinklą formuojantys inverteriai: šie keitikliai aktyviai reguliuoja įtampą ir dažnį, kartu sumažindami harmonikų sklaidimą.
- Energijos kaupimu pagrįstas kompensavimas: baterijų energijos kaupimo sistemos (BESS) ir superkondensatoriai užtikrina greitą galios injekciją, kad išlygintų harmonikų svyravimus.

Integravus šiuos metodus, mikrotinklai gali pagerinti elektros energijos kokybę ir užtikrinti stabilų ir efektyvų atsinaujinančiųjų energijos šaltinių veikimą.

Kaip Z. Liu ir kiti (2015) teigė savo tyrime apie harmoninius iškraipymus mikrotinkluose, „mikrotinklai laikomi perspektyvia galimybe tose vietose, kur pagrindinio tinklo plėtra yra neįmanoma arba neturi ekonominio pagrindo, pavyzdžiui, universitetų miestelių, karinių objektų ir kaimo gyvenviečių elektrifikavimas. Tačiau kartu su šiuo naudingu privalumu yra ir galimų iššūkių, susijusių su saugiu ir geru sistemos veikimu. Viena iš pagrindinių problemų, su kuria susiduriama atliekant mikrotinklų tyrimą, yra elektros energijos kokybės problema".[6]

Ryškus harmoninių iškraipimų, turinčių įtakos mikrotinklo veikimui, pavyzdys buvo pastebėtas Indijoje esančiame nutolusiame saulės energija maitinamame mikrotinkle. Mikrotinkle, tiekiančiame energiją kaimo bendruomenei, pasireiškė didelis bendras harmoninis iškraipymas (THD), viršijantis 10 %, todėl:

- dažnas transformatorių ir maitinimo kabelių perkaitimas dėl per didelį harmoninių srovių.
- įtampai jautrios įrangos, pavyzdžiui, LED apšvietimo ir medicinos prietaisų, veikimo sutrikimai.
- smarkiai pablogėja elektros energijos kokybė, todėl vartotojai nepatenkinti ir padidėja eksploatacinės išlaidos.

Siekdami sušvelninti šias problemas, mikrotinklo operatoriai įdiegė:

- Šuntinius aktyviosios galios filtrus, kad būtų dinamiškai panaikintos harmonikos.
- pažangų PWM valdymą inverteriuose, kuris sumažino žemesnės eilės harmoninius iškraipymus.
- baterijų energijos kaupimo sistemas (BESS) sistemos stabilumui pagerinti ir pereinamiesiems harmoniniams trikdžiams kompensuoti.

Atlikus šiuos patobulinimus, THD buvo sumažintas iki mažiau nei 5 %, užtikrinant atitiktį EN 50160 standartams ir gerokai pagerinant elektros energijos kokybę.[6]

1.3. Energijos kaupimo sistemų funkcija

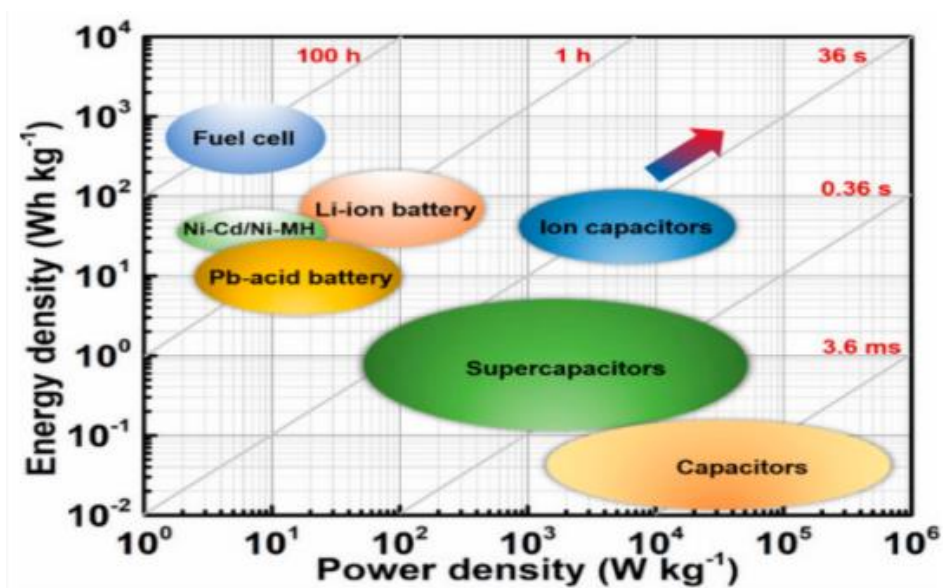
Energijos kaupimo sistemos (ESS) atlieka svarbią užduotį stabilizuojant mikrotinklo darbą, nes padeda spręsti atsinaujinančiųjų energijos išteklių (AEI), tokių kaip saulės ir vėjo energija, nepastovaus pobūdžio problemas. Kaupdamos perteklinę energiją piko metu ir iškraudamos ją, kai paklausa didelė arba gamyba maža, ESS užtikrina patikimą ir subalansuotą energijos tiekimą mikrotinkle.

Vienas iš pagrindinių ESS privalumų - galimybė padidinti dažnio ir įtampos stabilumą. Tradiciniai elektros tinklai, siekdami išlaikyti dažnio balansą, remiasi didelių besisukančių generatorių inercija, tačiau mikrotinklai, kuriuose didelę dalį sudaro AEI, tokios inercijos neturi. ESS, ypač baterijų

energijos kaupimo sistemos (BESS) ir superkondensatoriai, gali užtikrinti greitą dažnio reguliavimą, įleidamos arba absorbuodamos energiją, kai atsiranda svyravimų. Toks dinaminis atsakas padeda sušvelninti dažnio nuokrypius ir sumažina nestabilumo riziką pasikeitus apkrovai ar sumažėjus elektros energijos gamybai.[7]

Kelios šalys sėkmingai integruo ESS į savo mikrotinklo sistemas, kad padidintų stabilumą ir patikimumą:

- Vokietija: ši šalis įdiegė didelio masto baterijų energijos kaupimo sistemas (BESS), kad palaikytų didelę saulės ir vėjo energijos skvarbą, ypač decentralizuotuose tinkluose.
- Australija: Hornsdeilo energijos rezervas, kuriame naudojama „Tesla“ ličio jonų akumuliatorių sistema, pademonstravo didelę dažnio stabilizavimo naudą reaguojant į tinklo sutrikimus.
- Jungtinės Valstijos: Aliaskoje nutolusiuose mikrotinkluose naudojami hibridiniai ESS sprendimai (akumuliatoriai ir smagračiai) tinklo stabilumui palaikyti sudėtingomis sąlygomis, kai naudojama kintama atsinaujinančioji energija.
- Lietuva: šalyje įdiegtos baterijų kaupimo sistemos, siekiant padidinti tinklo stabilumą ir padėti integruoti atsinaujinančiąją energiją, ypač pereinant prie energetinės nepriklausomybės nuo išorės tiekėjų.



4 pav. Skirtingų energijos kaupimo įrenginių energijos tankio ir galios tankio palyginimas [8]

ESS technologijas pagal 4 pav. galima suskirstyti į kategorijas pagal jų reakcijos laiką ir energijos kaupimo trukmę:

- Baterijų energijos kaupimo sistemos (BESS) - ličio jonų baterijos plačiai naudojamos dėl didelio energijos tankio, efektyvumo ir santykinai greitos reakcijos trukmės.
- Superkondensatoriai – jie itin greitai reaguoja į energijos svyravimus, tačiau turi ribotą energijos kaupimo talpą, todėl idealiai tinka trumpalaikiam stabilumo valdymui.
- Hibridiniai akumuliatoriai gali būti naudojami ilgalaikiam saugojimui, o superkondensatoriai - trumpalaikiams svyravimams valdyti.

1 lentelė. Energijos kaupimo technologijos [8]

Technologija	Reakcijos laikas	Energijos tankis	Eksplotavimo trukmė	Naudojimo scenarijus
Ličio jonų baterijos	Greitas (<1s)	Didelis	10-15 metų	Apkrovos subalansavimas
Superkondensatoriai	Labai greitas (<1ms)	Mažas	15-20 metų	Greitas dažnio atkūrimas
Smagračiai	Greitas (<1s)	Vidutinis	+20 metų	Didelės galios įrenginiams
Vandenilio kuro elementai	Lėtas (>1min)	Didelis	+20 metų	Ilgalaikis energijos kaupimas
Švino rūgšties baterijos	Vidutinis (>1s)	Vidutinis	5-8 metai	Atsarginė galia

Nepaisant ESS privalumų pateiktų 1 lentelėje, plačiam jų taikymui mikrotinkluose kyla keli iššūkiai:

- Didelės pradinės sąnaudos: pažangios saugojimo technologijos, tokios kaip ličio jonų akumuliatoriai ir smagračiai, reikalauja didelių pradinių investicijų.
- Degradacijos ir gyvavimo trukmės problemos: laikui bėgant baterijų kaupimo sistemų pajėgumas mažėja, todėl mažėja jų ilgalaikis efektyvumas.
- Integravimo sudėtingumas: norint užtikrinti sklandų ESS ir galios elektronikos, inverterių bei tinklo valdymo sistemų koordinavimą, reikia sudėtingų valdymo algoritmų.
- Aplinkosaugos problemos: akumuliatorių medžiagų gavyba ir utilizavimas kelia tvarumo iššūkių, todėl būtina užtikrinti jų perdirbimą ir antrinį panaudojimą.

ESS ne tik subalansuoja pasiūlą ir paklausą, bet ir atlieka funkciją salų scenarijuose, kai mikrotinklas atsijungia nuo pagrindinio tinklo, jis turi veikti autonomiškai, todėl jam reikia neatidėliotino ir stabilaus energijos šaltinio. ESS užtikrina sklandų energijos perdavimą ir užtikrina, kad svarbiausios apkrovos ir toliau veiktų. Be to, energijos kaupimas gali padėti vykdyti avarinio paleidimo operacijas, todėl mikrotinklas gali vėl įsijungti be išorinio energijos šaltinio.

Dar viena svarbi ESS funkcija - jos indėlis į tinklo pagalbines paslaugas, pvz.:

- Pikinių apkrovų mažinimas – pirminių gamybos įrenginių apkrovos mažinimas iškraunant sukauptą energiją didžiausios paklausos metu.
- Apkrovos išlyginimas – išlygina AEI gaminamos energijos svyravimus, kad būtų palaikomas stabilus tiekimas.
- Reaktyviosios galios palaikymas - padeda reguliuoti įtampos svyravimus kompensuojant reaktyviąją galią.

Siekiant maksimaliai padidinti ESS efektyvumą, taikomos pažangios valdymo strategijos. Pažangios energijos valdymo sistemos (EMS) naudoja prognozavimo algoritmus ir realaus laiko duomenų analizę, kad optimizuotų įkrovimo ir iškrovimo ciklus. Į ESS valdymą vis dažniau integruojami neraiškieji loginiai valdikliai, kad pagerėtų reakcijos laikas ir sprendimų priėmimas esant neapibrėžtoms sąlygoms, taip pagerinant bendrą sistemos stabilumą.

2. Pažangios valdymo strategijos

Norint užtikrinti stabilų ir veiksmingą elektros energijos tiekimą, labai svarbu gerinti elektros energijos kokybę mikrotinkluose. Mikrotinklai, kurie gali veikti nepriklausomai arba kartu su pagrindiniu tinklu, kelia unikalių iššūkių ir suteikia unikalių galimybių. Toliau nagrinėjami įvairūs elektros tinklo kokybės gerinimo mikrotinkluose metodai, daugiausia dėmesio skiriant pažangioms valdymo strategijoms, atsinaujinančiųjų energijos išteklių integravimui, galios elektroniniams prietaisams, reagavimui į paklausą ir apkrovos valdymui.

Valdymo strategijoms tenka labai svarbi užduotis palaikant mikrotinklų stabilumą ir našumą. Droop valdymas yra vienas iš pagrindinių decentralizuotose sistemose taikomų metodų, skirtų valdyti apkrovos pasidalijimą tarp kelių generatorių be tiesioginio ryšio. Reguluojant išėjimo dažnį ir įtampą pagal apkrovą, droop valdymas padeda subalansuoti elektros energijos gamybą ir vartojimą, taip padidinant sistemos stabilumą. Šis metodas remiasi generatorių „droop“ charakteristikomis, t. y. didėjant apkrovai proporcingai mažėja dažnis ir įtampa, todėl galima automatiškai paskirstyti apkrovą.[9]

Dažnio ir aktyviosios galios droop (P-f Droop):

Droop valdymas reguliuoja paskirstytos generacijos įrenginio aktyviąją galią pagal sistemos dažnį:

$$P = P_{set} - K_p(f - f_{nom}) \quad (1)$$

Kai:

P - aktyvioji galia

P_{set} -nustatyta aktyvioji galia

K_p – aktyviosios galios nuokrypio koeficientas

f – išmatuotas sistemos dažnis

f_{nom} – vardinis sistemos dažnis

Kai dažnis nukrenta žemiau vardinės vertės, paskirstytos generacijos įrenginys padidina savo galią, kad palaikytų sistemą ir atvirkščiai.

Įtampos ir reaktyviosios galios nuokrypis (Q-V nuokrypis):

$$Q = Q_{set} - K_q(V - V_{nom}) \quad (2)$$

Kai:

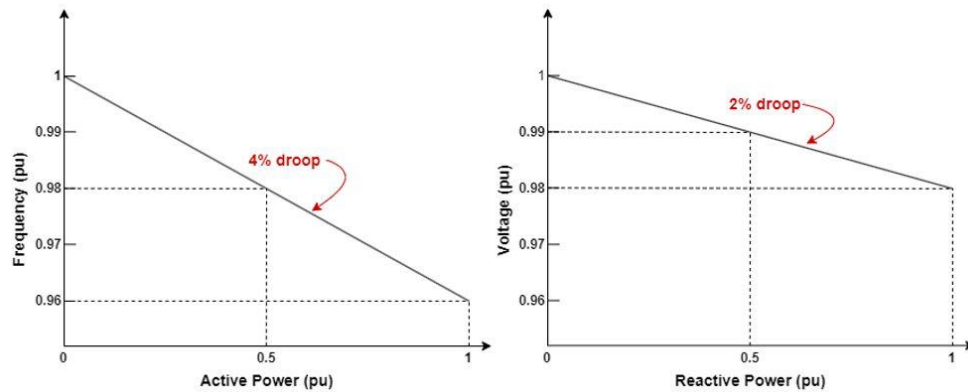
Q – reaktyvioji galia

Q_{set} -nustatyta reaktyvioji galia

K_q – reaktyviosios galios nuokrypio koeficientas

V – išmatuota sistemos įtampa

V_{nom} – vardinė sistemos įtampa



5 pav. Dažnio ir įtampos įprastos kritimo kreivės pavyzdys. [10]

Kaip parodyta 5pav. sumažėjus įtampai, padidėja reaktyvioji galia, padedanti reguliuoti įtampos lygį.

Droop valdymo privalumai:

1. Decentralizuotas veikimas – droop valdymas leidžia decentralizuotai valdyti kelis paskirstytos generacijos įrenginius. Kiekvienas įrenginys veikia nepriklausomai, reguliuodamas savo galią pagal vietos dažnio ir įtampos dydžius. Tai sumažina sudėtingų ryšių tinklų poreikį ir padidina mikrotinklo patikimumą.
2. Mastelio keitimas – dėl decentralizuoto droop valdymo pobūdžio jį iš esmės galima keisti. Naujus paskirstytos generacijos įrenginius į mikrosistemą galima įtraukti be didelių esamos valdymo sistemos pakeitimų.
3. Paprastumas ir patikimumas – droop valdymą gana paprasta įgyvendinti ir suderinti. Jo veikimas grindžiamas paprastais principais, kurie imituoja natūralią sinchroninių generatorių elgseną, todėl jis yra patikimas sprendimas įvairioms darbo sąlygoms.[11]

Droop valdymo minusai:

1. Nuolatinės būsenos paklaida – droop valdymas gali sukelti galios paskirstymo pastoviosios būsenos paklaidas, ypač sistemose, kuriose yra skirtingo pajėgumo ir charakteristikų paskirstytos generacijos įrenginių. Dėl to gali atsirasti galios paskirstymo disbalansas ir neefektyvumas.
2. Dinaminis veikimas – droop valdomos sistemos dinaminis atsakas gali būti ne toks greitas ir tikslus kaip centralizuoto valdymo metodų. Tai gali būti trūkumas sistemose, kuriose sparčiai keičiasi apkrova arba labai kintantys atsinaujinantys energijos šaltiniai.
3. Parametrų jautrumas – droop valdymo efektyvumas yra jautrus droop koeficientų parinkimui. Netinkamas derinimas gali lemti nestabilumą arba neoptimalų veikimą.[12]

Praktikoje droop valdymas gali būti patobulintas papildomomis valdymo strategijomis, kad būtų pašalinti jo trūkumai. Pavyzdžiui:

1. Antrinis valdymas – Siekiant kompensuoti nusistovėjusios būsenos paklaidas ir pagerinti bendrą sistemos veikimą, galima pridėti antrinius valdymo sluoksnius. Tai apima lėtesnius reguliavimus, kuriais laikui bėgant ištaisomi dažnio ir įtampos nuokrypiai.
2. Adaptyvusis droop valdymas – adaptyvūs algoritmai gali dinamiškai koreguoti nuokrypio koeficientus, atsižvelgdami į realaus laiko darbo sąlygas, taip pagerindami stabilumą ir atsaką.

3. Hierarchinis valdymas – integruojami keli valdymo lygiai (pirminis, antrinis, tretinis), leidžiantys koordinuoti droop valdymą su aukštesnio lygio korekcijomis ir taip pagerinti sistemos stabilumą bei dinaminį atsaką. [13]

Kitas sudėtingas metodas – modelio numatomasis valdymas (MPC) kurio valdymo ciklas pateiktas 6pav. MPC – tai pažangi valdymo strategija, naudojama sudėtingoms sistemoms valdyti numatant ir optimizuojant jų būsimą elgesį. Ji ypač veiksminga sistemose, turinčiose daug įėjimų ir išėjimų, dinaminę sąveiką ir apribojimus, todėl idealiai tinka taikyti mikrotinkluose. MPC remiasi dinaminio sistemos modeliu, kad būtų galima prognozuoti jos būsimas būsenas galutiniam laikotarpyje. Kiekviename valdymo etape sprendžiamas optimizavimo uždavinys, kurio tikslas – nustatyti valdymo veiksmus, minimizuojančius iš anksto nustatytą sąnaudų funkciją. Ši sąnaudų funkcija paprastai apima pageidaujamų atskaitos signalų sekimo bei valdymo pastangų mažinimo sąlygas.

Pagrindinis MPC principas apima tolstančio horizonto metodą. Optimizavimas atliekamas per baigtinį prognozavimo horizontą, tačiau įgyvendinamas tik pirmasis valdymo veiksmas. Šis procesas kartojamas kiekviename laiko žingsnyje su atnaujintais matavimais ir prognozėmis. MPC pasižymi tuo, kad aiškiai tvarko įėjimų, būsenų ir išėjimų apribojimus, užtikrindamas saugų ir įmanomą veikimą. Šis gebėjimas yra didelis pranašumas, palyginti su tradiciniais valdymo metodais, kurie dažnai susiduria su apribojimų valdymo sunkumais.[14]

Matematiškai MPC prognozavimo modelį galima pavaizduoti taip:

$$x(t + 1) = f(x(t), u(t)) \quad (3)$$

Kai:

$x(t)$ - būsenos vektorius

$u(t)$ – valdymo vektorius

f – sistemos dinamika

Sanaudų funkcija:

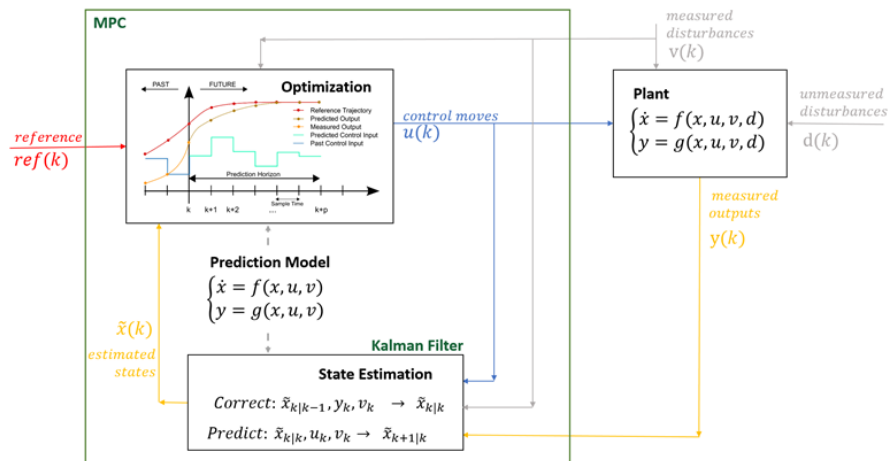
$$J = \sum_{k=0}^{N-1} [(x(t + k) - x_{ref})^T Q (x(t + k) - x_{ref}) + u(t + k)^T R u(t + k)] \quad (4)$$

Kai:

x_{ref} – atskaitos būsena

Q ir R – svorio matricos

N – prognozavimo horizontas



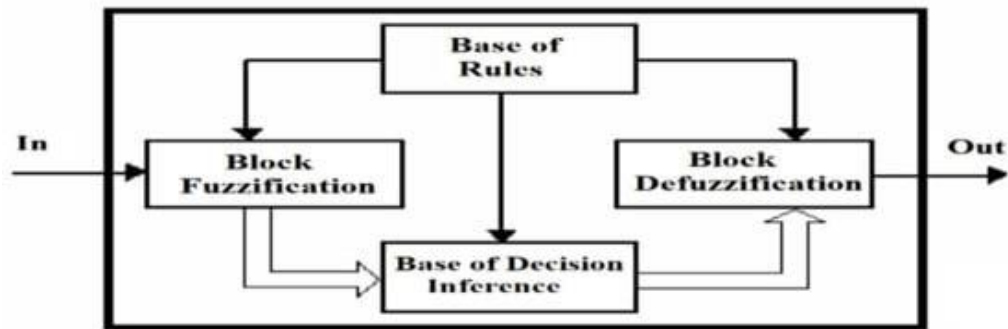
6 pav. MPC pagrindinis valdymo ciklas [10]

MPC turi keletą privalumų, įskaitant optimalų veikimą optimizuojant realiuoju laiku, patikimą apribojimų tvarkymą, lankstumą pritaikant įvairių tipų sistemas (tiesines, netiesines, kintančias laike, daugialypes) ir prognozavimo galimybes, leidžiančias aktyviai valdyti trikdžius ir pokyčius. Tačiau MPC taip pat susiduria su tokiais iššūkiais kaip skaičiavimo sudėtingumas, ypač greitos dinamikos arba ilgo laikotarpio sistemoms, ir priklausomybė nuo modelio tikslumo. Netikslūs modeliai gali lemti neoptimalų arba nestabilų valdymą. Be to, MPC įgyvendinimas gali būti sudėtingas, nes reikia optimizuoti realiuoju laiku ir tvarkyti apribojimus.

Praktiškai įgyvendinant MPC šie uždaviniai sprendžiami taikant įvairius metodus, pavyzdžiui, linijinį MPC, kuriame naudojami linijiniai modeliai ir kvadratinės sąnaudų funkcijos, tinkamos sistemoms, kurias galima aproksimuoti tiesiškai, ir netiesinį MPC, kuriame naudojami netiesiniai modeliai labai netiesinėms sistemoms. Siekiant užtikrinti patikimą veikimą, į patikimą MPC įtraukiami modelio neapibrėžtumai ir trikdžiai.[15]

Neraiškiosios logikos valdymas (FLC) - tai valdymo strategija, pagrįsta neraiškia logika, kuri išplečia klasikinę logiką, kad būtų galima naudoti apytikslus, o ne fiksuotus ir tikslius sprendimus. Informacinė struktūra pateikiama 7pav. FLC ypač veiksminga valdant sudėtingas, netiesines ir blogai apibrėžtas sistemas, kuriose tradiciniai valdymo metodai sunkiai pritaikomi, nes nėra tikslių modelių. Į FLC įtraukiamos ekspertinės žinios ir kalbiniai kintamieji, todėl FLC imituoja žmogaus sprendimų priėmimo procesus, todėl yra labai intuityvi ir lengvai pritaikoma. Atsinaujinančiųjų energijos šaltinių integravimas

FLC procesas pradedamas nuo išsklaidymo („fuzzification“), kai trapiosios įvesties reikšmės paverčiamos išsklaidytais aibėmis. Tam reikia apibrėžti lingvistinius kintamuosius ir narystės funkcijas, kurios parodo, kokių laipsnių įvestis priklauso kiekvienai išsklaidytai aibei. Pavyzdžiui, temperatūros įvestis gali būti aprašyta naudojant lingvistinius kintamuosius, tokius kaip „šalta“, „šilta“ ir „karšta“, kurių kiekvienas turi atitinkamas narystės funkcijas. FLC pagrindas yra taisyklių bazė, kurią sudaro iš ekspertinių žinių arba sistemos elgsenos išvestų „jei - tai“ taisyklių rinkinys. Taisyklės pavyzdys gali būti toks: „Jei temperatūra karšta, padidinkite aušinimo galią“. Šios taisyklės sudaromos naudojant loginius operatorius (AND, OR, NOT), kad būtų galima sujungti daugybę neaiškių įvesties duomenų.[16]



7 pav. FLC informacinė struktūra. [16]

Išvedimo sistema, naudodama taisyklių bazę, apdoroja įvesties neraiškiųjų aibių rinkinius ir generuoja neraiškiųjų išvestis. Ji įvertina taisykles ir sujungia rezultatus, kad gautų išsklaidytą išvesties rinkinį. Galutinis etapas – išsklaidymas, kurio metu išsklaidytoji išvesties aibė paverčiama aiškia verte, kurią galima naudoti sistemai valdyti. Įprasti išsklaidymo metodai apima centroido metodą, pagal kurį apskaičiuojamas neaiškos išvesties aibės svorio centras.

FLC turi keletą privalumų, įskaitant atsparumą sistemos neapibrėžtumui ir svyravimams, nes nereikalauja tikslaus matematinio sistemos modelio. Dėl to jis tinka sudėtingoms ir netiesinėms sistemoms. Dėl lingvistinių kintamųjų ir ekspertinių taisyklių naudojimo FLC yra intuityvus ir lengvai projektuojamas, nes valdymo strategijas galima formuluoti remiantis žmogaus patirtimi ir žiniomis. FLC taip pat yra pritaikoma, nes ją galima lengvai modifikuoti ir išplėsti koreguojant taisyklių bazę ir narystės funkcijas. Šis pritaikomumas leidžia tiksliai sureguliuoti ir patobulinti taisykles be didelių pertvarkymų. Be to, FLC efektyviai valdo netiesiškumą ir gali valdyti sudėtingos elgsenos sistemas, kurias sunku modeliuoti naudojant tradicinius valdymo metodus.

Tačiau FLC susiduria ir su tokiais iššūkiais kaip taisyklių perteklius, kai taisyklių bazės dydis gali eksponentiškai didėti kartu su įvesties kintamųjų skaičiumi, todėl sistema tampa sudėtinga ir reikalaujanti daug skaičiavimų. Priklausomybės funkcijų ir taisyklių projektavimas gali būti subjektyvus, labai priklausyti nuo ekspertinių žinių, kurios gali būti šališkos ir nenuoseklios, jei nėra kruopščiai valdomos. Be to, tiksliai sureguliuoti FLC sistemą, kad būtų pasiektas optimalus veikimas, gali būti sudėtinga ir užimti daug laiko, nes reikia kartotinių bandymų ir koregavimų.

Neraiškiosios logikos valdymas plačiai naudojamas įvairiose srityse - nuo pramoninės automatikos iki buitinės elektronikos. Pramoninių procesų valdyme FLC taikoma sudėtingiems pramoniniams procesams valdyti, kai nėra tikslių modelių, pavyzdžiui, cheminių reaktorių, elektrinių ir gamybos sistemų. Daugelyje plataus vartojimo prietaisų, pavyzdžiui, skalbyklėse, oro kondicionieriuose ir fotoaparatuose, FLC naudojama siekiant pagerinti vartotojo patirtį, atliekant pažangius koregavimus pagal veikimo sąlygas. Automobilių sistemose FLC naudojama variklio valdymui, transmisijos sistemoms ir adaptyviajam greičio palaikymui, gerinant našumą ir degalų naudojimo efektyvumą. Robotikoje FLC padeda navigacijai, kliūčių vengimui ir judesių valdymui, todėl robotai gali sklandžiai veikti dinamiškoje ir neapibrėžtoje aplinkoje.[17]

2.1. Galios elektronikos prietaisai

Galios elektronikos prietaisai yra labai svarbūs elektros energijos kokybei mikrotinkluose palaikyti. Statiniai sinchroniniai kompensatoriai (STATCOM) tai pažangūs galios elektroniniai įrenginiai,

naudojami elektros sistemose įtampai reguliuoti, stabilumui didinti ir elektros energijos kokybei gerinti. STATCOM veikia kaip šuntu prijungti reaktyviosios galios kompensavimo įtaisai, galintys tiekti į tinklą ir talpinę, ir indukcinę reaktyviąją galią. Jie pagrįsti įtampos šaltinio keitiklio (VSC) technologija, kuri pasižymi geresnėmis eksploatacinėmis savybėmis, palyginti su tradiciniais reaktyviosios galios kompensavimo įtaisais, tokiais kaip statiniai kintamosios srovės kompensatoriai (SVC).

Pagrindinis STATCOM komponentas yra įtampos šaltinio keitiklis, kuris nuolatinę įtampą paverčia kintamąja. VSC gali greitai reguliuoti išėjimo kintamosios įtampos amplitudę ir fazės kampą. Valdydamas VSC, STATCOM gali tiekti arba absorbuoti reaktyviąją galią ir taip reguliuoti įtampą savo prijungimo taške. Kai VSC sukuriamą kintamoji įtampa yra didesnė už tinklo įtampą, STATCOM tiekia į tinklą reaktyviąją galią (talpinis režimas). Ir atvirkščiai, kai kintamosios srovės įtampa yra mažesnė už tinklo įtampą, STATCOM iš tinklo sugeria reaktyviąją galią (induktyvusis režimas). STATCOM gali užtikrinti greitą dinaminį atsaką, paprastai per milisekundes, o tai labai svarbu įtampos stabilumui palaikyti pereinamųjų procesų metu, pavyzdžiui, esant gedimams ar staigiems apkrovos pokyčiams.

STATCOM turi keletą privalumų. Jie užtikrina tikslų ir greitą įtampos reguliavimą, didina elektros energijos sistemų stabilumą ir patikimumą. Jie gali veikti plačiame įtampų diapazone ir užtikrinti nepertraukiamą valdymą. Dėl greito STATCOM atsako laiko jie veiksmingai mažina įtampos svyravimus, pakilimus ir mirgėjimą, taip gerindami elektros energijos kokybę. Jie ypač naudingi sistemose, kuriose yra svyruojančių apkrovų arba kur reikia greitai palaikyti įtampą. Be to, palyginti su tradiciniais reaktyviosios galios kompensatoriais, STATCOM paprastai yra kompaktiškesni ir moduliniai, todėl juos lengviau įrengti ir prižiūrėti. Modulinė konstrukcija leidžia išplėsti sistemą ir lanksčiai tenkinti skirtingus sistemos reikalavimus. Užtikrindami dinaminį reaktyviosios galios palaikymą, STATCOM pagerina elektros energijos sistemų pereinamųjų procesų stabilumą, padeda išlaikyti sinchroniškumą trikdžių metu ir slopina galios svyravimus.[18]

Nepaisant to, STATCOM taip pat susiduria su sunkumais. Pradinės investicijos į STATCOM yra palyginti didelės dėl pažangių galios elektronikos komponentų ir valdymo sistemų. Šias išlaidas gali kompensuoti ilgalaikė sistemos patikimumo ir mažesnių eksploatacinių išlaidų nauda. STATCOM reikia sudėtingų valdymo sistemų, kad būtų galima valdyti VSC ir užtikrinti stabilų veikimą. Šių valdymo sistemų projektavimas ir derinimas gali būti sudėtingas, o norint optimizuoti veikimą gali prireikti pažangių valdymo strategijų, tokių kaip modelio numatomasis valdymas arba adaptyvusis valdymas. STATCOM galios elektronikos komponentai išskiria daug šilumos, todėl, siekiant užtikrinti patikimumą ir ilgaamžiškumą, reikalingos efektyvios šilumos valdymo sistemos. Efektyvūs aušinimo sprendimai yra labai svarbūs siekiant išlaikyti našumą didelės apkrovos sąlygomis.

STATCOM plačiai naudojami įvairiose srityse, įskaitant perdavimo ir paskirstymo sistemas, atsinaujinančiosios energijos integravimą ir pramoninius įrenginius. Perdavimo ir paskirstymo sistemose STATCOM padidina įtampos stabilumą ir pagerina elektros energijos kokybę. Jie ypač vertingi silpnuose tinkluose arba ilgose perdavimo linijose, kur įtampos reguliavimas yra sudėtingas. Didėjant atsinaujinančiųjų energijos šaltinių, pavyzdžiui, vėjo ir saulės energijos, paplitimui, STATCOM turi svarbia reikšmę stabilizuojant tinklą, užtikrinant dinaminį reaktyviosios galios palaikymą ir padedant valdyti su atsinaujinančiosios energijos gamyba susijusį nepastovumą ir nepastovumą. Pramonėje STATCOM sumažina įtampos kritimus ir pagerina elektros energijos

kokybę, užtikrindami sklandų jautrios įrangos ir procesų veikimą. Jie taip pat naudojami dideliems varikliams ir pavaroms palaikyti, mažinant su įtampa susijusių sutrikimų riziką.[19]

Dinaminiai įtampos atstatymo įrenginiai (DVR) yra dar vienas svarbus įrenginys, naudojamas jautrioms apkrovoms apsaugoti nuo įtampos sutrikimų. DVR Dinaminiai įtampos atstatymo įtaisai (DVR) – tai pažangūs galios elektronikos prietaisai, naudojami elektros energijos sistemose jautriai įrangai apsaugoti nuo įtampos kritimo, svyravimų ir kitų trikdžių. Jie veikia tiekdami arba absorbuodami įtampą, kad būtų palaikomas pastovus ir stabilus įtampos lygis, taip pagerinant elektros energijos tiekimo kokybę ir patikimumą. DVR paprastai jungiami nuosekliai su apkrova, kurią jie saugo. Atsiradus įtampos trikdžiams, DVR tiekia kompensuojamąją įtampą, kad neutralizuotų trikdžius ir palaikytų pageidaujamą apkrovos įtampą. Ši įtampa tiekama naudojant įtampos šaltinio keitiklį (VSC), kuris generuoja reikiamą kompensacinę įtampą.[5]

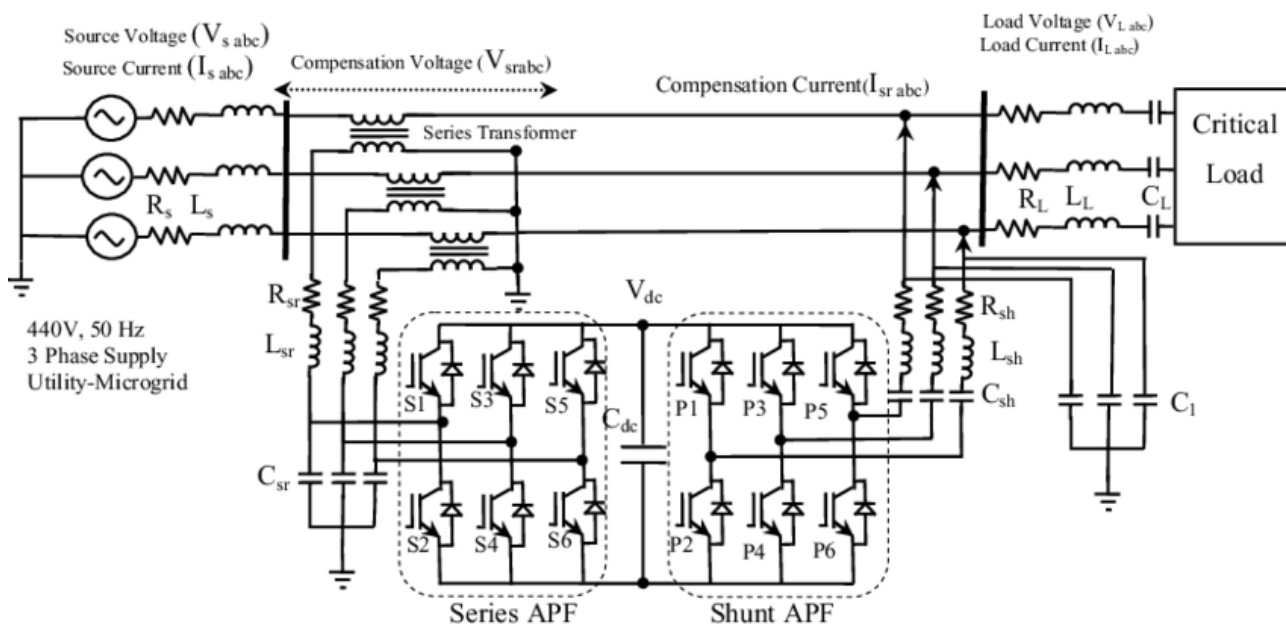
DVR dažnai turi energijos kaupimo sistemą, pavyzdžiui, akumuliatorius arba kondensatorius, kad būtų užtikrinta įtampos kompensavimui reikalinga energija. Ši energijos kaupimo sistema leidžia DVR greitai reaguoti į įtampos kritimus ir svyravimus, užtikrinant nuolatinę apkrovos apsaugą. DVR valdymo sistema stebi įeinančią maitinimo įtampą, aptinka trikdžius, apskaičiuoja reikiamą kompensuojamąją įtampą ir valdo VSC, kad ši įtampa būtų tiekama. Pažangūs valdymo algoritmai užtikrina, kad DVR greitai ir tiksliai reaguotų į įtampos sutrikimus.

DVR turi keletą privalumų. Jie labai efektyviai mažina įtampos svyravimus ir svyravimus, kurie yra dažni elektros energijos sistemų trikdžiai, ir užtikrina patikimą jautrios įrangos ir procesų veikimą. Jie gali užtikrinti kompensaciją per kelias milisekundes, todėl tinkami naudoti tais atvejais, kai reikia greito reagavimo laiko. Palaikydami stabilią tiekiamą įtampą, DVR pagerina bendrą elektros energijos kokybę, sumažina įrangos gedimų riziką ir prailgina elektros prietaisų tarnavimo laiką. Dėl jų gebėjimo valdyti įvairius įtampos trikdžius, įskaitant svyravimus, svyravimus, harmoninius iškreipimus ir nesubalansuotą įtampą, jie yra universalūs. Be to, jų kompaktiška konstrukcija leidžia lengvai integruoti į esamas elektros energijos sistemas, neužimant daug vietos.

Tiesa, DVR taip pat susiduria su sunkumais. Pradinė DVR kaina gali būti palyginti didelė dėl pažangių galios elektroninių komponentų ir valdymo sistemų. Vis dėlto šią kainą gali pateisinti geresnės elektros energijos kokybės ir mažesnio prastovų skaičiaus nauda. DVR efektyvumas priklauso nuo energijos kaupimo sistemos pajėgumo, kuris turi būti pakankamas, kad būtų galima veiksmingai kompensuoti ilgalaikius įtampos sutrikimus. Energijos kaupimo sistemos valdymas ir priežiūra gali padidinti bendrą sudėtingumą ir sąnaudas. DVR reikia sudėtingų valdymo sistemų, kad būtų galima nustatyti įtampos trikdžius ir tiksliai valdyti VSC. Šių valdymo sistemų projektavimas ir derinimas gali būti sudėtingas, o norint optimizuoti veikimą gali prireikti pažangių valdymo strategijų.[20]

Vieningi elektros energijos kokybės reguliatoriai (UPQC) (žr. 8 pav.) sujungia STATCOM ir DVR funkcijas, todėl teikia išsamius sprendimus elektros energijos kokybės problemoms spręsti. UPQC – tai pažangūs galios elektronikos įrenginiai, skirti vienu metu mažinti įvairias elektros energijos kokybės problemas, įskaitant įtampos nuokrypius, svyravimus, harmonikas, mirgėjimą ir disbalansą. UPQC sujungia nuosekliųjų ir šuntinių aktyviųjų galios filtrų funkcijas, užtikrindami visapusišką galios kokybės valdymą viename įrenginyje.[21] Nuoseklusis aktyvusis galios filtras yra nuosekliai sujungtas su elektros linija ir pirmiausia kompensuoja su įtampa susijusias problemas, tokias kaip įtampos svyravimai, nuokrypiai ir harmonikos, tiekdamas kompensacinę įtampą, kad būtų užtikrinta

stabili įtampa apkrovoje. Šuntavimo aktyviosios galios filtras jungiamas lygiagrečiai su apkrova ir užtikrina reaktyviosios galios palaikymą, kompensuoja apkrovos srovės harmonikas ir palaiko pageidaujamą galios koeficientą, įleidamas į elektros sistemą kompensuojamąją srovę.[22]



8 pav. Vieningas elektros energijos kokybės reguliatorius [21]

UPQC turi sudėtingą valdymo sistemą, kuri realiuoju laiku stebi elektros energijos kokybės parametrus, aptinka trikdžius ir apskaičiuoja būtinus nuosekliojo ir šuntinio filtrų kompensavimo veiksmus. Pažangūs valdymo algoritmai, pavyzdžiui, sinchroninio atraminio rėmo teorija arba momentinės reaktyviosios galios teorija, užtikrina tikslų ir greitą kompensavimą. UPQC yra kompleksinis įvairių elektros energijos kokybės problemų sprendimas, vienu metu sprendžiantis įtampos ir srovės kompensavimo klausimus, todėl jis labai efektyvus įvairiose srityse. Bendras nuosekliųjų ir šuntinių filtrų veikimas leidžia kompensuoti ir įtampą, ir srovę, didinant elektros sistemų patikimumą ir stabilumą, užkertant kelią įrangos gedimams, sutrumpinant prastovas ir pailginant elektros įrenginių eksploatavimo laiką.[19,23]

3. Salos tipo mikrotinklo modeliavimas

MATLAB/Simulink programa buvo sumodeliuotas visiškai funkcionalus salos mikrotinklo modelis, skirtas atkartoti autonominį veikimą naudojant kelis paskirstytus energijos šaltinius. Sistemą sudaro PV tinklas, vėjo turbina su nuolatinių magnetų sinchroniniu generatoriumi (PMSG), dyzelinis generatorius (DG), baterijų energijos kaupimo sistema (BESS) ir vieningas elektros energijos kokybės reguliatorius (UPQC). Mikrotinklas suprojektuotas taip, kad veiktų nepriklausomai nuo pagrindinio tinklo, kartu užtikrinant įtampos ir dažnio stabilumą kintančios apkrovos ir gamybos sąlygomis.

Pagrindiniai komponentai:

1. PV sistema modeliuojama sujungtą su DC/DC keitikliu. Keitiklį valdo neraiškia logika pagrįstas valdiklis, kuris realiuoju laiku reguliuoja darbo ciklą pagal įvesties duomenis apie apšvietą ir temperatūrą. Siekiant optimizuoti energijos generaciją kintančiomis aplinkos sąlygomis, taip pat naudojamas didžiausios galios taško sekimas (MPPT)
2. Vėjo energijos posistemyje naudojamas PMSG, kurio mechaninę įvestį lemia vėjo greitis. Generatoriaus išėjimas išlyginamas per diodų tilteli, filtruojamas ir apdorojamas per DC/DC keitiklį, kad būtų reguliuojama išėjimo įtampa. Neraiškūs valdiklis dinamiškai reguliuoja srovės tiekimą pagal vėjo įėjimo ir apkrovos sąlygas.
3. Dyzelinis generatorius modeliuojamas su vidiniais žadinimo ir įtampos reguliavimo blokais. Jo gnybtų įtampą perėjimų metu reguliuoja kvadratinio nulio pagrįsta valdymo struktūra. Modelis taip pat apima paleidimo seką, dažnio reguliavimą ir sąveikos su mikrotinklo apkrova logiką.
4. BESS yra integruotas per dvikryptį nuolatinės srovės DC-DC keitiklį. Įkrovimo ir iškrovimo veiksmai valdomi neaiškos logikos išvestimi ir ribojami SOC slenksčiais, kad būtų išvengta per didelio įkrovimo ar iškrovimo. Loginė funkcija skirsto valdiklio išvestį į įkrovimo ir iškrovimo komandas, taip užtikrindama saugų veikimą.
5. UPQC posistemį sudaro nuoseklūs ir šuntinis įtampos šaltinio keitikliai, sujungti per bendrą DC magistralę. Nuoseklūs keitiklis tiekia kompensacinę įtampą tarp tinklo ir apkrovos, siekiant sumažinti įtampos trikdžius bei harmoninius iškraipymus, o šuntinis keitiklis valdo srovės kokybę, kompensuoja reaktyviąją galią ir palaiko DC magistralės įtampą. Abu keitikliai valdomi koordinuotai, dažnai taikant dq ašies valdymo struktūrą, kuri leidžia tiksliai atskirti aktyviasias ir reaktyviasias komponentes bei užtikrinti efektyvų įtampos ir srovės harmonikų slopinimą.
6. Visi energijos šaltiniai ir kaupikliai prijungiami prie bendros DC linijos. PWM perjungimo dažnis nustatytas 10 kHz, kad būtų užtikrintas mažas harmoninis iškraipymas, o visi blokai sinchronizuojami pagal fiksuotą modeliavimo laiko intervalą, kad būtų užtikrintas nuoseklumas.

Kuriant salos principu veikiančio mikrotinklo valdymo modeli, dėl kelių techninių ir praktinių privalumų buvo pasirinktas neraiškūs loginis valdiklis (FLC), o ne tradicinis droop valdymas ir modelio numatomasis valdymas (MPC). Šis sprendimas pagrindžiamas remiantis modeliavimo rezultatais ir recenzuota literatūra.

Nors droop valdymas paprastai naudojamas galios paskirstymui, jis yra jautrus pastovios būsenos klaidoms ir negali greitai reaguoti į staigius pereinamuosius procesus. Tyrimai parodė, kad sistemose,

kuriose naudojamas droop valdymas, be antrinių valdiklių, esant dideliems apkrovos pokyčiams, dažnio nuokrypis gali siekti iki 8-10 %.[11]

MPC užtikrina gerą dinaminį atsaką ir apribojimų valdymą, tačiau reikalauja didelių skaičiavimo išteklių ir tikslaus sistemos modeliavimo. Simuliacijos atskleidė, kad MPC gali pareikalausiti iki 10 kartų daugiau skaičiavimo laiko nei neraiškiosios logikos skaičiavimai pagal tą patį sistemos modelį, kaip teigia Ramezani et al. (2019), todėl ją nepraktiška įgyvendinti MATLAB / Simulink aplinkoje realiuoju laiku.

FLC gerai tinka hibridinėms energijos sistemoms būdingam sistemos neapibrėžtumui ir netiesiškumui valdyti. Zhou et al. (2015) teigimu, neraiškieji loginiai valdikliai užtikrina geresnį pereinamųjų procesų stabilumą, atsparumą aplinkos svyravimams ir veiksmingą netiesinį valdymą nereikalaujant tikslaus sistemos modelio. Atliekant lyginamąjį modeliavimą, neraiškioji logika parodė, kad:

- 15-20 % greitesnis įtampos atkūrimas po trikdžių, palyginus su droop.
- Iki 12 % mažesnis dažnio nuokrypis esant dinaminės apkrovos perjungimo scenarijams.
- Stabilus veikimas be tikslų matematinių modelių, o tai labai svarbu modeliuojant atsinaujinančius energijos šaltinius su dideliu aplinkos kintamumu. [17]

Šie kiekybiškai įvertinami privalumai patvirtina, kad neraiškioji logika pasirinkta kaip tinkamiausia įdiegtos autonominės mikrotinklo atsinaujinančių šaltinių valdymo metodika.

Sumodeliuota mikrotinklo struktūra analizuojama pagal du pagrindinius veikimo scenarijus, siekiant įvertinti vieningo elektros energijos kokybės regulatoriaus (UPQC) poveikį ir naudą:

- 1) Be UPQC - tai yra bazinis mikrotinklo veikimo scenarijus, kai naudojami standartiniai komponentai ir valdikliai ir netaikomas UPQC.
- 2) Su UPQC - pagal šį scenarijų mikrotinkle įdiegiamas UPQC. Sistema iš naujo simuliuojama identiškomis darbo sąlygomis, siekiant įvertinti įtampos stabilumo, harmonikų slopinimo ir pereinamųjų vyksmų pagerėjimą.

Simuliacijos scenarijus parengtas pagal šią laiko juostą:

0-1 s: Mikrotinklas veikia prijungtas prie tinklo.

1-2 s: Nutraukiamas ryšys su pagrindiniu tinklu. Generatorius įsibėgėja iki vardinės įtampos ir prisijungia, kad palaikytų salos tinklą. Šiuo laikotarpiu mikrotinklas pereina į salos režimą, o inverteris pereina į tinklo formavimo režimą.

2-3 s: Po generatoriaus sinchronizacijos inverteris vėl pradeda veikti pagal tinklą, dabar jau susietas su generatoriumi.

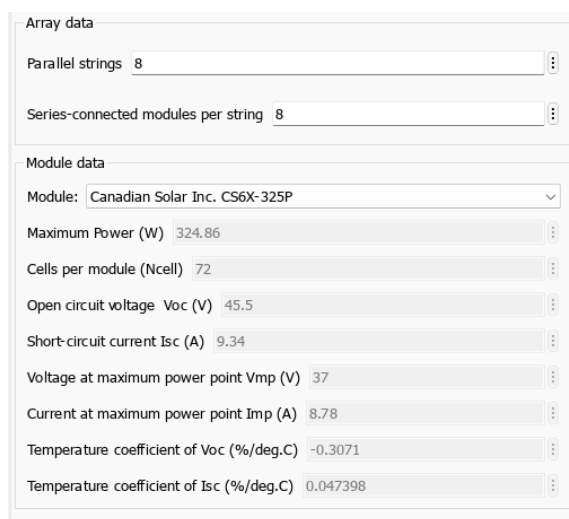
3-4 s: Siekiant įvertinti įtampos reguliavimą ir galios pasidalijimą, įjungiamos papildomos apkrovos.

Kiekvienas scenarijus bus modeliuojamas atskirai, kad būtų galima palyginti UPQC poveikį sistemos veikimui, daugiausia dėmesio skiriant dinaminio atsako gerinimui ir įtampos bei dažnio nuokrypių, taip pat bendrojo harmoninio iškraipymo (THD) mažinimui.

3.1. PV energijos sistemos modeliavimas

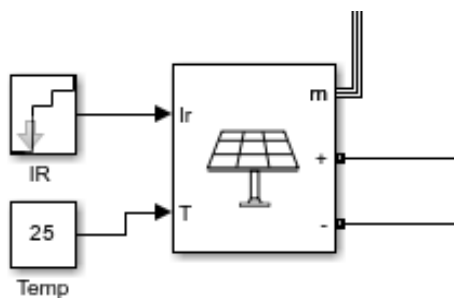
Mikrotinklo PV posistemė yra sukurta taip, kad galėtų gaminti 20 kW elektros energiją. Masyvą sudaro 8 lygiagrečios grandinės, kurių kiekvienoje yra po 8 nuosekliai sujungtus modulius, pagamintus pagal "Canadian Solar Inc. CS6X-325P modulio specifikacija kuri pateikta 9pav. Kiekvienas modulis turi:

- Didžiausia galia: 324.86 W
- Atviros grandinės įtampa (Voc): 45.5 V
- Trumpojo jungimo srovė (Isc): 9.34 A
- Įtampa didžiausios galios taške (Vmp): 37 V
- Srovė didžiausiosios galios taške (Imp): 8.78 A



9 pav. PV tinklo konfigūracija „Simulink“ programoje su nustatytais modulių parametrais

Apšvietos duomenys į PV posistemę patenka kaip kintantys laiko įvesties duomenys (žr. 10 pav.). Šie signalai kiekviename modeliavimo etape daro įtaką fotovoltinių elementų masyvo elektrinei galiai, todėl ji atspindi realius aplinkos pokyčius



10 pav. Apšvietos ir temperatūros įvesties duomenys, naudojami PV modelyje

Didžiausios galios taško sekimo (MPPT) sistemoje naudojamas neraiškusis loginis valdiklis (FLC), pagrįstas Mamdani tipo išvadų sistema. Jis nuolat reguliuoja didinančio keitiklio darbo ciklą, siekdamas užtikrinti, kad fotovoltinė sistema veiktų arti didžiausios galios taško (MPP), kintant apšvitai ir temperatūrai.

FLC naudoja du įėjimus:

Paklaida (e): skirtumas tarp eilės galios matavimų išreiškiamas:

$$e(k) = P(k) - P(k - 1) \quad (5)$$

Kai:

$e(k)$ – paklaida,

$P(k)$ – dabartinis galios matavimas,

$P(k - 1)$ – ankstesnis galios matavimas.

Paklaidos pokytis (Δe): paklaidos pokyčio dydis:

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (6)$$

Kai:

$\Delta e(k)$ – paklaidos pokytis,

$e(k)$ – dabartinė paklaida,

$e(k - 1)$ – buvusi paklaida.

Šios vertės rodo, kaip toli sistema yra nuo didžiausios galios taško ir ar ji artėja, ar tolsta nuo jo. Neaiškaus valdiklio išvestis yra darbo ciklo pokytis (ΔD), kuriuo reguliuojamas impulso pločio signalas, siunčiamas į stiprinimo keitiklio jungiklį. Šioje išvedimo sistemoje naudojamos neraiškiosios taisyklės (pavyzdžiui, jei e yra teigiama ir Δe yra neigiama, tai ΔD šiek tiek sumažėja), kad būtų galima užfiksuoti netiesinę dinamiką ir neapibrėžtumą.

Neraiškųjų valdiklį sudaro (žr. 11 pav.):

- Įvesties narystės funkcijos - septyni lingvistiniai kintamieji
- Taisyklių bazė - 7x7 apibrėžtų kontrolės veiksmų tinklas
- Defuzzifikacija - atliekama taikant centruotės metodą, kad būtų gauta aiški išvestis ΔD

MPPT neaiškus valdiklis išveda PWM moduliacijos koregavimus valdymo dažniu, atitinkančiu perjungimo dažnį.

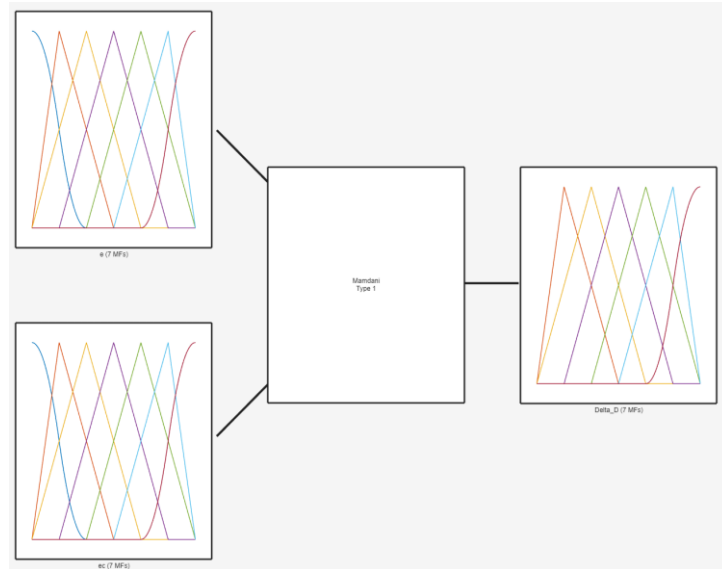
$$f_s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{50 * 10^{-6}} = 20kHz \quad (7)$$

Kai:

f_s – perjungimo dažnis,

T_s – sistemos laiko žingsnis

Taip užtikrinama tinkama skiriamoji geba perjungimui realiuoju laiku, o modeliavimo metu išlieka skaičiavimo efektyvumas.



11 pav. Fuzzy MPPT valdiklio struktūra

Palyginti su įprastais perturb-and-observe arba incremental conductance algoritmais, neaiški logika užtikrina sklandesnę sekimą, mažesnius svyravimus ties MPP ir geresnę reakciją į staigius švitinimo svyravimus.

Kad būtų užtikrintas efektyvus galios keitimas, galios didinimo keitiklis parenkamas pagal šiuos parametrus.

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{296}{500} = 0.408 \quad (8)$$

Kai:

D – darbinis ciklas,

V_{in} – įvesties įtampa,

V_{out} – išvesties įtampa.

$$\Delta I_L = 0.3 * I_{in} = 0.3 * \frac{20800}{296} = 21.08A \quad (9)$$

$$L = \frac{V_{in} * D}{f_s * \Delta I_L} = \frac{296 * 0.408}{20000 * 21.08} = 287\mu H \quad (10)$$

ΔI_L – leistinas srovės pokytis,

I_{in} – įvesties srovė,

L – leistinas induktyvumas

f_s – perjungimo dažnis

Talpa (C) išėjimo pusėje apskaičiuojama pagal įtampos pulsaciją:

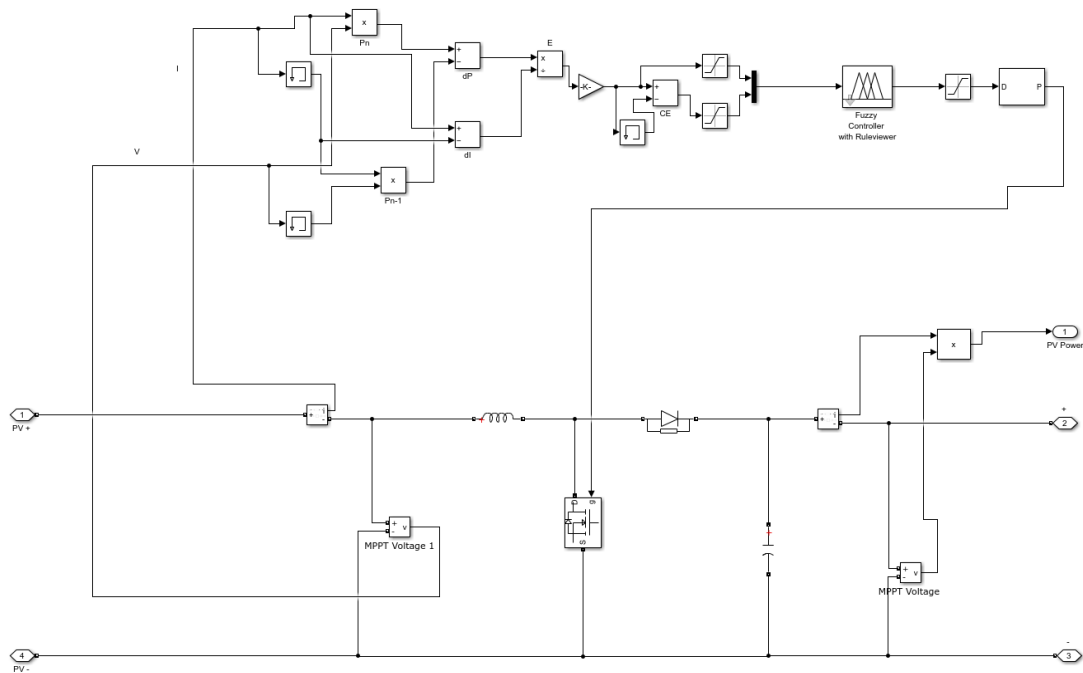
$$C = \frac{I_{out} * D}{f_s * \Delta V} = \frac{41.6 * 0.408}{20000 * 5} = 170\mu F \quad (11)$$

C – talpa,

I_{out} – išvesties srovė,

ΔV – įtampos pulsacija.

Fuzzy valdiklis apmokytas naudojant pavyzdinius duomenų rinkinius, atspindinčius skirtingus apšvietos ir temperatūros scenarijus. Jis naudoja neraiškias taisykles ir neuroninio tinklo mokymąsi, kad nustatytų idealų fotovoltinės sistemos veikimo tašką. Šis derinys leidžia greitai ir tiksliai nustatyti MPPT tiek stabiliomis, tiek greitai kintančiomis sąlygomis.



12 pav. PV MPPT valdymas ir stiprinimo keitiklio grandinė

Induktorius užtikrina nuolatinės srovės tiekimą ir sumažina įvesties pulsacijas, o išvesties kondensatorius išlygina įtampos svyravimus prieš integravimą į nuolatinės srovės grandinę. Komutatorius valdomas PWM impulsais, kuriuos generuoja neraiški MPPT logika, todėl užtikrinamas adaptyvus valdymas realiuoju laiku.

Šis gerai suderintas „fuzzy MPPT“ ir didinamosios konversijos derinys gerokai pagerina dinaminį atsaką, sušvelnina viršijimą ir pagerina bendrą energijos surinkimo efektyvumą, todėl labai tinka mikrotinklų aplinkai.

3.2. Vėjo energijos sistemos modeliavimas

Vėjo energijos posistemis sukurtas taip, kad būtų galima imituoti 20 kW vėjo turbiną, integruotą į mikrotinklą. Joje judančio oro kinetinė energija rotorius menčių pagalba paverčiama mechanine energija, kuri, naudojant nuolatinio magneto sinchroninį generatorių (PMSG), transformuojama į elektros energiją. Išėjimo galia toliau reguliuojama naudojant galios elektroniką ir Fuzzy logiką pagrįstą MPPT valdiklį.

Vėjo turbinos modelyje numatytas kintamo greičio veikimas su polinkio kampo reguliavimu. Mechaninę iš vėjo išgaunamą galią reguliuoja:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (12)$$

kai:

ρ - oro tankis

A - rotoriaus plotas

v - vėjo greitis

C_p - galios koeficientas, priklausantis nuo sūkių skaičiaus santykio (λ) ir posvyrio kampo (β).

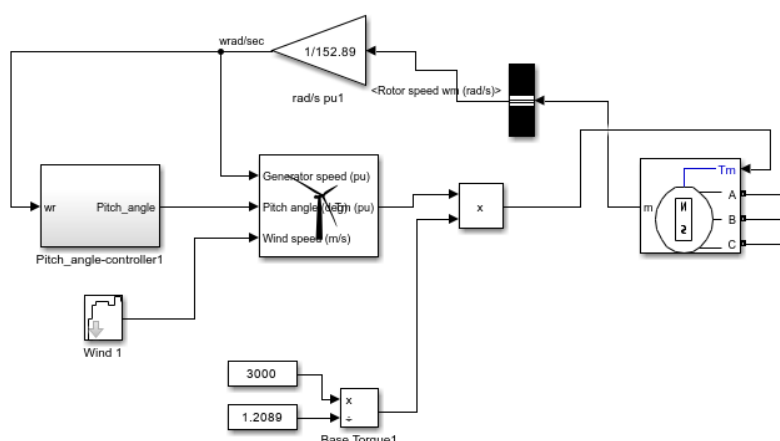
Sumodeliuotas mechaninis sukimo momentas perduodamas 3 fazių sinusiniam PMSG:

- fazių skaičius: 3
- rotorius: apvalus
- grįžtamasis elektromagnetinis laukas: sinusoidinis
- mechaninė įvestis: Sukimo momentas
- Elektrinė konfigūracija: Statorius su Wye jungtimi

Pagrindiniai parametrai:

- $R_s = 0,0918 \, \Omega$
- $L = 975 \, \mu H$
- Srauto ryšys = $0,1688 \, V \cdot s$
- Polių poros = 4

Turbinos rotoriaus greitis reguliuojamas per posvyrio reguliavimą, kad būtų apribotas per didelis greitis (žr. 13pav.). Proporcinis posvyrio valdiklis reguliuoja menčių kampus pagal nuokrypį nuo vardinio greičio, filtruojamas su greičio ribomis, kad būtų užtikrintas sklandus valdymas.



13 pav. Vėjo turbinos-PMSG su posvyrio kampo valdymu

Vėjo sistemos didžiausios galios taško stebėjimui (MPPT) naudojamas fuzzy loginis valdiklis, kuriame naudojama Mamdani išvada (žr. 14 pav.).

Įvestys:

Paklaida (e): skirtumas tarp eilės galios matavimų išreiškiamas:

$$e(k) = P(k) - P(k - 1) \quad (13)$$

Kai:

$e(k)$ – paklaida,

$P(k)$ – dabartinis galios matavimas,

$P(k - 1)$ – ankstesnis galios matavimas.

Paklaidos pokytis (Δe): paklaidos pokyčio dydis:

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (14)$$

Kai:

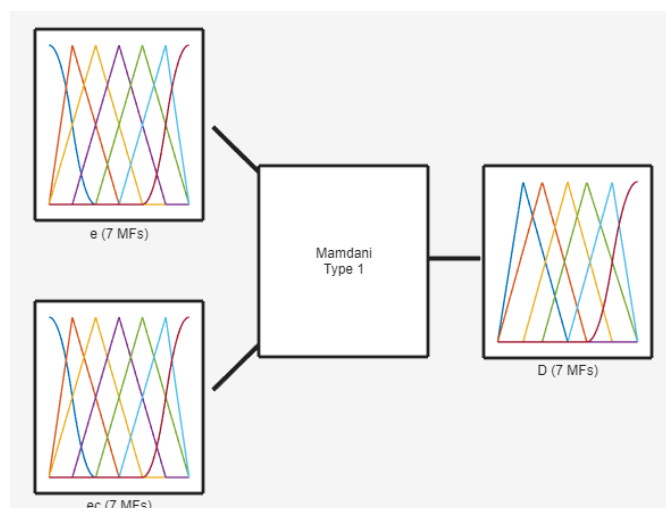
$\Delta e(k)$ – paklaidos pokytis,

$e(k)$ – dabartinė paklaida,

$e(k - 1)$ – buvusi paklaida.

Išvestis reguliuoja PWM impulso, valdančio stiprinimo keitiklį, darbo ciklą. Priklausomybės funkcijos (po 7 kiekvienai įvesties/išvesties funkcijai) sudaro 49 taisyklių bazę.

Šis valdiklis nuolat seka vėjo sistemos didžiausios galios tašką, kompensuodamas sukimo momento ir greičio bei vėjo greičio dinamikos netiesiškumą.



14 pav. Vėjo turbino modelio parametrų nustatymai

Stiprinamasis keitiklis padidina išlygintą DC įtampą, kad ji atitiktų mikrotinklo 500 V DC grandinės įtampą. Įvesties įtampa V_{in} gaunama iš PMSG lygintuvo išėjimo. Remdamiesi generatoriaus specifikacijomis ir 2400 aps/min sukimosi greičiu, įėjimo įtampą galime apskaičiuoti pagal sinusoidinį atgalinį EML ir srauto ryšį:

$$\omega_e = \frac{2\pi * f_m * p}{60} = \frac{2\pi * 2400 * 4}{60} = \frac{1005.3rad}{s} \quad (15)$$

Kai:

ω_e – elektrinis kampinis greitis,

f_m – mechaninis sukimosi dažnis,

p – polių porų skaičius.

$$V_{LL} = \sqrt{3} * K_e * \omega_e = \sqrt{3} * 0.1688 * 1005.3 \approx 293.6V \quad (16)$$

Kai:

V_{LL} – linijinė įtampa

K_e – EML pastovus koeficientas

ω_e – elektrinis kampinis greitis

$$V_{rec} \approx \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * V_{LL} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * 293.6 \approx 396V \quad (17)$$

Kai:

V_{rec} – lygintuvo išėjimo vidutinė DC įtampa

V_{LL} – linijinė įtampa

Taigi išlyginta įtampa, tiekama į stiprinimo keitiklį, yra maždaug 396 V.

Darbinis ciklas (D):

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{396}{500} = 0.208 \quad (18)$$

Induktyvumas (L):

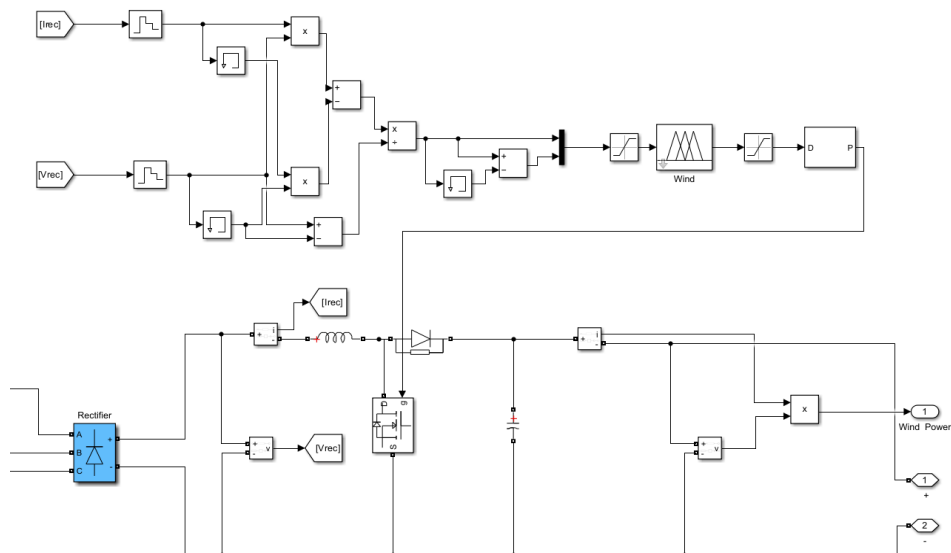
$$\Delta I_L = 0.2 * I_{in} = 0.2 * \frac{15000}{396} = 7.58A \quad (19)$$

$$L = \frac{V_{in} * D}{f_s * \Delta I_L} = \frac{396 * 0.208}{20000 * 7.58} = 0.544mH \quad (20)$$

Išvesties talpumas (C):

$$C = \frac{I_{out} * D}{f_s * \Delta V} = \frac{30 * 0.208}{20000 * 5} = 312\mu F \quad (21)$$

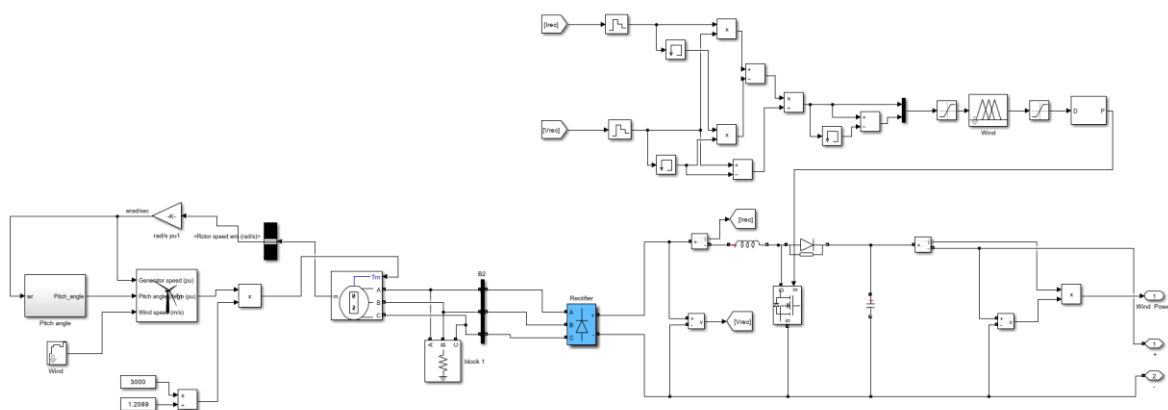
PMSG elektros energija tiekama per diodų tiltelio lygintuvą, kad būtų gaunama nuolatinė išėjimo įtampa (žr. 15 pav.). Ši DC įtampa reguliuojama ir prijungiama prie mikrotinklo DC magistralės, kad būtų galima subalansuoti apkrovą ir bendrai naudoti elektros energiją.



15 pav. Stiprinimo keitiklis su „Fuzzy MPPT“ integracija

Vėjo posistemėje vėjo greičio svyravimai paverčiami į naudingąją galią taikant dinaminį turbino posvyrio valdymą, PMSG generavimą ir neraiškų MPPT reguliavimą. Pagal neraiškiosios logikos metodą konverterio darbo ciklas pritaikomas optimaliai nuolatinės srovės tinklo įtampai, sumažinant pulsacijas ir užtikrinant stabilumą.

- Krypties valdymas užtikrina aerodinaminį efektyvumą
- MPPT maksimaliai padidina energijos gamybą
- Stiprinimo keitiklis, atitinkantis mikrotinklo standarto įtampą



16 pav. Neraiškios logikos MPPT valdiklio nustatymai

Ši hibridinė neraiškiojo PMSG konfigūracija puikiai veikia kintamo vėjo sąlygomis, greitai konverguoja į MPP ir yra atspari turbulencijai. Energijos vartojimo efektyvumo ir dinaminio stabilumo požiūriu ji gerokai lenkia tradicinius lookup table arba PI grindžiamus metodus. Pilnas vėjo elektrinės modelis pateiktas 16pav.

3.3. Dyzelinių generatorių integracija

Dyzelinis generatorius (DG) mikrotinkle veikia kaip svarbus atsarginis šaltinis salos režimu ir tiekia energiją, kai nepakanka atsinaujinančiųjų šaltinių arba sutrinka tinklo darbas. Visą posistemį sudaro trifazė sinchroninė mašina, žadinimo sistema, dyzelinis variklis su reguliatoriumi ir su paleidimo relės logika integruotas salos veikimo aptikimo mechanizmas. Tokia konfigūracija užtikrina, kad DG veiktų tik tada, kai reikia, ir prisideda prie mikrotinklo dažnio ir įtampos stabilumo.

Sinchroninė mašina modeliuojama tiesioginio kvadratinio nulinio sistemoje, naudojant 30 kVA, 400 V, 50 Hz generatoriaus parametrus. Ši transformacija supaprastina kintamosios srovės sistemos dinamiką, nes laiko atžvilgiu kintantys trifaziai signalai paverčiami pastoviomis nuolatinės srovės vertėmis, todėl valdymas ir analizė tampa efektyvesni.

2 lentelė. Generatoriaus parametrai

X_d	1.56
X'_d	0.296
X''_d	0.177
X_q	1.06
X''_q	0.177
X_l	0.052
T'_d	3.7s
T''_d	0.05s
T''_q	0.05s
H	1.07
R_s	0,0036

Sužadavimo sistema modeliuojama pagal IEEE AC1A. Ji reguliuoja lauko žadinimą, kad stabilizuotų generatoriaus gnybtų įtampą pereinamojo ir nusistovėjusio režimo sąlygomis.

3 lentelė. Žadinimo parametrai

Regulatoriaus stiprinimas ir laukas K_a, T_a	400, 0.02
Įtampos ribos	-5.43, 6.03
Keitiklio įžadinimo įtampa	4.18 3.14
Soties kreivės $S_{e1} S_{e2}$	0.10 0.03
Išmagnetinimo koeficientas K_d	0.38
Lygintuvo apkrovos koeficientas K_c	0.2

Dyzelinis variklis valdomas naudojant regulatoriaus modelį, kuris atspindi ir regulatoriaus, ir pavaros dinamiką. Šis modelis imituoja degalų tiekimo ir mechaninio sukimo momento susidarymo procesą.

Regulatoriaus perdavimo funkcija:

$$H_c(s) = \frac{K(1 + T_3s)}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)} \quad (22)$$

Kai:

K – pastiprinimo koeficientas,

T_1 – pirmoji laiko konstanta,

T_2 – antroji laiko konstanta,

T_3 – trečioji laiko konstanta,

Pavaros perdavimo funkcija:

$$H_a(s) = \frac{K(1 + T_4s)}{(1 + T_5s)(1 + T_6s)} \quad (23)$$

Kai:

T_4 – pirmoji pavaros laiko konstanta,

T_5 – antroji pavaros laiko konstanta,

T_6 – trečioji pavaros laiko konstanta,

Siekiant užtikrinti, kad generatorius įsijungtų tik sutrikus tinklo darbui, naudojama MATLAB pagrįsta salos aptikimo logika (žr. 17 pav.). Ji lygina sistemos dažnį su ribinėmis vertėmis ir įjungia DG paleidimo relę:

- Tinklas laikomas izoliuotu, jei $f < 49.5$ Hz arba $f > 50.5$ Hz
- Vėlavimas apsaugo nuo klaidingo suveikimo
- Atkūrus stabilų dažnį, po stabilaus laikotarpio bandoma atkurti ryšį

```
if clk < 2
    TS = 0;
    return;
end

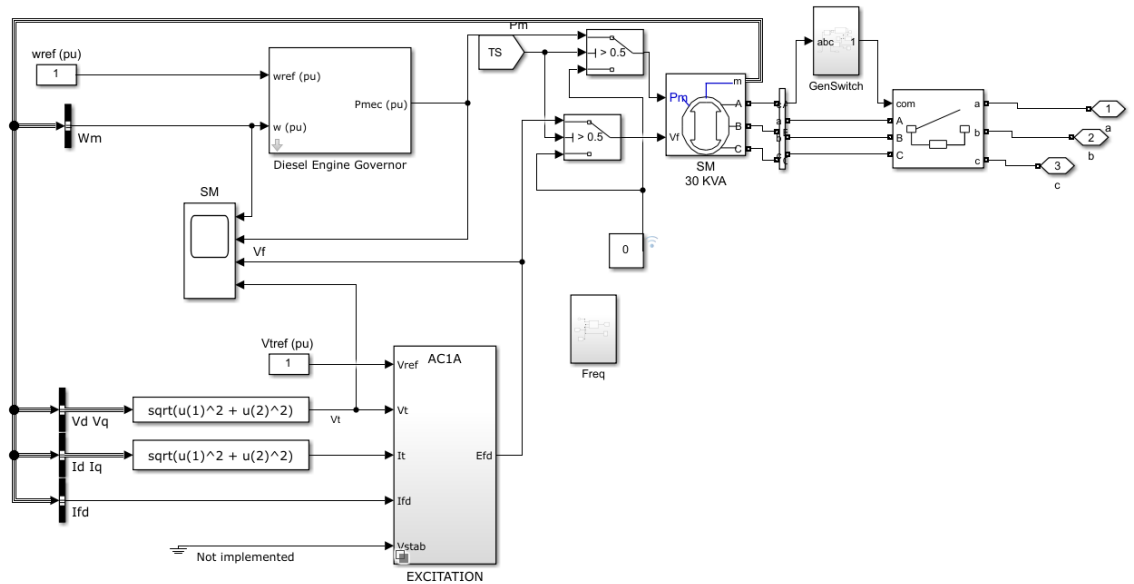
if (Freq < SysFreq - SysFreq*(UFset/100)) || (Freq > SysFreq + SysFreq*(OFset/100))
    if CaptureClk == 0
        StopClk = clk + delay;
        CaptureClk = 1;
    end
    if (RelayState == 0) && (clk >= StopClk)
        TripTime = clk + delay;
        RelayState = 1;
        RecoveryStart = 0;
    end
else
    CaptureClk = 0;
end

if RelayState == 1
    if (GridFreq >= 49.5 && GridFreq <= 50.5)
        if RecoveryStart == 0
            RecoveryStart = clk;
        elseif (clk - RecoveryStart >= minStableTime)
            RelayState = 0;
        end
    else
        RecoveryStart = 0;
    end
end

TS = double(RelayState);
```

17 pav. Relės suveikimo pavyzdys

DG sistema integruojama į mikrotinklą naudojant perjungimo įrenginius (žr. 18 pav.). Aptikus tinklo sutrikimą, generatorius sinchronizuoja ir tiekia aktyviąją ir reaktyviąją galią. Jis grįžta į budėjimo režimą, kai tinklas vėl tampa veikiantis ir stabilus.



18 pav. dyzelinio generatoriaus posistemis

3.4. Baterijos energijos saugojimo sistema

Baterijų energijos kaupimo sistema (BESS) mikrotinkle naudojama energijos balansui palaikyti bei įtampos ir dažnio stabilumui užtikrinti salos režimu. Ji veikia kaip rezervinė sistema, įsijungianti esant aktyviosios galios disbalansui tarp atsinaujinančių išteklių gamybos ir apkrovos. Baterija yra valdoma remiantis netiesine valdymo logika, apimančia realiuoju laiku stebimą galios disbalansą bei dažnio nuokrypį.

Sistema naudoja neraiškiosios logikos valdiklį, kuris įvertina du įėjimus: grynąją galią P_{net} ir dažnio nuokrypį (žr. 19 pav.). Išvestis yra nuolatinio veikimo reikšmė, nusakanti akumuliatoriaus įkrovimo ar iškrovimo intensyvumą. FLC yra Sugeno tipo, su penkiomis narių funkcijomis kiekvienam išvesties lygiui. Įvesties ašyse – penkios narių funkcijos ir trys narių funkcijos dažniui.

$$P_{net} = P_{RE} - P_{load} \quad (24)$$

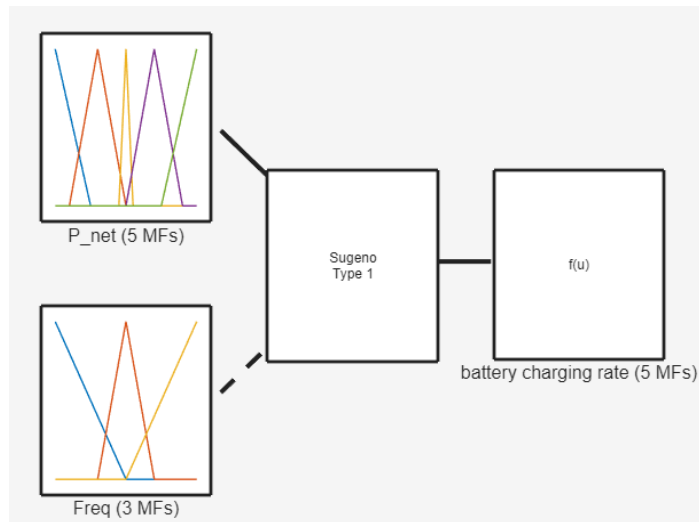
kur:

P_{RE} - bendra atsinaujinančios elektros energijos gamyba

P_{load} - momentinis mikrotinklo elektros energijos poreikis

Ši vertė rodo, ar mikrotinkle yra deficitas (reikia iškrauti), ar perteklius (reikia įkrauti).

FLC yra Sugeno 1 tipo, sudarytas iš penkių trikampių narystės funkcijų įėjimui ir atitinkamų pastovių išėjimo lygių:



19 pav. BESS neraiškysis valdiklis

Valdiklio išvestis perduodama į MATLAB funkcijos bloką, kuris ją padalina į du darbo ciklus: Dcharge ir Ddischarge, atsižvelgdamas į baterijos įkrovimo lygį (SOC) (žr. 20 pav.). Įgyvendinta logika: ribojamas išėjimas iki intervalo [0, 1].

- Kai SOC < 20 % – blokuojama iškrova;
- Kai SOC > 95 % – blokuojamas įkrovimas;
- 0 vertė reiškia „neveikimą“ – neutralus režimas;
- Tik vienas ciklas aktyvus vienu metu (arba įkrovimas, arba iškrovimas);

```
function [D_charge, D_discharge] = split_duty(fis_out, SOC)

    [-1, 1];
    fis_out = min(max(fis_out, -1), 1);

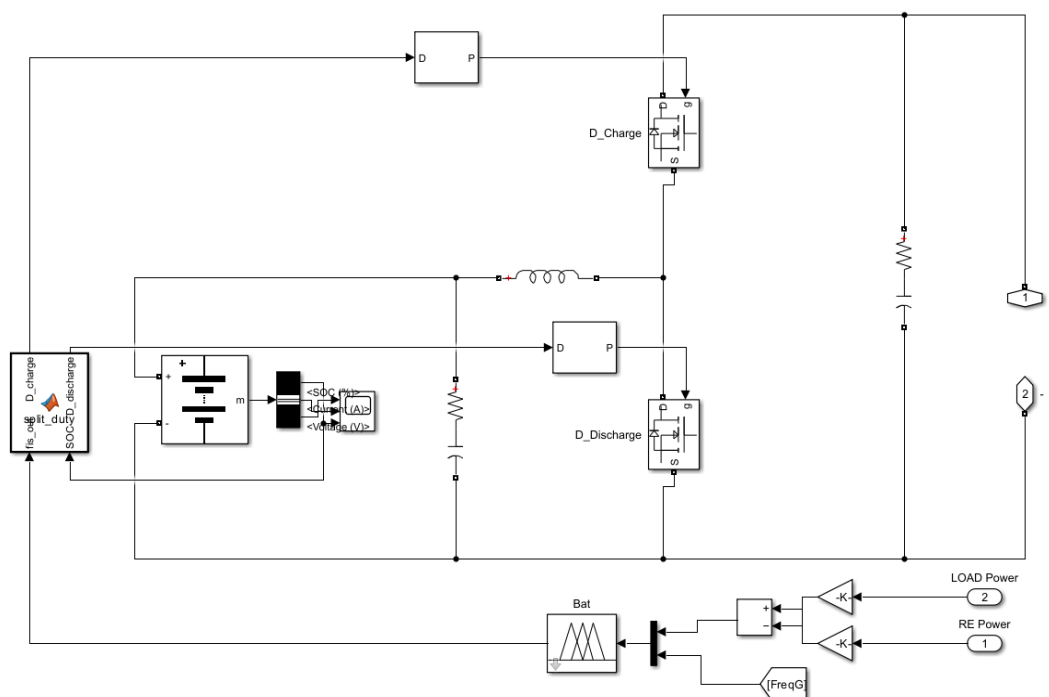
    if SOC <= 20
        fis_out = max(fis_out, 0);
    elseif SOC >= 95
        fis_out = min(fis_out, 0);
    end

    if fis_out > 0
        D_charge = fis_out;
        D_discharge = 0;
    elseif fis_out < 0
        D_charge = 0;
        D_discharge = -fis_out;
    else
        D_charge = 0;
        D_discharge = 0;
    end
end
```

20 pav. Funkcijos bloko kodas

Sistema realizuota per dvipusį DC–DC keitiklį, kuris susideda iš atskirų įkrovimo ir iškrovimo MOSFET kanalų. Šie kanalai valdomi PWM signalais pagal valdiklio generuotus darbo ciklus (žr. 21

pav.). Galios srautai stebimi naudojant realiuoju laiku apskaičiuojamą galių skirtumą tarp apkrovos ir atsinaujinančios gamybos, bei dažnio svyravimus mikrotinkle.



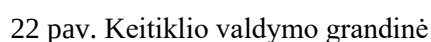
21 pav. Baterijų energijos kaupimo sistema

Po šios integracijos akumuliatorius gali dinamiškai reaguoti į grynosios apkrovos svyravimus ir padėti užtikrinti patikimą sistemos veikimą, savarankiškai reguliuodamas savo darbo režimą

3.5. Galios elektronikos keitikliai ir valdikliai

Inverterio posistemė yra pagrindinė mikrosistemos sudedamoji dalis, ji sumodeliuota kaip trifazis įtampos šaltinio keitiklis (VSC). Ji jungia DC tinklą, kurį palaiko PV, vėjo elektrinė ir BESS, su AC tinklu, todėl galima naudoti tiek prijungtą prie tinklo, tiek ir izoliuotą. Pagrindinės jo funkcijos - aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymas, nuolatinės srovės tinklo įtampos reguliavimas, sinchronizavimas su tinklu ir aukštos elektros energijos kokybės palaikymas.

Inverterio sistema veikia pagal hierarchinę valdymo struktūrą, kurią sudaro išorinis įtampos valdymo ciklas ir vidinis srovės valdymo ciklas. Šios kilpos veikia kvadratinio nulinio besisukančioje atskaitos sistemoje, suderintoje su kintamosios tinklo įtampos vektoriumi per fazės fiksavimo kilpą (PLL). Ši struktūra užtikrina, kad inverteris priklausomai nuo veikimo režimo elgtųsi kaip tinklą palaikantis arba tinklą formuojantis šaltinis (žr. 22 pav.).

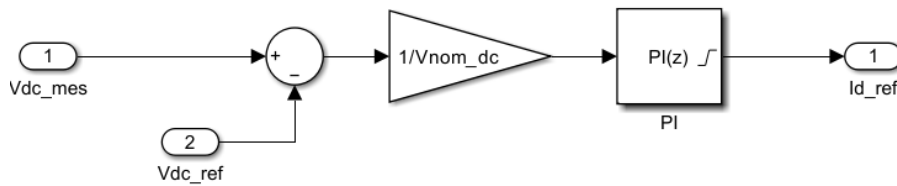


PLL taip pat sukuria kampinį dažnį ω ir fazės kampą θ , kurie reikalingi transformuojant kintamuosius iš abc į dq formą visoje valdymo sistemoje.



DC įtampos stabilizavimui išorinėje valdymo grandinėje naudojamas PI valdiklis. Išmatuota DC įtampa V_{dc}^{meas} lyginama su atskaitos verte V_{dc}^{ref} , o gauta paklaida apdorojama, kad būtų gauta d ašies atraminė srovė. I_{dc}^{ref} .

Ši atskaitos srovė lemia realiosios galios kiekį, kuri turi būti tiekiamas į kintamosios įtampos tinklą. PI valdiklis sureguliuojamas taip, kad būtų pašalinta pastoviosios būsenos paklaida ir kartu greitai reaguojama į nuolatinės įtampos svyravimus, atsirandančius dėl apkrovos pokyčių arba šaltinio nepastovumo (žr. 24 pav.).



24 pav. Nuolatinės įtampos reguliatoriaus blokas

Ši valdymo grandinė yra atsakinga už inverterio išėjimo srovės reguliavimą. Ji gauna I_d^{ref} ir I_q^{ref} kaip įėjimus ir lygina juos su išmatuotomis dq ašies srovėmis. Paklaida perduodama per PI valdiklius, kurie generuoja dq ašies įtampos komandas V_d^{ref} ir V_q^{ref} (žr. 25 pav.).

Siekiant pagerinti veikimą, pridedami išankstiniai atskyrimo nariai, kad būtų panaikintas kryžminio atskyrimo poveikis, atsirandantis dėl induktyvumo ir besisukančios atskaitos sistemos dinamikos:

$$V_d = V_{d,PI} + \omega L I_q \quad (27)$$

$$V_q = V_{q,PI} + \omega L I_d \quad (26)$$

Kai:

V_d, V_q – d ir q ašių įtampos dedamosios

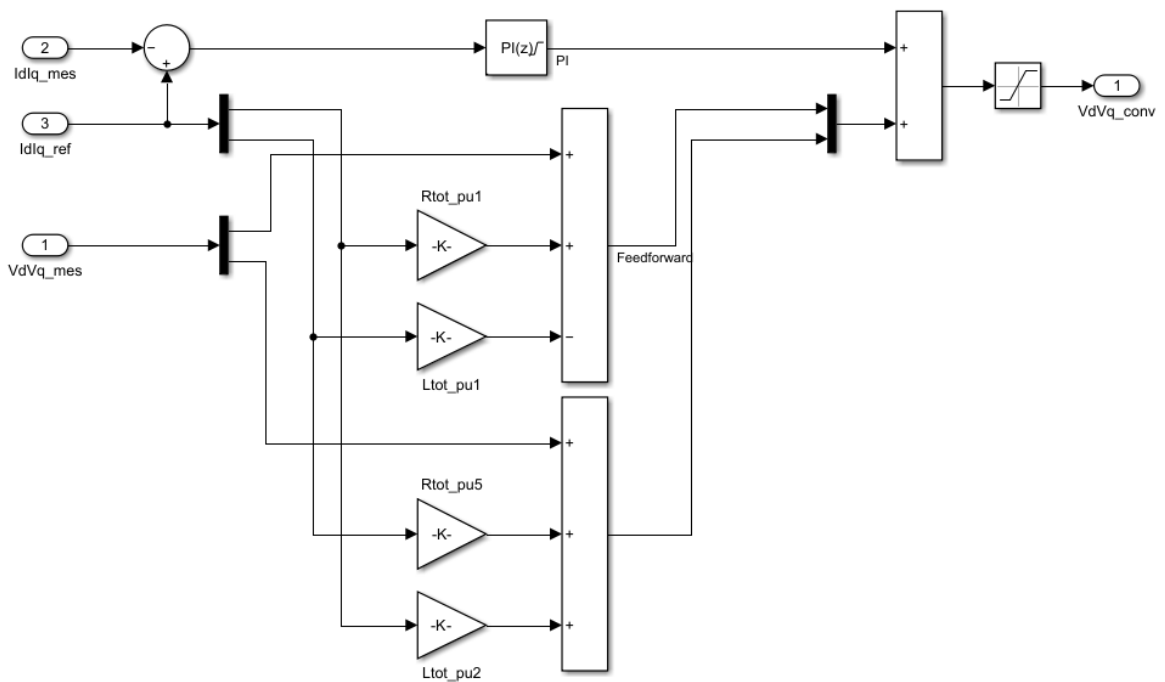
$V_{d,PI}, V_{q,PI}$ – PI valdiklio sugeneruotos įtampos

ω – kampinis greitis

L – filtro induktyvumas

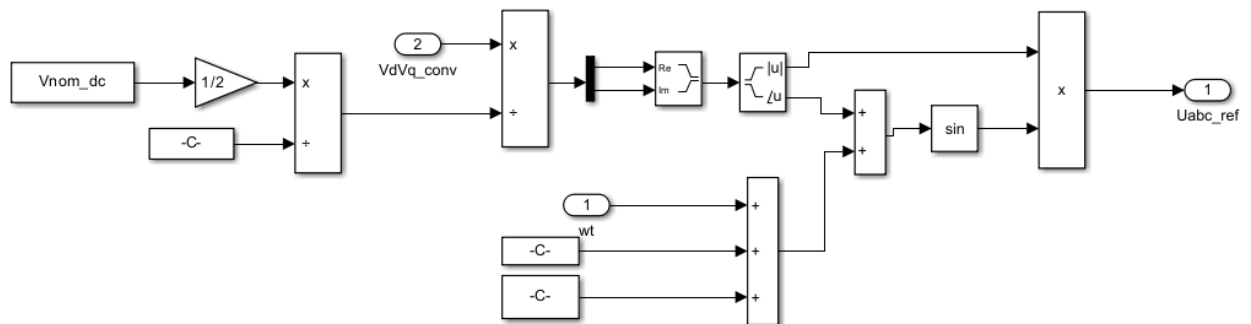
I_q, I_d – d ir q ašių srovės dedamosios

Šios įtampos perduodamos atvirkštinės Parko transformacijos blokui, kad būtų sukurta V_{adc}^{ref} .



25 pav. Srovės valdiklio blokas

Apskaičiuotos dq įtampos konvertuojamos atgal į trifazius dydžius naudojant atvirkštinę dq-abc transformaciją. Šios įtampos siunčiamos į PWM bloką, kuris generuoja IGBT inverterio perjungimo signalus (žr. 26 pav.).



26 pav. Įtampos nuorodos generavimo blokas

PWM perjungimo dažnis parenkamas atsižvelgiant į kompromisą tarp perjungimo nuostolių ir inverterio gebėjimo slopinti harmonikas. Šioje sistemoje naudojamas 10 kHz dažnis. Šis dažnis nustumia aukšto dažnio komponentus (ir jų harmonikas) nuo pagrindinio diapazono, todėl pasyvūs LCL filtrai lengviau slopina ir sumažina bendrąjį harmoninį iškraipymą. Simuliavimo laiko žingsnis yra 5×10^{-5} s - tai atitinka 20 kHz atnaujinimo dažnį - per vieną perjungimo periodą atliekami du simuliavimo žingsniai. Tai užtikrina pakankamą skiriamąją gebą tiksliam impulsų generavimui, kartu išlaikant modeliavimo stabilumą ir efektyvumą.

Kad sinusinė PWM veiktų linijinėje zonoje, moduliacijos indeksas turėtų būti mažesnis nei 1. Šiuo atveju moduliacijos indeksas apskaičiuojamas pagal pageidaujamą AC išėjimo įtampą ir turimą DC tinklo įtampą.

Moduliacijos indeksas m_a apibrėžiamas taip:

$$m_a = \frac{2\sqrt{2}}{3} * \frac{V_{LL}}{V_{dc}} = \frac{2.828}{3} * \frac{400}{500} \approx 0.75 \quad (27)$$

Gautas indeksas 0,75 patvirtina, kad sistema saugiai veikia tiesinės moduliacijos diapazone, išvengdama per didelės moduliacijos ir su ja susijusių įtampos iškraipymų.



27 pav. PWM keitiklis

Siekiant sumažinti keitiklio generuojamas aukšto dažnio harmonikas, jo išėjime įdiegtas LCL filtras. Jį sudaro du nuoseklūs induktoriai ir lygiagreti RC slopinimo atšaka (žr. 28 pav.). Modeliavimui naudojamos vertės apskaičiuojamos pagal sistemos parametrus:

- 1) Induktyvumas - esant 50 kW galiai ir 400 V linijiniai įtampai, linijos srovė yra:

$$I_{rms} = \frac{P}{\sqrt{3} * V_{LL}} = \frac{50000}{\sqrt{3} * 400} \approx 72.2A \quad (28)$$

Kai:

P – generuojama galia

V_{LL} – linijinė įtampa

Darant prielaidą kad 10% pulsacijos ($\Delta I = 7,2A$) su $V_{dc} = 500V$, $f_s = 10kHz$:

$$L_{1,2} = \frac{V_{dc} * D}{f_s * \Delta I} = \frac{500 * 0.75}{10^4 * 7.2} = 5,2mH \quad (29)$$

- 2) LCL filtro rezonansinis dažnis turėtų būti gerokai mažesnis už perjungimo dažnį:

$$f_{res} \approx \frac{f_s}{10} = \frac{10000}{10} = 1kHz \quad (30)$$

- 3) Talpumas ir varža taikant rezonanso sąlygą:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}} \rightarrow C_f = \frac{L_1 + L_2}{4\pi^2 f_{res}^2 L_1 L_2} = \frac{0.0104}{4\pi^2 * 1000^2 * 0.0052 * 0.0052} \approx 9,74\mu F \quad (31)$$

$$R_d = \frac{1}{3 * \zeta * \omega_{res} * C_f} = \frac{1}{3 * 0.3 * 6283 * 9.74 * 10^{-6}} \approx 18.2\Omega \quad (32)$$

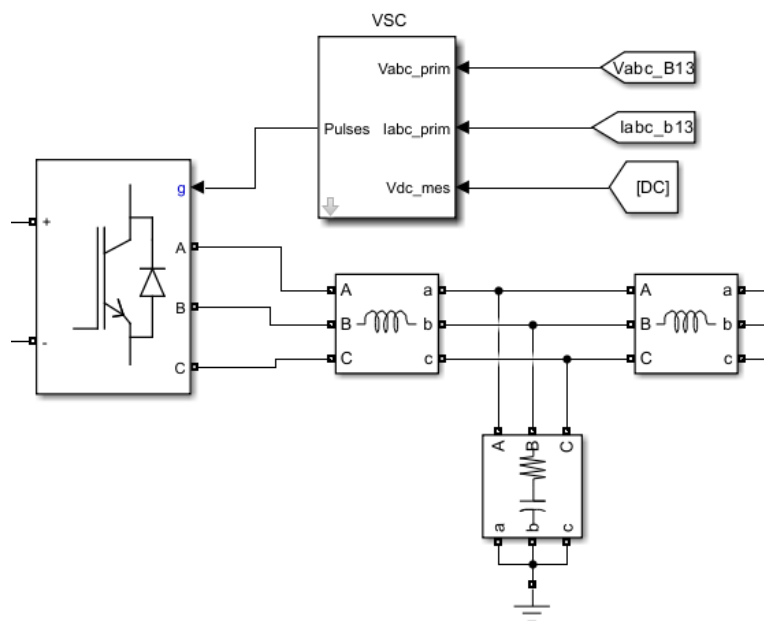
LCL filtro parametrai pateikiami 4 lentelėje.

4 lentelė. LCL filtras

L_1	5.2mH	Apriboja srovės pulsacijas
L_2	5.2mH	Apriboja tinklo trikdžius
C_f	9,74 μ F	Nustato ribinį daržį ties 1kHz
R_d	18.2 Ω	Apsaugo nuo rezonanso piko

Šis filtras užtikrina:

- Dėl LCL struktūros aukšto dažnio slopinimo savybių gerokai slopinamos keitiklio perjungimo harmonikos.
- Geresnės filtravimo savybės, palyginti su paprastais L arba LC filtrais, ypač veiksmingos netoli pasirinkto rezonansinio dažnio.
- Impedanso buferis tarp keitiklio ir tinklo, mažinantis valdymo sąveiką ir gerinantis elektros energijos kokybę.
- 1 kHz rezonanso dažnis (gerokai mažesnis už perjungimo dažnį) užtikrina, kad harmoninių pikų būtų už valdymo dažnių juostos pločio ribų.
- Naudojant slopinimo rezistorių $R_d = 18,2 \Omega$ pagal slopinimo koeficientą $\zeta = 0,3$ užtikrinamas stabilus veikimas slopinant filtro rezonansą.
- ženkliai slopinamos inverterio perjungimo harmonikos,
- geresnis stabilumas prijungimo prie tinklo sąlygomis,
- inverterio ir tinklo impedanso neatitikimo kompensavimas.



28 pav. VSC keitiklis

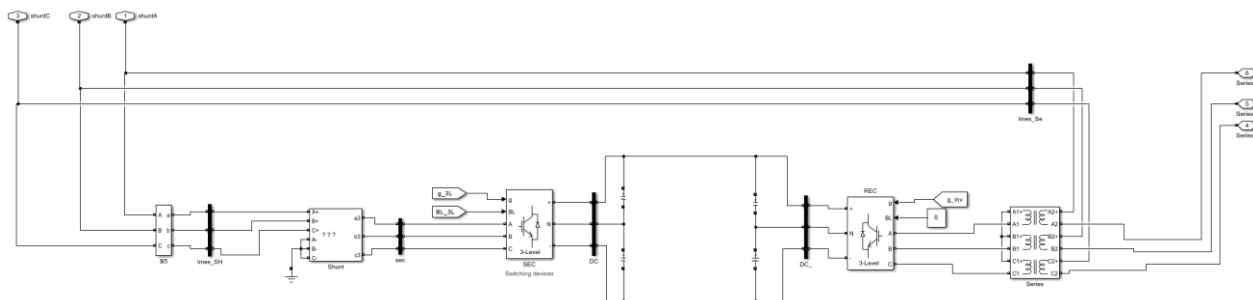
Ši keitiklio konfigūracija leidžia užtikrinti dvikryptį galios srautą, kuris yra būtinas tinklo ir salos režimu veikiantiems įrenginiams. Įprastomis tinklo sąlygomis jis veikia kaip srovės šaltinis, einantis paskui pagrindinį tinklą. Esant salos režimui, valdiklis pereina į įtampos valdymo režimą, užtikrindamas įtampos ir dažnio reguliavimą. Toks dviejų režimų lankstumas ir pažangus valdymas

gerokai padidina mikrotinklo stabilumą, ypač pereinamųjų procesų ar atsinaujinančiųjų išteklių svyravimų metu.

3.6. Vieningas elektros energijos kokybės reguliatorius

Salos režimu veikiančiame mikrotinkle buvo modeliuojamas vieningas elektros energijos kokybės reguliatorius (UPQC), siekiant įvertinti jo poveikį įtampos stabilumui ir harmoninių iškreipimų mažinimui (žr. 29 pav.). UPQC – tai kombinuotas galios elektronikos įrenginys, jungiantis nuoseklųjį aktyvųjį filtrą (DVR) ir šuntinį aktyvųjį filtrą (STATCOM). Abu keitikliai sujungti per bendrą DC magistralę ir veikia vieningai: DVR įterpia kompensacinę įtampą tarp tinklo ir apkrovos, o STATCOM kompensuoja reaktyviąją galią ir srovės harmonikas.

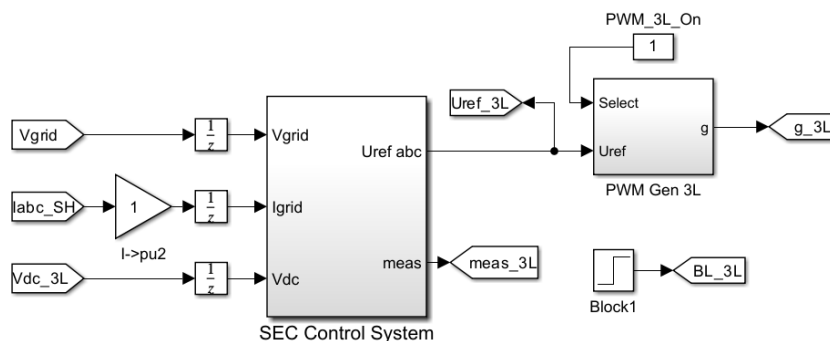
Šuntavimo keitiklis yra atsakingas už DC tinklo įtampos palaikymą ir reaktyviosios galios kompensavimą. Jis prijungtas prie tinklo per Zigzago fazių keitimo transformatorių, kuris izoliuoja DC pusę ir padeda slopinti harmonikas. Nuoseklusis keitiklis į perdavimo liniją nuosekliai tiekia valdomą įtampą ir taip valdo galios srautą. Jis jungiamas per 12 gnybtų nuoseklųjį transformatorių, kad būtų išlygintos fazės ir sutaptų impedansas.



29 pav. Pilna UPQC modeliavimo blokinė schema

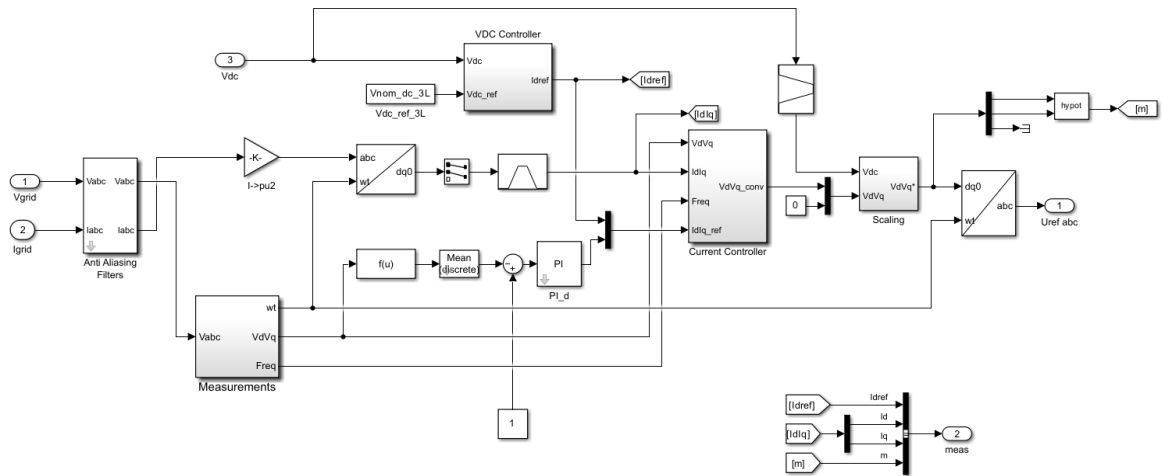
Šuntavimo keitiklio valdymo sistemą sudaro (žr. 30 pav.):

- fazės fiksavimo kilpa (PLL), skirta sinchronizacijai su tinklo įtampa.
- DC įtampos valdiklis, reguliuojantis DC grandinės įtampą.
- dq-rėmo srovės reguliatorius, skirtas tinklo srovei reguliuoti.



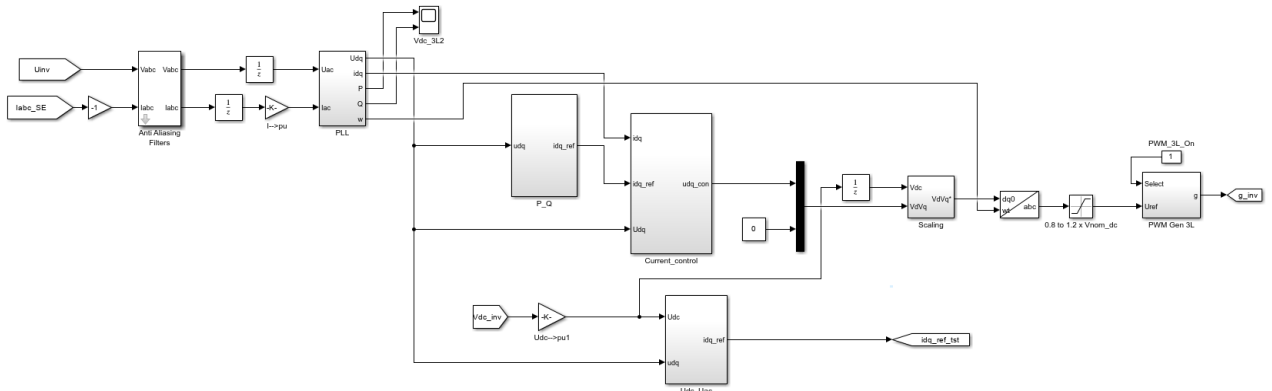
30 pav. Šunto keitiklio valdymo sistema

Valdymo blokas konvertuoja trifazes sroves ir įtampas į dq atskaitos sistemą ir reguliuoja jas naudodamas PI valdiklius. Dinamiškai apskaičiuojamas moduliacijos indeksas ir signalai transformuojami atgal į abc rėmelį impulsams generuoti (žr. 31 pav.).



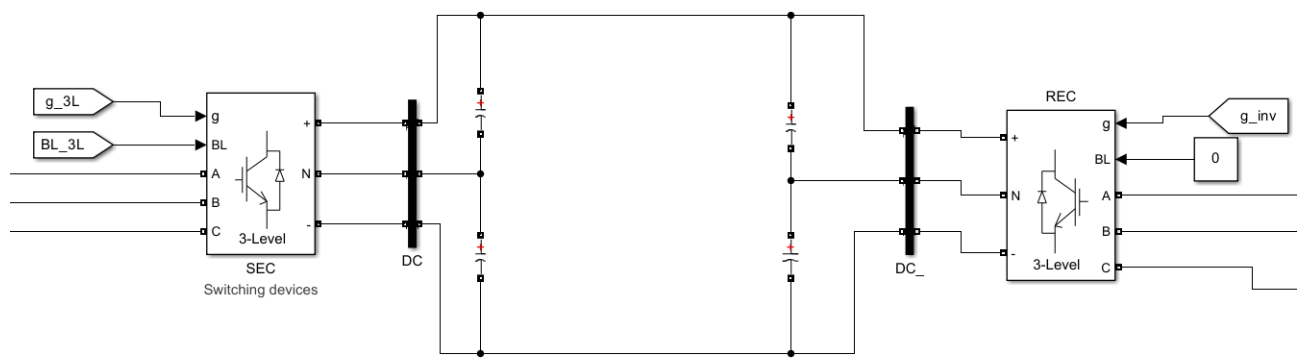
31 pav. Šunto dq valdymo ir moduliavimo sistema

Nuosekliojo keitiklio valdymas yra panašios architektūros, tačiau optimizuotas įtampai tiekti. Jis valdo aktyviąją ir reaktyviąją galią per srovės valdymą dq rėmelyje. Grįžtamasis ryšys iš galios skaičiavimo blokų atitinkamai koreguoja id ir iq atskaitos vertes (žr. 32 pav.).



32 pav. Nuoseklaus keitiklio valdymo sistema

Du keitikliai: šunto pusės energijos keitiklis ir imtuvo pusės energijos keitiklis - yra realizuoti „Simulink“ programoje naudojant trijų lygių NPC topologiją su komutacinėmis charakteristikomis, leidžiančiomis užtikrinti didelės skiriamosios gebos PWM valdymą ir efektyvų įtampos valdymą (žr. 33 pav.).



33 pav. Trijų pakopu NPC keitikliai

Igyvendinant UPQC naudojamą transformatoriaus konfigūraciją sudaro:

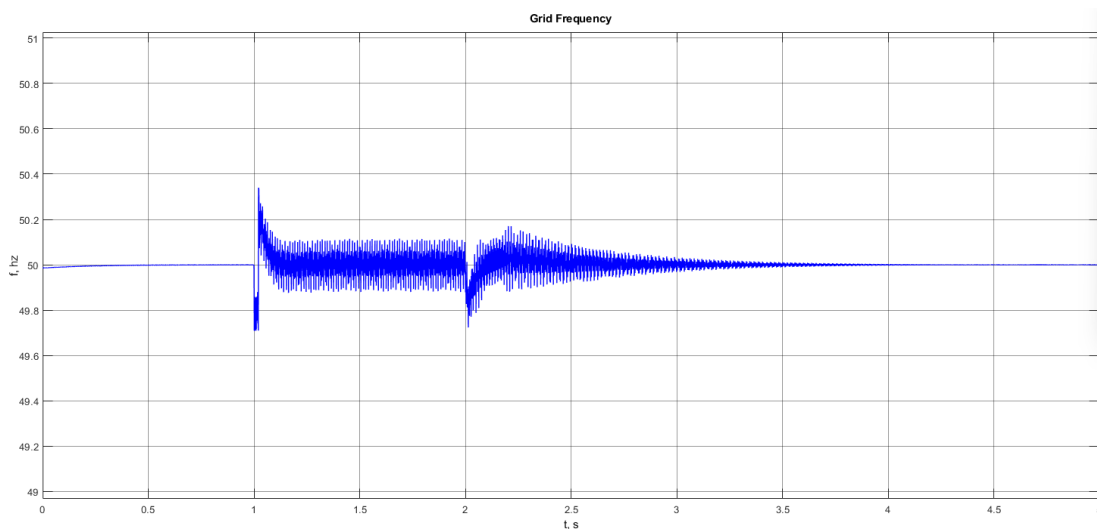
- 1) Šuntavimo transformatorius. Šuntinio keitiklio prijungimui naudojamas zigzago tipo fazių keitimo transformatorius. Šis transformatorius užtikrina galvaninį atskyrimą tarp galios keitiklio ir tinklo, leidžia suformuoti žemintą neutralų tašką bei efektyviai slopina trečiosios ir aukštesniųjų nulinės sekos harmonikų komponentes. Zigzago apvijų konfigūracija leidžia sulygtinti sroves tarp fazių ir panaikina nulinės sekos srovės komponentus, taip mažinant įtampos iškraipymus ir pagerinant elektros energijos kokybę.
- 2) Nuoseklusis transformatorius. Nuoseklusis keitiklis prie tinklo jungiamas per 12 gnybtų linijinį transformatorių. Transformatorius parenkamas su apibrėžta fazine varža ir nuotėkio induktyvumu, siekiant valdomai įterpti įtampą į liniją be nepageidaujamo poveikio pagrindiniam tinklo signalui. Jo konstrukcija leidžia suderinti impedansą tarp keitiklio ir tinklo bei slopinti aukštesniųjų harmonikų perdavimą.

Šis modeliavimo metodas leidžia UPQC reguliuoti įtampos dydį, valdyti realiąją ir reaktyviąją galią bei slopinti harmonikas visame mikrotinkle.

Pilnas modelio planas pateiktas 1 priede.

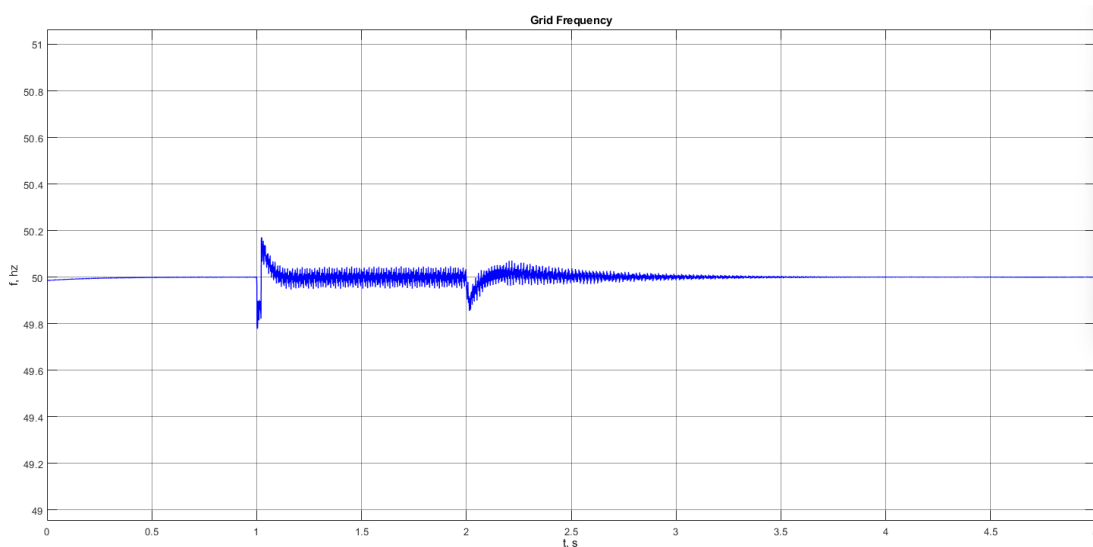
4. Modeliavimo rezultatai ir analizė

Šiame skyriuje pateikiami rezultatai, gauti modeliuojant mikrotinklą abiem konfigūracijomis: be UPQC ir su UPQC. Veikimas vertinamas pagal įtampos ir dažnio stabilumą, harmoninį iškreipimą ir dinaminį atsaką esant pereinamiesiems įvykiams, įskaitant tinklo atjungimą, generatoriaus sinchronizavimą ir apkrovos pokyčius.



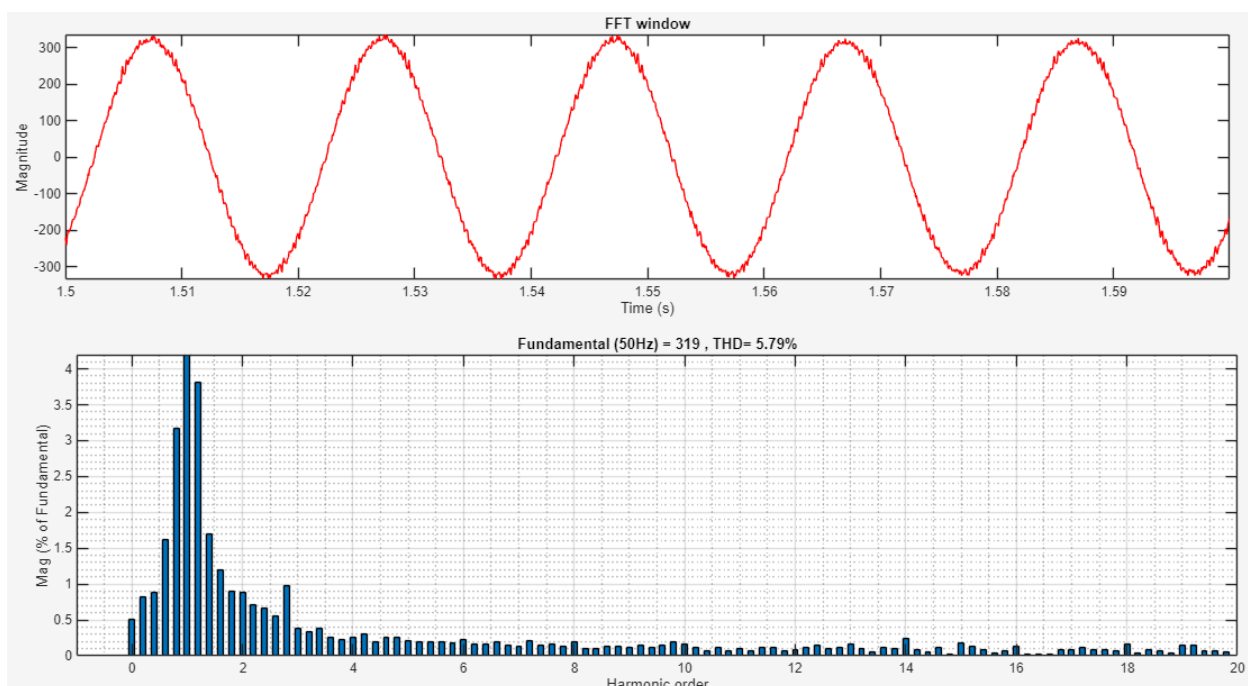
34 pav. Mikrotinklo dažnis be UPQC

Iš pradžių (0-1 s) mikrotinklas sinchronizuojamas su pagrindiniu tinklu ir palaiko stabilų 50 Hz dažnį. Po 1 s sistema atsijungia nuo mikrotinklo ir dėl išorinės atskaitos nebuvimo atsiranda dažnio svyravimų. Šie svyravimai tęsiasi, kol generatorius pasiekia nominalią įtampą ir sinchronizuojasi 2 s. Po prijungimo prie generatoriaus dažnis vėl sutrinka, tačiau greitai stabilizuojasi iki 3 s. Po to, nepaisant prijungtos papildomos apkrovos (3-4 s), dažnis išlieka stabilus, o tai rodo, kad generatorius sėkmingai palaiko salos principu veikiančią mikrotinklą (žr. 34 pav.).



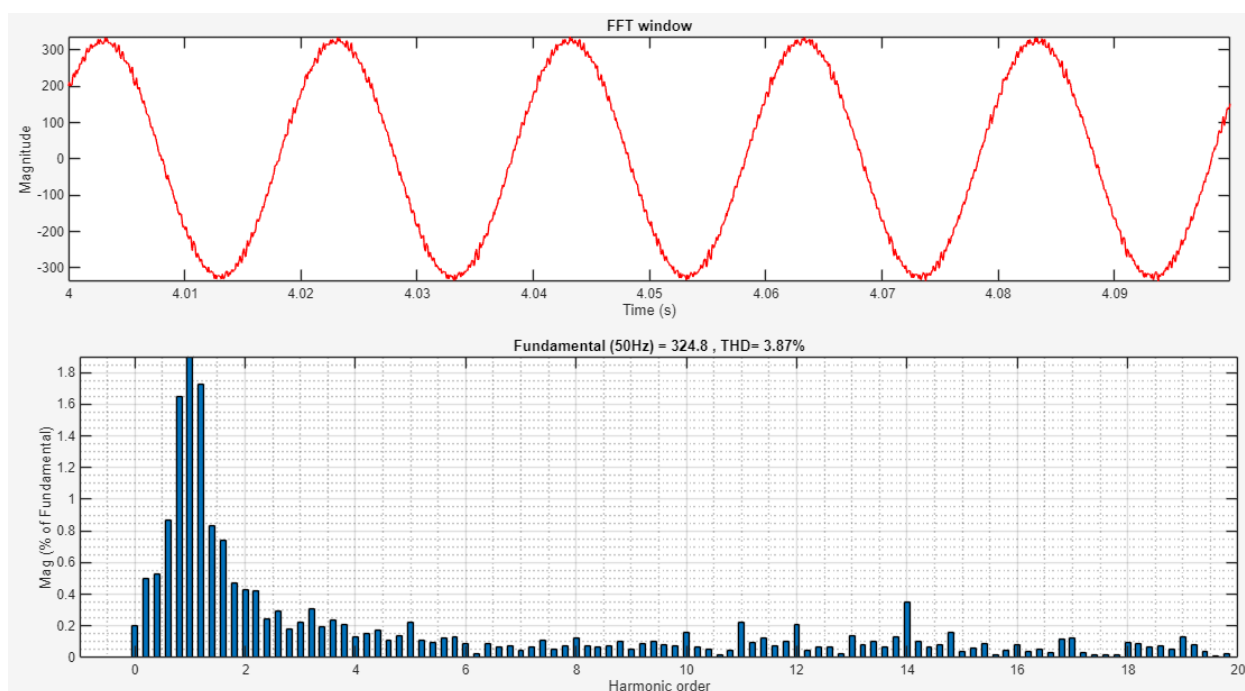
35 pav. Mikrotinklo dažnis be UPQC

Integravus UPQC, dažnio profilis tampa gerokai tolygesnis. Per 1 s perėjimą dažnio kritimas yra pastebimai mažesnis, o svyravimai nyksta greičiau. Generatoriui prisijungus, dažnio nuokrypis vėl sumažėja iki minimumo, o sistema greitai stabilizuojasi. Tai rodo UPQC gebėjimą palaikyti dažnio stabilumą užtikrinant dinaminę reaktyviosios galios palaikymą ir absorbuojant trikdžius (žr. 35 pav.).



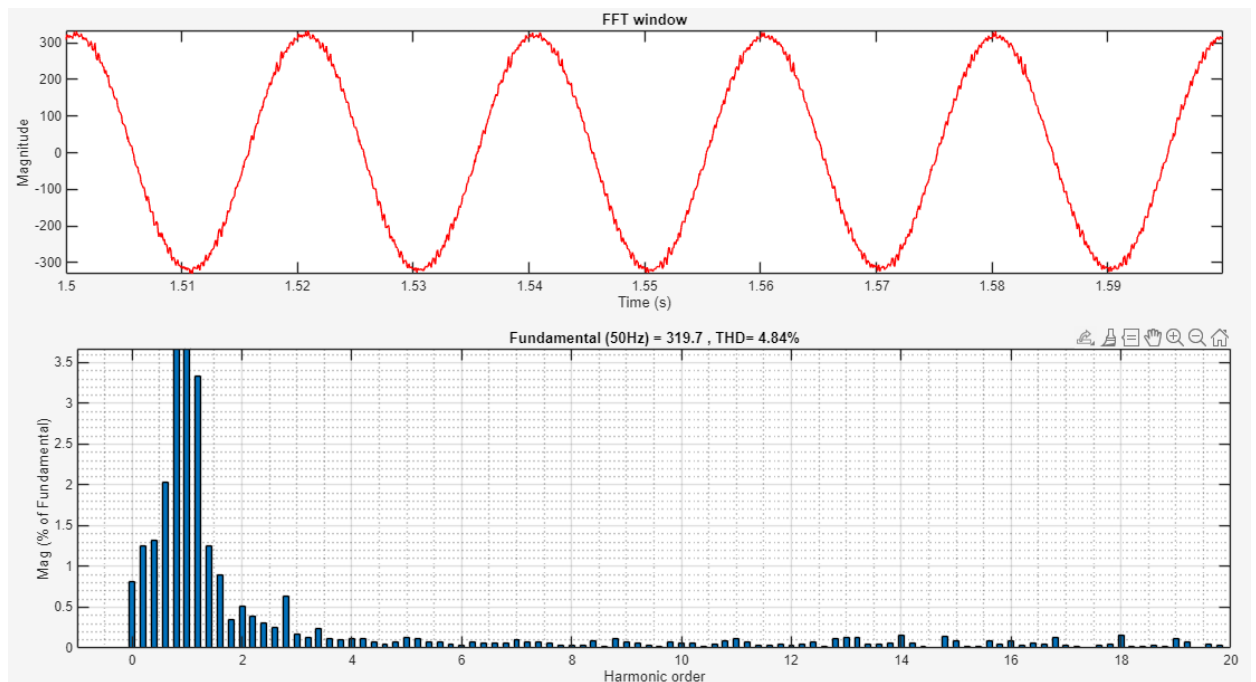
36 pav. C fazės įtampos harmonikų diapazonas 1,5s be UPQC

Harmonikų diapazonas rodo, kad pagrindinė įtampa yra 319 V, o bendrasis harmoninis iškreipymas (THD) - 5,79 %. Yra nemažai žemesnės eilės harmonikų, ypač šalia 1-osios ir 2-osios harmonikų. Šie iškreipymai rodo nepakankamą harmonikų slopinimą ankstyvuojų salos režimu (žr. 36 pav.).



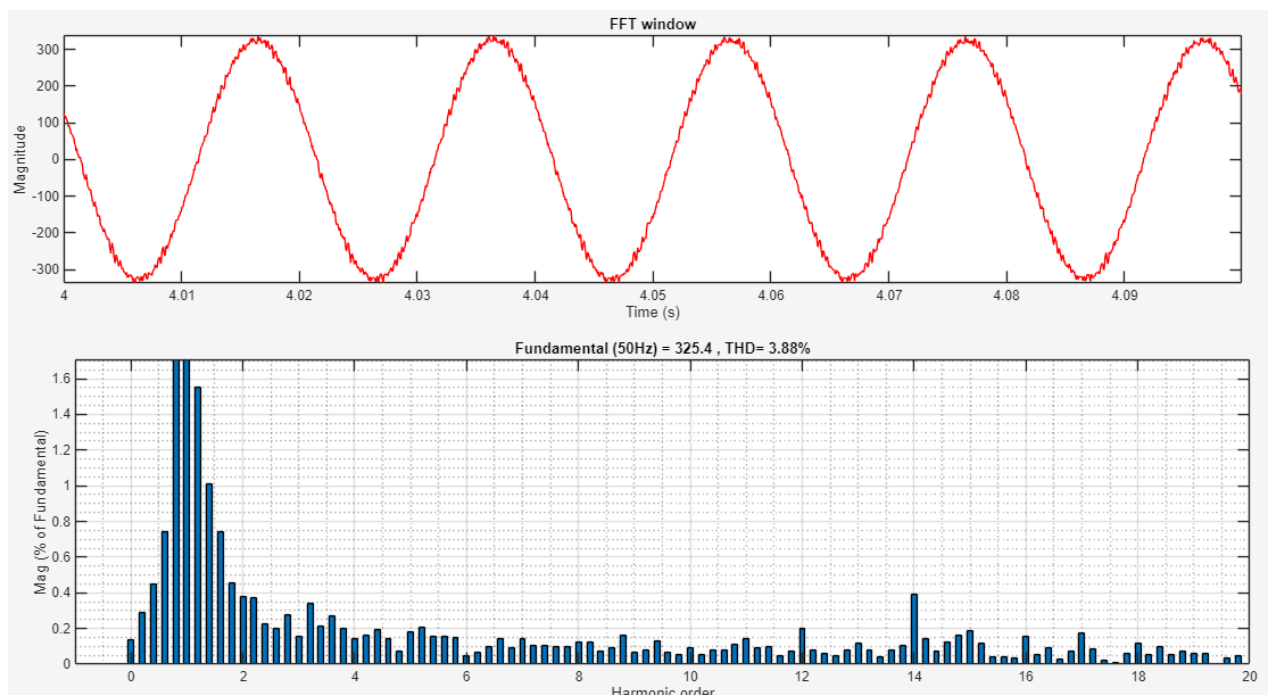
37 pav. C fazės įtampos harmonikų diapazonas 4 s be UPQC

Po 4 sekundžių C fazės įtampa rodo 324,8 V pagrindinę įtampą su sumažėjusiu 3,87 % THD. Sumažėjo harmonikų kiekis, o tai rodo pagerėjusią įtamos kokybę po mikrotinklo stabilizavimo, nors kai kurios likutinės harmonikos vis dar yra (žr. 37 pav.).



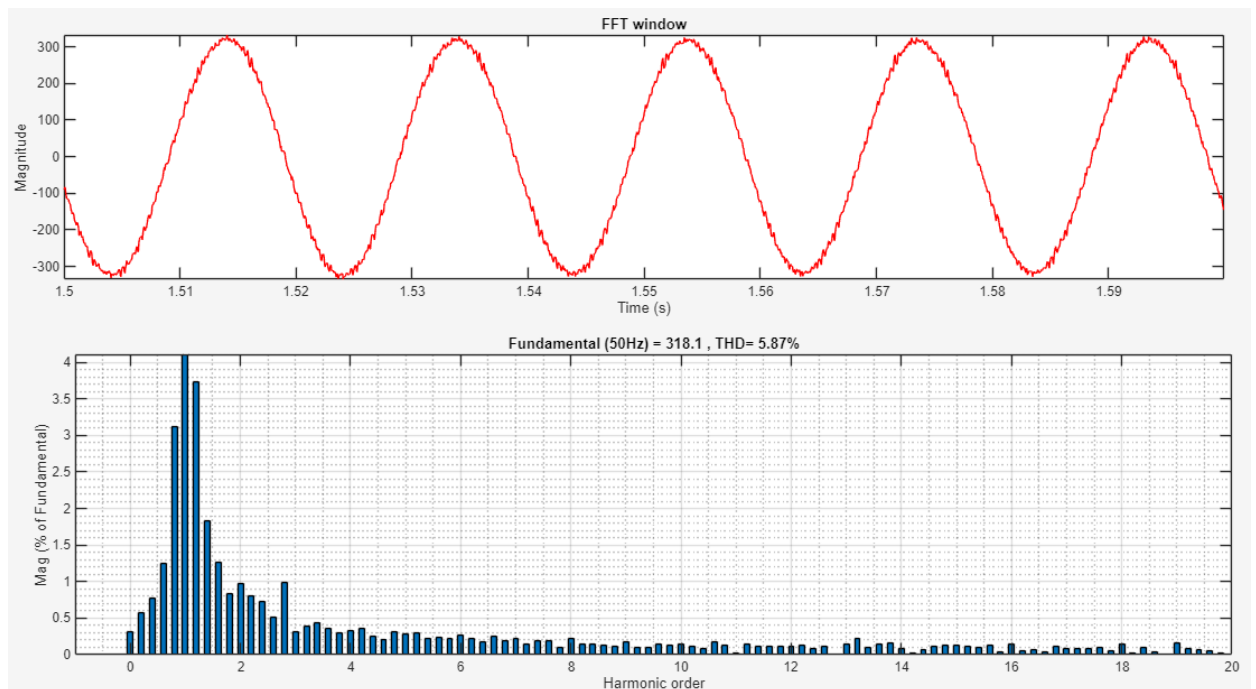
38 pav. B fazės įtamos harmonikų diapazonas 1,5s be UPQC

FFT rodo 319,7 V įtampą su 4,84 % THD. Nors, palyginus su C faze, iškraipymai šiek tiek mažesni, jie vis dar pastebimi. Grafike matyti susitelkusias harmonikas, o tai rodo prastą sinusoidės grynumą, kai inverteris veikia tinklo formavimo režimu (žr. 38 pav.).



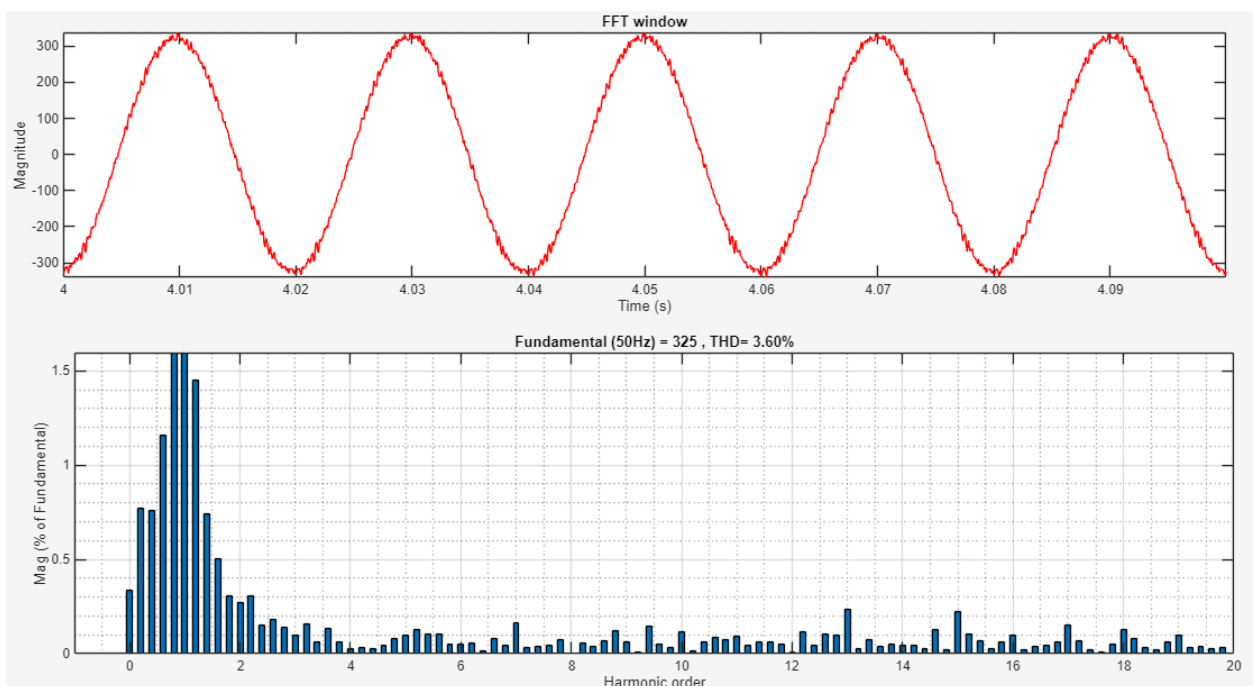
39 pav. B fazės įtamos harmonikų diapazonas 4 s be UPQC

Po stabilizavimo B fazės THD sumažėja iki 3,88 %, o pagrindinė įtampa yra 325,4 V. Harmonikų kiekis akivaizdžiai sumažėja, o tai rodo geresnį inverterio veikimą ir geresnį pastovios būsenos veikimą (žr. 39 pav.).



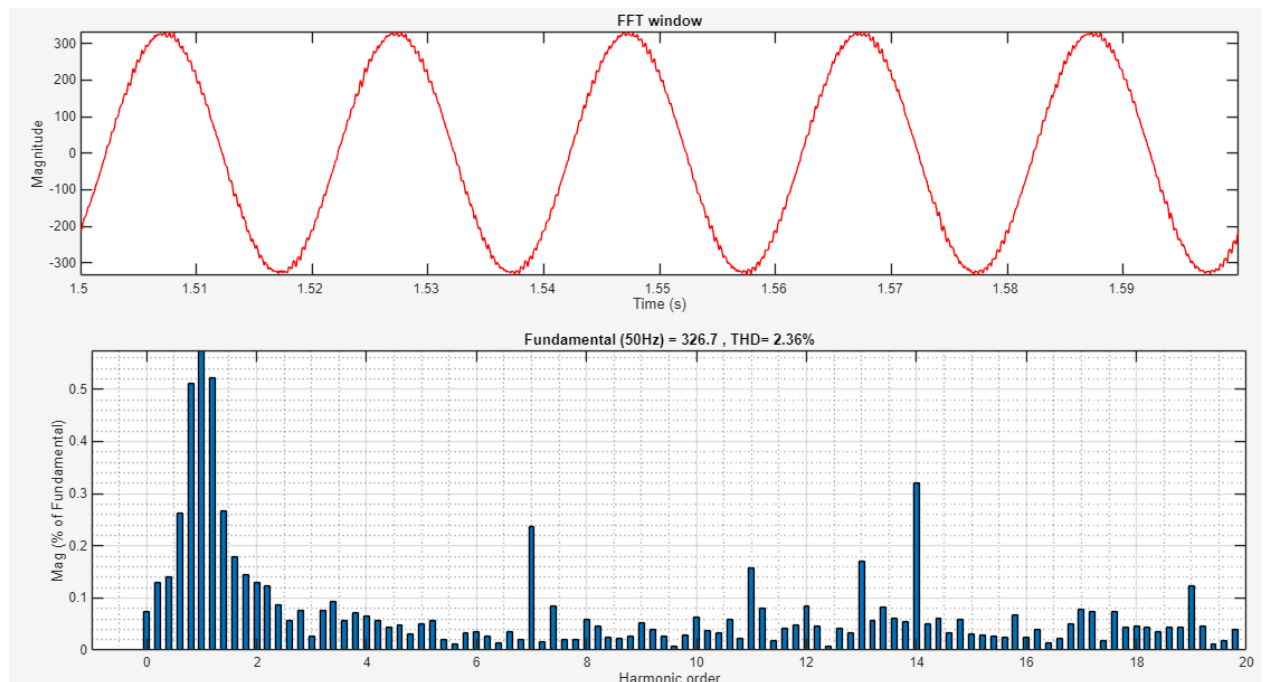
40 pav. A fazės įtamos harmonikų diapazonas 1,5s be UPQC

A fazėje yra 318,1 V ir 5,87 % THD - vienas didžiausių tarp visų fazių. Harmonikų pasiskirstymas yra platus, o tai rodo nestabilumą ir didelius perjungimo trikdžius pereinant prie salos režimo (žr. 40 pav.).



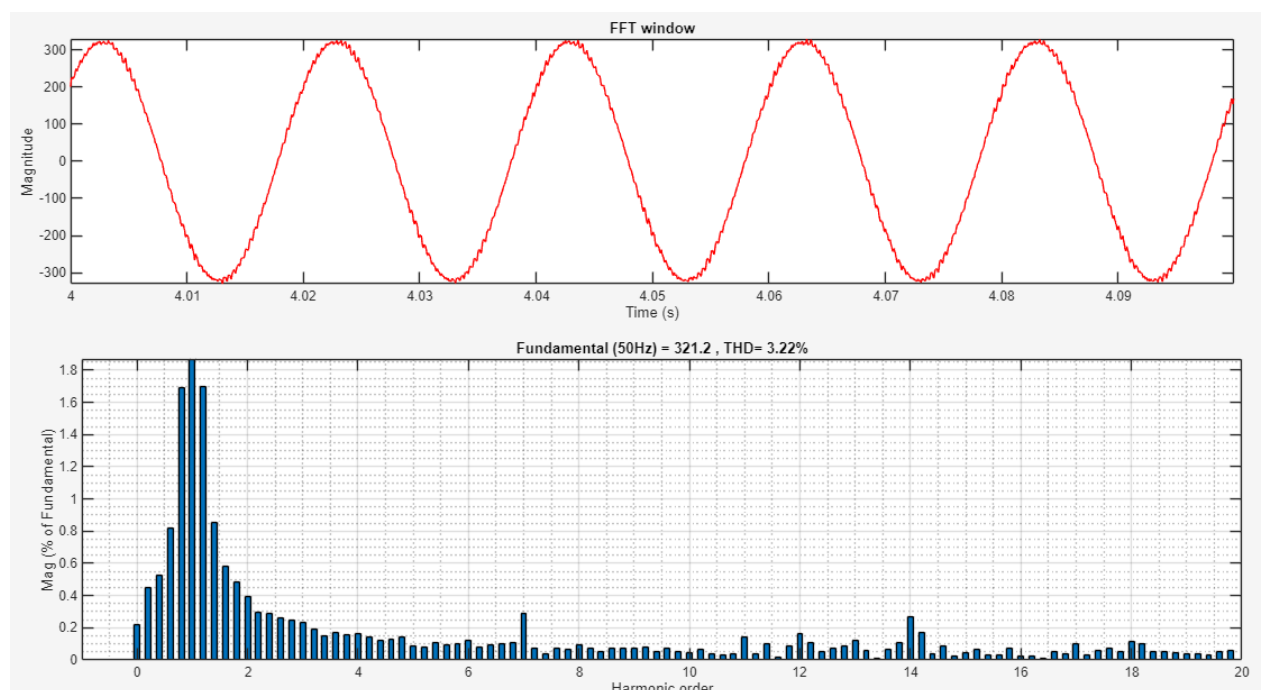
41 pav. A fazės įtamos harmonikų diapazonas 4 s be UPQC

Po 4 sekundžių A fazės įtampa stabilizuojasi ties 325 V, o THD yra 3,60 %. Harmonikų diapazonas yra mažesnis, o tai rodo, kad laikui bėgant inverterio valdymo sistema tampa efektyvesnė veikiant salos režimu (žr. 41 pav.).



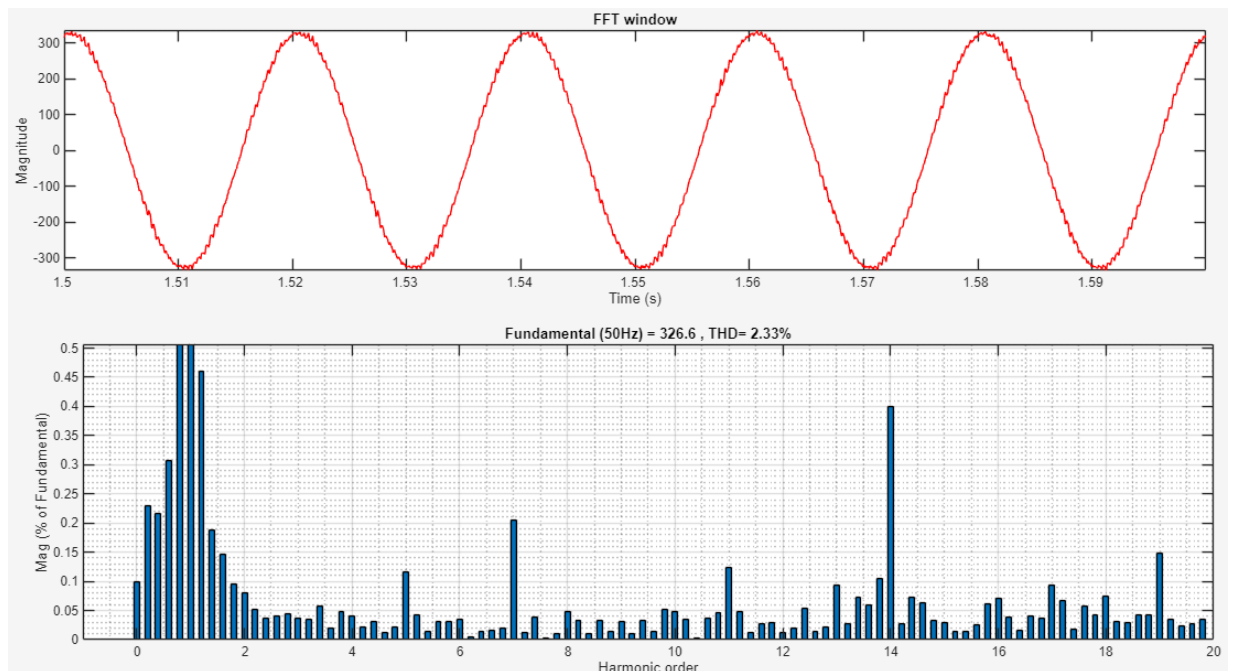
42 pav. C fazės įtamos harmonikų diapazonas 1,5s su UPQC

C fazės sinusoidė rodo geresnes charakteristikas veikiant UPQC. Įtampa pasiekia 326,7 V, o THD gerokai sumažėja - iki 2,36 %. Harmoniniai elementai, ypač žemesnės eilės, ypač slopinami, o tai rodo, kad UPQC užtikrina veiksmingą kompensavimą ir filtravimą, kai inverteris veikia tinklo formavimo režimu (žr. 42 pav.).



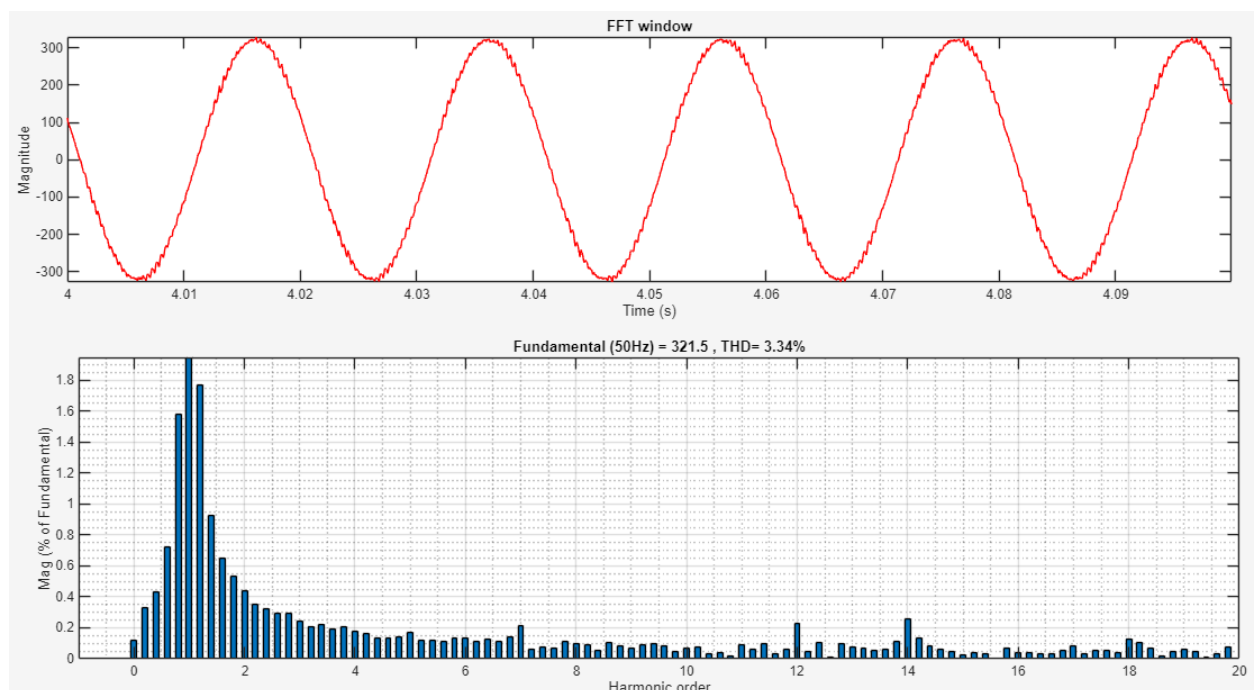
43 pav. C fazės įtamos harmonikų diapazonas 4s su UPQC

Po 4 sekundžių UPQC išlaiko sinusoidės formą, kurios įtampa yra 321,2 V, o THD - 3,22 %. Nors harmonikų lygis yra šiek tiek aukštesnis nei 1,5 s, jis išlieka gerai kontroliuojamas. Tai rodo UPQC gebėjimą valdyti įtampos iškraipymus net ir kintant apkrovos sąlygoms (žr. 43 pav.).



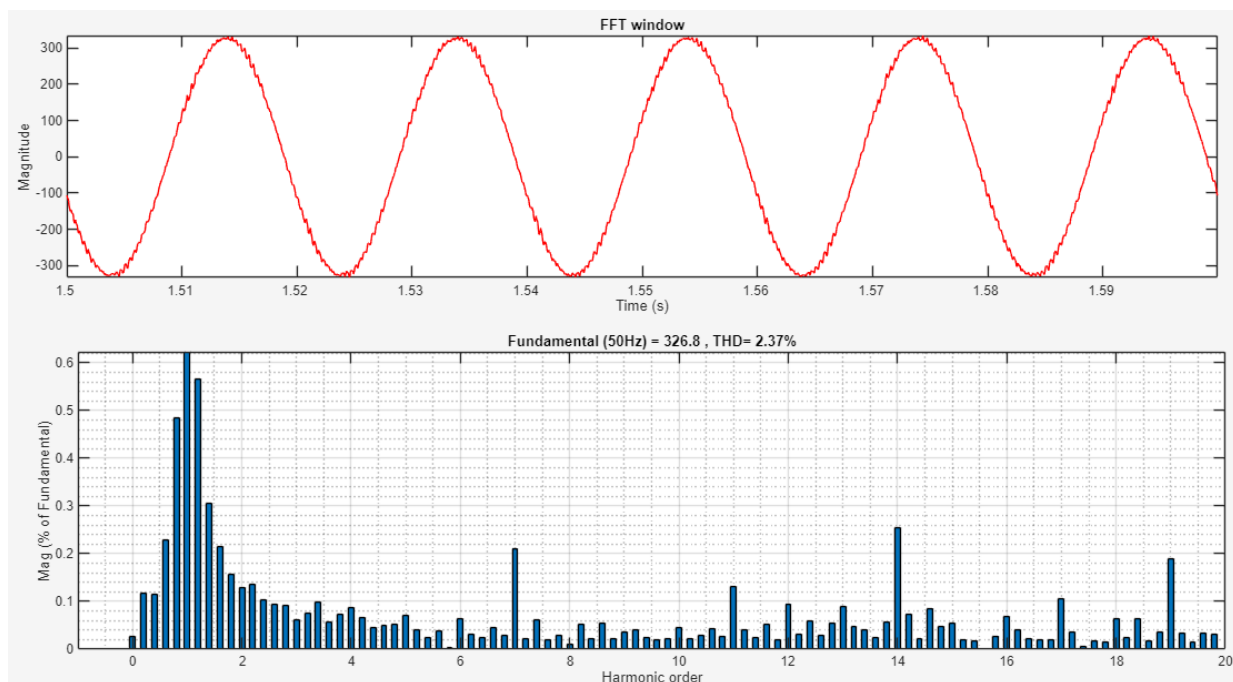
44 pav. B fazės įtampos harmonikų diapazonas 1,5s su UPQC

B fazės įtampa yra 326,6 V, o THD - 2,33 %. Diapazonas rodo mažas harmonikų amplitudes ir geresnį jų pasiskirstymą, palyginti su atveju be UPQC, o tai patvirtina, kad UPQC pagerina įtampos tiesiškumą ir veiksmingai slopina harmonikas ankstyvuosiuose pereinamuosiuose etapuose (žr. 44 pav.).



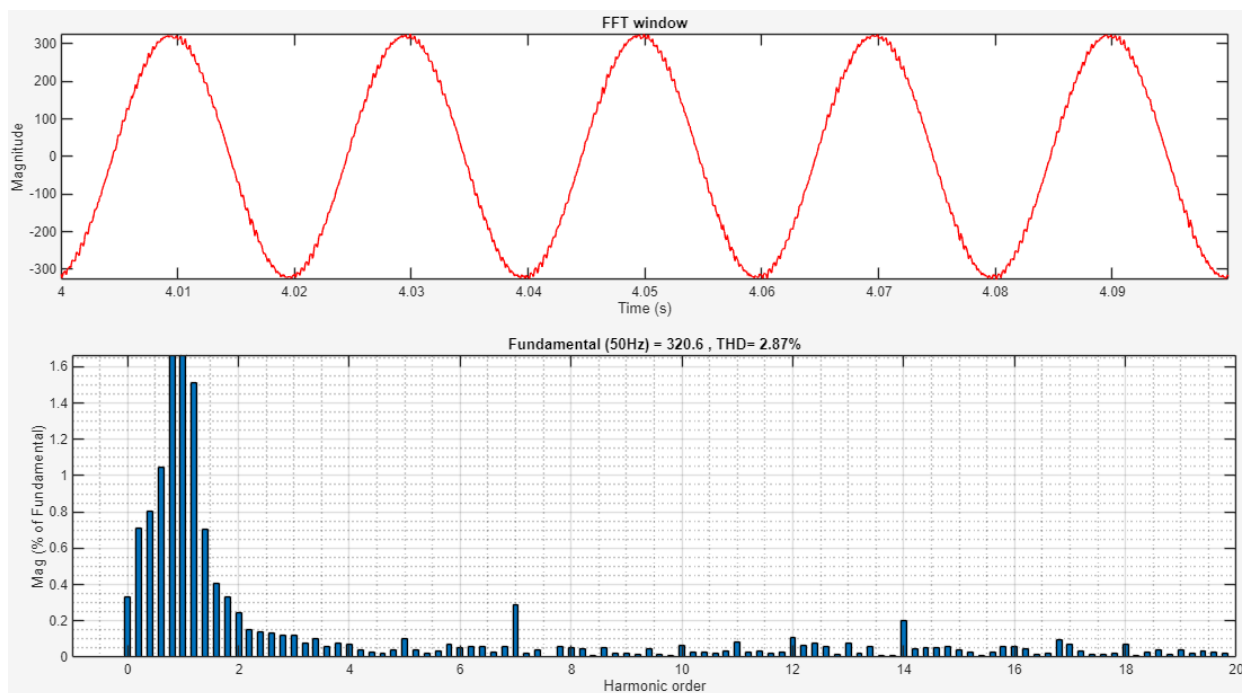
45 pav. B fazės įtampos harmonikų diapazonas 4s su UPQC

Po 4 sekundžių B fazė išlaiko 321,5 V pagrindinę įtampą, o THD šiek tiek padidėja iki 3,34 %. Sinusoide išlieka švaresnė nei be UPQC, o tai rodo, kad harmonikų mažinimas išlieka net ir po apkrovos prijungimo (žr. 45 pav.).



46 pav. A fazės įtamos harmonikų diapazonas 1,5s su UPQC

FFT analizė rodo, kad įtampa yra 326,8 V, o THD - 2,37 %, t. y. harmonikų slopinimas yra esminis. Palyginti su ankstesniu scenarijumi be UPQC, iškraipymai sumažėjo daugiau kaip 3 %, o tai rodo, kad pradinio salos veikimo metu gerokai pagerėjo našumas (žr. 46 pav.).



47 pav. A fazės įtamos harmonikų diapazonas 4s su UPQC

A fazėje yra 320,6 V įtampa ir 2,87 % THD. Nors ir šiek tiek didesnė nei 1,5 s, bendra įtampa išlieka „švari“, o tai patvirtina, kad UPQC ir toliau palaiko mažų iškraipymų veikimą net ir esant dinaminėms apkrovos sąlygoms (žr. 47 pav.).

5 lentelė. Įtampos charakteristikų ir harmoninių iškraipymų palyginimas

	Be UPQC			Su UPQC				
Laikas, s	V _{peak} , V	V _{rms} , V	THD, %	V _{peak} , V	V _{rms} , V	THD, %	Fazės kampas	ΔTHD, %
1.5	319.0	225.6	5.79	326.7	231.0	2.36	240°	3.43
1.5	319.7	226.1	4.84	326.6	230.9	2.33	120°	2.51
1.5	318.1	224.9	5.87	326.8	231.1	2.37	0°	3.5
4	324.8	229.7	3.87	321.2	227.1	3.22	240°	0.65
4	325.4	230.1	3.88	321.5	227.3	3.34	120°	0.54
4	325.0	229.8	3.6	320.6	226.7	2.87	0°	0.73

5 lentelėje pateikiama lyginamoji įtampos rodiklių ir harmoninių iškraipymų apžvalga dviem pagrindiniais laiko momentais - 1,5 s ir 4 s - atspindinčiais pereinamojo ir nusistovėjusio režimo sistemos elgseną. Pateikiamos visų trijų fazių vertės pagal scenarijus be UPQC ir su UPQC.

1,5 s, kai mikrotinklas yra pereinamojoje būsenoje ir inverteris veikia tinklo formavimo režimu, sistemoje be UPQC yra padidėjusios THD vertės (iki 5,87 %), atspindinčios padidėjusius įtampos iškraipymus dėl perjungimo ir nestabilumo. Naudojant UPQC, THD gerokai sumažėja visose fazėse (2,33-2,37 %), o tai patvirtina jo reikšmę mažinant harmonikų poveikį dinaminių įvykių metu. Įtampos palaikymas taip pat pagerėja, o veikiant UPQC pastebimos didesnės įtampos vertės.

Iki 4 s sistema pasiekia nusistovėjusią būseną. Harmoniniai iškraipymai natūraliai mažėja net ir be UPQC (3,6-3,87 %), tačiau UPQC ir toliau teikia išmatuojamą naudą, dar labiau sumažindamas THD iki 2,87-3,34 % intervalo. Įtampos kokybės pagerėjimas išlieka, o UPQC palaiko šiek tiek geresnį įtampos lygį visose fazėse.

Išvados

1. Nustatyta, kad salos režimu veikiančiuose mikrotinkluose elektros energijos kokybei didžiausią įtaką daro žema sistemos inercija, kuri atsiranda dėl inverteriniais keitikliais prijungtų atsinaujinančiųjų energijos šaltinių, neturinčių momentinės inercijos, būdingos sinchroniniams generatoriams. Dėl to sistema tampa jautri net ir nedideliems aktyviosios galios disbalansams, sukeliantiems dažnio svyravimus. Reaktyviosios galios disbalansas bei netiesinių apkrovų sukelti harmoniniai komponentai lemia įtampos iškraipymus ir trukdo užtikrinti stabilų įtampos lygį. Šių veiksmų kombinacija apsunkina mikrotinklo stabilumą pereinamuosiuose režimuose, kai sistema veikia be tinklo dažnio ir įtampos atramos.
2. Įvertinus valdymo algoritmų veikimą, nustatyta, kad neraiškiosios logikos valdiklis (FLC) pasižymi gebėjimu efektyviai reaguoti į netiesinius sistemų pokyčius ir nežinomybę. Lyginant su tradiciniais PID ar droop metodais, FLC suteikia didesnę valdymo lankstumą, nes remiasi taisyklių baze, o ne tiksliai matematinės sistemos modeliu, ir padeda palaikyti įtampos bei dažnio stabilumą.
3. Integruojant AEI su dyzeliniu generatoriumi bei energijos kaupimo sistema, užtikrinamas mikrotinklo energetinis lankstumas. Baterijų sistema veikia kaip buferis tarp gamybos ir apkrovos, kompensuodama tiekimo disbalansus, o kartu padeda stabilizuoti tinklo dažnį ir įtampą.
4. Galios elektronikos komponentai, tokie kaip STATCOM, DVR ir UPQC, yra esminiai siekiant sumažinti reaktyviąją galią, slopinti harmoninius trikdžius bei stabilizuoti pereinamuosius procesus. Tinkamai parinkta valdymo logika ir keitiklių architektūra užtikrina greitą ir tikslų atsaką į išorinius sisteminius trikdžius.
5. Sukurtas mikrotinklo modelis MATLAB/Simulink aplinkoje apėmė kelis elektros energijos šaltinius: saulės elektrinę, vėjo elektrinę, dyzelinį generatorių, UPQC ir energijos kaupimo sistemą. Naudoti keitikliai, fuzzy valdikliai AEI valdymui bei dažnio ir galios disbalanso analizė leido įvertinti sistemų sąveiką ir tinkamumą veikti autonomiškai.
6. Modeliavimo rezultatai parodė, kad integruotas UPQC įrenginys ženkliai pagerina įtampos stabilumą ir sumažina harmoninius iškraipymus. THD kai inverteris veikia tinklo formavimo režimu (1,5 s) sumažėjo nuo 5,87 % be UPQC iki 2,33–2,37 % su UPQC. Nusistovėjusios būsenos metu (4 s) reikšmės sumažėjo iki 2,87–3,34 %, o įtampos RMS visose fazėse buvo artimesnės vardinėms vertėms. Gauti rezultatai atitinka EN 50160 standarto reikalavimus ir patvirtina, kad UPQC sistema efektyviai veikia kaip harmonikų ir įtampos stabilizavimo sprendimas salos režimu.

Literatūros sąrašas

1. Bayindir, R., Demirbas, S., Irmak, E., Cetinkaya, U., Ova, A., & Yesil, M. (2016). Effects of renewable energy sources on the power system. In 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC) (pp. 388–393). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EPEPMC.2016.7752029>
2. Fleury, Á., Arteiro, F., Brasil, D., Gomes, P., & Franceschi, A. (2012). Integration of wind power plants into the electric system - The Brazilian experience. In Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (pp. 1–6).
3. Lietuvos energetikos agentūra. Gaminantys vartotojai. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per: <https://www.ena.lt/gaminantys-vartotojai/>
4. Kwasinski, F., Andrade, F., Castro-Sitiriche, M. J., & O'Neill-Carrillo, E. (2019). Hurricane Maria effects on Puerto Rico electric power infrastructure. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 6*(1), 85–94. <https://doi.org/10.1109/JPETS.2019.2900293>
5. Fu, Q., Nasiri, A., Solanki, A., Bani-Ahmed, A., Weber, L., & Bhavaraju, V. (2015). Microgrids: Architectures, controls, protection, and demonstration. Electric Power Components and Systems, 43 (12), 1453–1465. <https://doi.org/10.1080/15325008.2015.1039098>
6. Liu, Z., Xu, X., & Makram, E. (2015). Harmonics assessment and mitigation: A case study on an unbalanced stand-alone microgrid integrated with PV. In 2015 North American Power Symposium (NAPS) (pp. 1–6). IEEE.
7. Sreelekshmi, R. S., Lakshmi, R., & Nair, M. G. (2022). AC microgrid with battery energy storage management under grid connected and islanded modes of operation. Energy Reports. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.222>
8. Riaz, A., Sarker, M. R., Saad, M. H. M., & Mohamed, R. (2021). Review on comparison of different energy storage technologies used in micro-energy harvesting, WSNs, low-cost microelectronic devices: Challenges and recommendations. Sensors, 21, 5041. <https://doi.org/10.3390/s21155041>
9. Guerrero, J. M., Chandorkar, M., Lee, T. L., & Loh, P. C. (2013). Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part I: Decentralized and hierarchical control. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60 (4), 1254–1262. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2194969>
10. Mathworks svetainė. Droop valdymas [žiūrėta 2024-09-08]. Prieiga per: <https://se.mathworks.com/discovery/droop-control.html>
11. Guerrero, J., Vasquez, J. C., Alcala, J., Vicuna, L., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58, 158–172. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>
12. Altin, N., & Eyimaya, S. E. (2021). A review of microgrid control strategies. In 2021 10th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) (pp. 412–417). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRERA52334.2021.9598699>
13. Ndeh, S. G., Ngwashi, D. K., Letting, L. K., Iweh, C. D., & Tanyi, E. (2024). Power sharing enhancement through a decentralized droop-based control strategy in an islanded microgrid. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100433>

14. Ramezani, M., Abedi, M., & Yazdani, A. (2019). Comparison of model predictive control and fuzzy logic control for a microgrid under uncertainty. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 113, 369–378. <https://doi.org/10.5455/ijee.2>
15. Lenzi, V., Ulbig, A., & Andersson, G. (2013). Impacts of forecast accuracy on grid integration of renewable energy sources. In *IEEE PowerTech* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/PTC.2013.6652486>
16. Dumitrescu, C., Ciotirnae, P., & Vizitiu, C. (2021). Fuzzy logic for intelligent control system using soft computing applications. *Sensors*, 21 (8), 2617. <https://doi.org/10.3390/s21082617>
17. Zhou, B., Zhang, L., Yang, J., Wang, Y., & Zhao, R. (2015). Fuzzy logic-based coordinated control strategy for hybrid energy storage system in islanded microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6 (2), 755–765. <https://doi.org/10.1007/s40565-015-0119-x>
18. El Zoghby, H. M., & Ramadan, H. S. (2022). Isolated microgrid stability reinforcement using optimally controlled STATCOM. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101883. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101883>
19. Chilakapati, L. B., & Tenepalli, G. M. (2023). An improved power quality in a renewable energy-based microgrid system using adaptive hybrid UPQC control strategy. *International Journal of Experimental Research and Review*, 36, 217–231. <https://doi.org/10.52756/ijerr.2023.v36.022>
20. Masoum, M. A. S., & Fuchs, E. F. (2015). The roles of filters in power systems and unified power quality conditioners. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800782>
21. Kumar, A., Rajasekar, S., & Raj, P. (2015). Power quality profile enhancement of utility connected microgrid system using ANFIS-UPQC. *Procedia Technology*, 21, 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.10.017>
22. Khadkikar, V., & Chandra, A. (2006). A novel structure for three-phase four-wire distribution system utilizing unified power quality conditioner (UPQC). In 2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2006.344237>
23. Khadkikar, V. (2012). Enhancing electric power quality using UPQC: A comprehensive overview. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (5), 2284–2297. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2172001>

1 priedas. Mikrotinklo modelis

