



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Sinchroninių kompensatorių poveikio elektros sistemos dažnio stabilumui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Vytenis Butkevičius

Projekto autorius

Prof. Audrius Jonaitis

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Sinchroninių kompensatorių poveikio elektros sistemos dažnio stabilumui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Vytenis Butkevičius

Projekto autorius

Prof. Audrius Jonaitis

Vadovas

Doc. Ramūnas Deltuva

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Vytenis Butkevičius

Sinchroninių kompensatorių poveikio elektros sistemos dažnio stabilumui 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.

Vytenis Butkevičius

Patvirtinta elektroniniu būdu

Butkevičius, Vytenis. Sinchroninių kompensatorių poveikio elektros sistemos dažnio stabilumui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Audrius Jonaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: elektros energetikos sistemos dinaminis stabilumas, rotoriaus kampas, dažnis, dažnio kitimo greitis, įtampa, sistemos inercija, atsinaujinantys energijos šaltiniai, sinchroninis kompensatorius.

Kaunas, 2026. 62 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro projekte išnagrinėtas vėjo energetikos integracijos poveikis IEEE-39 šynų sistemos trumpalaikiam dinaminiam stabilumui ir įvertintas sinchroninio kompensatoriaus, kaip stabilumo gerinimo priemonės efektyvumas. Tyrimas atliktas naudojantis „PSS/E“ programine įranga, modeliuojant trifazio trumpojo jungimo ir galios disbalanso, atsijungiant generatoriui, trikdžius. Ištirti rotoriaus kampo, dažnio minimumo, dažnio kitimo greičio ir įtampos rodikliai penkiuose modeliuojamose scenarijuose. Nustatyta, kad didinant vėjo elektrinių integraciją, sistemos inercija mažėja, todėl didėja dažnio kitimo greičio ir rotoriaus kampo svyravimas. Prijungus sinchroninį kompensatorių pagerinti visi dinaminio stabilumo rodikliai, o jo poveikis augo proporcingai vėjo elektrinių generacijos lygiui. Sinchroninio kompensatoriaus jautrumo tyrimai atskleidė, kad nominalios galios didinimas yra efektyviausias kompensatoriaus parametras. Inercijos konstantos didinimas pagerina dažnio kitimo greičio rodiklį, tačiau pablogina dažnio minimumo vertę, dėl pavėlinto sukimosi greičio regulatoriaus aktyvavimo. Kompensatoriaus išdėstymas arti gedimo vietos yra naudingesnis dažnio kitimo greičio ir rotoriaus kampo mažinimui, tačiau tolimas išdėstymas yra naudingas dažnio minimumo vertės gerinimui. Kompensatoriaus skaičiaus tyrimas parodė, kad didžiausias pavienis pagerėjimas pasiekiamas sistemoje, esant dviem sinchroniniam kompensatoriam.

Butkevičius, Vytenis. Research on Effect of Synchronous Compensators on Electrical Power System's Frequency Stability. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Audrius Jonaitis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: power system dynamic stability, rotor angle, frequency, rate of change of frequency, voltage, system inertia, renewable energy sources, synchronous compensator.

Kaunas, 2026. 62 p.

Summary

This master's thesis investigates the impact of wind energy integration on the short-term dynamic stability of an IEEE-39 bus system and evaluates the effectiveness of a synchronous compensator as a stability enhancement measure. The study was conducted using „PSS/E“ software, simulating three-phase short-circuit and power imbalance disturbances caused by generator tripping. The rotor angle, frequency nadir, rate of frequency change, and voltage indicators were analyzed in five simulated scenarios. It was found that as the integration of wind power plants increases, system inertia decreases, leading to increased fluctuations in rate of frequency change and rotor angle. Connecting a synchronous compensator improved all dynamic stability indicators, and its effect increased proportionally to the level of wind generation. Sensitivity studies of the synchronous compensator revealed that increasing the rated power is the most effective parameter of the compensator. Increasing the inertia constant improves the rate of frequency change, but worsens the frequency nadir value due to the delayed activation of the speed governor. Placing the compensator close to the fault location is more beneficial for reducing the rate of frequency change and the rotor angle, but a distant placement is beneficial for improving the frequency nadir value. An investigation of the number of compensators showed that the greatest individual improvement is achieved in a system with two synchronous compensators.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	7
Paveikslų sąrašas.....	8
Santrumpų ir terminų sąrašas.....	10
Įvadas	11
1. Literatūros analizė	12
1.1. Energetikos sistemos dinaminis stabilumas	12
1.2. Rotoriaus kampo stabilumas.....	12
1.3. Dažnio stabilumas	13
1.4. Įtampos stabilumas.....	14
1.5. Tinklo inercija.....	14
1.6. Atsinaujinančių energijos išteklių integracija.....	15
1.7. Inercijos mažėjimo prognozės	17
1.8. Sinchroninių kompensatorių apžvalga	17
2. Tiriamosios dalies aprašymas	19
2.1. IEEE-39 principinė schema ir duomenys „PSS/E“ aplinkoje.....	19
2.2. Dinaminiai modeliai.....	22
2.2.1. Sinchroninio generatoriaus modeliai.....	22
2.2.2. Sinchroninio kompensatoriaus modelis.....	23
2.2.3. 4 tipo vėjo elektrinės modelis	24
2.3. Tiriama dinaminio stabilumo rodikliai	25
2.4. Tiriama trikdžiai ir scenarijai	26
3. Tyrimo rezultatai	28
3.1. Bazinė sistema	28
3.2. SG keičiami AEI, sistema be SK	33
3.3. SG keičiami AEI, sistema su SK	38
3.4. Sistemų palyginimas be SK ir su SK	43
3.5. Tyrimas keičiant SK pilnutinės galios (MVA) reikšmę	46
3.6. Keičiama SK inercijos konstantos (H) reikšmė	49
3.7. Keičiama SK vieta.....	52
3.8. Keičiamas SK kiekis	55
Išvados.....	58
Literatūros sąrašas.....	59

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Sistemos perdavimo linijų parametrai [43].....	20
2 lentelė. Sistemos generatorių vardiniai parametrai [43].....	21
3 lentelė. Modelio apkrovų parametrai [43]	21
4 lentelė. Tiriama AEI integracijos scenarijai	27
5 lentelė. Tiriama SK jautrumo parametrų scenarijai	27
6 lentelė. Rotoriaus kampo parametrai bazinio scenarijaus atveju.	28
7 lentelė. Įtampos parametrai šynose Nr. 16 bazinio scenarijaus atveju	29
8 lentelė. Įtampos parametrai šynose Nr. 38 bazinio scenarijaus atveju.	30
9 lentelė. Dažnio parametrai šynose Nr. 16 bazinio scenarijaus atveju	30
10 lentelė. Dažnio parametrai šynose Nr. 39 bazinio scenarijaus atveju.....	31
11 lentelė. RoCoF parametrai šynose Nr. 16 bazinio scenarijaus atveju.....	32
12 lentelė. RoCoF parametrai šynose Nr. 39 bazinio scenarijaus atveju.....	32
13 lentelė. Suvestinė rotoriaus kampo be SK parametrų lentelė.....	33
14 lentelė. Suvestinė įtampos šynose Nr. 16 be SK parametrų lentelė	34
15 lentelė. Suvestinė įtampos šynose Nr. 38 be SK parametrų lentelė	34
16 lentelė. Suvestinė dažnio šynose Nr. 16 be SK parametrų lentelė	35
17 lentelė. Suvestinė dažnio šynose Nr. 39 be SK parametrų lentelė	36
18 lentelė. Suvestinė RoCoF šynose Nr. 16 be SK parametrų lentelė	37
19 lentelė. Suvestinė RoCoF šynose Nr. 39 be SK parametrų lentelė	37
20 lentelė. AEI integracijos be SK rezultatai.....	38
21 lentelė. Suvestinė rotoriaus kampo su SK parametrų lentelė.....	39
22 lentelė. Suvestinė įtampos šynose Nr. 16 su SK lentelė	40
23 lentelė. Suvestinė įtampos šynose Nr. 38 su SK lentelė	40
24 lentelė. Suvestinė dažnio šynose Nr. 16 su SK lentelė	41
25 lentelė. Suvestinė dažnio šynose Nr. 39 su SK lentelė	41
26 lentelė. Suvestinė RoCoF šynose Nr. 16 su SK lentelė	42
27 lentelė. Suvestinė RoCoF šynose Nr. 39 su SK lentelė	43
28 lentelė. AEI integracijos su ir be SK rezultatai	46
29 lentelė. SK nominalios galios tyrimo rezultatai	48
30 lentelė. SK nominalios galios jautrumo tyrimo rezultatai	49
31 lentelė. SK inercijos konstantos tyrimo rezultatai.....	51
32 lentelė. SK vietos tyrimo rezultatai	53
33 lentelė. SK optimalios vietos skaičiavimo rezultatai.....	54
34 lentelė. SK skaičiaus tyrimo rezultatai	56
35 lentelė. Optimalaus SK skaičiaus skaičiavimo rezultatai	56

Paveikslų sąrašas

1 pav. IEEE/CIGRE elektros energetikos sistemos dinaminio stabilumo klasifikacija [7].....	12
2 pav. Tinklo dažnio atsakas į įvykusį trikdį [3].....	13
3 pav. Tinklo dažnio atsakas į trikdį skirtingų inercijos konstantų H atvejais [3].....	15
4 pav. Sistemos inercijos sumažėjimo priklausomybė nuo vėjo elektrinių kiekio elektros sistemoje [20].....	16
5 pav. Modeliuojama 39 šynų sistema „PSS/E“ aplinkoje	19
6 pav. Sinchroninio generatoriaus dinaminio modelio principinė schema	23
7 pav. Sinchroninio kompensatoriaus dinaminio modelio principinė schema	24
8 pav. 4 tipo vėjo elektrinės dinaminio modelio principinė schema	25
9 pav. Rotoriaus kampo grafikas baziniame scenarijuje (Trikdys – TJ).....	28
10 pav. Įtampos šynose Nr. 16 grafikas baziniame scenarijuje (Trikdys – TJ).....	29
11 pav. Įtampos trumpojo jungimo vietoje (šynose Nr. 38) grafikas baziniame scenarijuje (Trikdys – TJ)	29
12 pav. Dažnis matuojamas šynose Nr. 16 (Trikdys – TJ).....	30
13 pav. Dažnis matuojamas šynose Nr. 39 (Trikdys – TJ).....	31
14 pav. RoCoF matuojamas šynose Nr. 16 (Trikdys – Galios disbalansas).....	32
15 pav. RoCoF matuojamas šynose Nr. 39 (Trikdys – Galios disbalansas).....	32
16 pav. Suvestinis rotoriaus kampo grafikas be SK (Trikdys – TJ).....	33
17 pav. Suvestinis įtampos grafikas šynose Nr. 16 be SK (Trikdys – TJ)	34
18 pav. Suvestinis įtampos grafikas šynose Nr. 38 be SK (Trikdys – TJ)	34
19 pav. Suvestinis dažnio grafikas šynose Nr. 16 be SK (Trikdys – TJ)	35
20 pav. Suvestinis dažnio grafikas šynose Nr. 39 (Trikdys – TJ).....	36
21 pav. Suvestinis RoCoF grafikas šynose Nr. 16 be SK (Trikdys – Galios disbalansas).....	36
22 pav. Suvestinis RoCoF grafikas šynose Nr. 39 be SK (Trikdys – Galios disbalansas).....	37
23 pav. Suvestinis rotoriaus kampo grafikas su SK (Trikdys – TJ).....	39
24 pav. Suvestinis įtampos šynose Nr. 16 su SK grafikas (Trikdys – TJ)	39
25 pav. Suvestinis įtampos šynose Nr. 38 su SK grafikas (Trikdys – TJ)	40
26 pav. Suvestinis dažnio šynose Nr. 16 su SK grafikas (Trikdys – TJ)	41
27 pav. Suvestinis dažnio šynose Nr. 39 su SK grafikas (Trikdys – TJ)	41
28 pav. Suvestinis RoCoF šynose Nr. 16 su SK grafikas (Trikdys – Galios disbalansas).....	42
29 pav. Suvestinis RoCoF šynose Nr. 39 su SK grafikas (Trikdys – Galios disbalansas).....	43
30 pav. Rotoriaus kampo maksimalių verčių palyginimas sistemoje be SK ir su SK (Trikdys – TJ).....	44
31 pav. Įtampos šynose Nr. 16 minimalių verčių palyginimas sistemoje be SK ir su SK (Trikdys – TJ)	44
32 pav. Dažnio šynose Nr. 16 minimalių verčių palyginimas sistemoje be SK ir su SK (Trikdys – TJ)	45
33 pav. RoCoF šynose Nr. 16 minimalių verčių palyginimas sistemoje be SK ir su SK (Trikdys – Galios disbalansas).....	45
34 pav. RoCoF šynose Nr. 39 minimalių verčių palyginimas sistemoje be SK ir su SK (Trikdys – Galios disbalansas).....	46
35 pav. Rotoriaus kampo grafikas keičiant SK MVA reikšmes (Trikdys – TJ).....	47
36 pav. Dažnio grafikas keičiant SK MVA reikšmes (Trikdys – TJ)	47
37 pav. RoCoF grafikas keičiant SK MVA reikšmes (Trikdys – Galios disbalansas).....	48
38 pav. Rotoriaus kampo grafikas keičiant SK inercijos H reikšmę (Trikdys – TJ)	50

39 pav. Dažnio grafikas keičiant SK inercijos H reikšmę (Trikdīs – TJ).....	50
40 pav. RoCoF grafikas keičiant SK inercijos H reikšmę (Trikdīs – Galios disbalansas)	51
41 pav. Rotoriaus kampo grafikas keičiant SK lokacijas (Trikdīs – TJ).....	52
42 pav. Dažnio grafikas keičiant SK lokacijas (Trikdīs – TJ)	52
43 pav. RoCoF grafikas keičiant SK lokacijas (Trikdīs – Galios disbalansas)	53
44 pav. Rotoriaus kampo grafikas keičiant SK kiekį tyrime (Trikdīs – TJ).....	55
45 pav. Dažnio grafikas keičiant SK kiekį tyrime (Trikdīs – TJ).....	55
46 pav. RoCoF grafikas keičiant SK kiekį tyrime (Trikdīs – Galios disbalansas)	56

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ES – Europos sąjunga;

EES – elektros energetikos sistema.

ENTSO-E (angl. European Network of Transmission System Operators for Electricity) – Organizacija vienijanti Europos elektros perdavimo tinklo operatores;

IEEE – (angl. Institute of Electrical and Electronics Engineers) – rlektros ir elektronikos inžinierių institutas;

CIGRE – (pranc. Conseil International des Grands Réseaux Électriques) – tarptautinė didelių elektros sistemų taryba;

SG – sinchroniniai generatoriai

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;

RoCoF (angl. Rate of change of frequency) – dažnio kitimo greitis, matuojamas Hz/s;

SK – sinchroninis kompensatorius;

SG –sinchroninis generatorius;

WECC– (angl. Western Electricity Coordinating Council) – vakarų elektros energijos koordinavimo taryba.

Įvadas

Dabartinę energetikos sektoriaus transformaciją daugiausia nulemia Europos žaliojo kurso strategija 2050 metais tapti klimatui neutraliu žemynu. Siekiant įgyvendinti strategijos tikslus, reikalingas spartus nuo iškastinio kuro priklausomų garo ar šiluminių elektrinių keitimas atsinaujinančiais energijos ištekliais (AEI), pavyzdžiui, saulės ar vėjo elektrinėmis [1]. Nors pokyčiai neišvengiami, perėjimas prie AEI reikšmingai keičia elektros tinklo fizines charakteristikas [2].

Tradiciškai elektros tinklo dinaminio stabilumo užtikrinimas priklauso nuo didelės masės sinchroninių generatorių (SG) inercijos, kurie yra elektromagnetiškai susieti su tinklo dažniu [2]. Inercija veikia kaip natūrali apsauga nuo staigių dažnio pokyčių po tinklo sutrikimų. Tačiau modernių AEI elektrinių keitikliai atskiria generaciją nuo tinklo dažnio, todėl tiesiogiai neprisideda prie sistemos inercijos [3]. Vadinasi, keičiant sinchroninius generatorius AEI, tinklas patiria kritinį fizinės inercijos sumažėjimą [4].

Siekiant spręsti šiuos iššūkius, sinchroniniai kompensatoriai (SK) iškyla kaip svarbus infrastruktūros įrenginys šiuolaikinėse energetikos sistemose [5]. Veikdami kaip sinchroninės mašinos be aktyviosios apkrovos, SK teikia natūralią fizinę inerciją, sustiprina trumpojo jungimo srovę ir reaktyviosios galios palaikymą, savybes, kurių keitikliais pagrįstai generacijai atkurti yra sudėtinga [6]. Šiame tyrime nagrinėjamas poveikis dinaminio stabilumo rodikliams, keičiant sinchroninius generatorius vėjo elektrinėmis. Vertinamas sinchroninių kompensatorių efektyvumas atkuriant rotorius kampo, dažnio ir įtampos dinaminį stabilumą **IEEE 39 šynų sistemoje**.

Tiriamąo darbo tikslas – ištirti didėjančios vėjo elektrinių generacijos poveikį IEEE-39 šynų sistemos trumpalaikio dinaminio stabilumo parametrams ir įvertinti sinchroninio kompensatoriaus inercijos ir reaktyviosios galios palaikymo efektyvumą sistemoje.

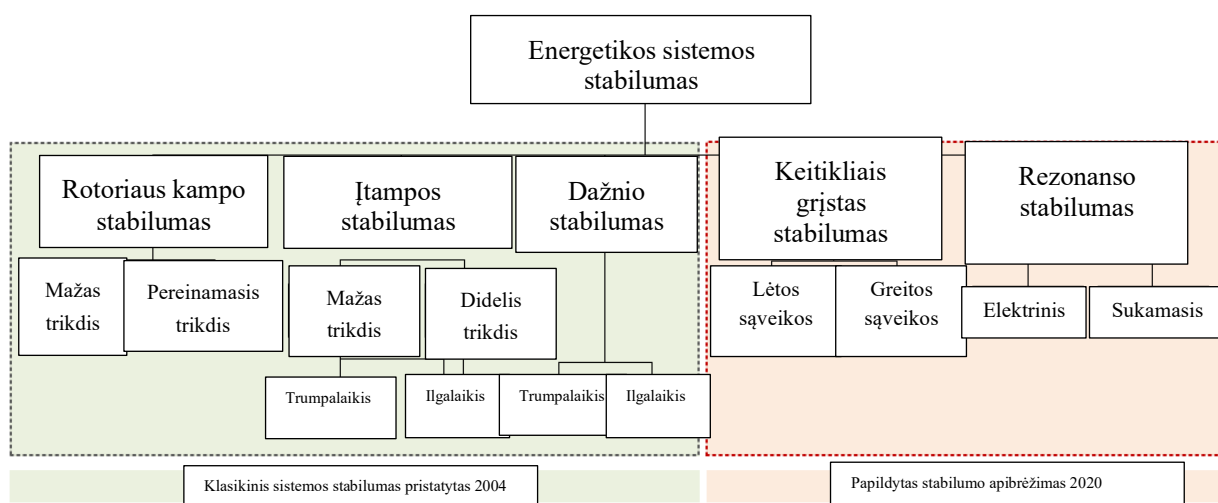
Tiriamąo darbo uždaviniai:

- kiekybiškai įvertinti vėjo elektrinių integracijos (10–75 %) daromą poveikį IEEE-39 šynų sistemos rotorius kampo, dažnio minimumo, RoCoF ir įtampos rodikliams;
- palyginti sistemos dinaminio stabilumo rodiklius be SK ir su juo visuose AEI scenarijuose, nustatant SK poveikio priklausomybę nuo vėjo integracijos lygio sistemoje;
- ištirti sinchroninio kompensatoriaus nominalios galios S (100–800 MVA) poveikį rotorius kampui, dažnio minimumui ir RoCoF;
- ištirti sinchroninio kompensatoriaus inercijos konstantos H (1–8 s) poveikį rotorius kampui, dažnio minimumui ir RoCoF;
- palyginti dviejų sinchroninių kompensatorių išdėstymo strategijas, nustatant prijungimo vietos poveikį dinaminio stabilumo rodikliams;
- įvertinti sinchroninių kompensatorių skaičiaus (1–4 vnt.) poveikį rotorius kampui, dažnio minimumo vertei ir RoCoF ir nustatyti optimalų SK kiekį.

1. Literatūros analizė

1.1. Energetikos sistemos dinaminis stabilumas

Elektros energetikos sistemos stabilumas (EES) apibūdinamas remiantis Elektros ir elektronikos inžinierių instituto (IEEE) ir Tarptautinės didelių elektros sistemų tarybos (CIGRE) bendra klasifikacija pateikta 1 pav. Pagal šią klasifikaciją stabilumas skirstomas į tris pagrindines kategorijas: rotoriaus kampo stabilumą, dažnio stabilumą ir įtampos stabilumą [7]. Kiekviena kategorija dar skirstoma pagal trikdžio dydį (mažas arba didelis) ir laiko intervalą (trumpalaikis arba ilgalaikis) [7]. 2020 m. IEEE klasifikacija papildyta dviem naujomis kategorijomis: keitiklių grįžtamumu ir rezonanso stabilumu, atsižvelgiant į augančią galios elektronikos daromą įtaką šiuolaikinėse energetikos sistemose. Šiame darbe tiriamos klasikinės kategorijos: trumpalaikis rotoriaus kampo, įtampos ir dažnio stabilumas, toliau išsamiau apžvelgiamos kiekvieną jų.



1 pav. IEEE/CIGRE elektros energetikos sistemos dinaminio stabilumo klasifikacija [7]

1.2. Rotoriaus kampo stabilumas

Rotoriaus kampas yra vienas svarbiausių kintamųjų, nusakančių sinchroninio generatoriaus būseną ir jo gebėjimą išlaikyti sinchronizaciją po tinkle įvykusių trikdžių [8]. Parametras apibrėžia rotoriaus magnetinio lauko padėtį statoriaus sukamojo magnetinio lauko atžvilgiu [9]. Tinkle susidarę kampų skirtumai tarp skirtingų generatorių lemia vykstančius galios srautus sistemoje [10].

Normaliomis veikimo sąlygomis rotoriaus kampas kinta tolygiai, tačiau po trikdžio gali prasidėti rotoriaus kampo svyravimas. Priklausomai nuo sistemos parametrų ir valdymo priemonių, šie svyravimai slopsta arba, esant nepakankamam stabilumo rezervui, gali lemti sinchronizacijos praradimą [10].

Rotoriaus kampo dinamika aprašoma elektromechanine švytavimo lygtimi (angl. swing equation), kuri susieja sinchroninio generatoriaus mechaninį judėjimą su jo rotoriaus kampo kitimu laike [11]. Pagal šią lygtį rotoriaus kampinis pagreitis yra tiesiogiai proporcingas skirtumui tarp tiekiamos mechaninės galios P_m ir į tinklą atiduodamos elektrinės galios P_e [8]. Lygties išraiška apibrėžiama taip:

$$M \frac{df}{dt} = P_m - P_e \quad (1)$$

čia M – sistemos inercija, MWs/Hz.

$\frac{df}{dt}$ – dažnio kitimo greitis, Hz/s.

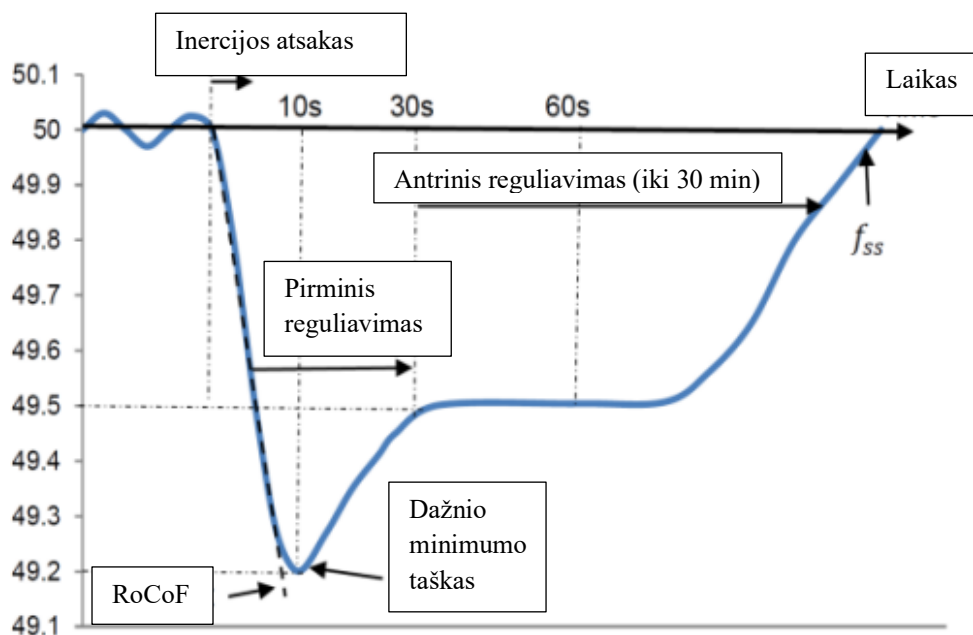
P_m – turbinų tiekiamą mechaninę galią, MW.

P_e – elektrinė galia (apkrova ir nuostoliai), MW.

1.3. Dažnio stabilumas

Dažnio stabilumas apibrėžiamas, kaip EES gebėjimas išlaikyti arba atkurti nominalų dažnį po trikdžių, sukėlusių reikšmingą aktyviosios galios disbalansą tarp generuojamos ir vartojamos elektros energijos [12]. Kadangi sistemos dažnis yra tiesiogiai susijęs su sinchroninių generatorių rotorių sukimosi greičiu, įvykęs galios disbalansas sukelia dažnio nuokrypį. Kuomet apkrova viršija generaciją, dažnis mažėja, tačiau tinkle esant perteklinei generacijai, dažnis didėja [3].

Kaip pavaizduota **2 paveiksle**, sistemos inercijos atsakas, kurį tiekia besisukančių sinchroninių mašinų masės, yra pirmoji apsaugos priemonė įvykus dažnio nuokrypiui [13]. Didesnė tinklo inercija lėtina dažnio pokyčius, taip suteikdama daugiau laiko sureaguoti į dažnio trikdžius. Dažnio stabilumo užtikrinimas vykdomas trimis reguliavimo lygiais [14]:



2 pav. Tinklo dažnio atsakas į įvykusį trikdį [3]

- **pirminis reguliavimas:** automatinė generatorių sukimosi greičio reguliatorių reakcija per kelias sekundes, skirta stabilizuoti dažnio kitimo greitį;
- **antrinis reguliavimas:** Procesas, trunkantis nuo kelių dešimčių sekundžių iki kelių minučių, kurio metu dažnis atkuriamas iki nominaliosios reikšmės;
- **tretinis reguliavimas:** tinklo operatoriaus galios rezervų perskirstymas.

Dažnio stabilumo pažeidimas gali kilti dėl staigių įvykių, pavyzdžiui, didelės galios generatoriaus atsijungimo, kuris sukelia dažnio kritimą sistemoje [15]. Vertinant sistemos dinaminį atsaką į trikdžius, išskiriami du esminiai dinaminiai dažnio rodikliai [13].

- **Dažnio minimumo vertė** – tai žemiausia dažnio reikšmė po trikdžio, rodanti, ar bus aktyvuotas automatinis apkrovos atjungimas. Šią vertę lemia sistemos inercija ir pirminio dažnio reguliavimo rezervų greitis [13].
- **Dažnio kitimo greitis (RoCoF)**: dažnio išvestinė laiko atžvilgiu $\left(\frac{df}{dt}\right)$, tiesiogiai atspindinti sistemos inerciją. Mažėjant inercijai, RoCoF reikšmės didėja, o tai gali sukelti apsaugų suveikimą ir mechaninį stresą likusioms sinchroninėms mašinoms [16].

1.4. Įtampos stabilumas

Įtampos stabilumas apibrėžiamas kaip EES gebėjimas išlaikyti nustatytas įtampos vertes visuose tinklo mazguose tiek normaliomis sąlygomis, tiek po įvykusių trikdžių. Ši savybė priklauso nuo sistemos gebėjimo išlaikyti pusiausvyrą tarp apkrovos poreikio ir tiekiamos galios. Jei šis balansas sutrinka, įtampa gali pradėti nekontroliuojamai kristi ir pasiekti kritinį įtampos lygio tašką [12].

Skirtingai nei dažnio stabilumas, įtampos stabilumas glaudžiai priklauso nuo reaktyviosios galios gamybos, perdavimo ir vartojimo [12]. Vietinis reaktyviosios galios deficitas yra viena pagrindinių įtampos nestabilumo priežasčių.

Pagal IEEE klasifikaciją įtampos stabilumas skirstomas [12]:

- **mažų trikdžių įtampos stabilumas**: sistemos gebėjimas palaikyti stabilias įtampas po nedidelių sutrikimų, pavyzdžiui, laipsniško apkrovos didėjimo.
- **didelių trikdžių įtampos stabilumas**: sistemos atsakas į reikšmingus avarijos scenarijus, tokius kaip trumpieji jungimai ar generacijos praradimas.
- **trumpalaikis ir ilgalaikis stabilumas**: trumpalaikiai procesai (kelios sekundės) siejami su greitai veikiančiais komponentais; ilgalaikis (dešimt ir daugiau minučių) su lėtesniais įrenginiais.

1.5. Tinklo inercija

Inercija elektros energetikos sistemoje apibūdina sinchroninių mašinų gebėjimą priešintis staigiems rotoriaus sukimosi greičio pokyčiams, atsirandantiems dėl galios disbalanso tarp gamybos ir vartojimo. Ši savybė kyla iš besisukančiose masėse sukauptos kinetinės energijos, kuri trikdžio metu akimirksniu atiduodama į tinklą arba pasisavinama, taip lėtinant dažnio kitimą [13].

Kinetinė energija E_k , sukaupta sinchroninėje mašinoje, yra tiesiogiai proporcinga jos inercijos momentui ir kampinio greičio kvadratui:

$$E_k = \frac{1}{2}J\omega^2 \quad (2)$$

čia J – rotoriaus inercijos momentas, $kg \cdot m^2$.

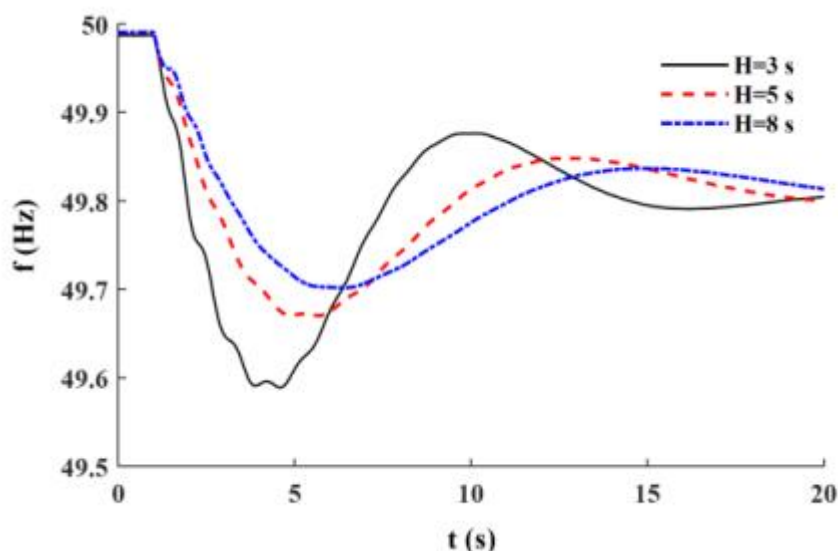
ω – kampinis greitis, rad/s.

Energetikos praktikoje sistemos inercinėms savybėms apibūdinti naudojama inercijos konstanta H , kuri apibrėžia santykį tarp sukauptos kinetinės energijos ir mašinos varinės galios S_n [13, 12]

$$H = \frac{E_k}{S_n} \quad (3)$$

Ši konstanta matuojama sekundėmis ir parodo laiką, kurį mašina gali tiekti savo vardinę galią naudodama tik sukauptą kinetinę energiją [12]. Šiluminių elektrinių generatorių H reikšmės paprastai svyruoja nuo 2 iki 9 sekundžių [13].

Kaip pavaizduota **3 paveiksle**, kuo didesnė sistemos inercijos konstanta H , tuo lėčiau krinta sistemos dažnis po trikdžio t.y. didesnė sistemos inercija geriau priešinasi dažnio pokyčiams. Kai $H=3$ s, dažnis nukrinta iki žemiausios reikšmės $\approx 49,6$ Hz, tuo tarpu kai $H=8$ s, dažnio minimumo vertė siekia $\approx 49,73$ Hz.



3 pav. Tinklo dažnio atsakas į trikdį skirtingų inercijos konstantų H atvejais [3]

Ryšys tarp aktyviosios galios disbalanso ir dažnio dinamiškumo aprašomas supaprastinta sistemos švytavimo lygtimi [11, 19].:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_0}{2H_{sys}} \cdot \frac{P_m - P_e}{S_n} = \frac{f_0 \cdot \Delta P}{2H_{sys} \cdot S_n} \quad (4)$$

čia f_0 – nominalus dažnis, s;

H_{sys} – ekvivalenti sistemos inercija, s;

ΔP – galios deficitas sistemoje, MW.

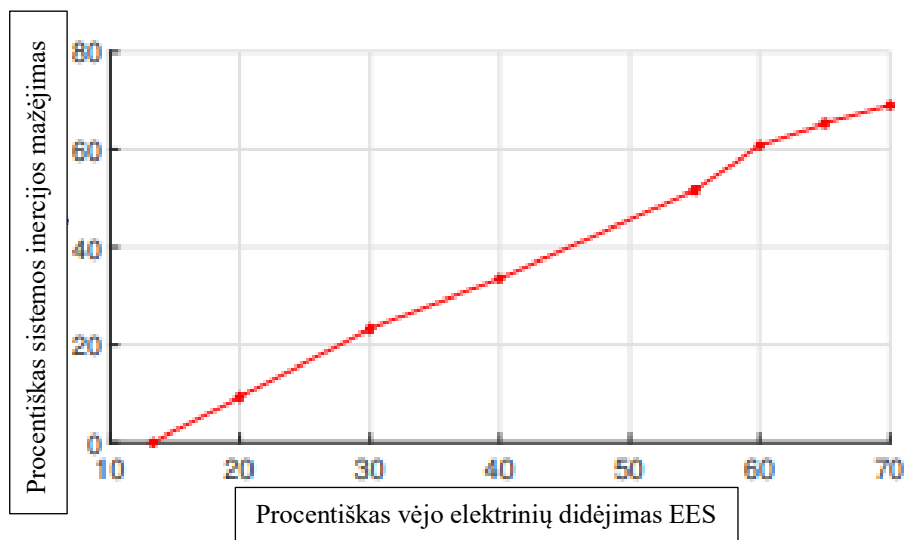
Remiantis šia lygtimi galima teigti, kad RoCoF yra atvirkščiai proporcingas inercijai, mažėjant tinklo inercijai, tas pats galios sutrikimas sukelia žymiai staigesnį dažnio nuokrypį [20].

1.6. Atsinaujinančių energijos išteklių integracija

Atsinaujinančių energijos išteklių integracija iš esmės keičia elektros energetikos sistemos stabilumo charakteristikas, veikdama generacijos poveikį ir atsaką į susidariusius trikdžius sistemoje [16]. Skirtingai nei sinchroniniai generatoriai, AEI jungiami prie tinklo naudojant galios elektronikos keitiklius, todėl jų elektromechaninė jungtis su tinklu yra netiesioginė [13]. Keitikliai atskiria gamybos šaltinį nuo tinklo sukimosi greičio, todėl modernių vėjo turbinų sukimasis savaime nepripusda prie sistemos inercijos [3, 20]. Vienas kritinių AEI integracijos poveikių yra bendrosios sistemos inercijos sumažėjimas [16]. Sinchroniniai generatoriai kaupia didelę kinetinę energiją, kuri

slopina dažnio nuokrypius. Nors keitiklių technologija paremti ištekliai reikšmingai prisideda prie aktyviosios galios generacijos, jų natūralus inercijos atsakas į dažnio pokyčius yra iš esmės kitoks nei sinchroninių mašinų [16].

4 paveiksle pateikiamas grafikas rodo artimą tiesinei priklausomybę, didėjant vėjo elektrinių daliai EES, sistemos inercija proporcingai krinta. Vadinasi, pasiekus 70 % lygį, sistema praranda net apie 70 % pradinės savo inercijos.



4 pav. Sistemos inercijos sumažėjimo priklausomybė nuo vėjo elektrinių kiekio elektros sistemoje [20]

Didėjant AEI integracijos lygiui, EES pereina į mažos inercijos veikimo režimą, kuriame tradiciniai stabilizavimo mechanizmai praranda efektyvumą. Dėl šios priežasties, atsiradus generacijos ir apkrovos disbalansui, dažnio kaita gali būti žymiai spartesnė, stebimos didesnės RoCoF reikšmės ir žemesnis dažnio minimumas, kas kelia grėsmę dažnio stabilumui.

AEI integracija keičia **dažnio reguliavimo** mechanizmus [22]. Tradiciniai sinchroniniai generatoriai sukimosi greičio regulatoriais natūraliai dalyvauja pirminiame dažnio reguliavime, tuo tarpu keitiklių technologija paremtų šaltinių dalyvavimas priklauso nuo valdymo sistemų [22]. Nors šiuolaikiniai keitikliai gali teikti sintetinę inerciją ar greitąjį dažnio palaikymą, jų efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo tinklo reikalavimų [23].

Įtampos stabilumui galios elektronikos įrenginiai leidžia itin tiksliai ir greitai valdyti reaktyviąją galią bei palaikyti įtampos lygį įvairiuose sistemos mazguose [24]. Tačiau didelė AEI koncentracija dažnai lemia mažesnę trumpojo jungimo galią, o tai mažina tinklo standumą [25]. Silpnuose tinkluose sistema tampa jautresnė trikdžiams, o reaktyviosios galios rezervų trūkumas gali priartinti prie kritinio įtampos lygio [26].

Rotoriaus kampo stabilumas, kaip ir kiti stabilumo rodikliai, patiria transformaciją [2]. Mažėjant sinchroninių mašinų skaičiui, sistemoje silpnėja elektromechaniniai ryšiai tarp likusių generatorių. Tai lemia didesnę likusių sinchroninių mašinų pažeidžiamumą ir polinkį į rotoriaus kampų svyravimą po didelių sutrikimų [27].

1.7. Inercijos mažėjimo prognozės

ENTSO-E prognozės rodo, kad dėl intensyvios dekarbonizacijos kontinentinės Europos sistemos inercija 2025–2030 m. laikotarpiu gali sumažėti **30–40 %**, lyginant su 2015 m. lygiu [28]. Šis nuosmukis aiškinamas tradicinių elektrinių (anglies ar branduolinių elektrinių) uždarymu, kurios anksčiau sudarė sistemos inercijos pagrindą [13, 28]. Vadinasi, pamažu sistemos įgyja mažesnę inercinį atsaką ir tampa jautresnės įvykusiems galios disbalansams.

Airijos elektros energetikos sistema (sistemų operatorės EirGrid/SONI) yra viena geriausiai dokumentuotų mažos inercijos sistemų pasaulyje [29]. Airijos patirtis rodo, kad viršijus 75 % ribą, dažnio stabilumo kontrolė tampa kritiškai sudėtinga, nes natūrali inercija nukrinta žemiau saugaus lygio (apie 23 GWs) [30]. Siekiant pasiekti ateities tikslą – 95 % AEI integracijos, Airijoje įgyvendinama DS3 programa (angl. Delivering a Secure Sustainable Electricity System), kurios pagrindinis aspektas yra sinchroninių kompensatorių prijungimas, siekiant kompensuoti prarastą tinklo inerciją [31].

Vienas kritiškiausių mažos inercijos sistemos parametrų yra dažnio kitimo greitis (RoCoF). ENTSO-E nustatyta 2 Hz/s riba yra esminė dėl kelių techninių priežasčių [16]:

1. daugelis senesnių generatorių bei paskirstymo tinklo apsaugų yra nustatytos veikti pajutus staigų dažnio pokytį. Jei po trikdžio RoCoF viršija šias reikšmes, apsaugos pradeda masiškai atjunginėti vartotojus ir generatorius, taip sukeldamos visišką regiono atjungimą;
2. pagal ENTSO-E tinklo kodeksą, nauji įrenginiai privalo atsilaikyti iki 2 Hz/s RoCoF reikšmės neatsijungdami. Jei sistemoje inercija yra tokia maža, kad RoCoF viršija šią 2 Hz/s ribą, generatoriai gali būti mechaniškai pažeisti.

Dėl šių priežasčių sinchroniniai kompensatoriai yra būtini – jie suteikia momentinę inerciją, kuri fiziškai sulėtina dažnio kitimą žemiau 2 Hz/s ribos [35].

1.8. Sinchroninių kompensatorių apžvalga

Sinchroninis kompensatorius – tai sinchroninė mašina, veikianti be aktyviosios apkrovos, kurios pagrindinės funkcijos yra reaktyviosios galios reguliavimas, inercijos palaikymas ir trumpojo jungimo galios užtikrinimas [36]. Įrenginys tiekia fizinį palaikymą tinklui, kuris anksčiau buvo natūralus sinchroninių generatorių veikimo šalutinis produktas.

Vienas esminių sinchroninio kompensatoriaus privalumų – gebėjimas dinamiškai tiekti arba vartoti **reaktyviąją galią**. Reguluojant sužadinimo srovę, įrenginys gali generuoti reaktyviąją galią (peržadinimo būsenoje) arba ją vartoti (nepakankamo sužadinimo būsenoje), efektyviai stabilizuodamas įtampą tinkle [37]. Skirtingai nuo statinių kompensavimo įrenginių, SK pasižymi didesnėmis perkrovos galimybės ir natūraliu elektromagnetiniu atsaku, kuris yra itin svarbus trumpalaikio įtampos stabilumo užtikrinimui silpnuose tinkluose [37].

Sinchroninis kompensatorius turi besisukančią masę, kurios sukauptą kinetinę energiją trikdžių metu automatiškai reaguoja į dažnio pokyčius [5]. Tai leidžia efektyviai mažinti RoCoF ir pagerinti dažnio minimumo reikšmes po staigaus generacijos praradimo [38].

SK sukauptą kinetinę energiją yra tiesiogiai proporcingas SK inercijos konstantai ir SK nominaliai galiai:

$$E_{SK} = H_{SK} \cdot S_{SK} \quad (5)$$

čia E_{SK} – SK sukaupta kinetinė energija, MWs;

H_{SK} – SK inercijos konstanta, s;

S_{SK} – SK nominali galia, MVA.

Didinant SK nominalią galią arba inercijos konstantą, didėja SK fizinis indėlis į sistemos dinaminį stabilumą. Ši savybė tampa kritinė šiuolaikinėse mažos inercijos sistemose, kuriose sinchroninius generatorius keičia keitiklių technologija grįsta generacija [39].

Sinchroniniai kompensatoriai prisideda prie **rotoriaus kampo stabilumo** užtikrinimo [40]. Jie veikia kaip papildomi sistemos mazgai su stabilia vidine varža, todėl sustiprina elektromechaninį ryšį tarp likusių SG ir padidina sistemos sinchroninę galią [39]. Tai padeda slopinti rotoriaus kampų svyravimus ir padeda išlaikyti generatorių sinchronizaciją su elektros tinklu po įvykusių trikdžių [40].

Sinchroniniai kompensatoriai padidina **trumpojo jungimo galią**, kuri yra būtina tinklo standumui užtikrinti [39]. Aukštesnis trumpojo jungimo lygis užtikrina stabilią įtampą ir užtikrina patikimą apsaugos įrenginių suveikimą [41].

Tinklo inercijos lygiui ir toliau sparčiai mažėjant, ENTSO-E pradeda kelti griežtesnius tinklo atsparumo reikalavimus, todėl SK aktualumas pradėjo itin augti [3, 42]. AEI integracijai sumažinus sistemos inerciją, SK yra pripažįstamas kaip vienas efektyviausių techninių sprendimų, leidžiančių išlaikyti tradicinės sistemos dinamines charakteristikas ateities tinkle [32].

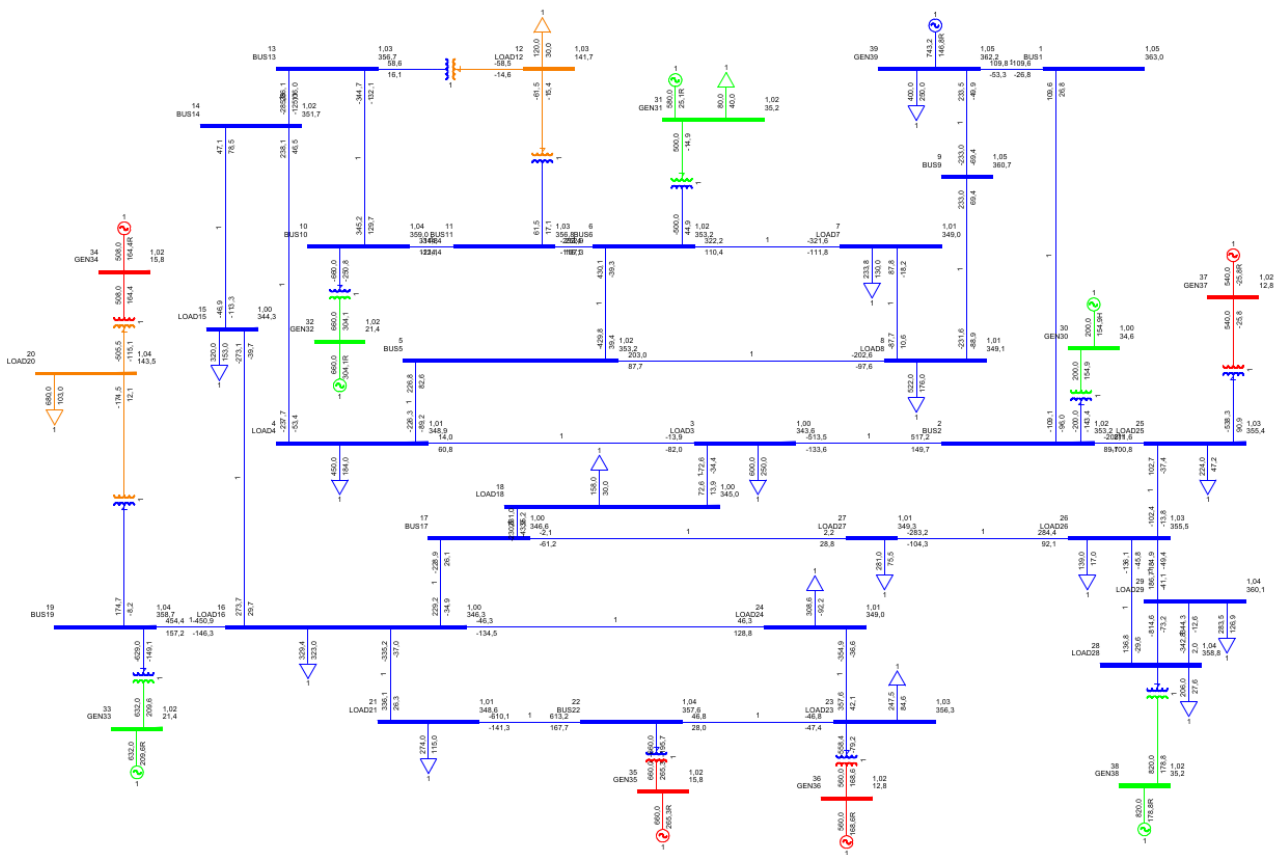
2. Tiriamosios dalies aprašymas

Šiame skyriuje aprašoma tyrimo metodika, pasirinktos elektros energetikos sistemos modelio struktūra, taikomi dinaminiai modeliai ir sudaromi tiriamieji scenarijai. Tyrimas atliktas naudojantis Siemens „PSS/E“ programine įranga, kuri yra plačiausiai naudojamas sistemų dinaminio stabilumo analizės įrankis. Šio tyrimo metu „PSS/E“ programa naudojama dviem režimais: stacionarios būsenos (galios srautų) ir dinaminio režimu. Galios srautų skaičiavimas nustato sistemos darbo tašką ramybės būsenoje (laikė nekinta). Galios srautų skaičiavime gauti duomenys yra dinaminio režimo atskaitos (pradžios) taškas. Dinaminis režimas leidžia ištirti dinaminius sistemos rodiklius, kintančius laike po įvykusių imituojamų trikdžių.

2.1. IEEE-39 principinė schema ir duomenys „PSS/E“ aplinkoje

Modeliuojama IEEE-39 šynų sistema [43]. Sistema susideda iš 39 šynų, 10 generatorių, 46 perdavimo linijų, 19 apkrovų ir 12 transformatorių. 39 šyna laikoma begaline, imituojančią jungtį su likusiu elektros sistemos tinklu. Sistema plačiai naudojama mokslinėje literatūroje, kaip tyrimų etalonas EES dinaminiam stabilumui tirti, kadangi sudaroma galimybė mokslininkams palyginti gautus rezultatus išvengiant konfidencialių realių tinklo duomenų naudojimo..

Bazinis IEEE-39 sistemos modelis „PSS/E“ aplinkoje pateikiamas 5 pav.



5 pav. Modeliuojama 39 šynų sistema „PSS/E“ aplinkoje

Čia mėlyna spalva – 330 kV, oranžinė – 110 kV, žalia – 35 kV, raudona – 10 kV.

„PSSE/E“ aplinkoje atskiri sistemos elementai: sinchroniniai generatoriai, AEI, perdavimo linijos, transformatoriai, apkrovos ir SK apjungiami vienoje sistemoje, siekiant imituoti realios EES veikimą. Bazinės sistemos parametrai pareikiami **1–3 lentelėse**.

1 lentelė. Sistemos perdavimo linijų parametrai [43]

Linija Tarp šynų	Aktyvioji varža R, s.v	Reaktyvioji varža X, s.v	Elektrinis laidumas B, s.v
BUS1 – BUS2	0,0035	0,0411	0,6987
BUS1 – BUS39	0,0010	0,0250	0,7500
BUS2 – BUS3	0,0013	0,0151	0,2572
BUS2 – BUS25	0,0070	0,0086	0,1460
BUS3 – BUS4	0,0013	0,0213	0,2214
BUS3 – BUS18	0,0011	0,0133	0,2138
BUS4 – BUS5	0,0008	0,0128	0,1342
BUS4 – BUS14	0,0008	0,0129	0,1382
BUS5 – BUS6	0,0002	0,0026	0,0434
BUS5 – BUS8	0,0008	0,0112	0,1476
BUS6 – BUS7	0,0006	0,0092	0,1130
BUS6 – BUS11	0,0007	0,0082	0,1389
BUS7 – BUS8	0,0004	0,0046	0,0780
BUS8 – BUS9	0,0023	0,0363	0,3804
BUS9 – BUS39	0,0010	0,0250	1,2000
BUS10 – BUS11	0,0004	0,0043	0,0729
BUS10 – BUS13	0,0004	0,0043	0,0729
BUS13 – BUS14	0,0009	0,0101	0,1723
BUS14 – BUS15	0,0018	0,0217	0,3660
BUS15 – BUS16	0,0009	0,0094	0,1710
BUS16 – BUS17	0,0007	0,0089	0,1342
BUS16 – BUS19	0,0016	0,0195	0,3040
BUS16 – BUS21	0,0008	0,0135	0,2548
BUS16 – BUS24	0,0003	0,0059	0,0680
BUS17 – BUS18	0,0007	0,0082	0,1319
BUS17 – BUS27	0,0013	0,0173	0,3216
BUS21 – BUS22	0,0008	0,0140	0,2565
BUS22 – BUS23	0,0006	0,0096	0,1846
BUS23 – BUS24	0,0022	0,0350	0,3610
BUS25 – BUS26	0,0032	0,0323	0,5130
BUS26 – BUS27	0,0014	0,0147	0,2396
BUS26 – BUS28	0,0043	0,0474	0,7802
BUS26 – BUS29	0,0057	0,0625	1,0290
BUS28 – BUS29	0,0014	0,0151	0,2490

BUS12 – BUS11	0,0016	0,0435	0
BUS12 – BUS13	0,0016	0,0435	0
BUS6 – BUS31	0	0,0250	0
BUS10 – BUS32	0	0,0200	0
BUS19 – BUS33	0,0007	0,0142	0
BUS20 – BUS34	0,0009	0,0180	0
BUS22 – BUS35	0	0,0143	0
BUS23 – BUS36	0,0005	0,0272	0
BUS25 – BUS37	0,0006	0,0232	0
BUS2 – BUS30	0	0,0181	0
BUS29 – BUS38	0,0008	0,0156	0
BUS19 – BUS20	0,0007	0,0138	0

2 lentelė. Sistemos generatorių vardiniai parametrai [43]

Šyna prie kurios prijungtas generatorius	Įtampa U, kV	Aktyvioji galia P _{max} , MW	Reaktyvioji galia Q _{max} , Mvar	Pilnutinė galia S, MVA ($\cos\varphi = 0,85$)
BUS30	35	250	154,94	294,12
BUS31	35	725	449,31	852,94
BUS32	35	825	511,29	970,59
BUS33	35	790	489,60	929,41
BUS34	10	635	393,54	747,06
BUS35	10	825	511,29	970,59
BUS36	10	700	533,82	823,53
BUS37	10	675	418,33	794,12
BUS38	35	1025	635,21	1205,88
BUS39	330	900	557,77	1058,82

3 lentelė. Modelio apkrovų parametrai [43]

Šyna prie kurios prijungta apkrova	Įtampa U, kV	Aktyvioji galia P, MW	Reaktyvioji galia Q, MVAR
BUS3	330	600	250
BUS4	330	450	184
BUS7	330	233,8	130
BUS8	330	522	176
BUS12	110	120	30
BUS15	330	320	153
BUS16	330	329,4	323
BUS18	330	158	30
BUS20	110	680	103

BUS21	330	274	115
BUS23	330	247,5	84,6
BUS24	330	308,6	-92,2
BUS25	330	224	47,2
BUS26	330	139	17
BUS27	330	281	75,5
BUS28	330	206	27,6
BUS29	330	283,5	126,9
BUS31	35	80	40
BUS39	330	400	250

2.2. Dinaminiai modeliai

2.2.1. Sinchroninio generatoriaus modeliai

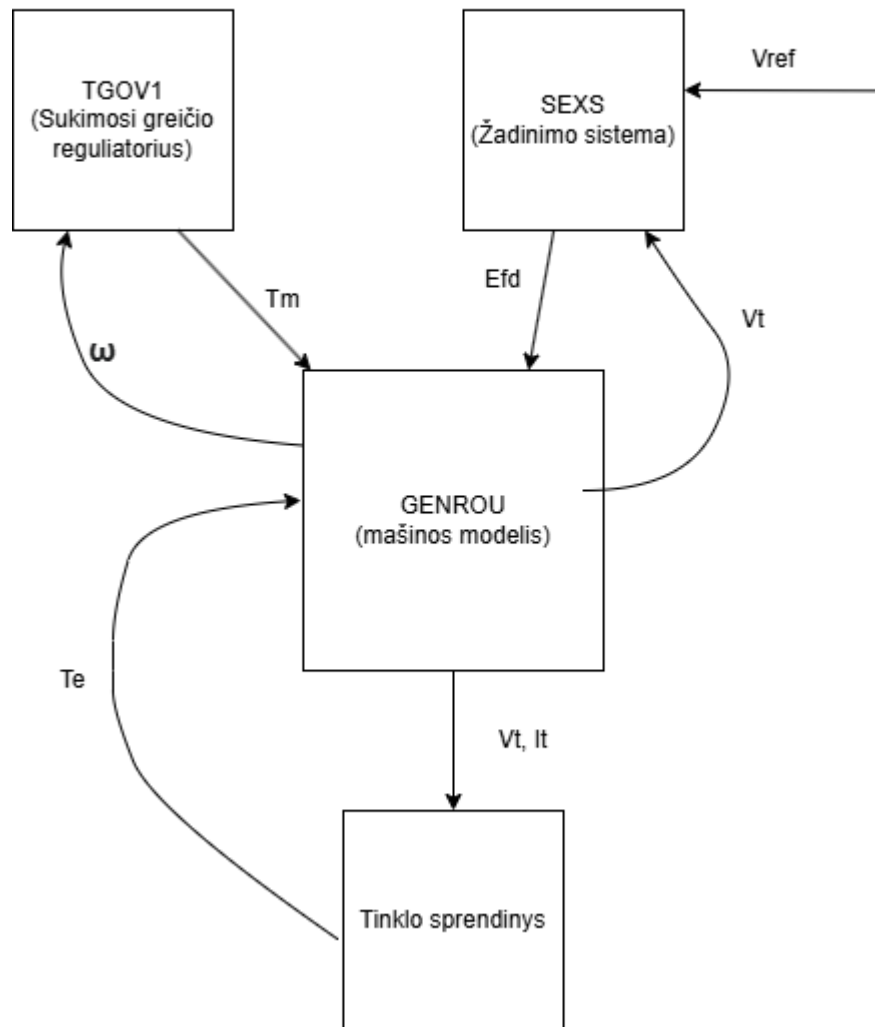
Sinchroninio generatoriaus dinaminį modelį sudaro:

- mašinos modelis (GENROU)
- žadinimo sistema (SEXS)
- sukimosi greičio reguliatorius (TGOV1)

Tyrime kiekvienas sinchroninis generatorius atspindimas trimis modeliais, kurie veikia kartu ir keičiasi duomenimis kiekvienu laiko momentu. Mašinos modelis (GENROU) pateikia elektromechanines lygtis, žadinimo sistema (SEXS) reguliuoja gnybtų įtampą valdydama lauko srovę. Sukimosi greičio reguliatorius (TGOV1) kontroliuoja mechaninę generatoriaus galią, reaguodamas į greičio nukrypimus.

Sinchroninis generatorius „PSS/E“ programinėje įrangoje modeliuojamas trimis tarpusavyje sujungtais modeliais pavaizduotais **6 pav.** Centrinis elementas yra GENROU mašinos modelis, kuriame slypi generatoriaus inercija H . Modelis skaičiuoja rotoriaus kampo ir greičio dinamiką. GENROU modelis gauna mechaninę galią T_m iš sukimosi greičio reguliatoriaus TGOV1, lauko įtampa E_{fd} iš žadinimo sistemos SEXS. Grįžtamuju ryšiu GENROU modelis perduoda šynų įtampą ir srovę į tinklo sprendinį. TGOV1 stebi rotoriaus greitį ir aptikus dažnio nukrypimus, vykdo pirminį dažnio reguliavimą. SEXS lygina faktinę šynų įtampą su etalonine įtampa V_{ref} ir valdant lauko įtampą E_{fd} palaiko reaktyviosios galios balansą. Abu modeliai veikia uždaro grįžtamojo ryšio principu, TGOV1 gauna greitį ω iš GENROU, SEXS gauna įtampą V_t iš GENROU ir abu modeliai grąžina signalus atgal. Tinklo sprendinys kiekvieną simuliacijos žingsnį grąžina elektromagnetinį momentą T_e į GENROU. Susidaręs T_m ir T_e skirtumas nulemia sinchroninio generatoriaus reakciją po trikdžio.

Sinchroninis generatorius



6 pav. Sinchroninio generatoriaus dinaminio modelio principinė schema

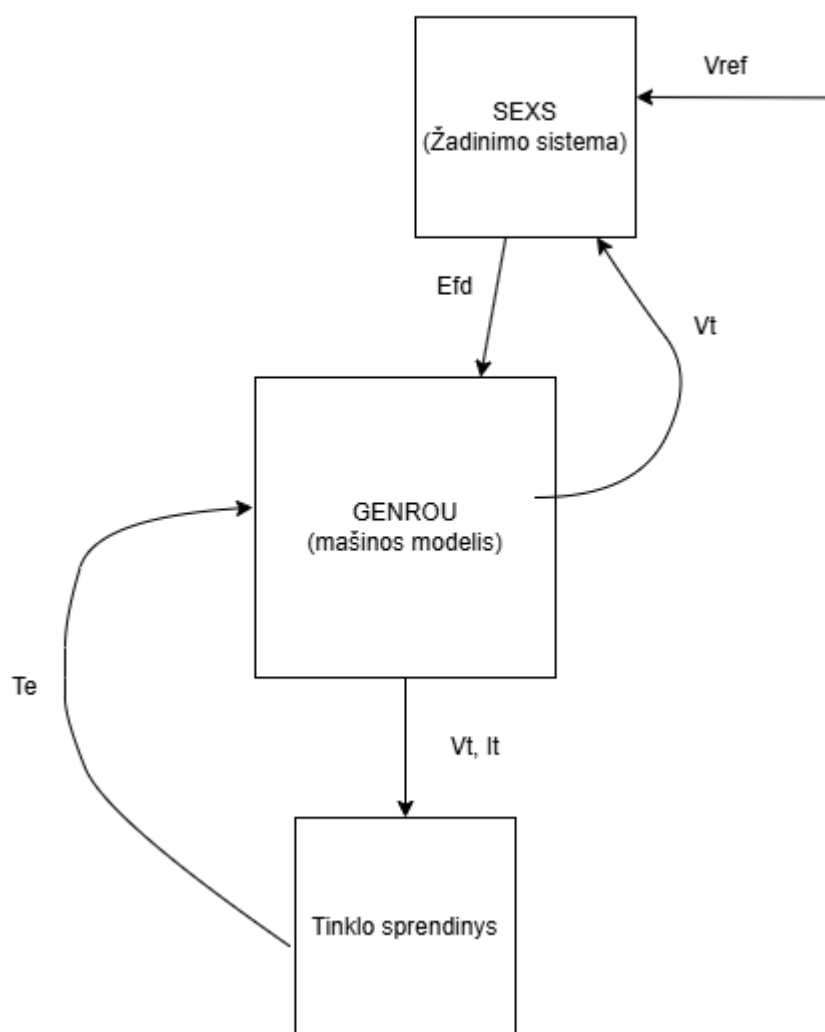
2.2.2. Sinchroninio kompensatoriaus modelis

Sinchroninio kompensatoriaus modelį sudaro:

- mašinos modelis (GENROU)
- žadinimo sistema (SEXS)

Sinchroninio kompensatoriaus veikimo principas pateikiamas 7 pav.

Sinchroninis kompensatorius



7 pav. Sinchroninio kompensatoriaus dinaminio modelio principinė schema

Sinchroninis kompensatorius yra sinchroninė mašina, kuri negeneruoja aktyviosios galios. SK tikslas EES yra reaktyviosios galios kompensavimas ir inercijos tiekimas EES. SK naudoja tą patį GENROU mašinos modelį ir SEXS žadinimo sistemą, kaip ir sinchroniniai generatoriai. Inercijos konstanta nustatyta $H = 4,0$ s, o vardinė galia $MVA = 200$ MVA. GENROU ir SEXS modeliai veikia taip pat, kaip SG, GENROU modelis teikia fizinę inerciją, o SEXS grįžtamojo ryšio būdu reguliuoja aktyviąją galią palaikydamas prijungtos šynos įtampą. SK pagerina RoCoF ir įtampos stabilumą, tačiau negali teikti pirminio dažnio reguliavimo, nes neturi aktyvios galios rezervo.

2.2.3. 4 tipo vėjo elektrinės modelis

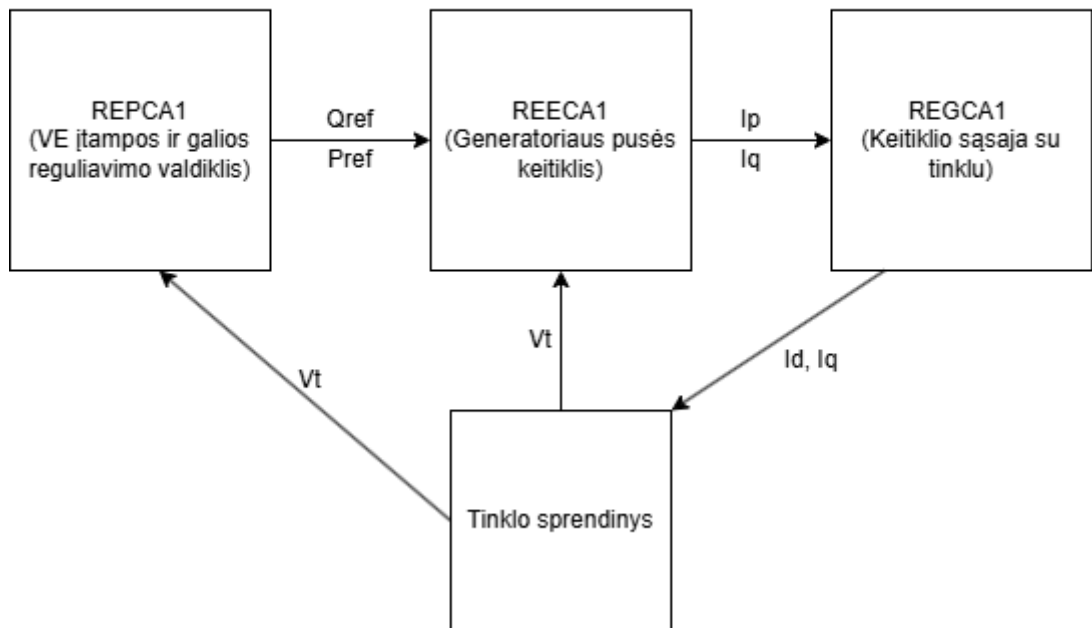
Vėjo elektrinės modelį sudaro:

- tinklo pusės keitiklis (REGCA1);
- generatoriaus pusės keitiklis (REECA1);
- vėjo elektrinės įtampos ir galios reguliavimo valdiklis (REPCA1).

Vėjo elektrinė modeliuojama naudojant WECC 4 tipo vėjo elektrinės dinaminis modelius. Vėjo elektrinę atvaizduoja trys susieti modeliai: REGCA1 (tinklo pusės keitiklis), REECA1 (generatoriaus

pusės keitiklis) ir REPCA1 (vėjo elektrinės įtampos ir galios reguliavimo valdiklis). Kartu šie modeliai imituoja vėjo elektrinės veikimą. Vėjo elektrinės veikimo principas pateikiamas **8 pav.**

4 tipo vėjo elektrinė



8 pav. 4 tipo vėjo elektrinės dinaminio modelio principinė schema

REPCA1 stebi prijungimo taško įtampą ir perduoda reaktyviosios ir aktyviosios galios nustatytąsias vertes į REECA1. REECA1 apskaičiuoja aktyviosios I_p ir reaktyviosios I_q srovės komandas ir perduoda jas į REGCA1. REGCA1 tiekia apskaičiuotas sroves tiesiai į tinklo sprendinį. Grįžtamasis ryšys perduodamas atbuline tvarka, šynų įtampa V_t iš tinklo gražinama į visus tris modelius, tuomet kiekvienas iš modelių sureaguoja pagal savo paskirtį.

2.3. Tiriami dinaminio stabilumo rodikliai

Baigiamajame magistro projekte pasirinkta tirti keturis dinaminio stabilumo rodiklius: rotoriaus kampą, dažnio minimumo vertę, dažnio kitimo greitį ir šynų įtampą. Šie dinaminio stabilumo rodikliai tiesiogiai atitinka tris IEEE/CIGRE stabilumo klasifikacijos kategorijas ir leidžia visapusiškai įvertinti AEI ir SK poveikį skirtingiems sistemos dinaminiais aspektams.

Rotoriaus kampo svyravimas pasirinktas, kaip trumpalaikio dinaminio stabilumo rodiklis, nes jis atspindi sinchroninių generatorių gebėjimą išlaikyti sinchronizaciją po trikdžių. Didėjant AEI daliai elektros sistemoje, silpnėja elektromechaniniai ryšiai tarp likusių sinchroninių mašinų, todėl rotoriaus kampas tampa jautresnis trikdžiams. Jei kampas viršija 180° , sistema praranda sinchronizaciją.

RoCoF rodiklis yra ryškiausia inercijos mažėjimo išraiška, kuri kiekybiškai parodo, kaip greitai dažnis kinta iškart po trikdžio. RoCoF taip pat yra vienas geriausių rodiklių pamatuoti SK teikiamos fizinės inercijos naudą, kadangi kuo didesnė inercija sistemoje, tuo mažesnis dažnio kitimo greitis ir atvirkščiai.

Dažnio minimali vertė apibūdina pirminės dažnio reguliavimo sistemos gebėjimą sustabdyti tolesnį dažnio kritimą. Minimumo vertė priklauso ne tik nuo inercijos, bet ir nuo sukimosi greičio

reguliatorių rezervo ir jų atsako greičio. Tyrime palyginamos dažnio minimumo vertės ir RoCoF vertės, siekiant įvairiapusiškai įvertinti poveikį sistemos dažniui.

Siekiami palyginti SK reaktyviosios galios palaikymo poveikį įtampai prie šynų Nr. 16 prijungus SK. Po TJ įtampa šynose gali smarkiai kristi, o SK reaktyviosios galios tiekimas gali pagreitinti įtampos atkūrimą.

2.4. Tiriama trikdžiai ir scenarijai

Tiriamajame darbe tiriama du atskiri ir nepriklausomi trikdžiai, kurių kiekvienas skirtas skirtingu stabilumo reiškinų stebėjimui.

Pirmasis trikdžis – **trifazis trumpasis jungimas šynose Nr. 38**. Trikdžio metu tiriama rotatoriaus kampo svyravimas, dažnio minimumas ir įtampos rodikliai. TJ sukuria staigų elektromagnetinį trikdį: generatoriaus gnybtų įtampa momentaliai krinta, elektromagnetinis sukimo momentas T_e sumažėja, o mechaninė galia T_m lieka nepakitusi. Susidaro mechaninis ir elektrinis pusiausvyros sutrikimas, kuris tiesiogiai veikia rotatoriaus kampo dinamiką. Staigus įtampos kritimas šynose Nr. 38 plinta po visą tinklą ir pasiekia stebimą šyną Nr. 16, kur stebimas SK reaktyviosios galios atsako efektyvumas. Trikdžio metu taip pat stebima dažnio minimumo vertė, kurią lemia TJ sukeltas trumpalaikis galios disbalansas. Trumpalaikius procesus sustabdo inercija ir sukimosi greičio regulatoriai.

Antrasis trikdžis – **generatoriaus Nr. 38 atjungimas** pasirinktas RoCoF rodikliui tirti. Šis scenarijus imituoja staigų 1025 MW aktyviosios galios netekimą. Skirtingai nuo TJ, kurio metu dažnio signalas $t = 2,0-2,1$ s lange yra iškraipytas perskaičiavimo triukšmo, generatoriaus atjungimas sukuria aiškų, fiziškai interpretuojamą ir tolygų dažnio kitimą nuo pat atjungimo momento. Tai leidžia patikimai apskaičiuoti RoCoF pagal 500 ms tiesinio nuolydžio metodą ir palyginti rezultatus tarp scenarijų. Generatoriaus GEN38 pasirinktas kaip didžiausias sistemoje esantis generatorius, todėl jo atjungimas sukuria žymiausią aktyviosios galios disbalanso scenarijų ir užtikrina, kad RoCoF skirtumai tarp scenarijų yra pakankamai ryškūs kiekybinei analizei.

Visi šie trikdžiai atliekami kiekvienam apačioje aprašomam scenarijui. Gauti rezultatai vėliau palyginami suformuojant išvadas.

Tiriama modelio scenarijai:

4 lentelėje pateikiami tiriama AEI integracijos scenarijai. Scenarijų tikslas išmatuoti dinaminio stabilumo rodiklius didėjant AEI integracijai sistemoje ir pažiūrėti kokį poveikį suteikia sistemoje prijungus SK. Bendra sistemos generacija visų scenarijų atveju išlieka 5880 MW.

4 lentelė. Tiriama AEI integracijos scenarijai

Scenarijus	AEI generacija (MW)	SG generacija (MW)	Pastabos
0 % AEI	0	5880	Tyrimo etalonas
10 % AEI	588	5292	Be SK
10 % AEI + SK	588	5292	SK prijungiamas šynoje Nr. 16
25 % AEI	1470	4410	Be SK
25 % AEI + SK	1470	4410	SK prijungiamas šynoje Nr. 16
50 % AEI	2940	2940	Be SK
50 % AEI + SK	2940	2940	SK prijungiamas šynoje Nr. 16
75 % AEI	4410	1470	Be SK
75 % AEI + SK	4410	1470	SK prijungiamas šynoje Nr. 16

5 lentelėje pateikiami SK jautrumo parametrų scenarijai. Tyrimu siekiama įvertinti įvairių SK jautrumo rodiklių poveikį dinaminiam stabilumui, nustatant optimalias jų vertes.

5 lentelė. Tiriama SK jautrumo parametrų scenarijai

Tyrimas	Scenarijus	Tyrimo reikšmės	Fiksuoti SK parametrai
SK vardinė galia S	75 % AEI	100, 200, 400, 600, 800	H = 4 s, šyna Nr. 16
SK inercijos konstanta H	75 % AEI	1, 2, 4, 6, 8	S = 200 MVA, šyna Nr. 16
Dviejų SK prijungimo vieta	75 % AEI	„Abu SK toli nuo trikdžio vietos“, „Vienas SK toli, kitas sistemos viduryje“, „Vienas SK toli, kitas arti trikdžio“, „Abu SK arti trikdžio vietos“.	H = 4 s, S = 200 MVA
SK kiekis	75 % AEI	1, 2, 3, 4	H = 4 s, S = 200 MVA

3. Tyrimo rezultatai

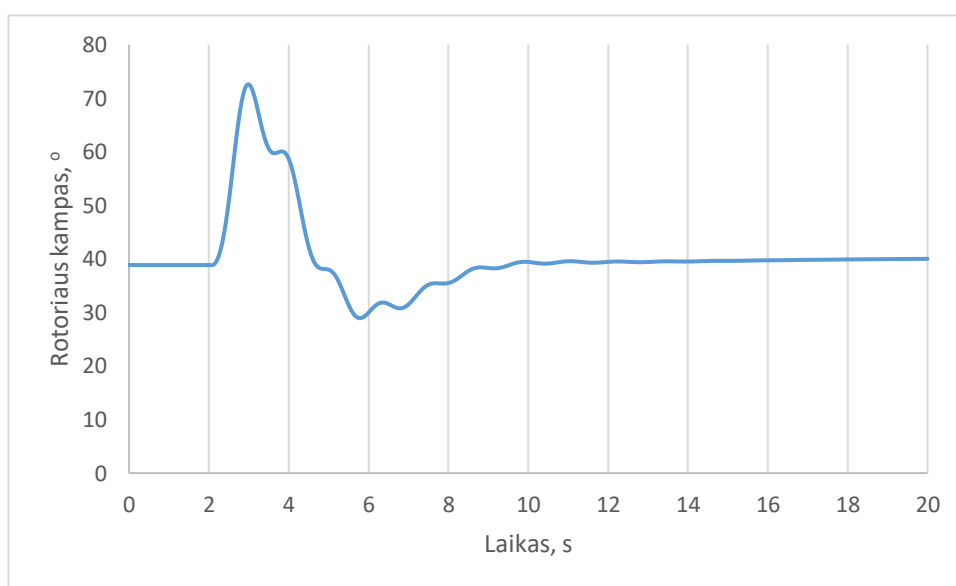
Prieš analizuojant skirtingus vėjo elektrinių generacijos scenarijus, pateikiami bazinės sistemos dinaminiai rodikliai. Bazinė sistema – tai IEEE-39 šynų sistema su 10 SG, be vėjo elektrinių ir be SK. Ji naudojama, kaip etalonas su kuriuo lyginami tolimesni scenarijai. Todėl stebimi parametrai yra atskaitos reikšmės vertinant AEI didėjančios generacijos ir prijungtų SK poveikį. Tolimesnėje tyrimo metu visi tiriami scenarijai pateikiami viename grafike

3.1. Bazinė sistema

Trumpojo jungimo bandymas

Paleidžiama modeliuojama sistema. Po 2 s trukmės modeliuojamas trifazis trumpasis jungimas šynoje Nr. 38, didžiausio generatoriaus prijungimo taške. Trumpojo jungimo trukmė yra 0,1 s. Po to trumpasis jungimas panaikinamas, sistema paleidžiama veikti iki 20 s. Stebimi dinaminio stabilumo rodikliai.

Rotoriaus kampo dinaminis stabilumas bazinės sistemos atveju stebimas **9 pav.** Rodiklis parodo ar po įvykusio trifazio trumpojo jungimo generatoriai nepraranda sinchronizacijos ir neviršija 180° . Gauti rodikliai pateikiami **6 lentelėje**.



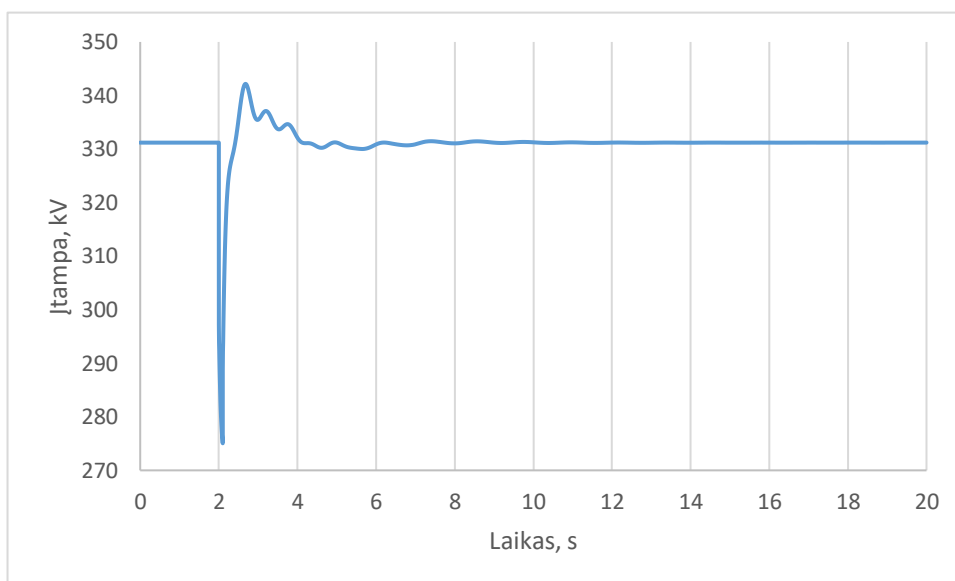
9 pav. Rotoriaus kampo grafikas baziniame scenarijuje (Trikdīs – TJ)

6 lentelė. Rotoriaus kampo parametrai bazinio scenarijaus atveju.

Parametras	Rotoriaus kampas
Maksimali reikšmė, °	72,58
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,99
Nuokrypis tarp pradinės ir maksimalios reikšmės, °	33,74
Laiko momentas, kuomet nusistovi rotoriaus kampas, s	8,52

Įtampa šynose Nr. 16 stebima, kaip įtampos dinaminio stabilumo rodiklis pateikta **10 pav.** Pasirinkta šyna Nr. 16, kadangi tai sistemos elektrinis centras ir būtent čia vėliau prijungiamas SK. Minimali įtampos reikšmė ir nusistovėjimo laikas baziniame scenarijuje naudojami, kaip atskaitos taškai

tolimesnei tyrimo eigai vertinant SK reaktyviosios galios palaikymą. Gauti rezultatai pateikiami 7 lentelėje.

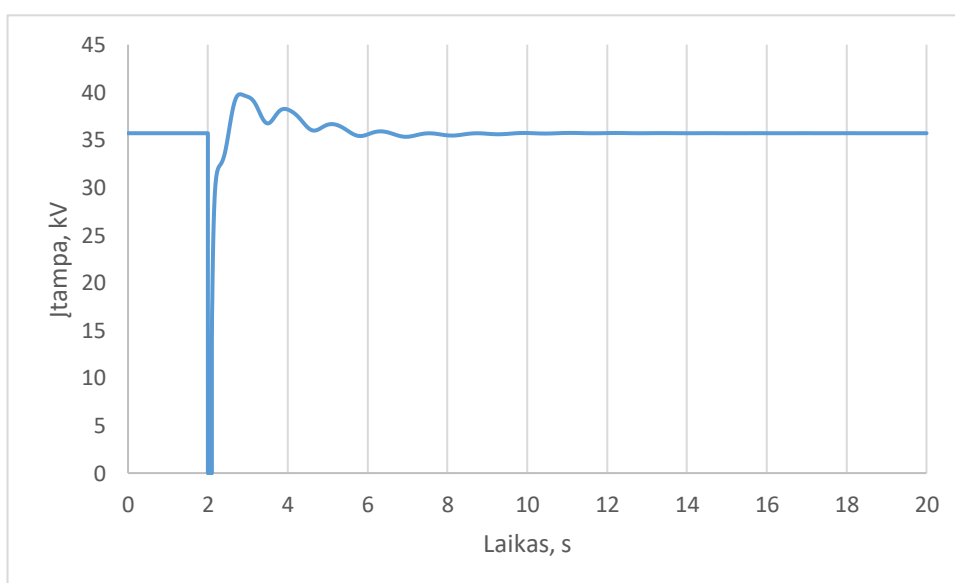


10 pav. Įtampos šynose Nr. 16 grafikas baziniame scenarijuje (Trikdžis – TJ)

7 lentelė. Įtampos parametrai šynose Nr. 16 bazinio scenarijaus atveju

Parametras	Įtampa šynose Nr. 16
Minimali reikšmė, kV	275,06
Laiko momentas, kuomet pasiekta minimali reikšmė, s	2,1
Laiko momentas, kuomet nusistovi įtampa, s	3,79

Įtampa šynose Nr. 38 stebima, kaip trikdžio vietos charakteristika pateikta 11 pav. TJ metu įtampa nukrinta iki nulio, o po trikdžio pašalinimo įtampa atkuriamą. Atkūrimo trukmė atspindi tinklo stiprumą gedimo vietoje. Gauti parametrai pateikiami 8 lentelėje.

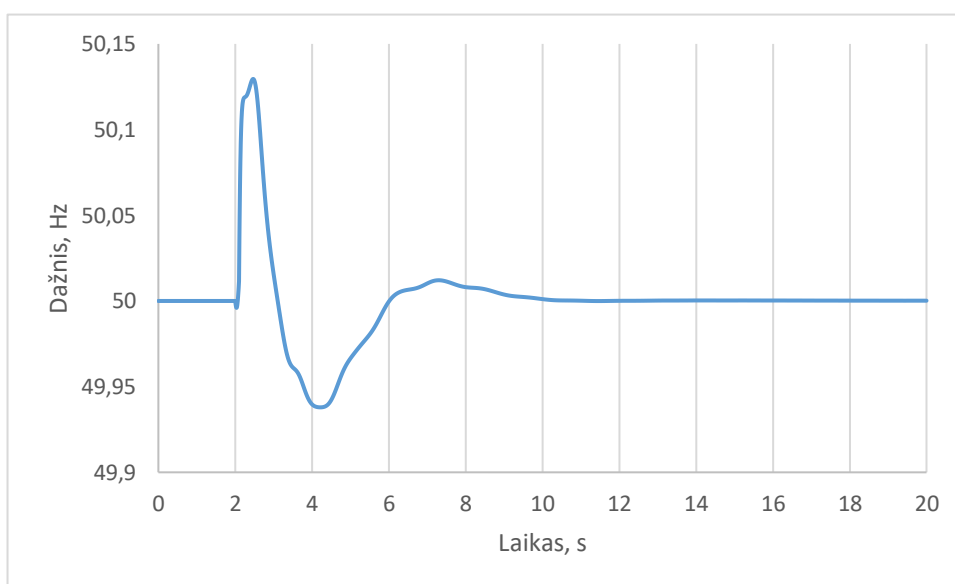


11 pav. Įtampos trumpojo jungimo vietoje (šynose Nr. 38) grafikas baziniame scenarijuje (Trikdžis – TJ)

8 lentelė. Įtampos parametrai šynose Nr. 38 bazinio scenarijaus atveju.

Parametras	Įtampa šynose Nr. 38
Minimali reikšmė, kV	0
Laiko momentas, kuomet pasiekta minimali reikšmė, s	2,1
Laiko momentas, kuomet nusistovi įtampa, s	7,05

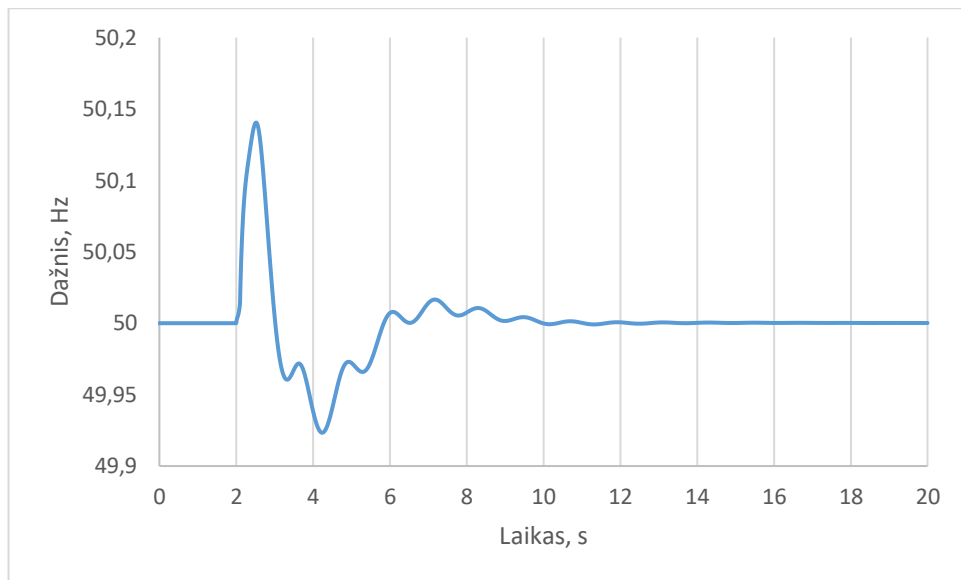
Dažnis šynose Nr. 16 (**12 pav.**) ir Nr. 39 (**13 pav.**) stebimas, kaip dažnio dinaminio stabilumo rodiklis. Dažnio minimalios, maksimalios reikšmės ir stabilizavimosi laikas baziniame scenarijuje pateikiamos **9 ir 10 lentelėse**.



12 pav. Dažnis matuojamas šynose Nr. 16 (Trikdīs – TJ)

9 lentelė. Dažnio parametrai šynose Nr. 16 bazinio scenarijaus atveju

Parametras	Dažnis
Minimali reikšmė, Hz	49,9379
Laiko momentas, kuomet pasiekta minimali reikšmė, s	4,22
Maksimali reikšmė, Hz	50,1295
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,47
Laiko momentas, kuomet nusistovi dažnis, s	4,65



13 pav. Dažnis matuojamas šynose Nr. 39 (Trikdīs – TJ)

10 lentelė. Dažnio parametrai šynose Nr. 39 bazinio scenarijaus atveju

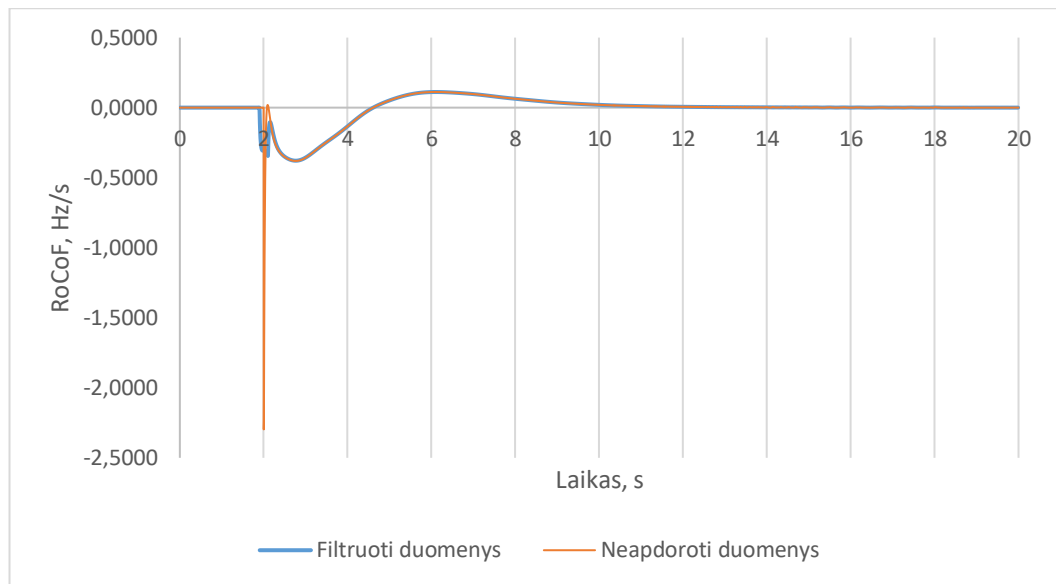
Parametras	Dažnis
Minimali reikšmė, Hz	49,9233
Laiko momentas, kuomet pasiekta minimali reikšmė, s	4,24
Maksimali reikšmė, Hz	50,1405
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,52
Laiko momentas, kuomet nusistovi dažnis, s	4,58

Sistemos disbalanso bandymas

Paleidžiama modeliuojama sistema. Po 2 s trukmės atjungiamas generatorius prijungtas prie šynos BUS38. Stebimas dažnio kitimo greitis. Bandymo tikslas išmatuoti dažnio kitimo greitį (RoCoF), kuris tiesiogiai atspindi sistemos inerciją.

Remiantis ENTSO-E Inercijos ir RoCoF gairėmis (v17, 2020), grafiniam vaizdavimui taikomas 200 ms slenkamojo vidurkio filtras, o lentelių palyginamosioms reikšmėms naudojamas 500 ms tiesinio nuolydžio metodas, skaičiuojamas nuo $t = 2,1$ s.

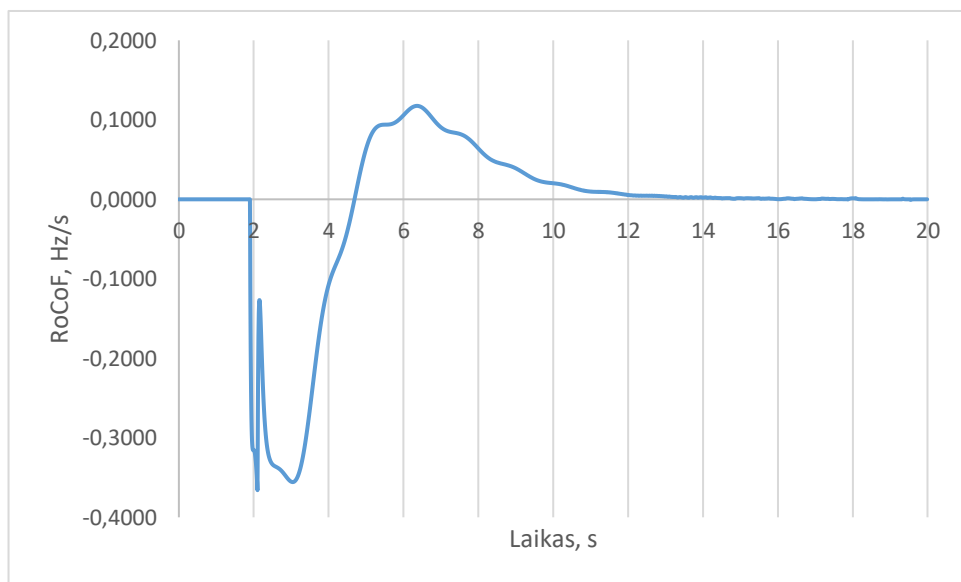
14 paveiksle pateikiami tiek neapdoroti, tiek filtruoti RoCoF duomenys, kurie parodo filtravimo būtinybę, nes neapdoroti duomenys yra iškraipyti integravimo triukšmo. Tolimesniu tyrimo metu bus pateikiamos tik filtruotos RoCoF reikšmės. RoCoF stebimas šynose Nr. 16 ir 39 (**14 ir 15 pav.**). Gauti rezultatai pateikiami **11 ir 12 lentelėse**.



14 pav. RoCoF matuojamas šynose Nr. 16 (Trikdīs – Galios disbalansas)

11 lentelė. RoCoF parametrai šynose Nr. 16 bazinio scenarijaus atveju

Parametras	RoCoF
Maksimali reikšmė, Hz/s	0,3788
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,76
Laiko momentas, kuomet nusistovi dažnis, s	8,45



15 pav. RoCoF matuojamas šynose Nr. 39 (Trikdīs – Galios disbalansas)

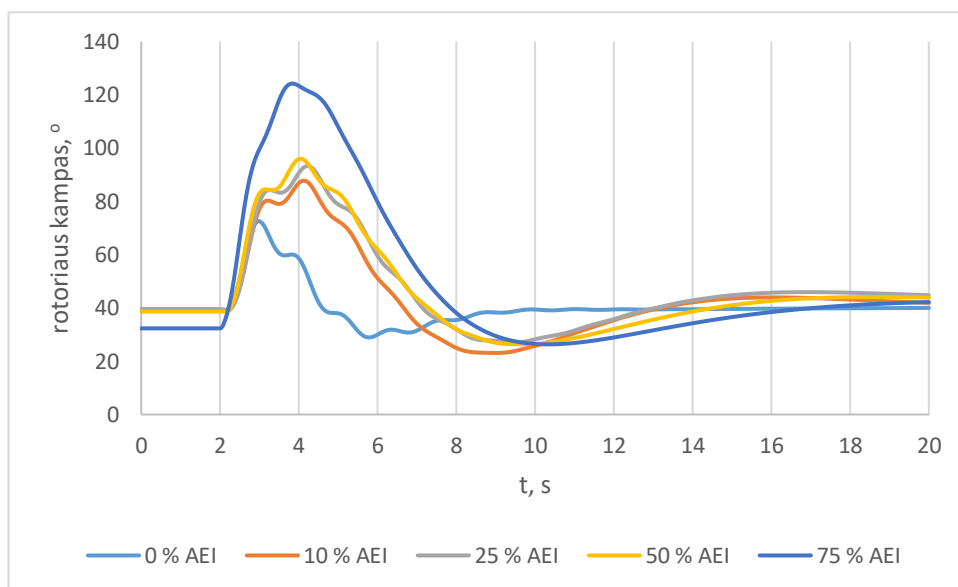
12 lentelė. RoCoF parametrai šynose Nr. 39 bazinio scenarijaus atveju

Parametras	RoCoF
Maksimali reikšmė, Hz/s	0,3659
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,1
Laiko momentas, kuomet nusistovi dažnis, s	8,31

3.2. SG keičiami AEI, sistema be SK

Šiame skyriuje pateikiami rezultatai gauti keičiant SG vėjo elektrinėmis (nuo 10 % iki 75 % generacijos) be SK. Šiuo tyrimu siekiama kiekybiškai nustatyti, kaip inercijos mažėjimas, dėl AEI integracijos veikia kiekvieną dinaminio stabilumo rodiklį. Visi tirti scenarijai pateikiami viename grafike, siekiant palyginti kiekvieno scenarijaus poveikį.

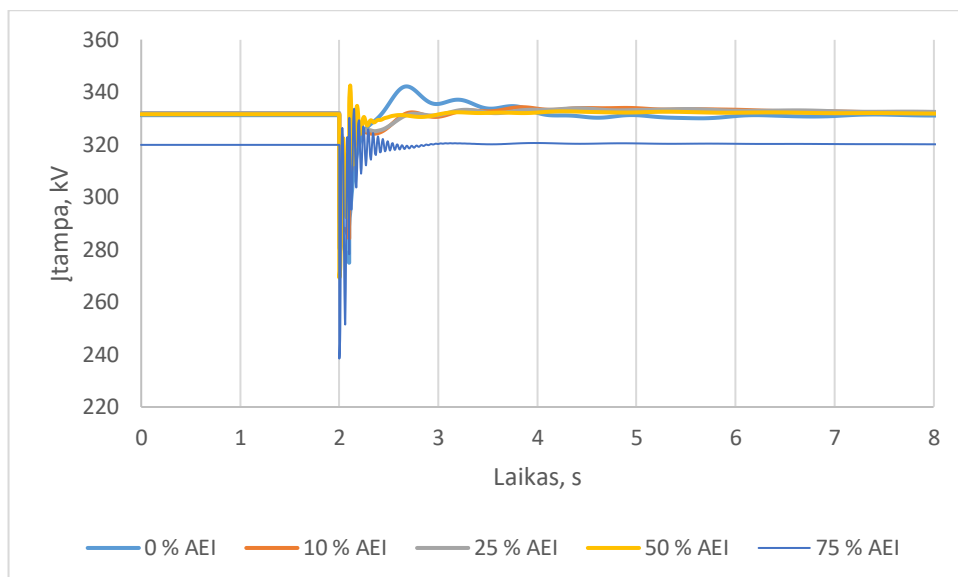
Trumpojo jungimo bandymas



16 pav. Suvestinis rotoriaus kampo grafikas be SK (Trikdis – TJ)

13 lentelė. Suvestinė rotoriaus kampo be SK parametrų lentelė

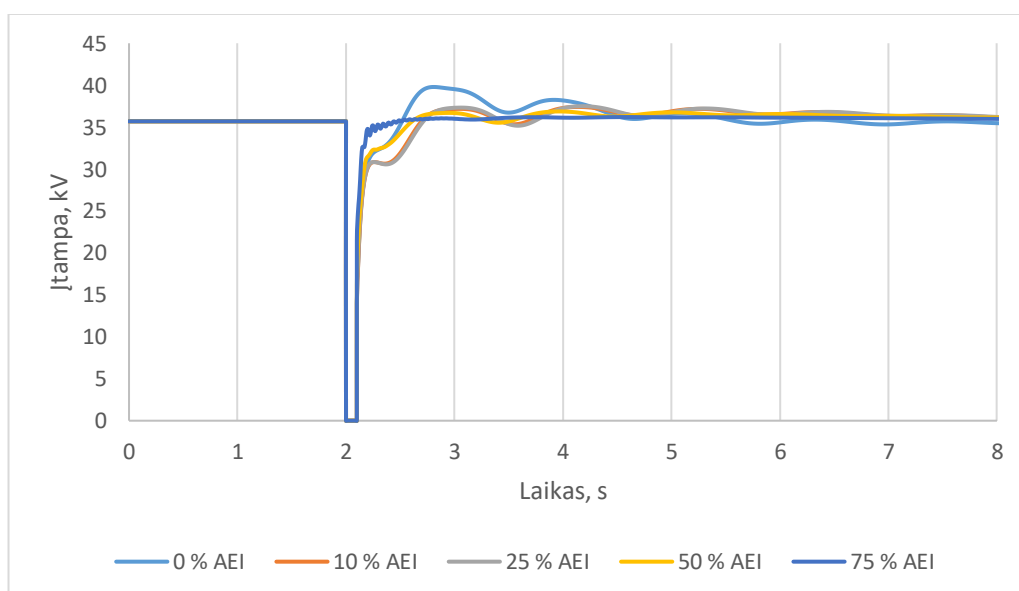
Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Maksimali reikšmė, °	72,58	87,78	93,31	96,02	124,23
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,99	4,13	4,23	4,05	3,84
Nuokrypis tarp pradinės ir maksimalios reikšmės, °	33,74	48,42	53,72	57,38	91,9
Laiko momentas, kuomet nusistovi rotoriaus kampas, s	8,52	13,602	14,302	15,192	20



17 pav. Suvestinis įtampos grafikas šynose Nr. 16 be SK (Trikdīs – TJ)

14 lentelė. Suvestinė įtampos šynose Nr. 16 be SK parametrų lentelė

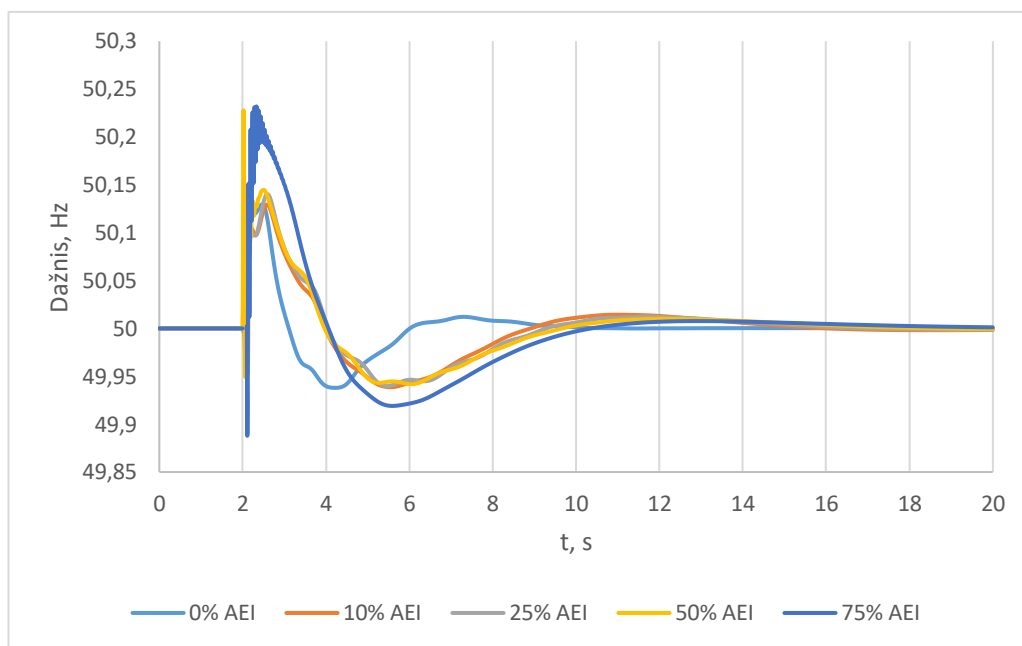
Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Minimali reikšmė, kV	275,06	284,36	279,87	269,77	278,22
Laiko momentas, kuomet pasiekta minimali reikšmė, s	2,1	2,1	2,01	2	2,1
Laiko momentas, kuomet nusistovi įtampa, s	3,79	2,54	2,56	2,29	2,37



18 pav. Suvestinis įtampos grafikas šynose Nr. 38 be SK (Trikdīs – TJ)

15 lentelė. Suvestinė įtampos šynose Nr. 38 be SK parametrų lentelė

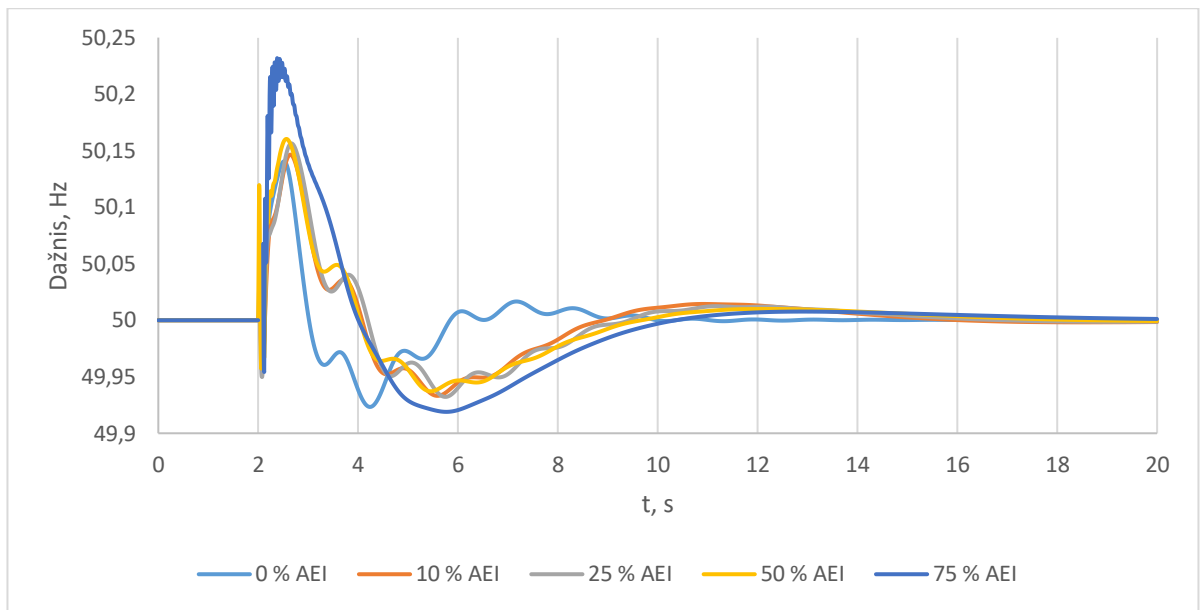
Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Minimali reikšmė, kV	0	0	0	0	0
Laiko momentas, kuomet pasiekta minimali reikšmė, s	2,1	2,1	2,01	2,1	2,1
Laiko momentas, kuomet nusistovi įtampa, s	7,05	8,9	9,01	8,7	7,32



19 pav. Suvestinis dažnio grafikas šynose Nr. 16 be SK (Trikdīs – TJ)

16 lentelė. Suvestinė dažnio šynose Nr. 16 be SK parametrų lentelė

Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Minimali reikšmė, Hz	49,9379	49,9386	49,9398	49,9418	49,8878
Laiko momentas, kuomet pasiekta minimali reikšmė,	4,22	5,54	5,46	6,05	2,11
Maksimali reikšmė, Hz	50,1295	50,1293	50,1403	50,2277	50,2319
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,47	2,58	2,59	2,02	2,33
Laiko momentas, kuomet nusistovi dažnis, s	4,65	6,48	6,69	6,61	7,51

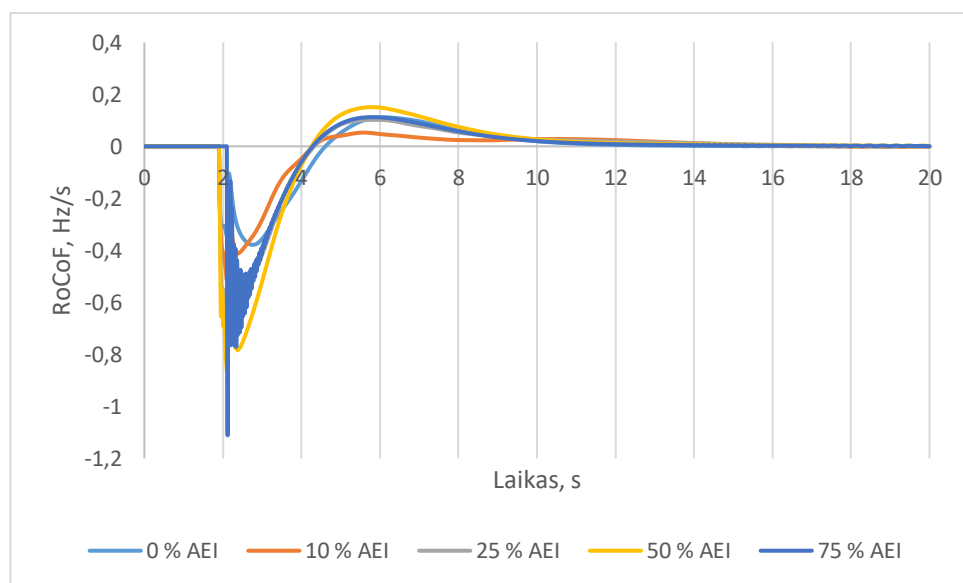


20 pav. Suvestinis dažnio grafikas šynose Nr. 39 (Trikdīs – TJ)

17 lentelė. Suvestinė dažnio šynose Nr. 39 be SK parametrų lentelė

Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Mėnimali reikšmė, Hz	49,9233	49,9331	49,9322	49,9371	49,9190
Laiko momentas, kuomet pasiekta mėnimali reikšmė,	4,24	5,59	5,75	5,45	5,77
Maksimali reikšmė, Hz	50,1405	50,1464	50,1564	50,1603	50,2318
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,52	2,64	2,67	2,57	2,38
Laiko momentas, kuomet nusistovi dažnis, s	4,58	6,2	6,9	6,74	7,5

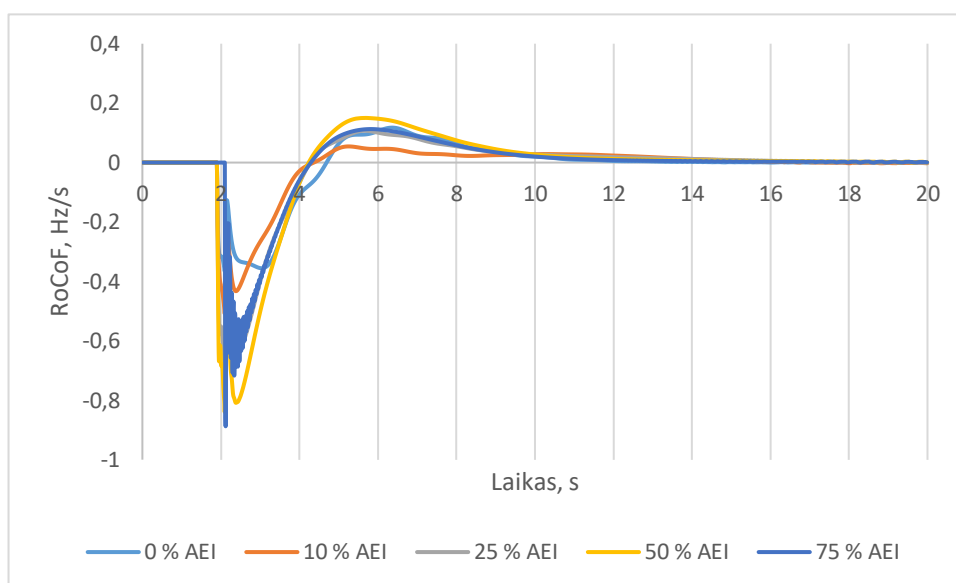
Sistemos disbalanso bandymas



21 pav. Suvestinis RoCoF grafikas šynose Nr. 16 be SK (Trikdīs – Galios disbalansas)

18 lentelė. Suvestinė RoCoF šynose Nr. 16 be SK parametrų lentelė

Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Maksimali reikšmė, Hz/s	0,3788	0,5141	0,7265	0,8644	1,1118
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,76	2,1	2,1	2,1	2,11
Laiko momentas, kuomet nusistovi RoCoF, s	8,45	5,78	7,990	8,66	8,19

**22 pav.** Suvestinis RoCoF grafikas šynose Nr. 39 be SK (Trikdīs – Galios disbalansas)**19 lentelė.** Suvestinė RoCoF šynose Nr. 39 be SK parametrų lentelė

Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Maksimali reikšmė, Hz/s	0,3659	0,5091	0,6889	0,8402	0,8877
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,1	2,1	2,1	2,1	2,11
Laiko momentas, kuomet nusistovi RoCoF, s	8,31	5,49	8,07	8,67	8,19

Siekiant įvertinti AEI integracijos poveikį sistemos dinaminiam stabilumui, atlikti bandymai keturiuose scenarijuose, keičiant AEI dalį sistemoje nuo 10 % iki 75 % visos sistemos generacijos. Rezultatai palyginami su 0 % AEI scenarijumi (100 % generacijos sudaro SG t.y. bazinis scenarijus). Šiuo atveju visi scenarijai modeliuojami be SK, siekiant įvertinti tik didėjančios AEI integracijos poveikį. Bandymų metu stebėti penki dinaminio stabilumo rodikliai: rotoriaus kampas ir jo stabilizavimo laikas, įtampa šynose, dažnio minimali vertė ir RoCoF. Rezultatai pateikiami 20 lentelėje.

20 lentelė. AEI integracijos be SK rezultatai

Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI	Pokytis Absoliutus (Santykinis)
Rotoriaus kampas, o	33,7	48,4	53,7	57,4	91,9	+0,733 (+173 %)
Rotoriaus kampo stabilizavimo laikas, s	8,52	13,6	14,3	15,19	20	+11,48 (+135 %)
Įtampa šynose Nr. 16, kV	275,06	284,4	279,9	269,8	278,8	+3,71 (+1,35 %)
Dažnio minimali vertė šynose Nr. 16, Hz	49,938	49,939	49,94	49,942	49,888	-0,05 (-0,1 %)
RoCoF šynose Nr. 16, Hz/s	0,379	0,514	0,727	0,864	1,112	+0,733 (+194 %)

Gauti rezultatai patvirtina, kad didėjanti AEI integracija sukelia neigiamą poveikį visiems tirtiems dinaminio stabilumo rodikliams. Rotoriaus kampo maksimali reikšmė nuosekliai auga nuo 33,74° (0 % AEI) iki 91,9° (75 % AEI) – tai 172 % padidėjimas nuo pradinės reikšmės, rodantis susilpnėjusius elektromechaninius ryšius tarp likusių SG. Stabilizavimosi laikas ilgėja nuo 8,52 s (0 % AEI) iki 20 s (75 % AEI).

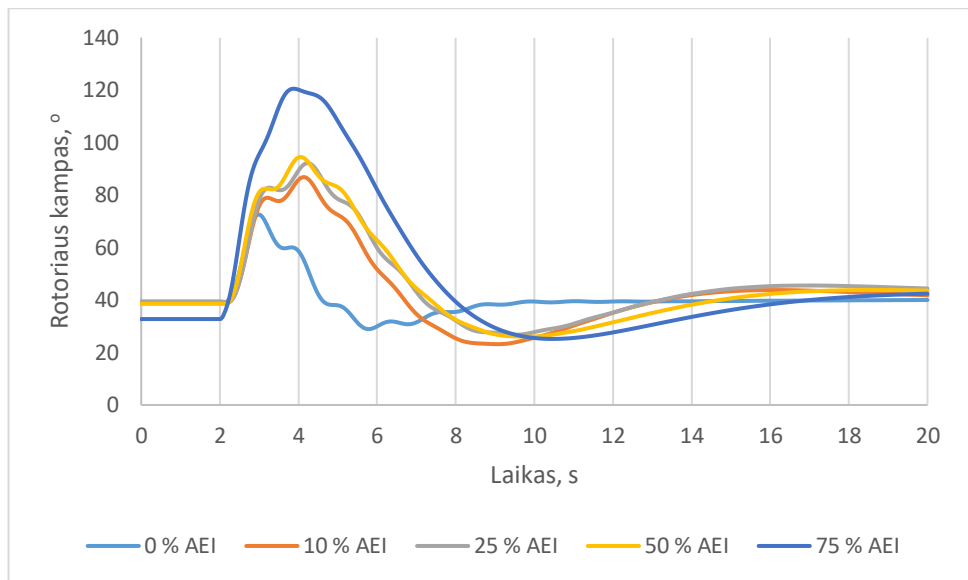
Dažnis šynose Nr. 16 kinta netolygiai. Scenarijuose (nuo 0 % AEI iki 50 % AEI) dažnio minimumas šiek tiek kyla (nuo 49,9379 Hz iki 49,9418 Hz), kol esant 75 % AEI staiga nukrinta iki 49,8878 Hz. Scenarijuose (0–50 % AEI), keitkliai TJ metu valdydami reaktyviają galią kompensuodavo, dėl inercijos praradimo atsirandančius nuostolius, tačiau 75 % AEI scenarijuje kompensavimas tapo nepankamas, dėl išsekusių sistemos reaktyvios galios reguliavimo rezervų.

RoCoF rodiklis šynose Nr. 16 augo visuose scenarijuose, nuo 0,3788 Hz/s (0 % AEI) iki 1,1118 Hz/s (75 % AEI), tai 194 % padidėjimas nuo bazinės. RoCoF rodiklio augimas atspindi tiesioginę švytavimo lygties priklausomybę, pakeitus SG iš sistemos pašalinama jo kinetinė, todėl mažėja bendra sistemos inercija. 75 % AEI scenarijaus atveju pasiekta trumpalaikio stabilumo riba, kadangi RoCoF rodiklis nenusistovi net ir pasibaigus tyrimo laikui – 20 s.

3.3. SG keičiami AEI, sistema su SK

Šiame skyriuje kartojami tie patys AEI integracijos scenarijai, tačiau sistemoje pridamas SK šynose Nr. 16 (H=4 s, S=200 MVA). Visi grafikai ir lentelės išdėstytos vienoda tvarka, kaip ir 3.2 skyriuje, siekiant palyginti rezultatus tarp sistemos su ir be SK.

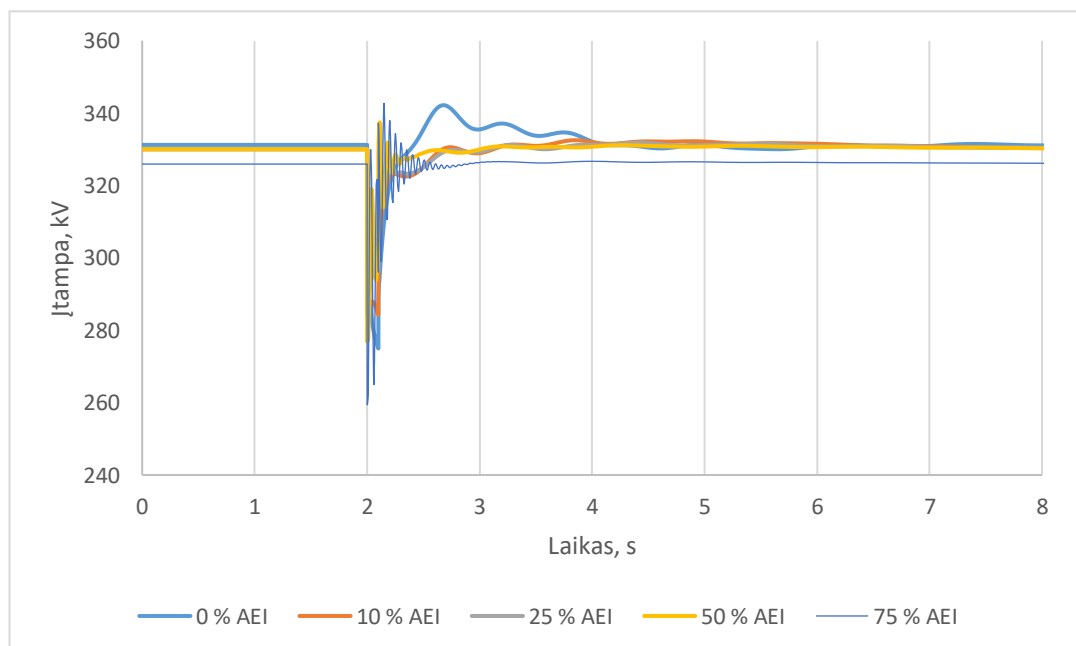
Trumpojo jungimo bandymas



23 pav. Suvestinis rotoriaus kampo grafikas su SK (Trikdīs – TJ)

21 lentelė. Suvestinė rotoriaus kampo su SK parametų lentelė

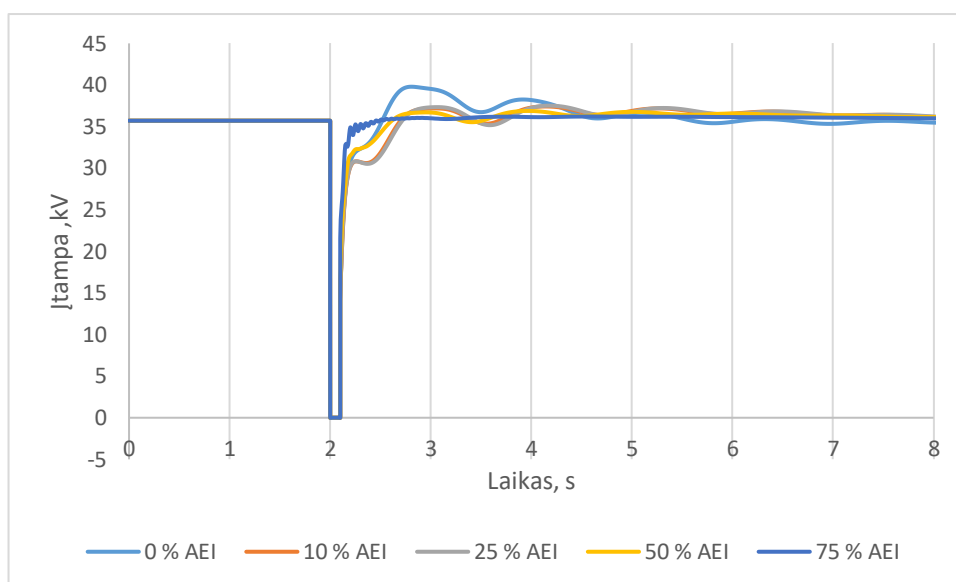
Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Maksimali reikšmė, °	72,58	86,83	92,16	94,5	120,52
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,99	4,14	4,23	4,05	3,88
Nuokrypis tarp pradinės ir maksimalios reikšmės, °	33,74	47,55	52,67	55,94	87,76
Laiko momentas, kuomet nusistovi rotoriaus kampas, s	8,52	13,652	14,342	15,232	20



24 pav. Suvestinis įtampos šynose Nr. 16 su SK grafikas (Trikdīs – TJ)

22 lentelė. Suvestinė įtampos šynose Nr. 16 su SK lentelė

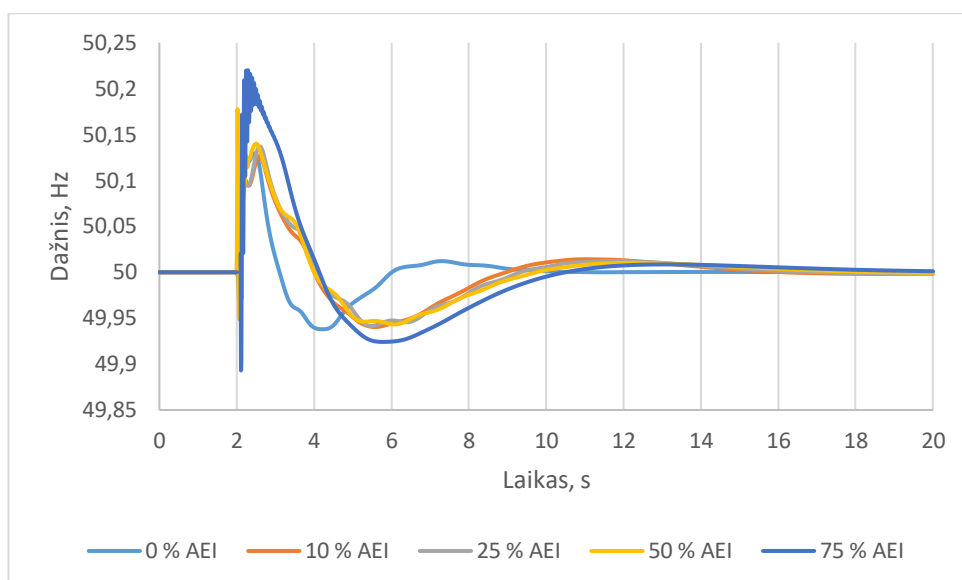
Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Minimali reikšmė, kV	275,056	284,37	282,91	276,95	296,05
Laiko momentas, kuomet pasiekta minimali reikšmė, s	2,1	2,1	2,01	2	2,1
Laiko momentas, kuomet nusistovi įtampa, s	3,79	2,54	2,56	2,3	2,38



25 pav. Suvestinis įtampos šynose Nr. 38 su SK grafikas (Trikdīs – TJ)

23 lentelė. Suvestinė įtampos šynose Nr. 38 su SK lentelė

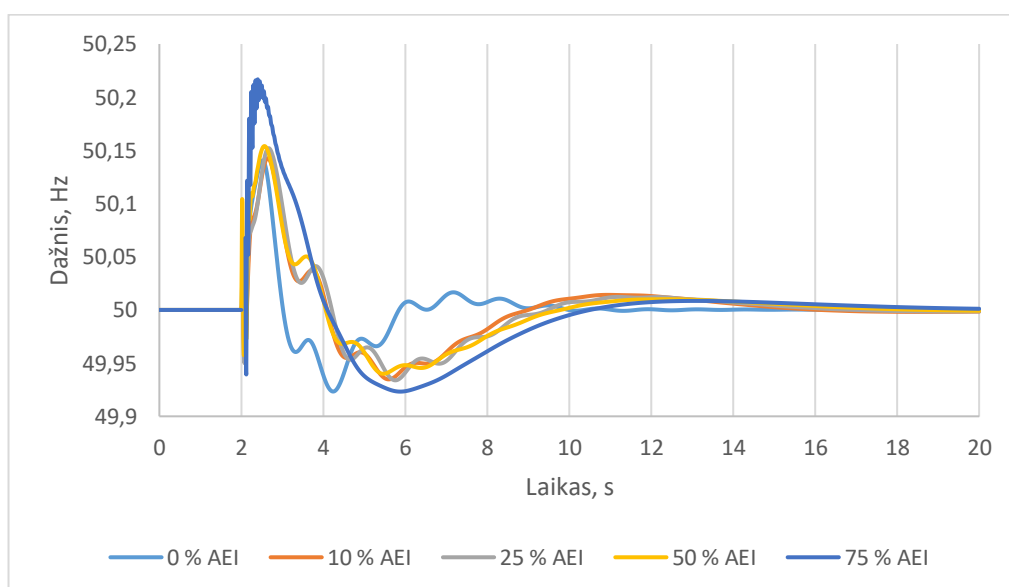
Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Minimali reikšmė, kV	0	0	0	0	0
Laiko momentas, kuomet pasiekta minimali reikšmė, s	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Laiko momentas, kuomet nusistovi įtampa, s	3,79	8,91	9,01	8,69	7,41



26 pav. Suvestinis dažnio šynose Nr. 16 su SK grafikas (Trikdīs – TJ)

24 lentelė. Suvestinė dažnio šynose Nr. 16 su SK lentelė

Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Minimali reikšmė, Hz	49,9379	49,9404	49,9416	49,9431	49,8931
Laiko momentas, kuomet pasiekta minimali reikšmė,	4,22	5,58	5,48	6,08	2,11
Maksimali reikšmė, Hz	50,1295	50,1262	50,137	50,1774	50,2199
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,47	2,59	2,6	2,02	2,29
Laiko momentas, kuomet nusistovi dažnis, s	4,65	6,46	6,7	6,62	7,66

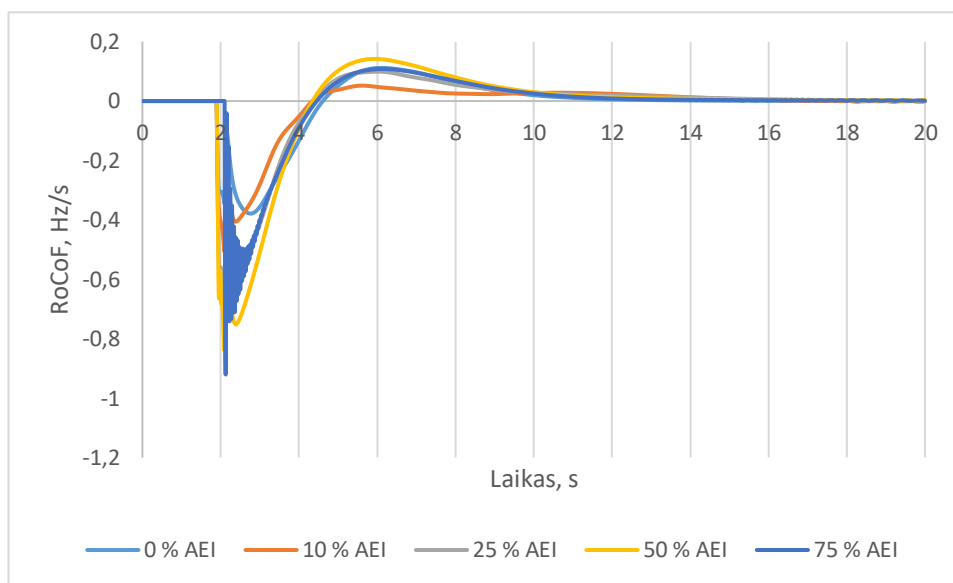


27 pav. Suvestinis dažnio šynose Nr. 39 su SK grafikas (Trikdīs – TJ)

25 lentelė. Suvestinė dažnio šynose Nr. 39 su SK lentelė

Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Minimali reikšmė, Hz	49,9233	49,9348	49,9339	49,94	49,9232
Laiko momentas, kuomet pasiekta minimali reikšmė,	4,24	5,59	5,76	5,46	5,87
Maksimali reikšmė, Hz	50,1405	50,1426	50,1520	50,1540	50,2168
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,47	2,64	2,67	2,56	2,4
Laiko momentas, kuomet nusistovi dažnis, s	4,58	6,13	6,91	6,75	7,66

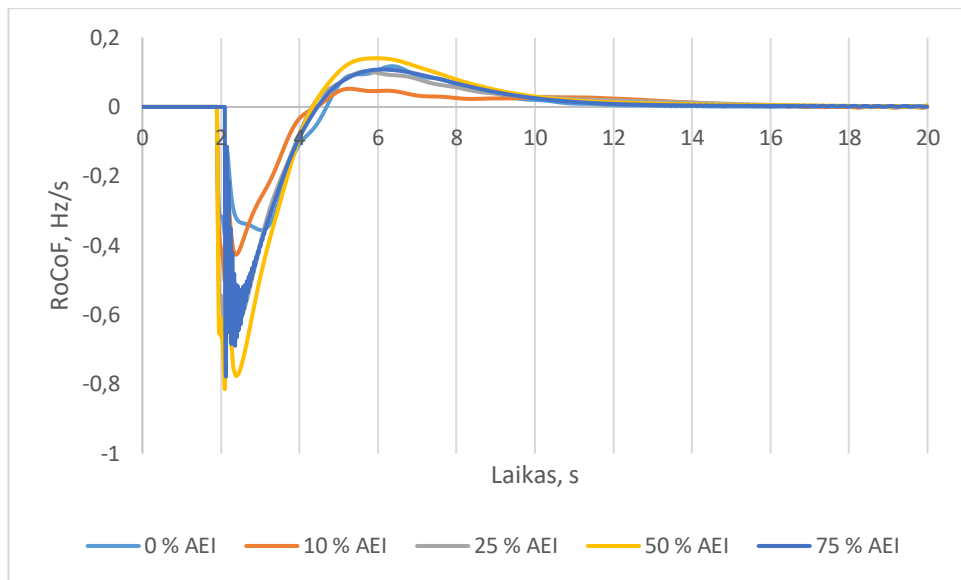
Sistemos disbalanso bandymas



28 pav. Suvestinis RoCoF šynose Nr. 16 su SK grafikas (Trikdīs – Galios disbalansas)

26 lentelė. Suvestinė RoCoF šynose Nr. 16 su SK lentelė

Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Maksimali reikšmė, Hz/s	0,3788	0,5078	0,715	0,8402	0,9205
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,76	2,1	2,1	2,1	2,12
Laiko momentas, kuomet nusistovi RoCoF, s	8,45	5,73	8,06	8,83	8,57



29 pav. Suvestinis RoCoF šynose Nr. 39 su SK grafikas (Trikdžis – Galios disbalansas)

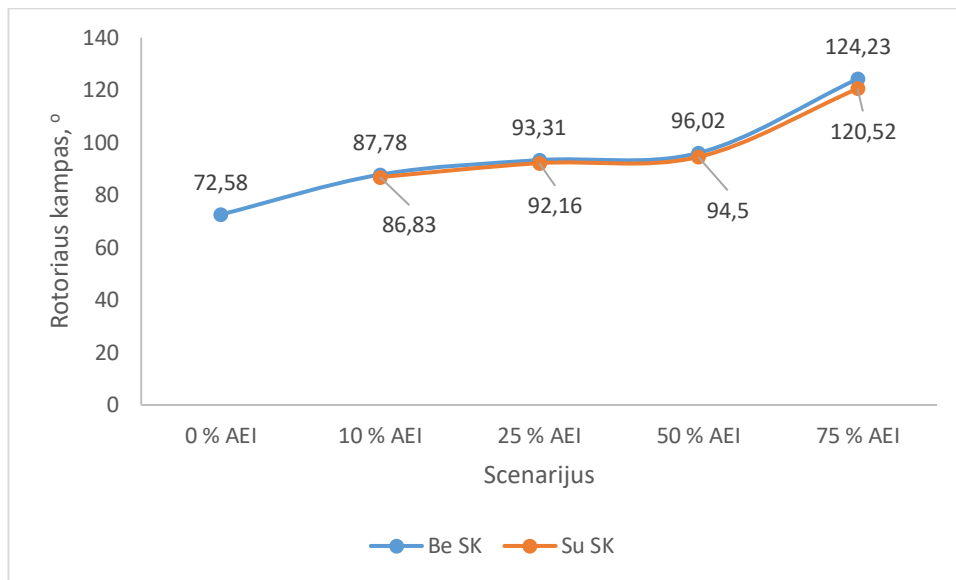
27 lentelė. Suvestinė RoCoF šynose Nr. 39 su SK lentelė

Parametras	0 % AEI	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Maksimali reikšmė, Hz/s	0,3659	0,5028	0,6761	0,8145	0,7783
Laiko momentas, kuomet pasiekta maksimali reikšmė, s	2,1	2,1	2,1	2,1	2,12
Laiko momentas, kuomet nusistovi RoCoF, s	8,31	5,4	8,13	8,83	8,57

3.4. Sistemų palyginimas be SK ir su SK

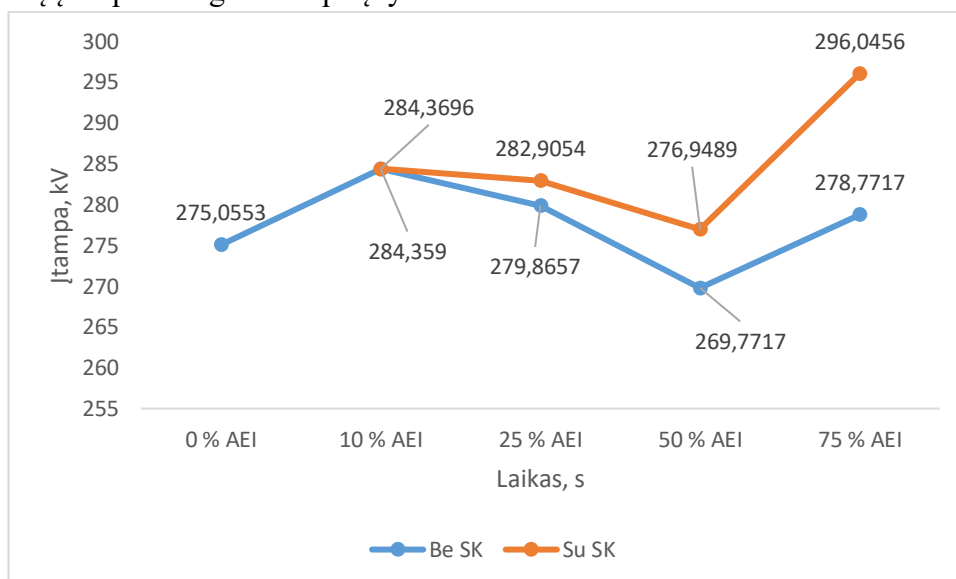
30–34 paveiksluose pateikiami apibendrinantys palyginimo grafikai, kuriuose palyginamos scenarijų reikšmės be SK ir su SK. Grafikai vizualiai parodo didėjančios AEI generacijos poveikį IEEE-39 sistemos dinaminio stabilumo rodikliams ir parodo kokį poveikį sukelia prijungtas SK.

Rotoriaus kampo maksimalių verčių palyginimas (**30 pav.**) parodo SK tiekiamos inercijos poveikį rotoriaus kampo svyravimui.



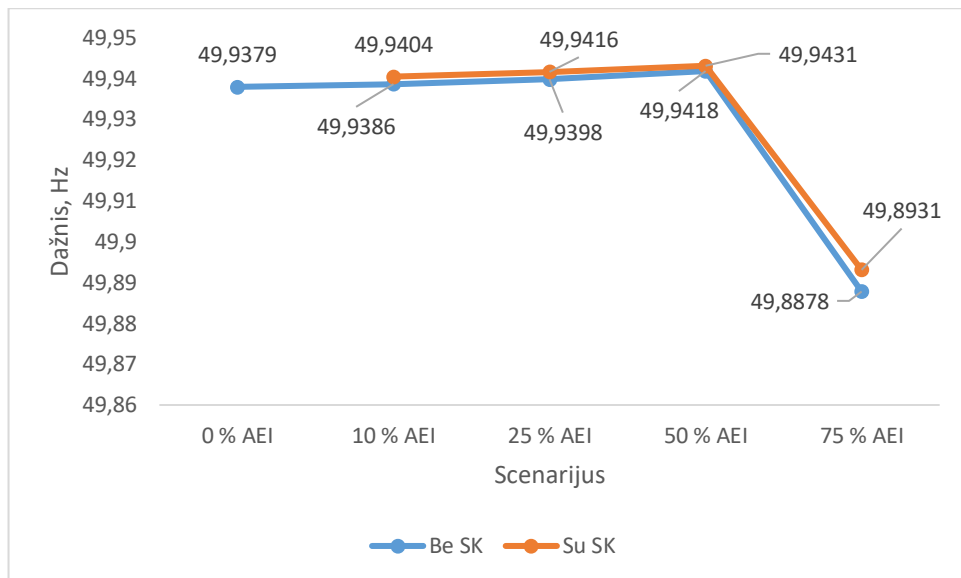
30 pav. Rotoriaus kampo maksimalių verčių palyginimas sistemoje be SK ir su SK (Trikdīs – TJ)

Įtampos minimalių reikšmių palyginimas šynose Nr. 16 (31 pav.) parodo SK reaktyviosios galios tiekimo poveikį įtampos atsigavimui po įvykusio TJ.



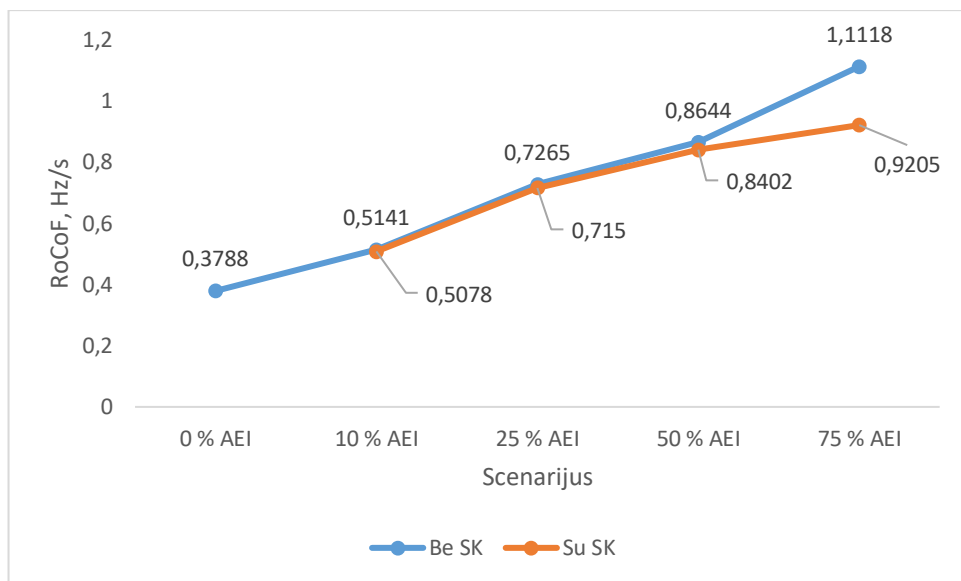
31 pav. Įtampos šynose Nr. 16 minimalių verčių palyginimas sistemoje be SK ir su SK (Trikdīs – TJ)

Dažnio minimalių verčių palyginimas (32 pav.) parodo kokį poveikį turi SK dažnio minimumui kiekviename AEI scenarijuje.

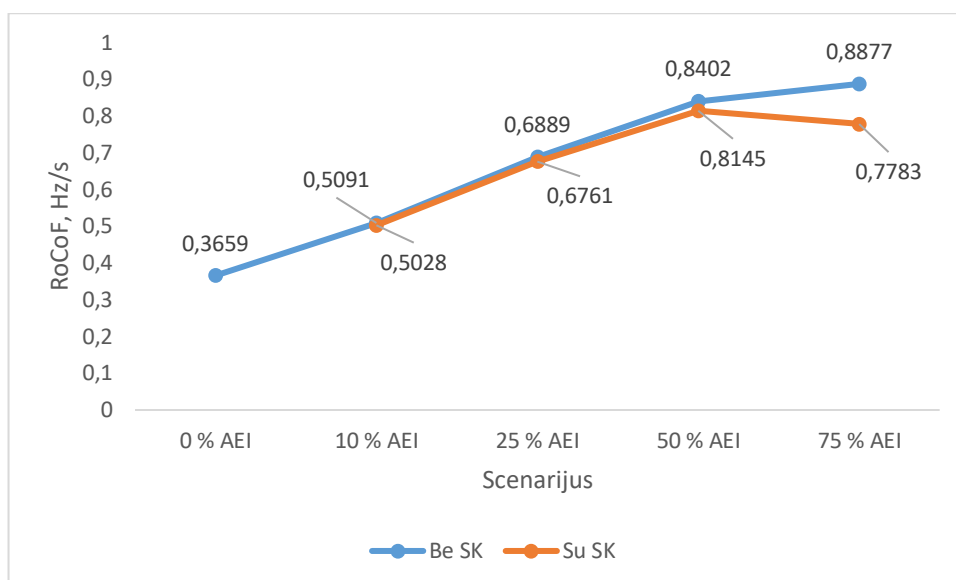


32 pav. Dažnio šynose Nr. 16 minimalių verčių palyginimas sistemoje be SK ir su SK (Trikdīs – TJ)

RoCoF verčių palyginimas šynose Nr. 16 ir 39 (**33** ir **34 pav.**) yra svarbiausi skyriaus grafikai, nes tiesiogiai iliustruoja SK fizinės inercijos poveikį pagrindiniam tiriamam dinaminio stabilumo rodikliui.



33 pav. RoCoF šynose Nr. 16 minimalių verčių palyginimas sistemoje be SK ir su SK (Trikdīs – Galios disbalansas)



34 pav. RoCoF šynose Nr. 39 minimalių verčių palyginimas sistemoje be SK ir su SK (Trikdis – Galios disbalansas)

Palyginimo rezultatai su SK ir be SK pateikiami **28 lentelėje**.

28 lentelė. AEI integracijos su ir be SK rezultatai

Rodiklis	10 % AEI	25 % AEI	50 % AEI	75 % AEI
Rotoriaus kampas	-1,1 %	-1,2 %	-1,6 %	-3,0 %
Įtampa šynose Nr. 16	+0,0 %	+1,1 %	+2,6 %	+6,2 %
Dažnio minimumo vertė šynose Nr. 16	+0,002 %	+0,004 %	+0,002 %	+0,01 %
RoCoF šynose Nr. 16	-1,2 %	-1,6 %	-2,8 %	-17,2 %

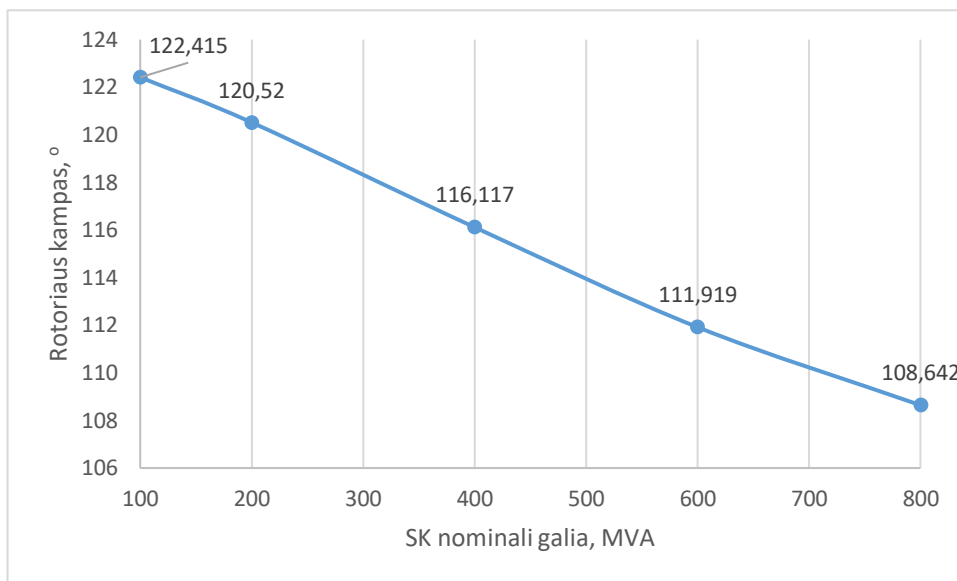
Sistemų be SK ir su SK palyginimas atskleidžia, kad SK poveikis yra proporcingas AEI integracijos lygiui ir tampa itin reikšmingas pasiekus aukštą AEI integracijos lygį. Kai AEI integracija siekia 10–50% visi rodikliai skiriasi nežymiai. RoCoF sumažėja 1,2–2,8 %, rotoriaus kampo maksimali vertė pagerėja nuo 0,9 iki 1,5°, dažnio minimumo vertė šynose Nr. 16 kinta nežymiai. Šiuose scenarijuose sistemos inercija pakankama ir SK inercinis indėlis sudaro nedidelę bendrą inercijos dalį.

Pasiekus 75 % AEI ribą, SK poveikis tampa reikšmingas. RoCoF vertė šynose Nr. 16 sumažėja 17,2 %, nuo 1,1118 iki 0,9205 Hz/s. Rotoriaus kampo maksimali reikšmė sumažėja 17,2 %, nuo 124,23° iki 120,52°. Įtampos minimumo vertė padidėja 17,3 kV, nuo 278,22 kV iki 296,05 kV. Pasiekiamas 75 % AEI scenarijaus žymus įtampos pagerėjimas, nes SK reaktyvios galios tiekimas tampa kritiškai svarbus, dėl sumažėjusių SG, kurie natūraliai tiekia trumpojo jungimo srovę. Tyrimas patvirtina teiginį, kad SK yra efektyviausia dinaminio stabilumo gerinimo priemonė scenarijuose, kuriuose yra itin didelė AEI integracija.

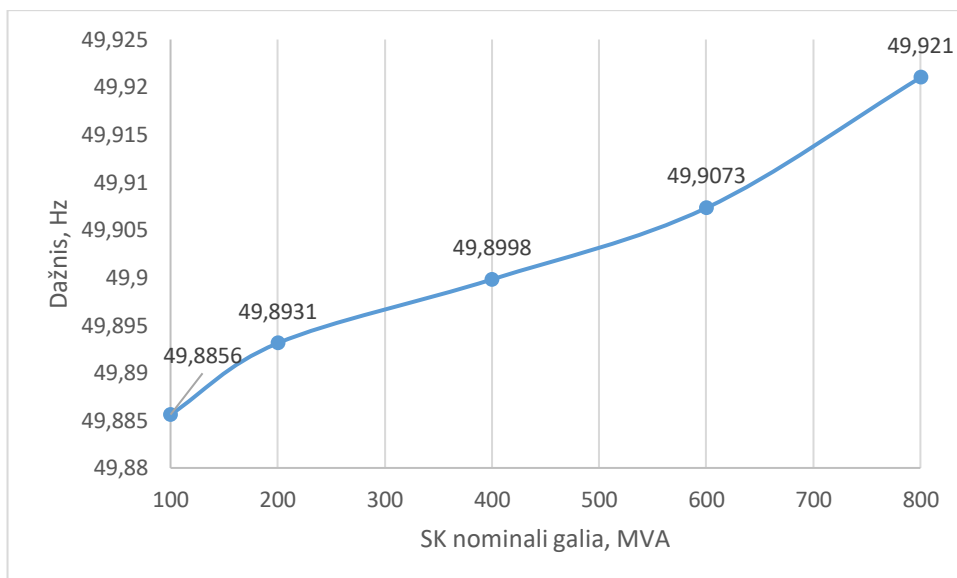
3.5. Tyrimas keičiant SK pilnutinės galios (MVA) reikšmę

SK jautrumo parametrų tyrimams pasirinktas scenarijus, kuriame 75 % generacijos sudaro AEI. Scenarijus pasirinktas, kaip ribinis stabilus scenarijus, kuriame SK poveikis yra labiausiai juntamas. Šio bandymo metu keičiamos SK nominalios galios vertės, siekiant įvertinti SK nominalios galios daromą įtaką sistemos dinaminio stabilumo parametrams.

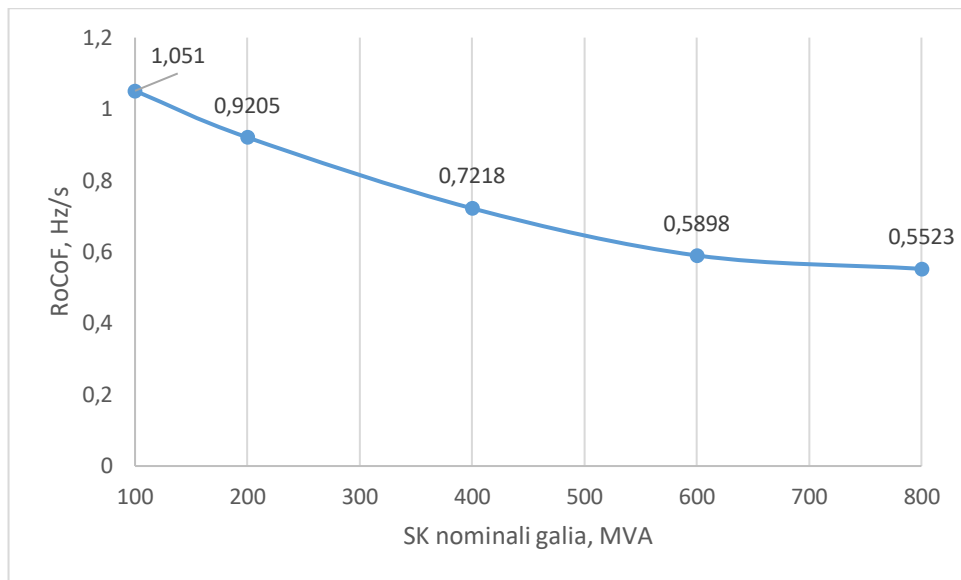
SK MVA vertės keičiamos nuo 100 MVA iki 800 MVA. Inercijos konstanta H išlieka 4.



35 pav. Rotoriaus kampo grafikas keičiant SK MVA reikšmes (Trikdīs – TJ)



36 pav. Dažnio grafikas keičiant SK MVA reikšmes (Trikdīs – TJ)



37 pav. RoCoF grafikas keičiant SK MVA reikšmes (Trikdis – Galios disbalansas)

SK nominalios galios tyrimo rezultatai apibendrinami **29 lentelėje**.

29 lentelė. SK nominalios galios tyrimo rezultatai

Rodiklis	100 MVA	800 MVA	Pokytis Absoliutus (Santykinis)
Rotoriaus kampas, °	122,4	108,6	-13,8 (-11,3 %)
Dažnio minimumo vertė, Hz	49,886	49,921	+0,035 (+0,07 %)
RoCoF, Hz/s	1,051	0,552	-0,499 (-47,5 %)

Nustatoma optimaliausia SK nominalios galios vertė pagal RoCoF rodiklį:

Pirmiausia apskaičiuojamas SK nominalios galios pagerėjimo indeksas:

$$P_i = \frac{RoCoF_{100} - RoCoF_i}{RoCoF_{100} - RoCoF_{800}} \times 100 \% \quad (6)$$

čia P_i – SK nominalios galios pagerėjimas indeksas, %;

$$\text{Kai } 200 \text{ MVA: } P_i = \frac{1,051 - 0,921}{1,051 - 0,552} \times 100 = 26,1 \%$$

Apskaičiuojamas sąnaudų procentas:

$$C_i = \frac{S_i}{S_{max}} \times 100 \% \quad (7)$$

čia C_i – SK nominalios galios sąnaudų dalis, %;

S_i – SK nominali galia, MVA;

S_{\max} – SK maksimali tirta nominali galia, MVA

$$\text{Kai } 200 \text{ MVA: } C_i = \frac{200}{800} \times 100 = 25 \%$$

Toliau apskaičiuojamas SK nominalios galios efektyvumo indeksas:

$$E_i = \frac{P_i}{C_i} \quad (8)$$

čia E_i – SK nominalios galios efektyvumo indeksas;

$$\text{Kai } 200 \text{ MVA: } E_i = \frac{26,1}{25} = 1,04$$

Rezultatai pateikiami **30 lentelėje**.

30 lentelė. SK nominalios galios jautrumo tyrimo rezultatai

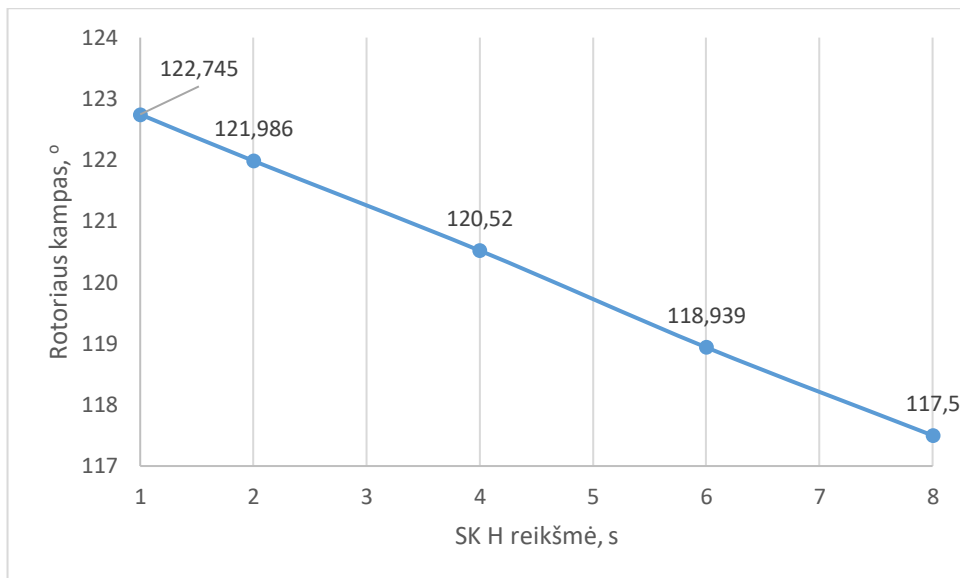
SK nominali galia S, MVA	RoCoF, Hz/s	P _i , %	C _i , %	E _i ,
100	1,051	0	12,5	-
200	0,921	26,1	25	1,04
400	0,722	65,9	50	1,32
600	0,59	92,4	75	1,23
800	0,552	100	100	1

Didinant SK nominalią galią nuo 100 MVA iki 800 MVA pagerėja visi tiriami dinaminio stabilumo rodikliai gerėja (rotoriaus kampas, dažnis, RoCoF). Rotoriaus kampo maksimali vertė sumažėja nuo 122,4° iki 108,6°. Dažnio minimumas padidėja nuo 49,886 Hz iki 49,921 Hz. RoCoF maksimali reikšmė sumažėja nuo 1,051 Hz/s iki 0,552 Hz/s – 47,5 % sumažėjimas.

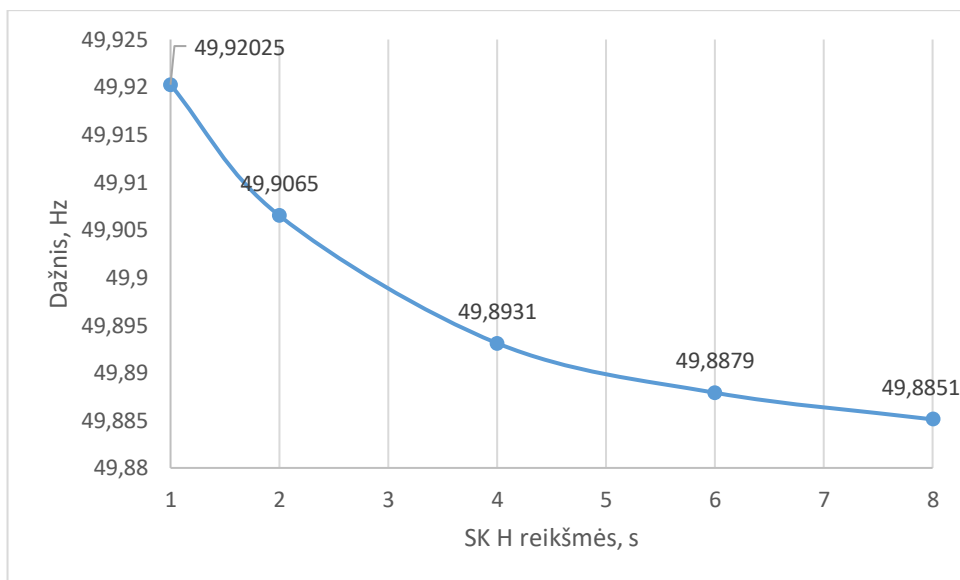
Palyginus su scenarijumi be SK, 100 MVA SK sumažina RoCoF reikšmę 5,5 %. Apskaičiavus SK nominalios galios efektyvumo indeksą nustatytas geriausias pagerėjimas 400 MVA atveju. RoCoF sumažėja 0,199 Hz/s, rotoriaus kampo maksimali reikšmė sumažėja 4,4°.

3.6. Keičiama SK inercijos konstantos (H) reikšmė

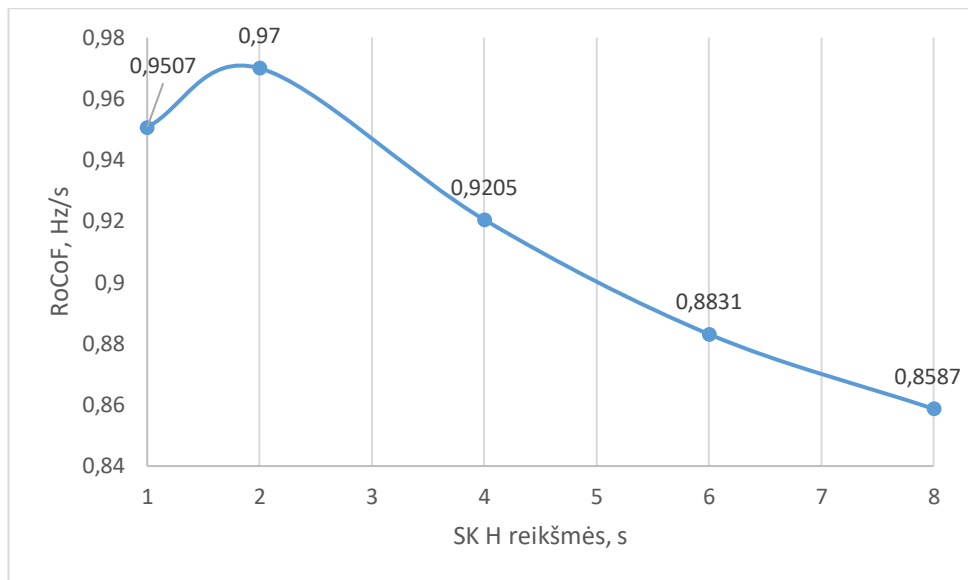
Antrame jautrumo tyrime (75 % AEI) keičiama inercijos konstanta H nuo 1 s iki 8 s, o nominalios galios reikšmė lieka 200 MVA. Konstantos H reikšmės kitimas keičia tik rotoriaus masę ir jos sukauptą kinetinę energiją, reaktyviosios galios pajėgumas lieka tas pats. Tyrimu parodomas tik inercijos poveikis be papildomo reaktyviosios galios poveikio.



38 pav. Rotoriaus kampo grafikas keičiant SK inercijos H reikšmę (Trikdīs – TJ)



39 pav. Dažnio grafikas keičiant SK inercijos H reikšmę (Trikdīs – TJ)



40 pav. RoCoF grafikas keičiant SK inercijos H reikšmę (Trikdvis – Galios disbalansas)

SK inercijos konstantos tyrimo rezultatai apibendrinami **31 lentelėje**.

31 lentelė. SK inercijos konstantos tyrimo rezultatai

Rodiklis	1 s	8 s	Pokytis Absoliutus (Santykinis)
Rotoriaus kampas, °	122,7	117,5	-5,2 (-4,2 %)
Dažnio minimumo vertė, Hz	49,92	49,885	-0,035 (-0,07 %)
RoCoF, Hz/s	0,951	0,859	-0,092 (-9,7 %)

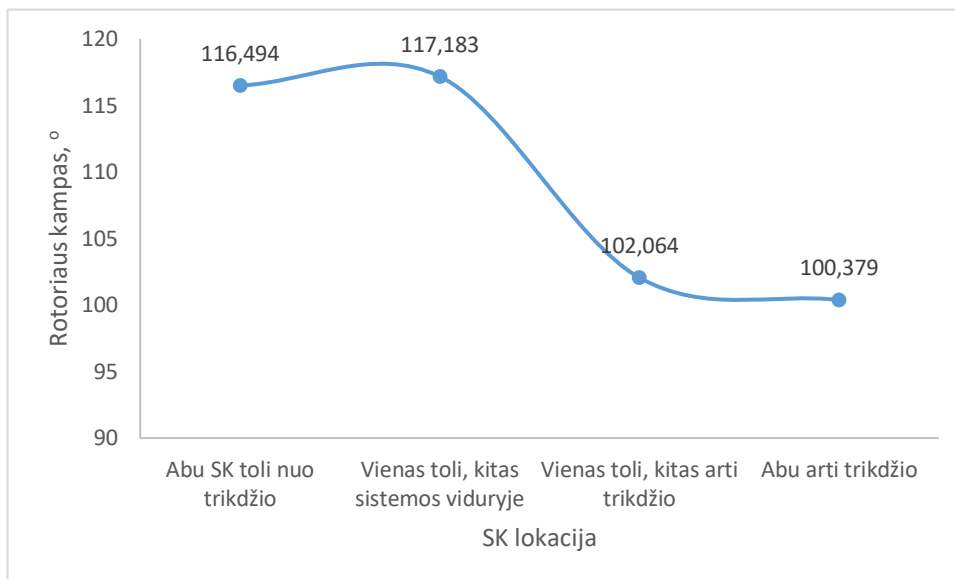
Rotoriaus kampo maksimali vertė sumažėja nuo 122,7° (H=1 s) iki 117,5° (H=8 s) – tai 5,2° pagerėjimas. Didėjanti SK inercija nuosekliai mažina rotoriaus kampo svyravimą, dėl geresnio elektromechaninių svyravimų slopinimo. Palyginti su sistema be SK (124,2°), net H=1s užtikrina 1,5° pagerėjimą.

RoCoF (H=1–2 s) intervale pastebimas nežymus pablogėjimas, paaiškinamas modeliavimo triuškmū, o ne fiziniu reiškiniu. Nuo (H=4 s) ryškėja aiški tendencija, RoCoF mažėja nuo 0,921 iki 0,859 Hz/s. Gautas rezultatas yra net 47,5 % prastesnis negu keičiant SK nominalią galią į 800 MVA.

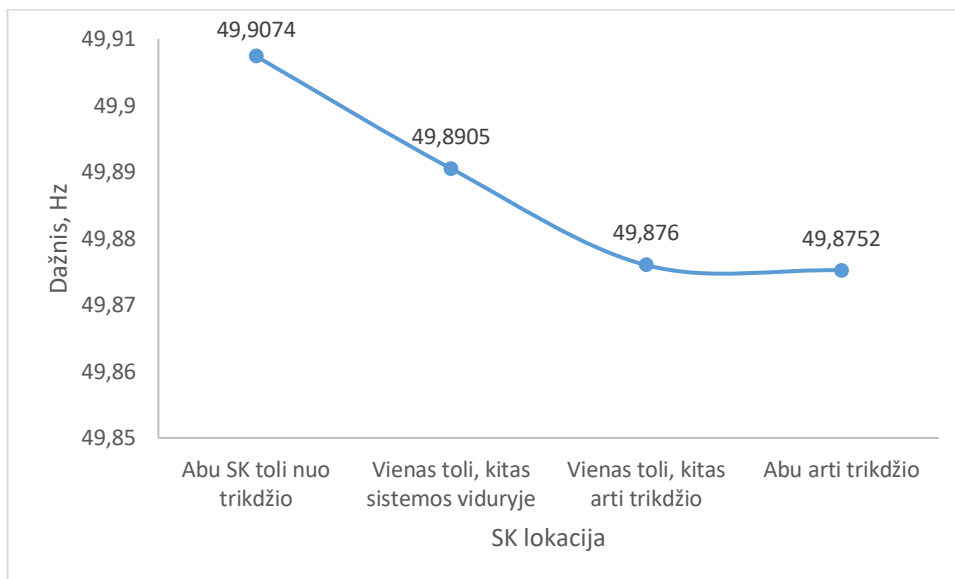
Dažnio minimumo vertė pablogėja didėjant H nuo 49,920 Hz (H = 1 s) iki 49,885 Hz (H = 8 s). Tai fiziškai realus reiškinys, kadangi didesnė SK inercija sulėtina pradinį dažnio mažėjimo greitį, o tai atideda sukimosi greičio regulatoriaus aktyvavimą. Sukimosi greičio regulatorius reaguoja į dažnio pokyčio greitį, lėtesnis kritimas reiškia vėlesnę reakciją, todėl dažnis pasiekia gilesnę dažnio minimumo vertę. Šiuo tyrimu įrodoma, kad inercija ir dažnio minimumo vertė nėra tiesiogiai proporcingos.

3.7. Keičiama SK vieta

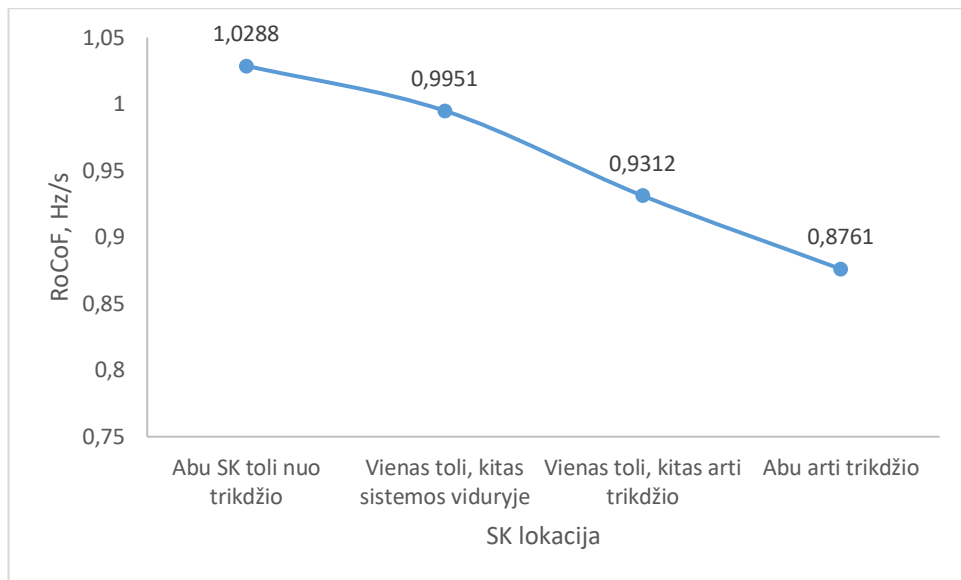
Trečiame jautrumo tyrime tiriama dviejų SK (kiekvienas $H=4$ s, $S=200$ MVA) išdėstymas tinkle, siekiant pagerinti dinaminio stabilumo rodiklius. Bendra inercija visose konfigūracijose išlaikoma vienoda, todėl gautas rezultatas pasiekiamas tik dėl pasirinktos vietos. Tiriamos keturios išdėstymo strategijos: „Abu SK toli nuo trikdžio“, „Vienas toli, kitas sistemos viduryje“, „Vienas toli, kitas arti trikdžio“, „Abu arti trikdžio“.



41 pav. Rotoriaus kampo grafikas keičiant SK lokacijas (Trikdžis – TJ)



42 pav. Dažnio grafikas keičiant SK lokacijas (Trikdžis – TJ)



43 pav. RoCoF grafikas keičiant SK lokacijas (Trikdžis – Galios disbalansas)

SK vietos tyrimo rezultatai pateikiami 32 lentelėje.

32 lentelė. SK vietos tyrimo rezultatai

Rodiklis	„Abu SK toli nuo trikdžio“	„Abu SK arti trikdžio“	Pokytis Absoliutus (Santykinis)
Rotoriaus kampas, °	116,5	100,4	-16,1 (-13,8 %)
Dažnio minimumo vertė, Hz	49,907	49,875	-0,032 (-0,064 %)
RoCoF, Hz/s	1,029	0,876	-0,153 (-14,9 %)

Siekiant rasti optimaliausią SK išdėstymą pasitelkiama svertinio vidurkio metodika:

$$S_k = w_j \cdot N_{RoCoF} + w_f \cdot N_f + w_r \cdot N_{rot} \quad (9)$$

čia S_k – SK vietos optimalumo balas

w_j – tiriama rodiklių svorinis koeficientas (RoCoF = 0,4; Dažnio minimumo = 0,3, rotoriaus kampo = 0,3);

N_{RoCoF} – RoCoF rodiklio balas;

N_f – dažnio minimumo rodiklio balas;

N_{rot} – rotoriaus kampo rodiklio balas;

RoCoF rodiklio balas apskaičiuojamas:

$$N_{RoCoF} = \frac{RoCoF_{max} - RoCoF_k}{RoCoF_{max} - RoCoF_{min}} \quad (10)$$

$$\text{"Abu toli nuo trikdžio" scenarijaus atveju: } N_{\text{RoCoF}} = \frac{1,029 - 1,029}{1,0288 - 0,876} = 0$$

Dažnio minimalios vertės rodiklio balas apskaičiuojamas:

$$N_f = \frac{f_k - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (11)$$

$$\text{"Toli + Toli scenarijaus atveju: } N_f = \frac{49,907 - 49,875}{49,907 - 49,875} = 1$$

Rotoriaus kampo rodiklio balas apskaičiuojamas:

$$N_{\text{rot}} = \frac{\text{Rot}_{\max} - \text{Rot}_k}{\text{Rot}_{\max} - \text{Rot}_{\min}} \quad (12)$$

$$\text{"Abu toli nuo trikdžio" scenarijaus atveju: } N_{\text{rot}} = \frac{117,2 - 116,5}{117,2 - 100,4} = 0,042$$

Randamas scenarijaus „Toli+Toli“ svertinis vidurkis:

$$\text{"Abu toli nuo trikdžio" scenarijaus atveju: } S = 0 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,3 + 0,042 \cdot 0,3 = 0,313$$

Visų scenarijų rezultatai pateikiami **33 lentelėje**.

33 lentelė. SK optimalios vietos skaičiavimo rezultatai

Scenarijus	N_{RoCoF}	N_f	N_{rot}	S_k
„Abu SK toli nuo trikdžio“	0	1	0,042	0,313
„Vienas toli, kitas sistemos viduryje“	0,222	0,5	0	0,239
„Vienas toli, kitas arti trikdžio“	0,641	0,031	0,899	0,535
„Abu arti trikdžio“	1	1	0	0,7

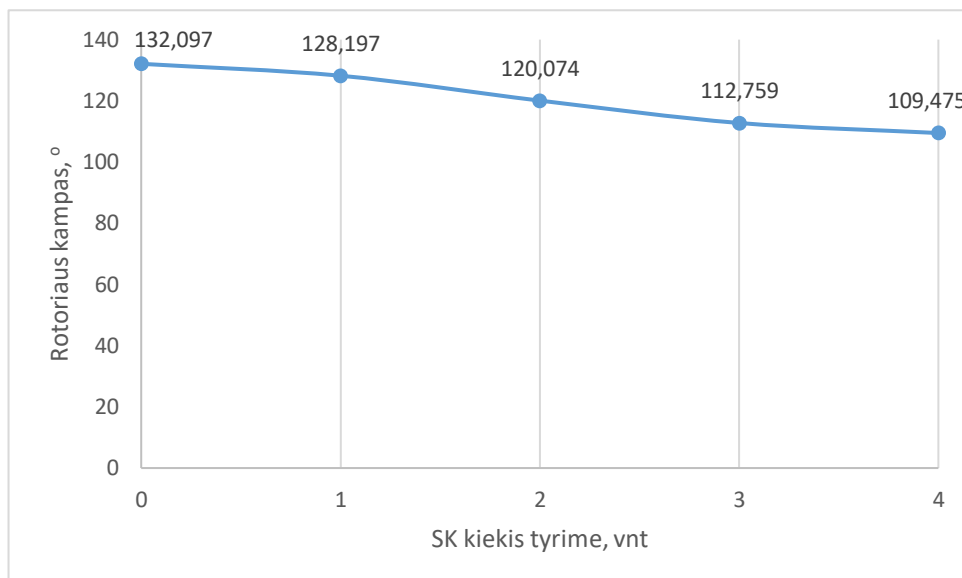
RoCoF rodiklis nuosekliai gerėja, kai SK priartėja prie gedimo vietos. Konfigūracija „Abu arti trikdžio“ pasiekia geriausią RoCoF rodiklį 0,876 Hz/s, po jos eina „Vienas toli, kitas arti trikdžio“ (0,931 Hz/s). Blogiausia konfigūracija „Abu SK toli nuo trikdžio“ (1,029 Hz/s). Skirtumas tarp geriausio ir blogiausio išdėstymo yra 0,153 Hz/s (14,8 %). Tai rodo, kad RoCoF rezultatus lemia SK išdėstymas, o ne tik bendras inercijos lygis sistemoje. Ši tendencija galioja ir rotoriaus kampui: „Abu arti trikdžio“ pasiekia 100,4°, o „Abu SK toli nuo trikdžio“ 116,5°. Skirtumas yra 16,1°.

Geriausia dažnio minimumo vertė yra esant konfigūracijai „Abu SK toli nuo trikdžio“ (49,907 Hz) ir mažėja, kai SK priartėja prie gedimo vietos, pasiekdamas 49,875 Hz esant konfigūracijai „Abu arti trikdžio“. Skirtumas 0,032 Hz. SK, esantys netoli gedimo vietos, užtikrina stiprų reaktyvųjų palaikymą ir slopinimą, kuris sumažina RoCoF ir kampo svyravimus, tačiau nepadedą sukimosi greičio regulatoriaus reakcijai sustabdyti dažnio minimumą.

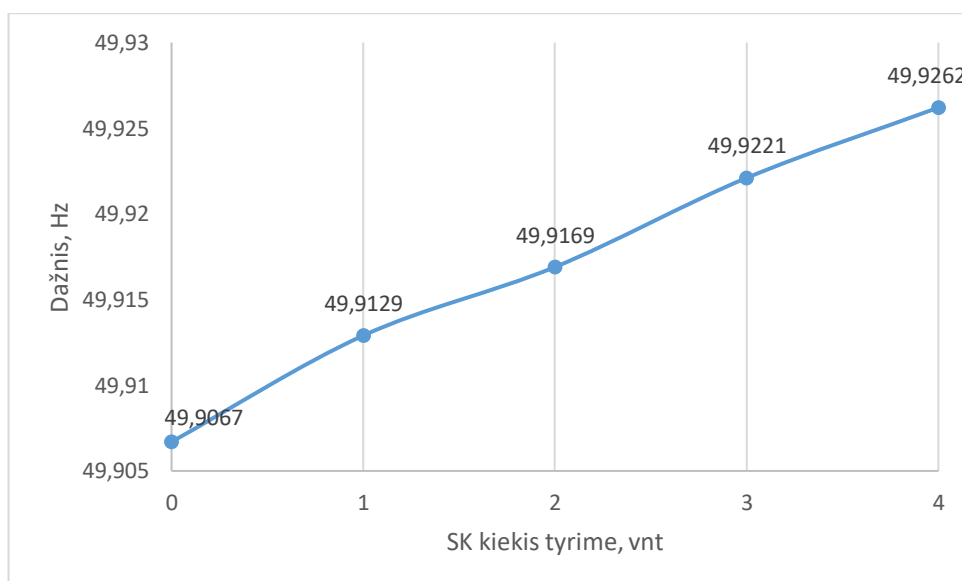
Remiantis atliktais svertinio vidurkio skaičiavimais, nustatyta optimaliausia SK vietos strategija yra „Abu SK arti trikdžio“.

3.8. Keičiamas SK kiekis

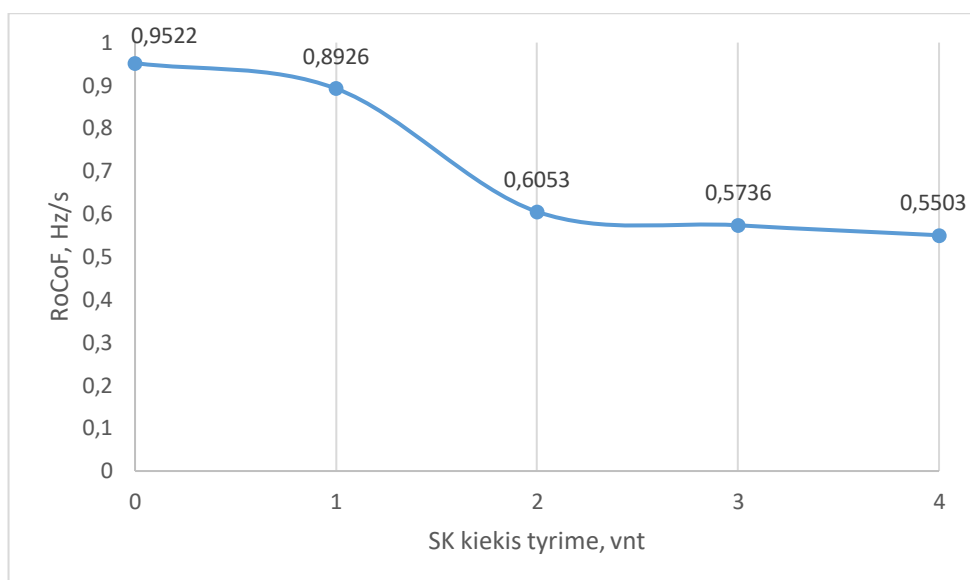
Ketvirtajame jautrumo tyrime vertinama SK skaičiaus (nuo 1 iki 4) poveikis dinaminio stabilumo rodikliams. Visų SK parametrai vienodi ($H=4$ s, $S=200$ MVA). SK prie šynų Nr. 16, 29, 26 išdėstomi prioriteto tvarka pagal 4.7 skyriuje gautas vietas tyrimo rezultatus, o ketvirtasis SK pridedamas prie šynos Nr. 4.



44 pav. Rotoriaus kampo grafikas keičiant SK kiekį tyrime (Trikdīs – TJ)



45 pav. Dažnio grafikas keičiant SK kiekį tyrime (Trikdīs – TJ)



46 pav. RoCoF grafikas keičiant SK kiekį tyrime (Trikdis – Galios disbalansas)

SK skaičiaus tyrimo rezultatai pateikiami **34 lentelėje**.

34 lentelė. SK skaičiaus tyrimo rezultatai

Rodiklis	SK=0	SK=4	Pokytis Absoliutus (Santykinis)
Rotoriaus kampas, °	132,1	109,5	-22,6 (-17,1 %)
Dažnio minimumo vertė, Hz	49,907	49,926	+0,019 (+0,038 %)
RoCoF, Hz/s	0,952	0,550	-0,402 (-42,2 %)

Siekiant rasti optimalų SK skaičių, taikomos (6), (7), (8) formulės aprašytos 3.5 skyriuje. Pagerėjimo indeksas apskaičiuojamas nuo SK=0 atvejo (be SK) iki SK=4 atvejo. Rezultatai pateikiami **35 lentelėje**.

35 lentelė. Optimalaus SK skaičiaus skaičiavimo rezultatai

SK skaičius	Pi, %	Ci, %	Ei	Δ RoCoF, Hz/s
1	14,7	25	0,59	0,059
2	86,3	50	1,73	0,288
3	94	75	1,25	0,031
4	100	100	1	0,024

Didinant SK skaičių nuo 1 iki 4, visi trys dinaminio stabilumo rodikliai gerėja. Rotoriaus kampo maksimali reikšmė mažėja nuo 132,1° iki 109,5°, tai 22,6° sumažėjimas. Dažnio minimumo vertė kyla nuo 49,907 Hz iki 49,926 Hz. RoCoF mažėja nuo 0,952 Hz/s iki 0,55 Hz/s, tai -42,2% sumažėjimas.

Didžiausias vienkartinis RoCoF pagerėjimas pasiekiamas pridedant antrąjį SK prie šynos Nr. 29 (arti gedimo vietos). RoCoF sumažėja 0,287 Hz/s, tai beveik 5 kartus daugiau nei suteikia pirmasis SK (0,06 Hz/s). Tai paaiškinama ir išdėstymo tyrimo išvada, kad SK prijungiamas arti gedimo vietos yra itin svarbus. Nuo SK=2 stebima mažėjanti grąžos tendencija. Trečias SK suteikia 0,032 Hz/s, o ketvirtasis tik 0,023 Hz/s pagerėjimą. Optimaliausias variantas yra 3 SK.

Išvados

1. Padidinus vėjo energetikos dalį nuo 0 % iki 75 %, RoCoF padidėjo 194 %, rotoriaus kampo maksimali reikšmė padidėjo 173 %, stabilizavimosi laikas pailgėjo nuo 8,52 s iki daugiau nei 20 s.
2. Nustatyta, kad sinchroninio kompensatoriaus poveikis yra proporcingas AEI integracijos lygiui. Kai AEI yra 10–50 %, SK indėlis yra nedidelis (RoCoF sumažėja 1,2–2,8 %, rotoriaus kampas sumažėja 1,1–1,6 %). Tačiau pasiekus 75 % AEI riba, SK tampa itin reikšmingas, RoCoF sumažėjo -17,2 %, rotoriaus kampas -3 %, įtampos minimali vertė šynose Nr. 16 padidėjo 6,2 %. Nustatyta, kad SK efektyviausias, kai sistemoje yra itin aukšta AEI integracija.
3. Padidinus SK nominalią galią nuo 100 iki 800 MVA, visi trys dinaminio stabilumo rodikliai pagerėjo. RoCoF sumažėjo -47,5%, rotoriaus kampas sumažėjo -11,3 %, o dažnio minimumo vertė pakilo nuo 0,035 Hz. RoCoF efektyvumo indekso metodu nustatyta optimaliausia pilnutinės galios vertė yra 400 MVA.
4. Padidinus SK inercijos konstantą H nuo 1 s iki 8 s, rotoriaus kampas sumažėjo -4,2 %, RoCoF sumažėjo -9,7 %. Tačiau dažnio minimumo vertė pablogėja (nuo 49,92 iki 49,885 Hz), nes didesnė sistemos inercija atideda sukimosi greičio regulatoriaus aktyvavimą. Nustatyta, kad H konstantos didinimas yra mažiau efektyvus parametras nei nominalios galia S didinimas.
5. SK išdėstymas lemia -14,9 % RoCoF rodiklio skirtumą ir -13,8 % rotoriaus kampo skirtumą tarp geriausios ir blogiausios konfigūracijos. Kadangi RoCoF ir dažnio minimumo rodikliai kinta priešingomis kryptimis nuo SK vietos, taikytas svertinio vidurkio metodas, siekiant surasti optimalų išdėstymą. Nustatytas optimaliausias išdėstymas yra „Abu SK arti trikdžio“.
6. Padidinus SK skaičių nuo 0 iki 4, visi trys dinaminio stabilumo rodikliai gerėja. RoCoF rodiklis sumažėjo -42,2%, rotoriaus kampas sumažėjo -17,1 %. Optimaliam SK skaičiui nustatyti taikytas RoCoF efektyvumo indeksas. Efektyvumo optimaliausia vertė fiksuojama pridėjus antrą SK, kurio metu RoCoF sumažėja -32,2 %.

Literatūros sąrašas

1. BEŞCHEA, G.-A. ir kt. A systematic review of systemic challenges and transition strategies for integrating renewable energy sources into conventional electricity generation in the European Union. In *Frontiers in Sustainability*. 2026. Vol. 7. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3389/frsus.2026.1723918>.
2. TÁCZI, I. - VOKONY, I. Review of Stability Analysis in Power Systems with High Penetration of Non-synchronous Generation. In *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2022. Vol. 20, p. 685–689. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.24084/repqj20.402>.
3. NGUYEN, H.T. Frequency Characterization and Control for Future Low Inertia Systems. PhD thesis. Technical University of Denmark, 2018. Prieiga per internetą: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/frequency-characterization-and-control-for-future-low-inertia-sys/>
4. NEDD, M. ir kt. Metrics for determining the frequency stability limits of a power system: A GB case study. In *Electric Power Systems Research*. 2020. Vol. 190, p. 106553–106553. [ži . Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106553>.
5. NGUYEN, H.T. ir kt. Talega SynCon - Power Grid Support for Renewable-based Systems. 2020. p. 1–6. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1109/SoutheastCon42311.2019.9020538>.
6. JIA, J. ir kt. Hardware-in-the-loop Tests on Reverse Power and Over-Frequency Protection for Synchronous Condensers. In *Research Portal Denmark*. 2020. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/333356359_Hardware-in-the-loop_Tests_on_Reverse_Power_and_Over-Frequency_Protection_for_Synchronous_Condensers
7. SHAIR, J. ir kt. Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 145, p. 111111–111111. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111111>
8. ALAZZAWI, O.K.D. ir kt. Transient stability enhancement in the presence of optimally placed D-FACTS. In *International Journal of Power Electronics and Drive Systems/International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020. Vol. 11, no. 3, p. 1350–1350. Prieiga per internetą: <http://doi.org/10.11591/ijped.v11.i3.pp1350-1359>
9. SAMAMI, M. - AZARI, M.N. Fast and Secure Angular-Based Detection Algorithm for Reverse Power Occurrence in Synchronous Generators. In *Scientia Iranica*. 2021. p. 0. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.24200/sci.2021.58407.5711>
10. KHAN, H.F. ir kt. Rotor Angle and Voltage Stability Analysis with Fault Location Identification on the IEEE 9 Bus System. In *Engineering Technology & Applied Science Research*. 2020. Vol. 10, no. 1, p. 5259–5264. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.48084/etasr.3175>
11. HAMZEH, A. - AL-OMARI, Z. Improved model for investigating transient stability in multimachine power systems. In *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2019. Vol. 13, no. 1, p. 368–368. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v13.i1.pp368-376>
12. KUNDUR, P. ir kt. Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. In *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004. Vol. 19, no. 3, p. 1387–1401. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2004.825981>

13. REZKALLA, M. ir kt. Electric power system inertia: requirements, challenges and solutions. In *Electrical Engineering*. 2018. Vol. 100, no. 4, p. 2677–2693. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0739-z>
14. NAHOR, K.B. Resilient microgrids with high dynamic stability in the presence of massive integration of variable renewables. In HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe). 2019. Prieiga per internetą: <https://theses.hal.science/tel-03042626>
15. ATKINSON, J. - ALBAYATI, I.M. Impact of the Generation System Parameters on the Frequency Response of the Power System: A UK Grid Case Study. In *Electricity*. 2021. Vol. 2, no. 2, p. 143–157. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/electricity2020009>
16. FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN, A. ir kt. Extensive frequency response and inertia analysis under high renewable energy source integration scenarios: application to the European interconnected power system. In *IET Renewable Power Generation*. 2020. Vol. 14, no. 15, p. 2885–2896. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0045>
17. KHIDRANI, A. ir kt. Review on various voltage stability issues in AC distribution network. In *International Journal of Power Electronics and Drive Systems/International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2023. Vol. 15, no. 1, p. 404–404. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i1.pp404-411>
18. CUTSEM, T.V. ir kt. Test Systems for Voltage Stability Studies. In *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. Vol. 35, no. 5, p. 4078–4087. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.2976834>
19. NGUYEN, D.T. Contributions to analysis and prevention of power system blackouts. In HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe). 2008. Prieiga per internetą: <https://theses.hal.science/tel-00352414>
20. AGRAWAL, U. ir kt. A Study of the Impact of Reduced Inertia in Power Systems. In *Proceedings of the ... Annual Hawaii International Conference on System Sciences/Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. 2020. Prieiga per internetą: <https://pdfs.semanticscholar.org/f252/2977dc5b8e5f39002dc2c276accf6496150b.pdf>
21. VENKATRAMAN, A. ir kt. Improving Dynamic Performance of Low-Inertia Systems Through Eigensensitivity Optimization. In *IEEE Transactions on Power Systems*. 2021. Vol. 36, no. 5, p. 4075–4088. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2021.3062974>
22. SOLAT, S. ir kt. Empowering IBRs for Frequency Support: The Role of Technological Innovations. In *IEEE Power Electronics Magazine*. 2025. Vol. 12, no. 2, p. 79–85. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1109/mpel.2025.3565949>
23. TADJEDDINE, A. ir kt. VRE Integrating in PIAT grid with aFRR using PSS, MPPT, and PSO-based Techniques: A Case Study Kabertene. In *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*. 2023. Vol. 10. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.4108/ew.3378>
24. MOUFID, I. ir kt. Impact of static synchronous compensator STATCOM installation in power quality improvement. In *International Journal of Power Electronics and Drive Systems/International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022. Vol. 13, no. 4, p. 2296–2296. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v13.i4.pp2296-2304>
25. HENDERSON, C. ir kt. Grid Strength Impedance Metric: An Alternative to SCR for Evaluating System Strength in Converter Dominated Systems. In *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2023. Vol. 39, no. 1, p. 386–396. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2022.3233455>

26. VERAYIAH, R. - MOHAMED, A.R. Comparison of Weak Load Bus Detection using LQP_LT Index with PV and QV Analysis of PSS/E. In *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2018. Vol. 12, no. 2, p. 577–577. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v12.i2.pp577-584>
27. PIOTR, P. - PASZEK, S. Location of generating units most affecting the angular stability of the power system based on the analysis of instantaneous power waveforms. In *Archives of Control Sciences*. 2023. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.24425/acs.2020.133500>
28. AGATHOKLEOUS, C. - EHNBERG, J. A Quantitative Study on the Requirement for Additional Inertia in the European Power System until 2050 and the Potential Role of Wind Power. In *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 9, p. 2309–2309. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/en13092309>
29. HURTADO, M. ir kt. Stability Assessment of Low-Inertia Power Systems: A System Operator Perspective. In *arXiv (Cornell University)*. 2024. Prieiga per internetą: <https://arxiv.org/abs/2404.04618>
30. MEHIGAN, L. ir kt. Renewables in the European power system and the impact on system rotational inertia. In *Energy*. 2020. Vol. 203, p. 117776–117776. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117776>
31. AYAMOLOWO, O.J. ir kt. An overview of inertia requirement in modern renewable energy sourced grid: challenges and way forward. In *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. 2022. Vol. 9, no. 1. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1186/s43067-022-00053-2>
32. LEE, R. ir kt. A closed-loop analysis of grid scale battery systems providing frequency response and reserve services in a variable inertia grid. In *Applied Energy*. 2018. Vol. 236, p. 961–972. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.044>
33. BIAŁEK, J. What does the GB power outage on 9 August 2019 tell us about the current state of decarbonised power systems? In *Energy Policy*. 2020. Vol. 146, p. 111821–111821. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111821>
34. ASSENKAMP, A. ir kt. Capability of synchronous machines to ride through events with high ROCOF. In *Archives of Electrical Engineering*. 2019. p. 325–339. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.24425/aee.2019.128271>
35. NGUYEN, H.T. ir kt. Applying Synchronous Condenser for Damping Provision in Converter-dominated Power System. In *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2021. Vol. 9, no. 3, p. 639–647. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.35833/mpce.2020.000207>
36. JIA, J. Assessment of Short Circuit Power and Protection Systems for Future Low Inertia Power Systems. In *Research Portal Denmark*. 2018. p. 184. Prieiga per internetą: <https://local.forskningsportal.dk/local/dki-cgi/ws/cris-link?src=dtu&id=dtu-1e68ea79-092e-4653-9adb-86f95ff6e77d&ti=Assessment%20of%20Short%20Circuit%20Power%20and%20Protection%20Systems%20for%20Future%20Low%20Inertia%20Power%20Systems>
37. MARKEN, P.E. ir kt. Selection of Synchronous Condenser technology for the Granite Substation. In. 2010. p. 1–6. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1109/tdc.2010.5484423>
38. NGUYEN, H.T. ir kt. Challenges and Research Opportunities of Frequency Control in Low Inertia Systems. In *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 115, p. 2001–2001. Prieiga per internetą: <https://www.e3s->

conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/41/e3sconf_eege18_02001/e3sconf_eege18_02001.html

39. JIA, J. ir kt. Investigation on the Combined Effect of VSC-Based Sources and Synchronous Condensers Under Grid Unbalanced Faults. In IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. Vol. 34, no. 5, p. 1898–1908. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2019.2914342>
40. ROUX, P.F.L. - BANSAL, R.C. Transient stability control by means of under-frequency load shedding and a hybrid control scheme. In Journal of Energy in Southern Africa. 2017. Vol. 28, no. 4. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2017/v28i4a2395>
41. JIA, J. ir kt. Synchronous Condenser Allocation for Improving System Short Circuit Ratio. In. 2018. p. 1–5. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1109/epecs.2018.8443358>
42. LEPOUR, D. ir kt. Performance assessment of Synchronous Condensers vs Voltage Source Converters providing grid-forming functions. In. 2021. p. 1–6. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1109/powertech46648.2021.9494883>
43. ATHAY, T., R. PODMORE ir S. VIRMANI. A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1979, t. PAS-98, Nr. 2, p. 573–584. DOI 10.1109/TPAS.1979.319407. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1979.319407>