



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Arvydas Babelis

VĖJO ELEKTRINIŲ DINAMINIO STABILUMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Mindaugas Ažubalis

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

VĖJO ELEKTRINIŲ DINAMINIO STABILUMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
M3146L21 Elektros energetikos sistemos (621H63005)

Vadovas
Doc. dr. Mindaugas Ažubalis

Recenzentas
Lekt. Dainius Slušnys

Projektą atliko
Arvydas Babelis

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Arvydas Babelis

(Studento vardas, pavardė)

M3146L21 Elektros energetikos sistemos (621H63005)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Vėjo elektrinių dinaminio stabilumo tyrimas

AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. Gegužės 21 d.
Kaunas

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

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Babelis A. Vėjo elektrinių dinaminio stabilumo tyrimas. *Elektros energetikos sistemų* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Mindaugas Ažubalis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2015. 61 psl.

SANTRAUKA

Magistro baigiamajame darbe atliekami Lietuvos vakarų ir pietvakarių regiono elektros energetikos sistemos dinaminio stabilumo skaičiavimai. Skaičiavimai atliekami numatant, kad vėjo parkų instaliuota galia bus išplėsta iki 753 MW. Tiriama režimai yra žiemos maksimumo ir vasaros minimumo. Jie skaičiuojami su PSSE programa. Visi skaičiavimai šiame darbe yra perspektyviniai ir atliekami 2016 ir 2030 metams. Ieškomi ribiniai trumpojo jungimo laikai prie kurių sistema jau pereina į kritinį režimą ir praranda dinaminį stabilumą ir po trikdžio jau neatsistato. Stebima kaip kinta stabilumas po trikdžio atskiruose mazguose priklausomai nuo atstumo kur įvyko trikdys. Taip pat apžvelgiamas dabartinis vėjo elektrinių pasiskirstymas, paplitimas ir diegiamos galios prognozės.

Babelis Arvydas. Research on Dynamic Stability of Wind Power Plants. Final project of *Electrical Power Systems* / supervisor doc. dr. Mindaugas Ažubalis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Department of Electrical Power Systems.

Kaunas, 2015. 61 psl.

SUMMARY

In the master's task there are accomplished electrical power system calculations of dynamic stability control in west and southwest regions of Lithuania. These calculations are made with perspective that in the future power of wind power plants will be expended until 753 MW. In this research there are four steps of calculations. With PSSE program was simulated winter maximum mode for 2016 and 2030 years and summer minimum mode for the same years. Limitary short circuit time was searched then dynamic stability of electrical power system comes to critical point and don't recovers. Dynamic stability was tracked not only in short circuit point but in the other points too. It was observed how dynamic stability depends on distance between triggered point and the other points without trigger. Moreover it was researched how system recovers depending on distance. Also reviewed wind power plants, their pervasion and predictions of their growing power in Lithuania.

TURINYS

Iliustracijų sąrašas	7
Lentelių sąrašas	8
Įvadas	10
1. Apžvalginė dalis.....	10
2. Vėjo elektrinės	12
2.1. VE konstrukcijos ir įtaka elektros sistemos tinkui	12
2.2. Vėjo elektrinių klasifikacija	12
2.3. Vėjo elektrinių generatorių tipai	13
2.4. Vėjo elektrinės modelio sudėtinės dalys	15
2.4.1. VE Mechaninis modelis	16
2.4.2. Asinchroninio generatoriaus trumpai jungtu rotoriumi elektrinis modelis	17
3. Vėjo elektrinėms keliami reikalavimai	18
3.1. Aktyviosios galios valdymas.....	18
3.2. Reaktyviosios galios valdymas.....	19
3.3. Įtampos ir dažnio dydžiai	19
4. Eksploatacinės VE charakteristikos trikdžių tinkle metu.....	20
5. Vėjo elektrinių parkai Lietuvoje.....	21
5.1. Instaliuota suminė vėjo elektrinių parkų galia Lietuvoje.....	21
5.2. Vėjo parkai ir jų pasiskirstymas	21
6. Vėjo elektrinių scenarijai iki 2030 metų	24
7. Linijų apkrautumas vakarinėje Lietuvos dalyje	25
8. Dinaminis stabilumas elektros sistemoje	26
9. Skaičiuojamosios avarijos aprašymas.....	27
10. Dinaminio stabilumo skaičiavimas su PSSE programa	27
11. Skaičiavimų duomenys	29
12. Skaičiavimai.....	30
Dinaminio stabilumo riba 2030 m. žiemos maksimumo režimu.....	30
12.1. Trumpas jungimas Klaipėdos 330kV mazge (6831)	30
12.2. Trumpas jungimas Bitėnų 110kV mazge (6832).....	31
12.3. Trumpas jungimas Šyša 330kV mazge (6835).....	33
12.4. Trumpas jungimas Benaičių 110kV mazge (5291)	34
12.5. Trumpas jungimas Varduvos 110kV mazge (5471)	34
12.6. Trumpas jungimas Priekulės 110kV mazge (5349).....	35
13. Dinaminio stabilumo riba 2016 m. žiemos maksimumo režimu	36
13.1. Trumpas jungimas Klaipėdos 330kV mazge (6831)	36
13.2. Trumpas jungimas Bitėnai 330kV mazge (6832).....	37
13.3. Trumpas jungimas Šyša 330kV mazge (6835).....	39
13.4. Trumpas jungimas Benaičiai 110kV mazge (5291)	39
13.5. Trumpas jungimas Varduva 110kV mazge (5471).....	40
13.6. Trumpas jungimas Priekulės 110kV mazge (5349).....	41

14. Dinaminio stabilumo riba 2030 m. vasaros minimumo režimu	42
14.1. Trumpas jungimas Klaipėdos 330kV mazge (6831)	42
14.2 Trumpas jungimas Bitėnų 110kV mazge (6832).....	43
14.3. Trumpas jungimas Šyša 330kV mazge (6835).....	44
14.4. Trumpas jungimas Benaičių 110kV mazge (5291)	45
14.5. Trumpas jungimas Varduvos 110kV mazge (5471).....	46
14.6. Trumpas jungimas Priekulės 110kV mazge (5349).....	47
15. Dinaminio stabilumo riba 2016 m. vasaros minimumo režimu	48
15.1 Trumpas jungimas Klaipėdos 330kV mazge (6831)	48
15.2. Trumpas jungimas Bitėnai 330kV mazge (6832).....	49
15.3. Trumpas jungimas Šyša 330kV mazge (6835).....	50
15.4. Trumpas jungimas Benaičiai 110kV mazge (5291)	51
15.5. Trumpas jungimas Varduva 110kV mazge (5471).....	52
15.6. Trumpas jungimas Priekulės 110kV mazge (5349).....	52
16. Rezultatų analizė	53
17. Išvados.....	59
18. Literatūros sąrašas	60
19. Priedai	61

Ilustracijų sąrašas

1.1. paveikslas. Elektros energijos poreikių prognozė iki 2030 m.	11
2.1.1. paveikslas. Vertikalios veleno ašies vėjo el.	12
2.2.1. paveikslas. Vėjo elektrinių klasifikacijos schema	13
2.3.1. paveikslas. Vėjo elektrinė su asinchroniniu generatoriumi [4] Lars Lindgen	14
2.3.2. paveikslas. Vėjo elektrinė su asinchroniniu, turinčiu fazinį rotorių generatoriumi [4] Lars Lindgen.....	14
2.3.3. paveikslas. Vėjo elektrinė, turinti kintamų sūkių sinchroninį generatorių ir nuolatinės srovės intarpą [3] Lars Lindgen	14
2.3.4. paveikslas. Vėjo elektrinė, turinti kintamų sūkių sinchroninį generatorių, nuolatinės srovės intarpą ir greičių dėžę [3] Lars Lindgen	14
2.4.1. paveikslas. Vėjo elektrinės modelio schema [1] Poul Sorensen	15
2.4.1.1. paveikslas. Vėjo elektrinės mechaninė schema [5] Anca D.	16
2.4.2.1. paveikslas. Asinchroninio generatoriaus trumpai jungtu rotoriumi atstojamoji schema [6]	17
3.3.1. paveikslas. Reikalavimai vėjo elektrinių eksploatavimui nuo įtampos ir dažnio	20
4.1. paveikslas. Vėjo elektrinės įtampos kitimo grafikas	20
5.1.1. paveikslas. Instaliuotos VE galios augimas Lietuvoje [11],[12]	21
5.2.1. paveikslas. Vėjo greičio vidurkis Lietuvos regione	24
7.1. paveikslas. Labiausiai apkrautos vakarinėje Lietuvos dalyje esančios linijos	25
11.1. paveikslas. Skaičiavimo duomenys (pavyzdys)	29
11.3. paveikslas. Tiriamų mazgų išsidėstymas.....	30
12.1.1. paveikslas. Stabilus režimas Klaipėdos mazge (t.j. – 0,60s)	31
12.2.1. paveikslas.. Stabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,23s).....	32
12.2.2. paveikslas. Nestabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,25s).....	32
12.3.1. paveikslas. Stabilus režimas Šyša mazge (t.j. – 0,26s).....	33
12.4.1. paveikslas. Stabilus režimas Benaičių mazge (t.j. – 0,16s)	34
12.5.1. paveikslas. Stabilus režimas Varduvos mazge (t.j. – 0,19s).....	35
12.6.1. paveikslas. Stabilus režimas Priekulės mazge (t.j. – 0,2s)	36
13.1.1. paveikslas. Stabilus režimas Klaipėdos mazge (t.j. – 2,60s)	37
13.2.1. paveikslas. Stabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,28s).....	38
13.2.2. paveikslas. Nestabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,29s).....	38
13.3.1. paveikslas. Stabilus režimas Šyša mazge (t.j. – 0,75s).....	39
13.4.1. paveikslas. Stabilus režimas Benaičių mazge (t.j. – 0,9s).....	40
13.5.1. paveikslas. Stabilus režimas Varduvos mazge (t.j. – 0,6s).....	41
13.6.1. paveikslas. Stabilus režimas Priekulės mazge (t.j. – 0,45s)	42
14.1.1. paveikslas. Stabilus režimas Klaipėdos mazge (t.j. – 0,58s)	43
14.2.1. paveikslas. Stabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,20s).....	44
14.2.3. paveikslas. Nestabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,25s).....	44
14.3.1. paveikslas. Stabilus režimas Šyša mazge (t.j. – 0,24s).....	45
14.4.1. paveikslas. Stabilus režimas Benaičių mazge (t.j. – 0,14s)	46

14.4.2. paveikslas. Nestabilus režimas Bitėnų mazge, kai t.j. Benaičiuose (t.j. – 0,15s)	46
14.5.1. paveikslas. Stabilus režimas Varduvos mazge (t.j. – 0,15s)	47
14.6.1. paveikslas. Stabilus režimas Priekulės mazge (t.j. – 0,17s)	48
15.1.1. paveikslas. Stabilus režimas Klaipėdos mazge (t.j. – 2,35s)	49
15.2.1. paveikslas. Stabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,26s)	50
15.3.1. paveikslas. Stabilus režimas Šyša mazge (t.j. – 0,72s)	51
15.4.1. paveikslas. Stabilus režimas Benaičių mazge (t.j. – 0,84s)	51
15.5.1. paveikslas. Stabilus režimas Varduvos mazge (t.j. – 0,57s)	52
15.6.1. paveikslas. Stabilus režimas Priekulės mazge (t.j. – 0,43s)	53
16.1. paveikslas. 2030 metų stabilumo ribos palyginimas	55
vasaros minimumo ir žiemos maksimumo laikotarpiu	55
16.2. paveikslas. 2016 metų stabilumo ribos palyginimas	55
vasaros minimumo ir žiemos maksimumo laikotarpiu	55
16.3. paveikslas. 2016 ir 2030 metų stabilumo ribos palyginimas	56
žiemos maksimumo laikotarpiu	56
16.4. paveikslas. Trumpo jungimo laiko priklausomybė nuo įdiegtos vėjo elektrinių galios.	57
16.5. paveikslas. Trumpo jungimo laiko priklausomybė nuo įdiegtos vėjo elektrinių galios.	58

Lentelių sąrašas

1.1. lentelė. Elektros energijos poreikių prognozė iki 2030 m.	11
5.1.1. lentelė. Instaliuota vėjo elektrinių galia Lietuvoje.	21
6.1. lentelė. Vėjo elektrinių galių scenarijai iki 2030 metų	25
7.1. lentelė. Lentelėje pateikiamos linijų atkarpos, prie kurių gali būti prijungiamos vėjo elektrinės neplečiant 110kV tinklo	26
11.1. lentelė. Apkrovos ir generacija 2030 ir 2016 metais.	29
11.2. lentelė. Prijungtų vėjo elektrinių galia. 2030 ir 2016 metais	30
11.3. lentelė. Atstumai tarp tiriamų mazgų.	30
12.1.1. lentelė. Nestabilumo ribos.	31
12.1.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.	31
12.2.1. lentelė. Nestabilumo ribos.	32
12.2.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.	32
12.3.1. lentelė. Nestabilumo ribos.	33
12.3.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.	33
12.4.1. lentelė. Nestabilumo ribos.	34
12.4.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.	34
12.5.1. lentelė. Nestabilumo ribos.	35
12.5.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.	35
12.6.1. lentelė. Nestabilumo ribos.	36
12.6.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.	36

13.1.1. lentelė. Nestabilumo ribos.....	37
13.1.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	37
13.2.1. lentelė. Nestabilumo ribos.....	38
13.2.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	38
13.3.1. lentelė. Nestabilumo ribos.....	39
13.3.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	39
13.4.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	40
13.5.1. lentelė. Atsistatymo laikas.....	40
13.5.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	41
13.6.1. lentelė. Atsistatymo laikas.....	41
13.6.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	41
14.1.1. lentelė. Nestabilumo ribos.....	42
14.1.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	42
14.2.1. lentelė. Nestabilumo ribos.....	43
14.2.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	43
14.3.1. lentelė. Nestabilumo ribos.....	44
14.4.1. lentelė. Nestabilumo ribos.....	45
14.4.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	45
14.5.1. lentelė. Nestabilumo ribos.....	46
14.6.1. lentelė. Nestabilumo ribos.....	47
14.6.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	47
15.1.1. lentelė. Atsistatymo laikas.....	48
15.1.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	48
15.2.1. lentelė. Atsistatymo laikas.....	49
15.2.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	49
15.3.1. lentelė. Atsistatymo laikas.....	50
15.3.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	50
15.4.1. lentelė. Atsistatymo laikas.....	51
15.4.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	51
15.5.1. lentelė. Atsistatymo laikas.....	52
15.5.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	52
15.6.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.....	53
16.1. lentelė. Stabilumo ribos 2030 m.....	54
16.2. lentelė. Stabilumo ribos 2016 m.....	54
16.2. 2. lentelė. Trumpo jungimo laiko palyginimas Žmaks režimu.....	56
16.2. 3. lentelė. Trumpo jungimo laiko palyginimas Vmin režimu.....	56
12.2.1. lentelė. Nestabilumo ribos.....	57
16.3. lentelė. Trumpo jungimo laiko priklausomybė nuo galios.....	57
16.4. lentelė. Trumpo jungimo laiko priklausomybė nuo galios.....	58

Ivadas

Baigiamojo magistro darbo tema yra „Vėjo elektrinių dinaminio stabilumo tyrimas“.

Šio tyrimo tikslas – ištirti Lietuvos elektros energetikos sistemos dinaminį stabilumą, vertinant vėjo elektrinių plėtrą 2016 ir 2030 metais. Ištyrus vėjo elektrinių įtaką elektros sistemos darbo režimams bus galima sudaryti prielaidas geresniam tinklo valdymui siekiant išvengti kritinių režimų.

Žvelgiant į dabartinę Lietuvos situaciją galima teigti, kad vis labiau didėja vėjo gaminamos elektros energijos perdavimas į elektros sistemą. Lietuva taip pat įsipareigojusi, kad iki 2020 metų į elektros energetikos sistemą integruos tiek naujų vėjo jėgainių, kad jų galia sudarys 500 MW [1]. Šiuo metu atsiranda tendencija statyti ne pavienes vėjo jėgaines, o didelius vėjo elektrinių parkus, kurių galia siekia keliasdešimt MW. Tokia elektrinių integracija į elektros tinklą skatina elektros sistemos operatorius atsižvelgti į kintančią gaminamą galią ir labiau nuo jų priklausyti. Tokia situacija reiškia, kad ateityje tokios vėjo jėgainės turi galėti pakeisti tradicines elektrines ir taip pat turi būti aktyvūs elektros tinklo kontroliavimo elementai.

Toks tyrimas turi padėti išsiaiškinti prijungimo aspektus tiek vėjo elektrinių investuotojams, tiek tinklo techniniam personalui. Taip pat toks tyrimas turi teikti naudingos informacijos ir galimai sumažinti prijungimo kainą.

Tiriant vėjo elektrinių dinaminį stabilumą pirmiausia sudaromas vėjo elektrinių dinaminis modelis. Svarbu naudoti šį modelį siekiant išspręsti dinaminę sąveiką tarp vėjo elektrinių ir elektros energetikos sistemos per normalaus veikimo ir per trumpalaikes tinklo avarijas. Šis modelis apima pastotę, kur yra prijungta vėjo elektrinė, vėjo elektrinės modelį, mechaninį ir elektrinį modelius.

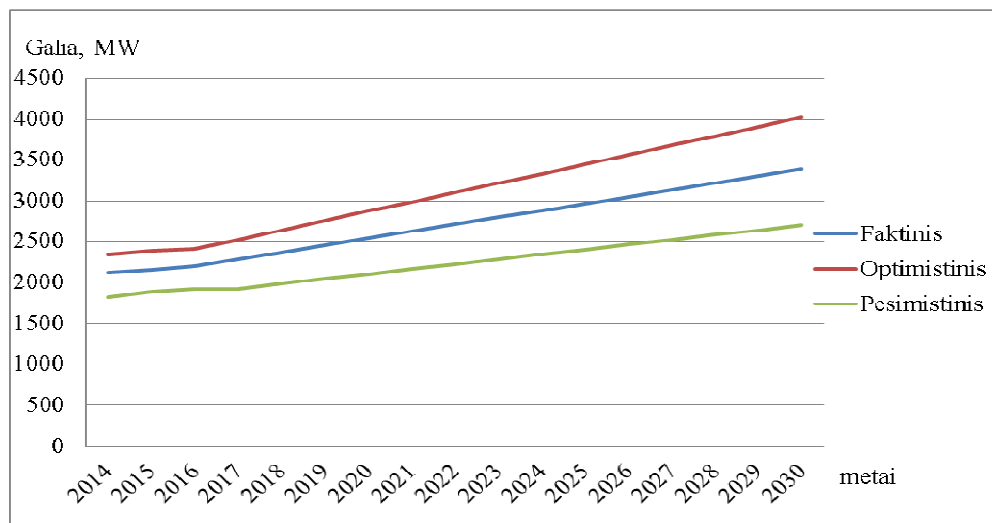
1. Apžvalginė dalis.

Elektros energijos poreikių prognozės iki 2030 metų

Remiantis duomenimis [2] maksimali pareikalaujama galia 2030 metais pagal optimistinį scenarijų bus apie 4420 MW. Labiausiai tikėtina apie 3390 MW, o pesimistinė 2704 MW.

1.1. lentelė. Elektros energijos poreikių prognozė iki 2030 m.

Metai	Maksimali pareikalaujama galia, MW		
	Faktinis	Optimistinis	Pesimistinis
2014	2120	2350	1820
2015	2160	2390	1890
2016	2200	2410	1920
2017	2285	2525	1924
2018	2370	2640	1984
2019	2455	2755	2044
2020	2540	2870	2104
2021	2625	2985	2164
2022	2710	3100	2224
2023	2795	3215	2284
2024	2880	3330	2344
2025	2965	3445	2404
2026	3050	3560	2464
2027	3135	3675	2524
2028	3220	3790	2584
2029	3305	3905	2644
2030	3390	4020	2704



1.1. paveikslas. Elektros energijos poreikių prognozė iki 2030 m.

2. Vėjo elektrinės

2.1. VE konstrukcijos ir įtaka elektros sistemos tinkui

Jau nusistovėjo vėjo elektrinės (VE), turinčios bokštą, horizontaliai įtvirtintą veleną ir jo gale įtvirtintą trijų menčių vėjaratį konstrukcija. Kiti konstrukcijų variantai su dviem ar viena mentimi, išsisiniu vėjaračiu, taip pat vertikalios veleno ašies elektrinės nepaplito.



2.1.1. paveikslas. Vertikalios veleno ašies vėjo el.



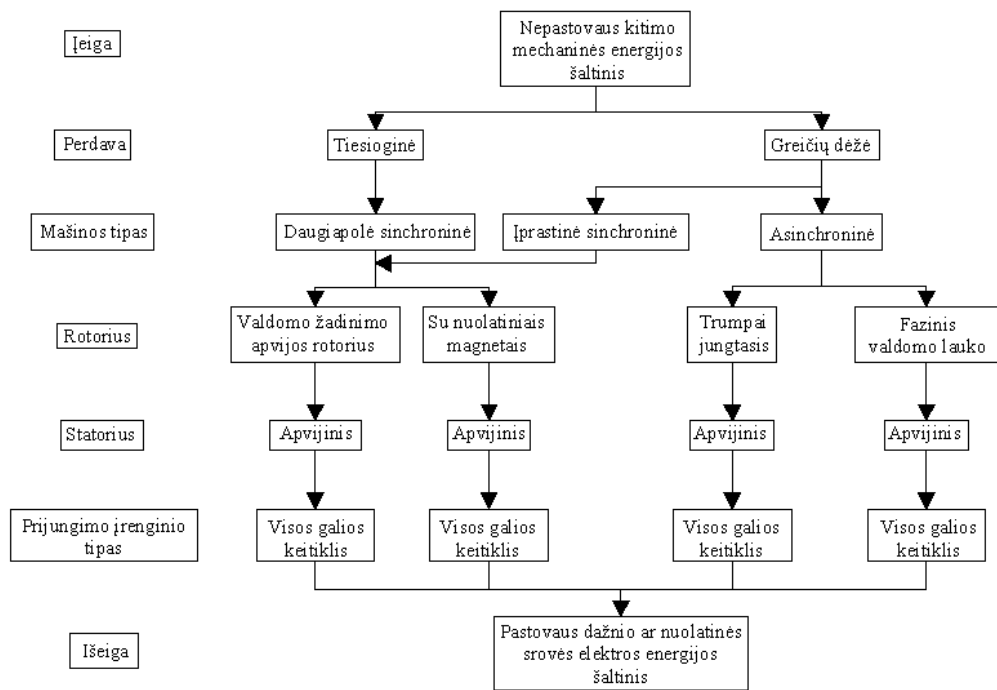
2.1.2 paveikslas. Vienos mentės vėjo elektrinė

Didelės galios vėjo turbinos, kurios pastatytos sausumoje arba atviroje jūroje, dirba sujungtos su vietiniais elektros tinklais ir visą pagamintą elektros energiją atiduoda į juos. Elektros tinklai susiję su elektros energijos vartotojais, kuriems būtina užtikrinti tiekiamos elektros energijos kokybę, tai kelia tam tikrų reikalavimų ir elektros energijos, gaunamos iš vėjo elektrinių, kokybės parametrams. [3].

Dažnas vėjo greičio svyravimas sukelia turbinos generatoriaus įtampos lygio svyravimus. Jei elektros tinklas, prie kurio prijungtos vėjo turbinos, nėra užtektinai didelis, tai gali atsilipti viso elektros tinklo įtampos kokybei. Tai taip pat gali kelti kai kurių sunkumų buitiniams ir pramoniniams vartotojams. Norint išvengti šio reiškinių neigiamų pasekmių, aukšto dažnio svyravimams nuslopinti naudojamos tam tikros įtampos techninės slopinimo priemonės. Vis dėlto žemesnių dažnių svyravimams išlyginti ir galios balansui elektros tinkle palaikyti tenka įprastinėms elektrinėms dirbančioms elektros tinkle.

2.2. Vėjo elektrinių klasifikacija

Vėjo elektrinės skirstomos pagal sūkių pastovumą ir jų valdymo bei taikomo keitiklio savybes. Taip pat vėjo elektrinės klasifikuojamos pagal:



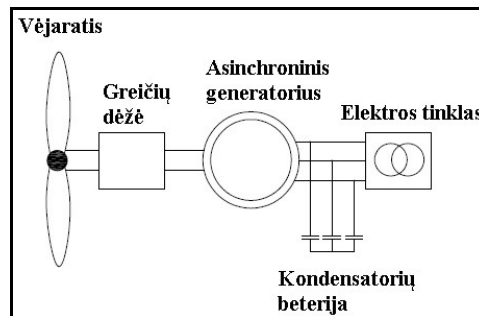
2.2.1. paveikslas. Vėjo elektrinių klasifikacijos schema

Sūkių valdymo požiūriu skiriamos elektrinės, kurių vėjaračio mentys gali būti sukiojamos ir kurių pokrypio kampą galima keisti, pavyzdžiui nuo -2° iki 12° ar net iki 35° , ir elektrines, kurių mentys įtvirtintos ir nesukiojamos. Siekiant išlaikyti pastovų sukimosi greitį, kai vėjo greitis toliau didėja, ir saugoti vėjaratį nuo per daug stipraus vėjo, jo mentys turi turėti greičio netekimo savybę. Mentės konstrukcija tokia, kad prie didelių oro srautų greičių dalis srauto mentės paviršiuje virsta turbulenciškais sūkuriais ir oro srautas jėgos į mentę nebeperduoda. Šis greičio netekimo reiškinys gali būti pasyvus, bet gali būti ir aktyviai valdomas, tam tikrais kampais sukiojant ar kitaip valdant mentes. Hidraulinė (kartais taikoma elektrinė) pavara didina elektrinės kainą ir aptarnavimo darbus, mažina viso elektrinės kaip industrijos gaminio patikimumą, todėl vėjo elektrinių parkuose masiškai statant elektrines kartais pasirenkamas supaprastintas vėjaračio tipas be jokio valdymo. Tai nėra labai blogai, nes vėjo parko generuojamą galią galima valdyti prijungiant ir atjungiant atskiras elektrines, tačiau galimybė valdyti vėjo elektrinės turbiną didina jos generuojamus elektros energijos kiekius, ypač Lietuvoje įprastinėje nedidelių vėjo greičių srityje.

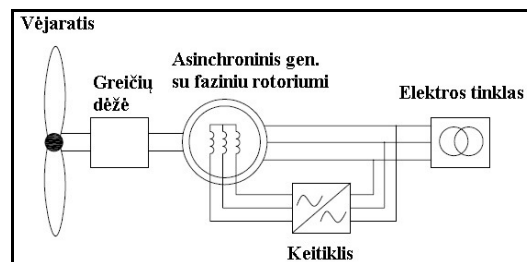
2.3. Vėjo elektrinių generatorių tipai

Pagrindiniai vėjo elektrinių generatorių tipai yra keturi: asinchroninis trumpai jungtuojų rotoriumi generatorius (2.3.1. paveikslas), asinchroninis su faziniu rotoriumi generatorius (2.3.2. paveikslas), sinchroninis kintamų sūkių generatorius (2.3.3. paveikslas) ir sinchroninis kintamų sūkių generatorius su greičių dėže, įgalinantis naudoti didelio greičio generatorius (2.3.4. paveikslas).

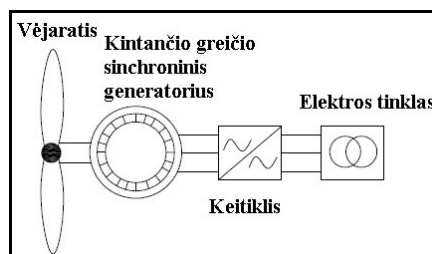
Pastarieji trys tipai turi keitiklius. Generatoriai su faziniu rotoriumi turi mažesnės už vardinę galią (apie 20% – 30%) pagalbinį keitiklį fazinio rotoriaus ir tuo pačiu generatoriaus įmagnetinimui maitinti, o sinchroninis generatorius – galingą vardinės galios dažnio keitiklį, kuris veikia kaip nuolatinės srovės intarpas.



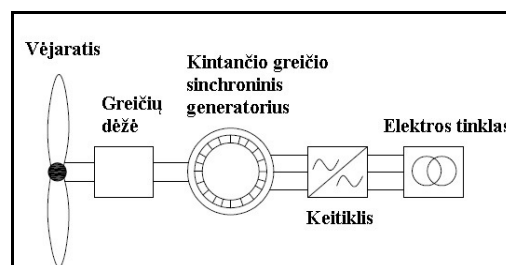
2.3.1. paveikslas. Vėjo elektrinė su asinchroniniu generatoriumi [4] Lars Lindgen



2.3.2. paveikslas. Vėjo elektrinė su asinchroniniu, turinčiu fazinį rotorių generatoriumi [4] Lars Lindgen



2.3.3. paveikslas. Vėjo elektrinė, turinti kintamų sūkių sinchroninį generatorių ir nuolatinės srovės intarpą [3] Lars Lindgen



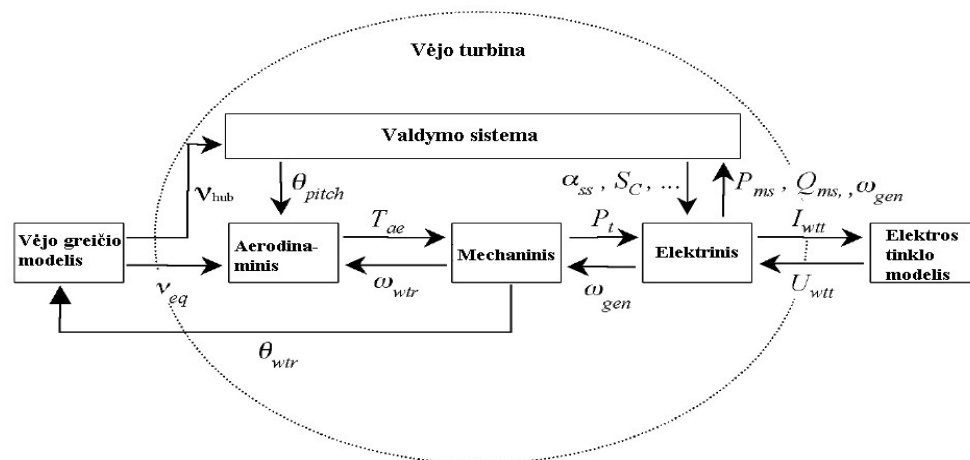
2.3.4. paveikslas. Vėjo elektrinė, turinti kintamų sūkių sinchroninį generatorių, nuolatinės srovės intarpą ir greičių dėžę [3] Lars Lindgen

Šiuo metu labai paplitęs vėjo elektrinių tipas tai vėjo elektrinės su asinchroniniu, turinčiu fazinį rotorių, generatoriumi. Kitaip dar vadinamas dvigubo maitinimo generatoriumi (2.3.1. paveikslas). Nes valdant įmagnetinimą išvengiama staigių srovės šuolių paleidimo ir trumpojo jungimo akimirksniais bei viršįtampių, netekus apkrovos. Greitai besisukantis generatorius yra palyginti mažų gabaritų, o rotorių maitinančio keitiklio galia 30% visos generatoriaus galios, todėl jis yra pigesnis. Trūkumas – dar būtina greičių dėžė, pilna tepalo, kuris dažnai nuteka, be to, pavyzdžiui, nuo žaibo, gerai dega. Elektrinė modeliuojama labai smulkmeniškai perteikiant dvigubo maitinimo su faziniu rotoriumi asinchroninio generatoriaus savybes, nuolatinės srovės intarpo keitiklius ir jų valdymą. Veleno modelyje perteikiami sukimosi švytavimai. Energijos šaltinio aerodinaminiam modelyje įvertinamas menčių pokrypio kampo valdymas.

Tiristoriams ir jų tipams tobulėjant keitiklio modeliai taip pat tobulėja. Įvedamos apsaugos nuo viršsrovių ir nuo šiluminių perkrovų, kurios atsiranda, kai generatorius srovė pradeda tekėti į prijungimo tinkle susidariusio trumpojo jungimo tašką. Šiuose keitikliuose numatyta blokuoti išorinių trumpųjų jungimų poveikį. Keitiklio modelis bus nepilnas, jai šis blokavimas bus neįvertintas. Keitiklio modelyje reikia įvertinti trumpojo jungimo srovės nutraukimo režimą ir po to sekantį, jei reikia, nuolatinės srovės intarpo įjungimą. Be to elektros tinklo pusės keitiklis per tinklo pažaidas gali dirbti kaip reaktyviosios galios valdiklis. Įtampos stabilumo tyrimuose pagrindinis uždavinys yra tinkamai atspindėti nuolatinės srovės intarpą, jo apsaugas ir darbo rezultatus.

2.4. Vėjo elektrinės modelio sudėtinės dalys

Bendra vėjo elektrinės modelio schema parodyta 2.4.1. paveiksle. Ji susideda iš rotoriaus aerodinaminio, mechaninės ir elektrinės dalių modelių, kuriuos dar apjungia valdymo sistemos modelis.



2.4.1. paveikslas. Vėjo elektrinės modelio schema [1] Poul Sorensen

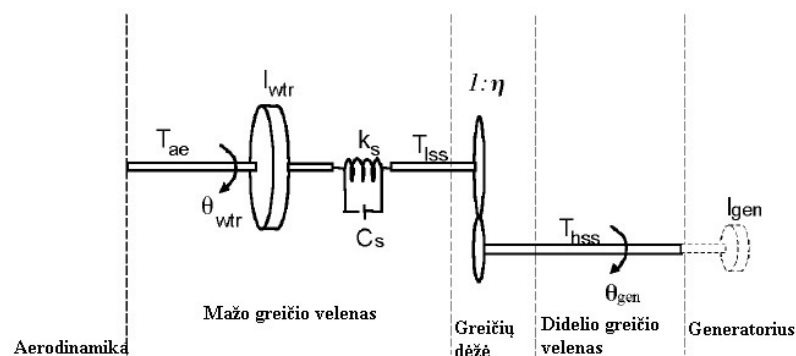
Įėjimo signalas pateikiamas iš vėjo modelio, o prijungimo taško savybes išreiškia elektros tinklo modelis. Įėjimo signalai yra vėjo greitis veleno aukštyje v_{hub} ir ekvivalentinis vėjo greitis v_{eq} . Iš valdymo sistemos į aerodinaminį modelį dar patenka menčių pokrypio kampas θ_{pitch} ir iš mechaninio modelio vėjo erdviųjų išsibarstymo savybėms įvertinti pateikiama rotoriaus menčių erdvinė padėtis ω_{WTR} . Valdymo sistema dar gauna kabinos aukštyje nuolat aerometrais matuojamą vėjo greitį v_{hub} . Aerodinaminio modelio išėjime susidaro aerodinaminis sūkių momentas T_{ae} , kuris kartu yra mechaninio modelio įėjimo signalas.

Mechaninis modelis, gaudamas įėjime du sūkių momentus: aerodinaminį T_{ae} ir iš elektrinio modelio sugrįžusį generatoriaus pasipriešinimo sūkiams momentą T_{ag} , juos tarpusavyje lygina ir sukelia rotoriaus padėties ω_{WTR} , menčių erdvinio kampo θ_{WTR} ir generatoriaus sūkių greičio ω_{gen} signalus. Generatoriaus sūkių greičio signalą ω_{gen} naudoja valdymo sistema generatoriaus paleidimo per sklandžiojo (minkštojo) paleidiklio įtaisus valdymui, pavyzdžiui, skaičiuoja sklandžiojo paleidiklio darbo kampą α_{ss} .

Elektrinio modelio įėjime yra vėjo elektrinės prijungimo taško parametrai: įtampa U_{WTT} , sūkių greitis ω_{gen} , sūkių momentas T_{ag} ir vėjo elektrinės valdymo sistemos signalai. Išėjime yra prijungimo taško pagrindinį jungtuvą kertančios aktyvioji ir reaktyvioji galios P_{MS} ir Q_{MS} bei srovė I_{WTT} . Modeliuojant taikomos universalios MATLAB, SIMULK modeliavimo programos.

2.4.1. VE Mechaninis modelis

Mechaninis modelis atspindi vėjo elektrinės mechaninę konstrukciją. Mechaniškai sudėtingiausia yra konstrukcija, kurioje lėti vėjaračio sūčiai greičių dėžėje yra padidinami iki greitų asinchroninio generatoriaus sūkių. Kitų tipų elektrinių mechaninė konstrukcija paprastesnė.



2.4.1.1. paveikslas. Vėjo elektrinės mechaninė schema [5] Anca D.

Vėjo turbinos sūkių kampas ir aerodinaminis sūkių momentas T_{ae} yra aerodinaminio modelio kintamieji. T_{ae} aerodinaminė jėga keičiama į jėgą ant mažo greičio veleno T_{lss} , kuris eina į greičių

dėžę. Mechaninio modelio pusėje yra ryšio su elektriniu modeliu dydžiai: didelio greičio velenas $Thss$ ir sūkių kampas θ_{gen} , kuris elektriniame modelyje jau vadinamas fazės kampu ω .

Vidiniai mechaninio modelio dydžiai yra vėjo turbinos inercijos momentas I_{wt} , generatoriaus rotoriaus inercijos momentas I_{gen} , greičių santykis $1:\eta$, o veleno lankstumas modeliuojamas veleno standumu ks ir slopinimo koeficientais Cs .

Perduodant sukimo judesį, velenas elgiasi kaip spyruoklė ir jo galų erdviniai kampai skiriasi, veleno susisukimo kampas lygus vėjaračio kampo ir elektros srovės fazinio kampo skirtumui[5]:

$$\theta_k = \theta_{WTR} - \frac{\theta_{gen}}{\eta}. \quad (1)$$

Ekvivalentinis inercijos momentas yra vėjaračio didelio inercijos momento ir generatoriaus mažo inercijos momento suma:

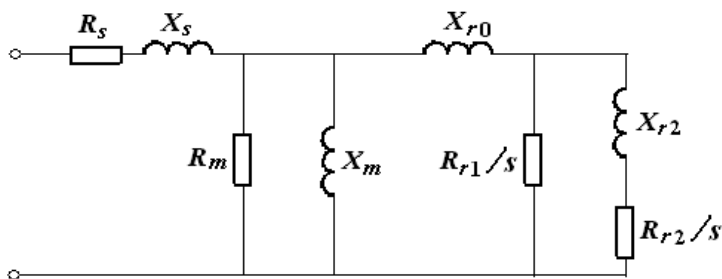
$$I_{eq} = \frac{I_{WTR} \cdot \eta^2 I_{gen}}{I_{WTR} + \eta^2 I_{gen}}. \quad (2)$$

Pavojingas vidinio rezonanso režimas, kurio dažnis ir veleno standumo koeficientas yra susiję:

$$k_{ms} = (2\pi f_{osc})^2 I_{eq}. \quad (3)$$

Paprastai tik tikrinama ar rezonansas nesusidaro, bet į modelį rezonanso režimas neįtraukiamas. Tai pat nevertinamas elektrinės stiebo lankstumas, kuris įvertinamas stiebo rezonanso dažniu. Tiek mechaninės besisukančios dalies, tiek stiebo rezonansų režimai yra pavojingi režimai. Mechaniniame modelyje reikia tikrinti rezonansų buvimą.

2.4.2. Asinchroninio generatoriaus trumpai jungtu rotoriumi elektrinis modelis



2.4.2.1. paveikslas. Asinchroninio generatoriaus trumpai jungtu rotoriumi atstojamoji schema [6]

Generatoriaus atstojamoji viena linijinė schema parodyta 6.2.1. paveiksle. Tai universalus modelis. Induktyviosios varžos X_s , X_{r0} ir X_m gali būti modeliuojamos fiksuotų ar prisisotinamųjų verčių. Šiuo atveju soties kreivės taip pat gali skirtis.

Dinaminiam procesams modeliuoti asinchroniniam generatoriui, kaip bet kokiai elektros mašinai, reikia taikyti Parko lygtis d-q ašys [6]:

$$\bar{i}_s R_s - \bar{u}_s = -\frac{d\bar{\phi}_s}{dt} - j\omega_b \bar{\phi}_s; \quad (4) \quad \bar{i}_r R_r' - \bar{u}_r = -\frac{d\bar{\phi}_r}{dt} - j(\omega_b - \omega_r) \bar{\phi}_r; \quad (5)$$

$$M_{el} = p \operatorname{Re}\{j\bar{\phi}_s \bar{i}_s^*\} \quad (6) \quad \bar{\phi}_s = L_{s\sigma} \bar{i}_s + L_m (\bar{i}_s + \bar{i}_r); \quad (7)$$

$$\bar{\phi}_r = L_{r\sigma} \bar{i}_r + L_m (\bar{i}_s + \bar{i}_r); \quad (8)$$

Šiose lygtyse: ir statoriaus ir rotoriaus srovės kompleksinės vertės;

R_s ir R_r – statoriaus ir rotoriaus aktyviosios varžos;

u_s ir u_r – statoriaus ir rotoriaus įtampų kompleksinės vertės;

ψ_s ir ψ_r – statoriaus ir rotoriaus srautų kompleksinės vertės;

ω_b – elektros sistemos kampinis greitis;

ω_r – rotoriaus kampinis greitis;

M_{el} – elektrinis momentas;

p – polių skaičius;

$\operatorname{Re}\{x\}$ – realioji x dalis;

\bar{x}^* – jungtinis x dydžio kompleksinė vertė;

$L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$ – statoriaus ir rotoriaus induktyvumai;

L_m – savitarpio induktyvumas.

Dinaminuose tyrimuose dar paprastai pridedama sūkių tvėrmės lygtis:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{I_{gen}} (T_{el} - T_{mech}). \quad (9)$$

Elektrinis sūkių momentas yra galios išraiška:

$$T_{el} = \bar{v}_{qs} \bar{i}_{qs} + \bar{v}_{ds} \bar{i}_{ds}. \quad (10)$$

Asinchroninių generatorių turinčių fazinius rotorius elektriniai modeliai dar turi rotoriaus maitinimo keitiklio ir to keitiklio valdymo sistemos modelius.

3. Vėjo elektrinėms keliami reikalavimai

3.1. Aktyviosios galios valdymas.

Veikiančios vėjo elektrinės aktyviosios galios riba turi būti galima reguliuoti nuotoliniu būdu, kad generuojamos aktyviosios galios vidutinė vertė dešimties minučių bėgyje neviršytų nustatyto lygmens. Turi būti galima apriboti vėjo turbinos aktyviosios galios gamybos kitimo greitį didėjimo kryptimi iki 10%

Turi būti galimybė sumažinti vėjo turbinos aktyviąją galią nuo 100% iki 20% vardinės galios greičiau kaip per 5 s. Tai reikalinga sistemos apsaugoms. Kai kurios apsaugos sistemos (dėl stabilumo) reikalaujam, kad aktyvioji galia būtų atkurta per trumpą laiko tarpą po greito galios sumažėjimo.

Turi būti galima automatiškai valdyti vėjo elektrinės aktyviąją galią priklausomai nuo sistemos dažnio kitimo.

3.2. Reaktyviosios galios valdymas

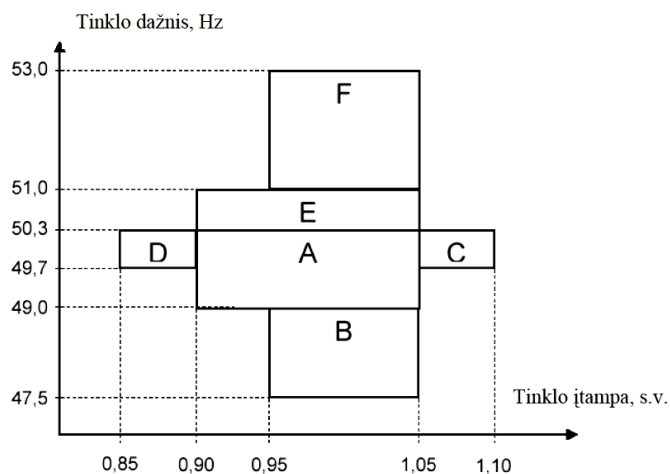
Vėjo elektrinės turi galėti valdyti reaktyviosios galios srautą su sistema. Valdymas turi vykti automatiškai ir nepertraukiamai.

Vėjo elektrinės turi galėti prijungimo taške automatiškai reguliuoti savo reaktyviąją galią įtampai valdyti.

3.3. Įtampos ir dažnio dydžiai

Kai įtampos ir dažniai yra paveiksle parodytų stačiakampių plotų viduje, tai vėjo elektrinės ar parkas turi tenkinti reikalavimus:

- a) Normalus ilgalaikis darbas. Dėl sistemos įtampos ir dažnio joks aktyviosios ar reaktyviosios galios sumažėjimas nėra leistinas.
- b) Nepertraukiamas darbas turi trukti mažiausiai 30 minučių. Sistemos dažniui mažėjant nuo 49,0 Hz iki 47,5 Hz aktyviąją galią leidžiama mažinti nuo 0 iki 15% mažėjimo pokyčio pagal tiesinę dažnio funkciją.
- c) Nepertraukiamas darbas turi trukti mažiausiai 60 minučių. Aktyvioji galia gali būti sumažinta 10%.
- d) Nepertraukiamas darbas turi trukti mažiausiai 60 minučių. Aktyvioji galia gali būti sumažinta 10%.
- e) Nepertraukiamas darbas turi trukti mažiausiai 30 minučių. Aktyviąją galią leidžiama truputį sumažinti.
- f) Nepertraukiamas darnas turi trukti mažiausiai 3 minutes. Aktyvioji galia gali būti sumažinta iki bet kokio dydžio, bet turbinos turi likti įjungtos į sistemą.



3.3.1. paveikslas. Reikalavimai vėjo elektrinių eksploatavimui nuo įtampos ir dažnio

4. Eksploatacinės VE charakteristikos trikdžių tinkle metu

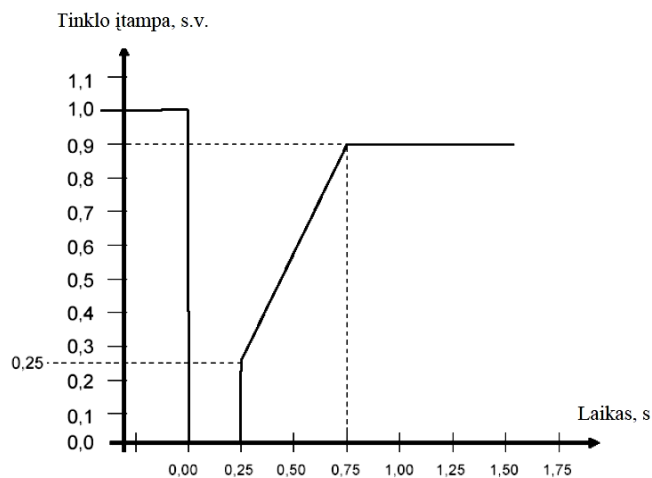
(pagal ENTSO-E* standartą)

ENTSO-E* - perdavimo sistemos operatorių Europos elektros tinklų organizacija.

Vėjo elektrinė ir vėjo turbina vėjo elektrinių parke turi gebėti likti prijungtos prie sistemos ir tęsti darbą gedimo bendroje sistemoje ar po jos.

Vėjo elektrinės gali būti atjungtos nuo sistemos, jei įtampa prijungimo taške sistemos trikdžio metu ar po jo tikrai krinta žemiau lygmenų, parodytų paveiksle.

Gedimo trukmė, kai įtampa prijungimo taške gali būti lygi 0 yra 250 milisekundžių. [7]



4.1. paveikslas. Vėjo elektrinės įtampos kitimo grafikas

5. Vėjo elektrinių parkai Lietuvoje

5.1. Instaliuota suminė vėjo elektrinių parkų galia Lietuvoje

2014 m. sausio 1 d. Lietuvos elektros sistemoje elektrinių bendra įrengtoji galia sudarė 4304 megavatų (MW).

Įrengtoji vėjo elektrinių galia 2014.01.01 Lietuvoje:

Vėjo elektrinės prijungtos prie perdavimo tinklo – 223 MW.

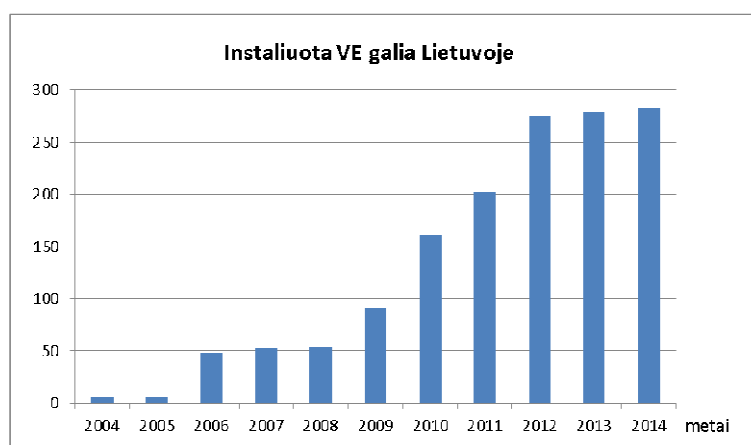
Vėjo elektrinės prijungtos prie skirstomojo tinklo – 59 MW.

AB Litgrid informacija.

Diagramoje pateikiama vėjo elektrinių instaliuotos galios augimas nuo 2004 iki 2014 metų. Galima pastebėti, kad Lietuvoje instaliuota galia iš atsinaujinančios energetikos šaltinių, šiuo atveju vėjo, ženkliai išaugo. 2014 08 mėn. esamais duomenimis Lietuvoje veikia 116 vėjo jėgainių. Jų pagaminama elektros energija sudaro 6% kasmet visos Lietuvos suvartojamos elektros energijos. [13].

5.1.1. lentelė. Instaliuota vėjo elektrinių galia Lietuvoje.

Metai	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2012	2013	2014
P_{inst}, MW	6	6	48	52	54	91	161	202	275	279	282



5.1.1. paveikslas. Instaliuotos VE galios augimas Lietuvoje [11],[12]

5.2. Vėjo parkai ir jų pasiskirstymas

Šiuo metu Lietuvoje veikia 17 didesniu vėjo jėgainių parkų:

Čiutelių vėjo elektrinių parkas

20 vnt. Enercon E-82, kurių kiekvienos nominali galia 2 MW, menčių ilgis 41 m, bokštų aukštis 85 m.

Suminė nominali galia 40 MW.

Prognozuojama metinė gamyba: 100 GWh.

Benaičiai – 1 vėjo elektrinių parkas

Kretingos rajone, Darbėnų seniūnijoje, Benaičių, Žynelių ir Pelėkių kaimuose esančiame vėjo elektrinių parke sumontuota septyniolika Enercon E-82 tipo vėjo elektrinių. Vienos VEP "Benaičiai-1" vėjo elektrinės aukštis siekia 97 metrus.

Vėjo elektrinių parko galingumas – 34 MW

Per metus naujasis parkas pagamins apie 86 mln. kWh elektros energijos.

Vydmantų vėjo elektrinių parkas

Vėjo elektrinių parke elektros energiją gamina 15 Vokietijos įmonės „Enercon GmbH“ pagamintų „E-70“ modelio vėjo elektrinių, kurių kiekvienos instaliuota galia siekia 2 MW.

Suminė nominali galia 30 MW.

Per 2013 metus bendrovė pagamino 57,007 gigavatvalandes (GWh) elektros energijos.

Didšilių vėjo elektrinių parkas

10 vėjo elektrinių. Elektrines projektui tiekė Vokietijos koncernas „Enercon GmbH“

Tikimasi, kad per metus šis parkas sugeneruos iki 54,6 GWh elektros energijos

Suminė nominali galia 21,5 MW.

Benaičių vėjo elektrinių parkas

Darbėnų seniūnijoje, Benaičių kaime esančiame vėjo elektrinių parke sumontuotos šešios V100 2,75-3 tipo vėjo elektrinės Danijos bendrovės “Vestas”.

Vėjo elektrinių parko galingumas – 16 MW

Per metus jis pagamina apie 44 mln. kWh elektros energijos

Šilalės vėjo elektrinių parkas

Vėjo elektrinių kiekis - 8 vnt.

Suminė nominali galia 13,8 MW

Parke veikiančios šešios vėjo jėgainės turi Siemens SWT-2.3-101 turbinas, kurių kiekvienos elektrinė galia yra 2,3 MW. Vėjo turbinos sparnai yra pagaminti iš stiklo pluoštu sutvirtintos

epoksidinės dervos, o rotoriaus (jėgainės sparnų) diametras siekia 101 metrą. Šios turbinos pradeda generuoti energiją vėjui pasiekus 4 m/s greitį, o optimaliausias vėjo greitis jėgainės veikimui yra 12-13 m/s.

Mockių vėjo elektrinių parkas

6 vnt. Enercon E-82, kurių kiekvienos nominali galia 2 MW, menčių ilgis 41 m, bokštų aukštis 85 m. Suminė nominali galia 12 MW. Prognozuojama metinė gamyba: 38 GWh (užtektų visam Šilutės miestui).

Sudėnų vėjo elektrinių parkas

4 vnt. Enercon E-82, kurių kiekvienos nominali galia 2 MW, menčių ilgis 41 m, bokštų aukštis 78 m. Suminė nominali galia 8MW. Prognozuojama metinė gamyba: 33GWh.

Pakertų vėjo elektrinių parkas

Instaliuota nominali galia – 6 MW.

Enercon firmos turbinos.

Vienos jėgainės galia 2MW.

Boksto aukštis 98m, rotoriu skersmuo 82 m.

Seirijų VE parkas

Nominali instaliuota galia – 6 MW.

Enercon firmos turbinos.

Vienos jėgainės galia 2MW.

Liepynės VE parkas

Nominali instaliuota galia – 9,13 MW.

Laukžemės VE parkas

Laukžemės VE parke yra pastatytos „VESTAS Wind Systems A/S“ (Danija) įrenginiai.

Nominali instaliuota galia 16 MW.

Kreivėnai III VE parkas

Instaliuota nominali galia – 14,9 MW.

Kreivėnai II VE parkas

Instaliuota nominali galia – 10 MW.

Kreivėnai VE parkas

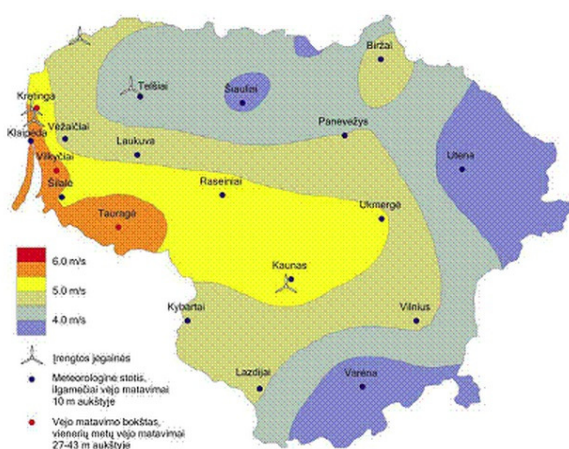
Instaliuota nominali galia – 20 MW.

Akmenėlių vėjo elektriniu parkas

Instaliuota nominali galia – 6 MW.

Anužių VE

Instaliuota nominali galia – 4 MW.



5.2.1. paveikslas. Vėjo greičio vidurkis Lietuvos regione

Taigi, iš vėjo elektrinių parkų apžvalgos galima pastebėti, kad vėjo elektrinių parkų didžiausias paplitimas yra vakarinėje Lietuvos dalyje. Tai patvirtina ir vėjo greičio pasiskirstymo žemėlapis 5.2.1. paveikslas. Toks vėjo elektrinių pasiskirstymas taip pat lemia ir linijų apkrautumą. Tolesniame tyrime bus sprendžiama, kaip tokie parkai veikia visą sistemos darbą. Kas atsitiktų jiems atsijungus, prisijungus, kaip keistųsi įtampos tinkle, kaip jie veiktų esant avariniam režimui.

6. Vėjo elektrinių scenarijai iki 2030 metų

Iki 2030 metų yra numatyti trys galimi atsinaujinančių energijos šaltinių plėtros scenarijai, tame tarpe ir vėjo elektrinių. Pagrindiniame scenarijuje numatoma vėjo elektrinių galia iki turėtų išaugti iki 500 MW, pagal tarpinį iki 670 MW, o pagal ambicingąjį 840 MW. Veiksniai, kurie riboja elektrinių galią yra aktyviosios galios rezervo reguliavimas ir perdavimo tinklų pralaidumas.

Pagal Europos tinklų reikalavimus, 66% antrinio rezervo poreikio arba 50% antrinio ir tretinio rezervų poreikio turi būti palaikomi šalies viduje, o likusi rezervų poreikio dalis gali būti užtikrinama per tarp sistemines jungtis.

Lietuvos Respublikos Atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas numato, kad pasiekus 500 MW vėjo elektrinių įrengtąją galią, turės būti patvirtina tolesnė perdavimo tinklo infrastruktūros plėtros tvarka, atsižvelgiant į šalies įsipareigojimus dėl aplinkos taršos mažinimo, energijos tiekimo saugumo ir patikimumo užtikrinimo bei vartotojų teisių ir teisėtų interesų apsaugos reikalavimus.

Litgrid AB duomenys.

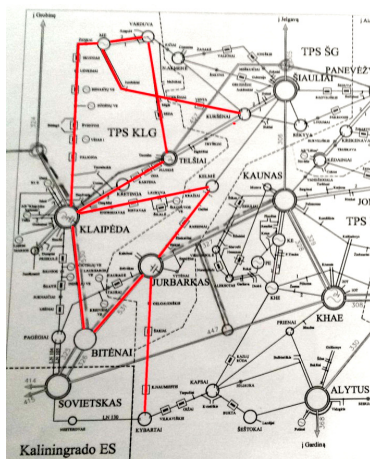
6.1. lentelė. Vėjo elektrinių galių scenarijai iki 2030 metų

Scenarijai	TWh	Vėjo el.
Pagrindinis	1,06	500 MW
Tarpinis	1,70	670 MW
Ambicingasis	2,21	840 MW

Didėjant vėjo elektrinių instaliuotai galiai atsiranda rezervavimo būtinumas. Reikalingas tam, kad būtų galima kompensuoti apkrovų ir vėjo elektrinių generuojamų galių prognozavimo klaidas. Lietuva, kaip ir kitos šalys turi būti subalansavusios savo elektros energetikos sistemą. Turi pagaminti tiek kiek suvartoja.

7. Linijų apkrautumas vakarinėje Lietuvos dalyje

Didžioji dalis norimų prijungti vėjo elektrinių yra sutelktos vakarinėje ir pietvakarinėje Lietuvos elektros energetikos sistemos perdavimo tinklo dalyje, todėl gali persikrauti vakarinės perdavimo tinkle dalies 110kV ir 330 kV linijos bei transformatoriai.



7.1. paveikslas. Labiausiai apkrautos vakarinėje Lietuvos dalyje esančios linijos

7.1. lentelė. Lentelėje pateikiamos linijų atkarpos, prie kurių gali būti prijungiamos vėjo elektrinės neplečiant 110kV tinklo.

Eil. Nr.	Linijos ir jų grupės	Didžiausia leistina vėjo parkų galia neplečiant tinklo, MW
1.	Klaipėda – Pagėgiai, Pagėgiai – Sovetskas, Pagėgiai – Jurbarkas	110
2.	Klaipėda – Kelmė, Kelmė – Šiauliai, Kelmė – Jurbarkas	150
3.	Klaipėda – Telšiai	120
4.	Mažeikių E – Klaipėda	85
5.	Mažeikių E – Varduva – Telšiai, Mažeikių E - Kuršėnai	106
6.	Jurbarkas – Kybartai, Kybartai – Kapsai	90
7.	Kruonio HAE – Kaišiadorys – Žasliai, Žasliai - Kruonis	90
8.	Kaunas – Kėdainiai, Kėdainiai – Panevėžys, Kėdainiai - Jonava	140
9.	Jurbarkas – Vytėnai	60
10.	Klaipėda - Marios	95

8. Dinaminis stabilumas elektros sistemoje

Dinaminis stabilumas tai didelis ES darbo režimų trikdys, kuris sukelia sinchroninių mašinų – sinchroninių generatorių, variklių, kompensatorių rotorius sukimosi svyravimus, nes dėl trikdžio staigiai pasikeičia jų atiduodama ar imama elektromagnetinė galia.

Generatorių pirminių variklių reguliatoriai turi didelę inerciją – turbinų galia praktiškai lieka pastovi, o staigiai pakitus generatorių galiai, pažeidžiamas generatoriaus ir turbinos galių balansas. Atsiradusių svyravimų pobūdis bei pereinamojo proceso baigtis priklauso nuo daugelio veiksnių.

Generatorių atiduodamų galių ir nebalanso galių greitinančių ar stabdančių rotorius reikšmės kiekvienu laiko momentu priklauso nuo visų ES generatorių elektrovarų (evj) dydžių ir fazių, kurios ilgainiui keičiasi. Evj fazės pokytis susijęs su santykinu rotorius pasisukimu ir priklauso nuo besisukančių masių inercijos t.y. nuo mechaninių sistemos savybių. Tuo tarpu evj reikšmės priklauso nuo elektromagnetinių procesų sinchroninėje mašinoje bei AŽR (automatinis žadinimo reguliavimas).

Iš visų generatoriaus sukimosi greičio svyravimų priežasčių pavojingiausi yra trumpieji jungimai. Todėl dinaminio stabilumo skaičiavimai atliekami atsiradus tiems stacionaraus darbo režimo pažeidimams, kuriuos sukelia trumpieji jungimai.

Dinaminio stabilumo požiūriu pavojingiausias yra trifazis trumpasis jungimas, nes stipriai sumažėjus įtampai susilpnėja ryšys tarp generatorių ir dažnai pažeidžiamas sistemos stabilumas.

Taigi dinaminis stabilumas yra sistemos sugebėjimas po didelio trikdžio atstatyti pradinį ar jam artimą režimą.

9. Skaičiuojamosios avarijos aprašymas

Dauguma vėjo elektrinių nelabai padeda elektros sistemos stabilumui. Perdavimo tinkle nežymiai sumažėjus įtampai ar dažniui vėjo elektrinių generatorių apsaugos gali sukelti staigų daugelio vėjo elektrinių parkų atsijungimą ir tuo sukelti sistemoje žymų galios generacijos sumažėjimą anksčiau nei sistemos apsaugos lokalizuoja gedimą. Didėjant vėjo elektrinių parkų skaičiui ir jiems koncentruojantis atskiruose regionuose, toks atsijungimas gali sukelti daugiau kaip 3000MW galios praradimą, o tai gali vesti prie didelių sisteminių avarių. Todėl sėkmingam problemos sprendimui reikia, kad visi generatoriai, įskaitant ir vėjo elektrines, būtų įpareigoti tenkinti tam tikrus sisteminius reikalavimus, kaip kad esant gedimui tinkle neatsijungus dėl įtampos pažemėjimo tol, kol elektros tinklų apsaugos lokalizuos gedimą ir palaikyti įtampą.

Vėjo elektrinių generuojama galia gali kisti, taip darydama įtaką:

- Energetikos sistemos dinaminiam stabilumui;
- Reaktyviosios galios ir įtampos reguliavimui;
- Galių balansui ir dažnio reguliavimui.

Jeigu vėjo elektrinė atsijungia dar nelokalizavus trumpojo jungimo vietos, tai turi neigiamą poveikį sistemos dinaminiam stabilumui. Kai vėjo elektrinių generacija yra didelė ir dėl to atjungiami tradiciniai elektros blokai, sumažėja energetikos sistemos inercija. Tai taip pat pablogina sistemos dinaminį stabilumą, o atsijungus vėjo elektrinėms padidėja ir pagreitėja dažnio sumažėjimas. [7].

10. Dinaminio stabilumo skaičiavimas su PSSE programa

Kiekvienam tiriamam ES pereinamajam procesui būtina atkurti informaciją apie ES schemos konfigūraciją, generatorių, apkrovų ir linijų bei transformatorių parametrus normalaus prieš avarinio režimo pradinių duomenų byloje. Iš pradžių prijungti ar atjungti linijas, transformatorius ir generatorius, kad būtų gauta reikiama tiriamojo režimo elektros tinklo schema.

Pradinių duomenų bylos generatorių dalyje būtina įrašyti tikrąsias vardinės (nominalios) galios S_N reikšmes ir trumpalaikės pereinamosios varžos x''_d reikšmes, nes pagal nutylėjimą priskiriama S_N reikšmė yra 100 MVA, o $x''_d=1,0$.

Generatoriams reikia įvesti atitinkamas reaktyviosios galios ribas. Veikiant skirtinga galia generatoriaus reaktyviosios galios ribos yra skirtingos. Jas koreguoti pagal generatorių galių diagramas arba dispečerių rekomendacijas. Mažos galios generatoriai turi nedideles reaktyviosios galios ribas todėl sistemai nėra labai aktualu įvesti tikslias reaktyviosios galios, tačiau didelės galios generatorių, tokių kaip Ignalinos AE, reaktyviosios galios ribos yra gana plačios ir priklauso nuo aktyviosios galios, todėl trūkstant reaktyviosios galios Q ar esant jos pertekliui šie generatoriai atlieka labai svarbų vaidmenį įtampų reguliavime ir būtina tiksliai įvedinėti jų galias.

Pereinamųjų procesų skaičiavimo seka suskirstyta į tris etapus:

- a) normalaus prieš avarinio režimo skaičiavimas ir paruošimas komutacijų modeliavimui;
- b) dinaminį elektros sistemos elementų parametrų įvedimas ir patikrinimas;
- c) pereinamojo proceso skaičiavimas.

Skaičiavimas pradedamas nuo galios srautų pasiskirstymo skaičiavimo normaliaame režime. Tam naudojama programa "Power Flow and Faults". Pirmiausia yra įvedama informacija apie elektros sistemos mazgus, apkrovas, generatorius, linijas, transformatorius, schemas suskirstymą sritimis ir zonomis. Nustatomos generatorių galios. Balansiniu mazgu turėtų būti parinktas kuris nors tiriamosios elektros energetikos sistemos generatoriaus mazgas. Kad skaičiuojant dinaminį elektros sistemos režimą žadinimo regulatoriai nebūtų pasiekę ribos, normalų režimą reikia suderinti taip, kad balansinio mazgo generatoriaus reaktyvioji galia neviršytų jo reaktyviosios galios leistinų ribų. Schemoje balansiniu mazgu gali būti parinktas tolimas ES mazgas, kurio nors LE generatoriaus mazgas (pavyzdžiui, 5821 mazgas ar 7777, ar 3333 mazgai). Pagrindinis normalaus režimo derinimo tikslas yra taip parinkti generatorių gnybtų įtampą ir autotransformatorių transformacijos koeficientus, kad elektros tinklo mazgų įtampos būtų $(0,9 - 1,1)U_N$ ribose (U_N – vardinė įtampa), o generatorių įtampas $(0,95 - 1,05)U_N$ ribose ir generatorių reaktyviosios galios neperžengtų leistinų ribų. Generatorių leistinos reaktyviosios galios ribos nustatomos pagal jų galių diagramas arba dispečerių rekomendacijas.

Sprendimo palengvinimui galima panaudoti PSS/E programų komplekso režimo optimizavimo programa "OPF". Uždavus mazgų įtampų ribas bei generatorių reaktyviųjų galių ribas bei nurodžius optimizavimo tikslą – "sumažinti" aktyviųjų ir reaktyviųjų galių nuostolius. Režimas suderinamas labai greitai. Jei sprendinio nėra, nesibalansuoja reaktyviosios galios, tenka ieškoti reaktyviosios galios balansavimo galimybių ir vėl kartoti skaičiavimą.

Skaičiuojant avarinius pereinamuosius procesus, iš pradžių nuo $-0,02$ s iki 0 s skaičiuojama neįvedus trikdžio. Laiko momentu $t=0$ įvedamas trikdys. Trikdžiais paprastai laikomi trifazis trumpasis jungimas arba maksimali technologinė avarija. Trumpojo jungimo 330kV linijose skaičiuojamasis

atjungimo laikas yra 0,14s. Tuo momentu yra atjungiamas pažeista linija arba šynos. Po to skaičiuojama iki nustatytos laiko ribos.

Skaičiuojant dinامينius režimus standartinis integravimo žingsnis yra 0,01 s. Skaičiuojant režimus, kurie yra arti stabilumo ribos gali pasireikšti skaitmeninis nestabilumas. Geriausia priemonė siekiant išvengti skaitmeninio nestabilumo – integravimo žingsnio mažinimas iki 0,001 s

11. Skaičiavimų duomenys

Stabilios sistemos skaičiavimas:

Trumpasis jungimas simuliuojamas pasirinktame mazge. Ieškomas laikas, prie kurio režimas nusistovi. Nusistovėjęs režimas stebimas ne tik šiame taške, bet ir kituose: Klaipėdos, Bitėnų, Benaičių, Varduvos, Priekulės, Šyšos. Jie lyginami ir jei matomas nestabilumas kuriame nors iš jų, priimama, kad sistema nestabili.

```
psspy.strt(0,r""1.out""")
psspy.run(0,0.0,0,1,0)
psspy.dynamics_solution_param_2([99,_i,_i,_i,_i,_i,_i,_i],[
0.20,_f, 0.001, 0.04,_f,_f,_f,_f])
psspy.run(0, 0.1,0,1,0)
psspy.dist_bus_fault(5349,1,0.0,[0.0,-0.2E+10])
#
psspy.run(0, 0.45,0,1,0)
psspy.dynamics_solution_param_2([999,_i,_i,_i,_i,_i,_i,_i],[
0.3,_f, 0.001, 0.08,_f,_f,_f,_f])
psspy.dist_clear_fault(1)
#
psspy.run(0, 40.00,0,1,0)
psspy.dynamics_solution_param_2([999,_i,_i,_i,_i,_i,_i,_i],[
0.3,_f, 0.001, 0.08,_f,_f,_f,_f])
pssplot.newplotbook()
pssplot.insertpage()
pssplot.setselectedpage(0)
pssplot.openchandatafile(r""C:\PSSE33\EXAMPLE\2016 metai+
\1.out""")
```

11.1. paveikslas. Skaičiavimo duomenys (pavyzdys)

Skaičiavimai atliekami prie numatomos generacijos ir apkrovų, kurios pateiktos lentelėje:

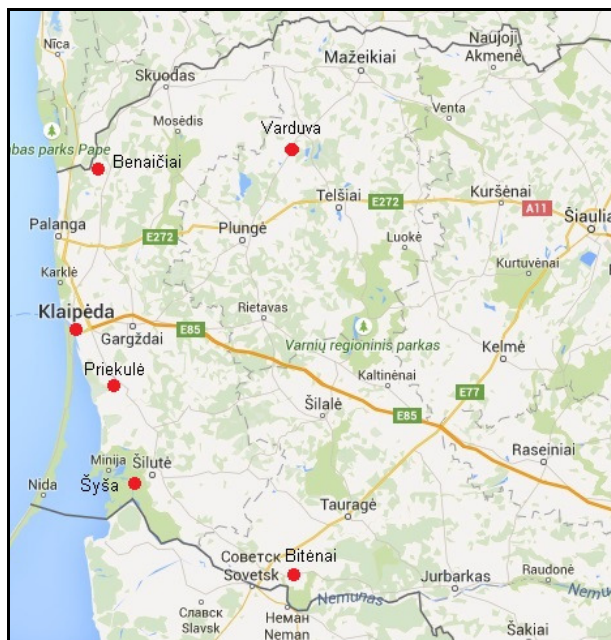
11.1.lentelė. Apkrovos ir generacija 2030 ir 2016 metais.

Šalis	2030 metai			
	Generacija, S (MVA)		Apkrova, S (MVA)	
	V min	Ž maks	V min	Ž maks
Lietuva	2162	3367	840	2311
	2016 metai			
	Gamyba, S (MVA)		Apkrova, S (MVA)	
	V min	Ž maks	V min	Ž maks
Lietuva	1368	2129	714	1900

11.2. lentelė. Prijungtų vėjo elektrinių galia. 2030 ir 2016 metais.

	2030 metai	2016 metai
Galia, P (MW)	753	446

Atstumai tarp prijunginių



11.3. paveikslas. Tiriamų mazgų išsidėstymas

11.3. lentelė. Atstumai tarp tiriamų mazgų.

Atkarpa	Atstumas
Klaipėda - Benaičiai	44 km
Klaipėda – Priekulė	24 km
Priekulė – Šyša	31 km
Šyša – Bitėnai	55 km
Benaičiai – Varduva	72 km
Varduva – Telšiai	40 km
Klaipėda – Telšiai	82 km

12. Skaičiavimai

Dinaminio stabilumo riba 2030 m. žiemos maksimumo režimu

12.1. Trumpas jungimas Klaipėdos 330kV mazge (6831)

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,6

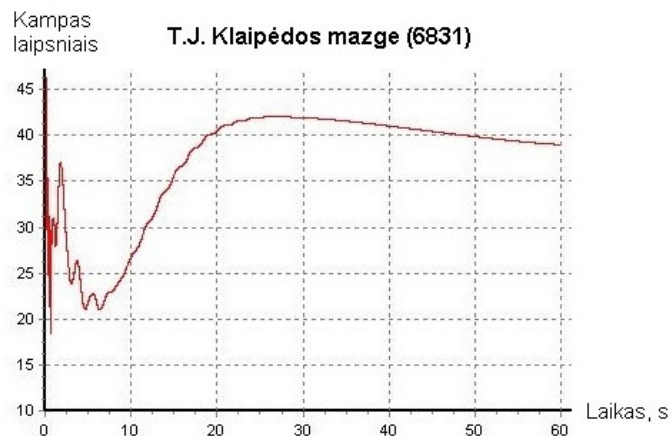
Nestabilumo ribos:

12.1.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	37 – 21	16
Bitėnai (6832)	32 – 16	16
Šyša (6835)	34 – 18	16
Benaičiai (5291)	37 – 22	15
Varduva (5471)	34 – 18	16
Priekulė (5349)	36 – 19	17

12.1.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,2	+
0,4	+
0,6	+
0,61	-
0,65	-
0,7	-

**12.1.1. paveikslas. Stabilus režimas Klaipėdos mazge (t.j. – 0,60s)****12.2. Trumpas jungimas Bitėnų 110kV mazge (6832)**

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,23

Nestabilumo ribos:

12.2.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	47 – 43	4
Bitėnai (6832)	42 – 36	6
Šyša (6835)	45 – 40	5
Benaičiai (5291)	47 – 43	4
Varduva (5471)	41 – 37	4
Priekulė (5349)	41 – 45	4

12.2.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,15	+
0,23	+
0,25	-
0,5	-
0,6	-



12.2.1. paveikslas. Stabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,23s)



12.2.2. paveikslas. Nestabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,25s)

12.3. Trumpas jungimas Šyša 330kV mazge (6835)

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,26s

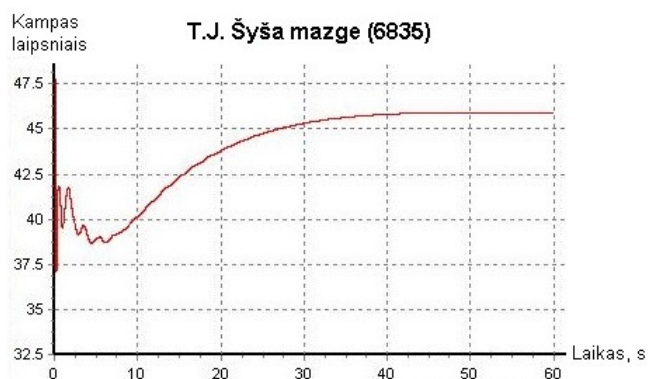
Nestabilumo ribos:

12.3.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	44 – 41	3
Bitėnai (6832)	39 – 36	3
Šyša (6835)	42 – 38	4
Benaičiai (5291)	44 – 41	3
Varduva (5471)	40 – 36	4
Priekulė (5349)	42 – 39	3

12.3.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,15	+
0,2	+
0,26	+
0,27	-
0,28	-
0,3	-
0,4	-



12.3.1. paveikslas. Stabilus režimas Šyša mazge (t.j. – 0,26s)

12.4. Trumpas jungimas Benaičių 110kV mazge (5291)

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,16s

Nestabilumo ribos:

12.4.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	44,7 – 45,7	1
Bitėnai (6832)	39,4 – 40,4	1
Šyša (6835)	42,4 – 43,4	1
Benaičiai (5291)	41 – 46	5
Varduva (5471)	38,3 – 40,6	2,3
Priekulė (5349)	43,4 – 44,3	1

12.4.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,14	+
0,16	+
0,17	-
0,18	-
0,20	-



12.4.1. paveikslas. Stabilus režimas Benaičių mazge (t.j. – 0,16s)

12.5. Trumpas jungimas Varduvos 110kV mazge (5471)

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,19s

Nestabilumo ribos:

12.5.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	44,6 – 45,6	1
Bitėnai (6832)	39,4 – 40,4	1
Šyša (6835)	42,4 – 43,4	1
Benaičiai (5291)	44,2 – 45,8	1,6
Varduva (5471)	36 – 41	5
Priekulė (5349)	43,2 – 44,2	1

12.5.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,14	+
0,19	+
0,20	-
0,22	-
0,24	-

**12.5.1. paveikslas.** Stabilus režimas Varduvos mazge (t.j. – 0,19s)**12.6. Trumpas jungimas Priekulės 110kV mazge (5349)**

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,2s

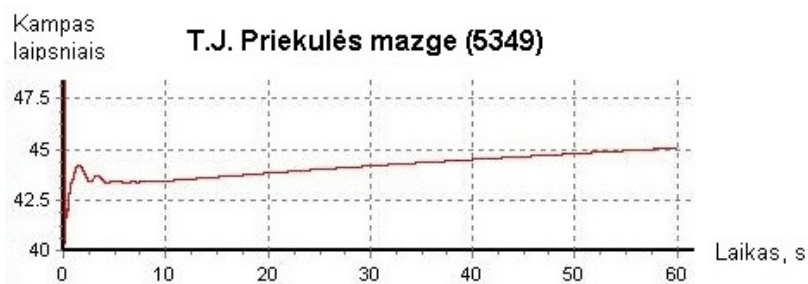
Nestabilumo ribos:

12.6.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	44,7 – 45,7	1
Bitėnai (6832)	39,3 – 40,3	1
Šyša (6835)	42,3 – 43,4	1
Benaičiai (5291)	44,2 – 45,8	1,6
Varduva (5471)	39 – 40,5	1,5
Priekulė (5349)	41 – 44	3

12.6.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,2	+
0,21	-
0,22	-
0,25	-
0,3	-
0,4	-

**12.6.1. paveikslas. Stabilus režimas Priekulės mazge (t.j. – 0,2s)****13. Dinaminio stabilumo riba 2016 m. žiemos maksimumo režimu****13.1. Trumpas jungimas Klaipėdos 330kV mazge (6831)**

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 2,6

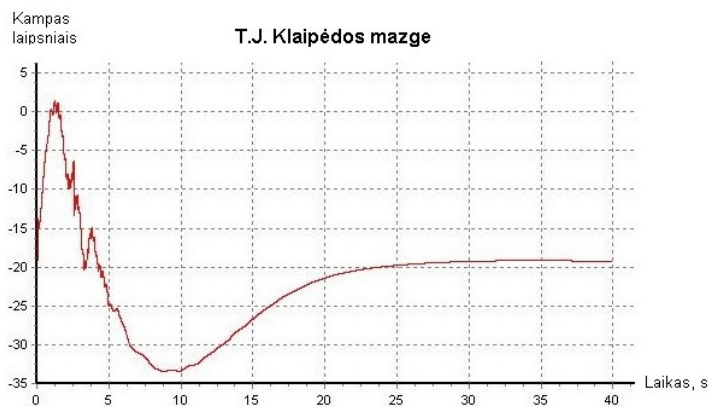
Nestabilumo ribos:

13.1.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	-6 – (-34)	28
Bitėnai (6832)	-7 – (-32)	25
Šyša (6835)	-8 – (-33)	25
Benaičiai (5291)	-8 – (-28)	20
Varduva (5471)	-12 – (-35)	23
Priekulė (5349)	-7 – (-33)	26

13.1.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,9	+
2,0	+
2,6	+
2,65	-
2,8	-



13.1.1. paveikslas. Stabilus režimas Klaipėdos mazge (t.j. – 2,60s)

13.2. Trumpas jungimas Bitėnai 330kV mazge (6832)

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,28s.

Nestabilumo ribos:

13.2.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	10 – (-7,5)	17,5
Bitėnai (6832)	15 – (-4)	19
Šyša (6835)	12,5 – (-7)	19,5
Benaičiai (5291)	14 – (-4,5)	18,5
Varduva (5471)	8 – (-11)	19
Priekulė (5349)	11 – (-11)	22

13.2.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,28	+
0,29	-
0,30	-
0,32	-
0,34	-



13.2.1. paveikslas. Stabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,28s)

Kai trumpo jungimo laikas 0,29 s jau matomas sistemos nestabilumas.



13.2.2. paveikslas. Nestabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,29s)

13.3. Trumpas jungimas Šyša 330kV mazge (6835)

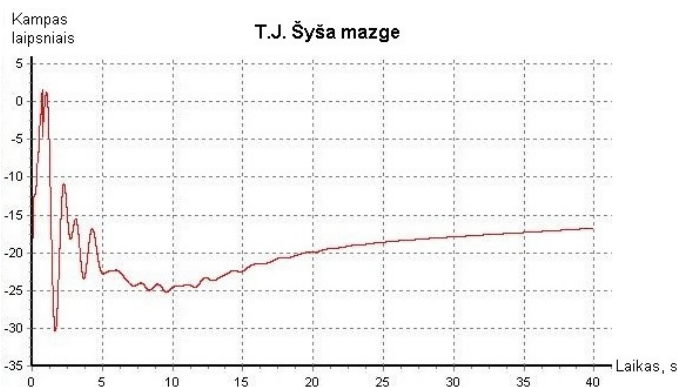
Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,75s.

13.3.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, 9laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	-3 – (-30)	27
Bitėnai (6832)	5 – (-32)	27
Šyša (6835)	2 – (-30)	28
Benaičiai (5291)	3 – (-25)	22
Varduva (5471)	-4 – (-33)	29
Priekulė (5349)	1 – (-28)	27

13.3.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,7	+
0,75	+
0,77	-
0,8	-



13.3.1. paveikslas. Stabilus režimas Šyša mazge (t.j. – 0,75s)

13.4. Trumpas jungimas Benaičiai 110kV mazge (5291)

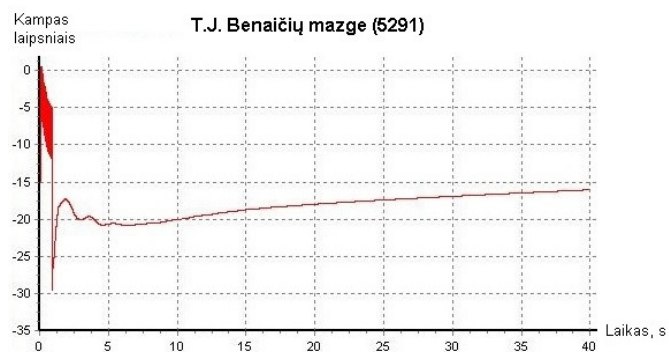
Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,9s.

13.4.1. lentelė. Atsistatymo laikas

Mazgas	Laikas, s
Klaipėda (6831)	4
Bitėnai (6832)	4
Šyša (6835)	6
Benaičiai (5291)	3
Varduva (5471)	12
Priekulė (5349)	14

13.4.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,7	+
0,8	+
0,9	+
1,0	-

**13.4.1. paveikslas.** Stabilus režimas Benaičių mazge (t.j. – 0,9s)**13.5. Trumpas jungimas Varduva 110kV mazge (5471)**

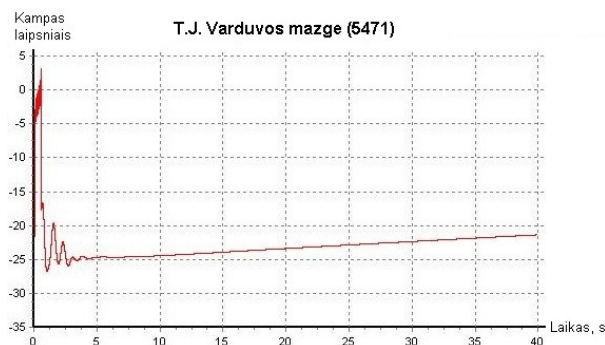
Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,6s.

13.5.1. lentelė. Atsistatymo laikas

Mazgas	Laikas, s
Klaipėda (6831)	5
Bitėnai (6832)	7
Šyša (6835)	6
Benaičiai (5291)	6
Varduva (5471)	7
Priekulė (5349)	6

13.5.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,6	+
0,7	-
0,8	-



13.5.1. paveikslas. Stabilus režimas Varduvo mazge (t.j. – 0,6s)

13.6. Trumpas jungimas Priekulės 110kV mazge (5349)

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,45s.

13.6.1. lentelė. Atsistatymo laikas

Mazgas	Laikas, s
Klaipėda (6831)	5
Bitėnai (6832)	7
Šyša (6835)	6
Benaičiai (5291)	6
Varduva (5471)	7
Priekulė (5349)	8

13.6.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,45	+
0,46	-
0,5	-
0,55	-



13.6.1. paveikslas. Stabilus režimas Priekulės mazge (t.j. – 0,45s)

14. Dinaminio stabilumo riba 2030 m. vasaros minimumo režimu

14.1. Trumpas jungimas Klaipėdos 330kV mazge (6831)

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,58

Nestabilumo ribos:

14.1.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	65 – 46	19
Bitėnai (6832)	56 – 38	18
Šyša (6835)	61 – 43	18
Benaičiai (5291)	68 – 49	19
Varduva (5471)	62 – 44	18
Priekulė (5349)	65 – 46	19

14.1.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,58	+
0,59	-
0,60	-



14.1.1. paveikslas. Stabilus režimas Klaipėdos mazge (t.j. – 0,58s)

14.2 Trumpas jungimas Bitėnų 110kV mazge (6832)

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,20

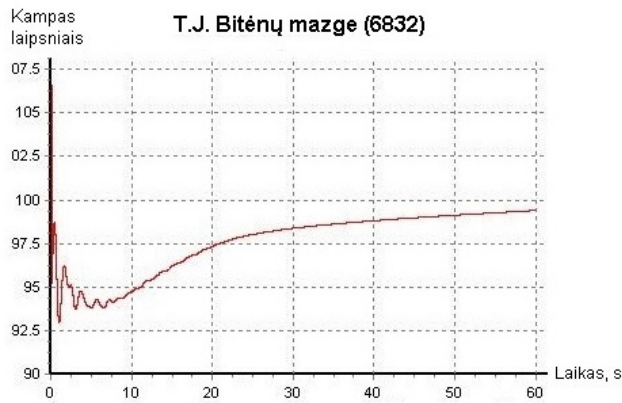
Nestabilumo ribos:

14.2.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	103 – 106	3
Bitėnai (6832)	99 – 92	7
Šyša (6835)	102,5 – 97,5	5
Benaičiai (5291)	107,5 – 102	5,5
Varduva (5471)	103 – 98	5
Priekulė (5349)	105,5 – 101,5	4

14.2.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,2	+
0,21	-
0,22	-
0,25	-
0,3	-
0,4	-



14.2.1. paveikslas. Stabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,20s)



14.2.3. paveikslas. Nestabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,25s)

Kai trumpas jungimas trunka 0,21s sistema jau pradeda prarasti stabilumą. Kampas pradeda didėti.

14.3. Trumpas jungimas Šyša 330kV mazge (6835)

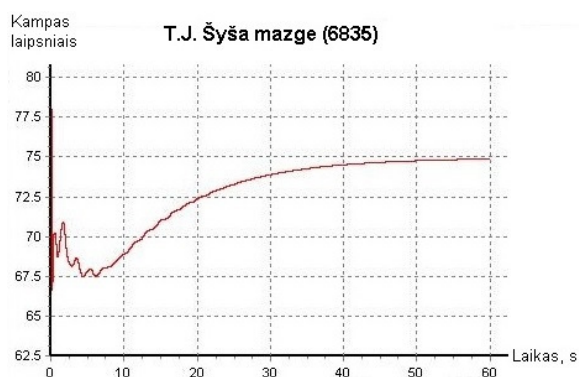
Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,24s

14.3.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	74,5 – 71,5	3
Bitėnai (6832)	66 – 63,5	2,5
Šyša (6835)	71,5 – 67,5	4
Benaičiai (5291)	76 – 73	3
Varduva (5471)	71,5 – 68,5	3
Priekulė (5349)	74 – 71,5	3

14.3.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,2	+
0,23	+
0,24	+
0,25	-
0,27	-
0,3	-



14.3.1. paveikslas. Stabilus režimas Šyša mazge (t.j. – 0,24s)

14.4. Trumpas jungimas Benaičių 110kV mazge (5291)

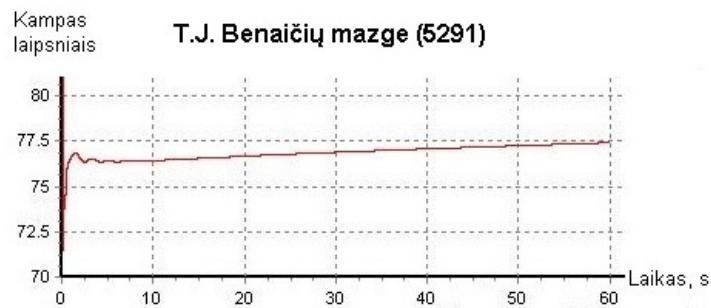
Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,14s

14.4.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	75 – 74, 1	0,9
Bitėnai (6832)	66,8 – 65,8	1
Šyša (6835)	71,2 – 70,2	1
Benaičiai (5291)	77 – 73	4
Varduva (5471)	72 – 70,2	1,8
Priekulė (5349)	74,7 – 73,4	1,3

14.4.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,14	+
0,15	-
0,16	-
0,17	-



14.4.1. paveikslas. Stabilus režimas Benaičių mazge (t.j. – 0,14s)



14.4.2. paveikslas. Nestabilus režimas Bitėnų mazge, kai t.j. Benaičiuose (t.j. – 0,15s)

14.5. Trumpas jungimas Varduvos 110kV mazge (5471)

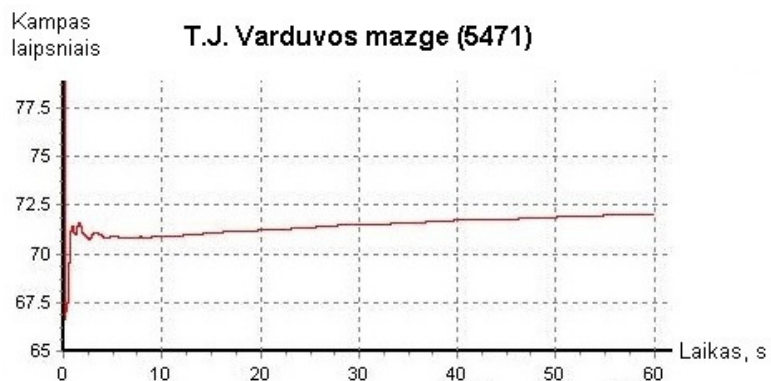
Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,15s

14.5.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	74,5 – 73,2	1,3
Bitėnai (6832)	66,1 – 65,1	1
Šyša (6835)	42,4 – 43,4	1
Benaičiai (5291)	76,3 – 74,3	2
Varduva (5471)	71,5 – 66	5,5
Priekulė (5349)	74,2 – 72,8	1,4

14.5.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,15	+
0,16	-
0,17	-
0,18	-
0,19	-



14.5.1. paveikslas. Stabilus režimas Varduvo mazge (t.j. – 0,15s)

14.6. Trumpas jungimas Priekulės 110kV mazge (5349)

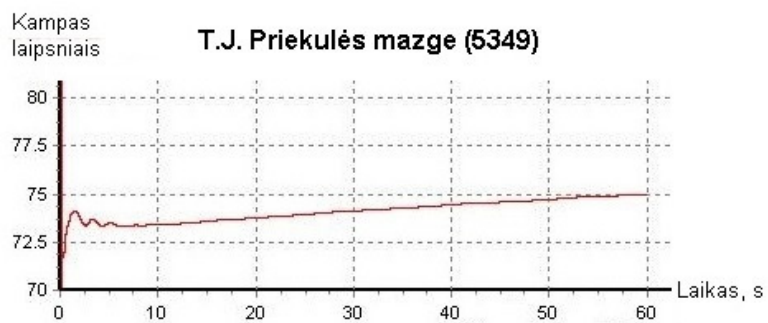
Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,17s

14.6.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	74,4 – 73,3	1,1
Bitėnai (6832)	66,2 – 65,2	1
Šyša (6835)	70,5 – 69,5	1
Benaičiai (5291)	76,2 – 74,8	1,4
Varduva (5471)	71,5 – 70	1,5
Priekulė (5349)	74 – 70	4

14.6.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,17	+
0,18	-
0,19	-
0,2	-



14.6.1. paveikslas. Stabilus režimas Priekulės mazge (t.j. – 0,17s)

15. Dinaminio stabilumo riba 2016 m. vasaros minimumo režimu

15.1 Trumpas jungimas Klaipėdos 330kV mazge (6831)

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 2,35s

15.1.1. lentelė. Atsistatymo laikas.

Mazgas	Atsistatymo laikas, s
Klaipėda (6831)	28
Bitėnai (6832)	14
Šyša (6835)	14
Benaičiai (5291)	13
Varduva (5471)	12
Priekulė (5349)	27

15.1.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
2,35	+
2,4	-
2,5	-
2,6	-



15.1.1. paveikslas. Stabilus režimas Klaipėdos mazge (t.j. – 2,35s)

15.2. Trumpas jungimas Bitėnai 330kV mazge (6832)

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,26s.

15.2.1. lentelė. Atsistatymo laikas.

Mazgas	Atsistatymo laikas, s
Klaipėda (6831)	17
Bitėnai (6832)	21
Šyša (6835)	14
Benaičiai (5291)	13
Varduva (5471)	12
Priekulė (5349)	20

15.2.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,26	+
0,27	-
0,28	-
0,30	-



15.2.1. paveikslas. Stabilus režimas Bitėnų mazge (t.j. – 0,26s)

15.3. Trumpas jungimas Šyša 330kV mazge (6835)

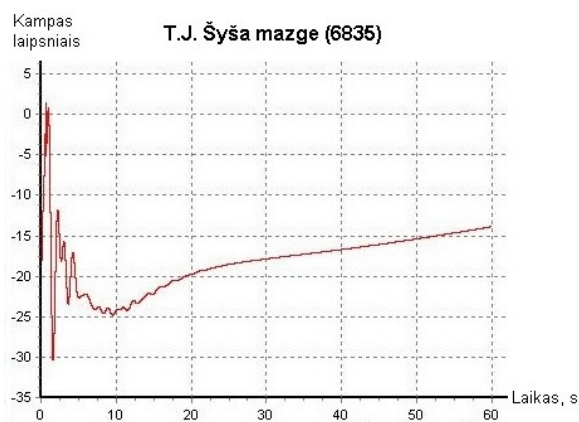
Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,72s.

15.3.1. lentelė. Atsistatymo laikas.

Mazgas	Atsistatymo laikas, s
Klaipėda (6831)	12
Bitėnai (6832)	14
Šyša (6835)	22
Benaičiai (5291)	11
Varduva (5471)	12
Priekulė (5349)	18

15.3.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,72	+
0,73	-
0,75	-
0,8	-



15.3.1. paveikslas. Stabilus režimas Šyša mazge (t.j. – 0,72s)

15.4. Trumpas jungimas Benaičiai 110kV mazge (5291)

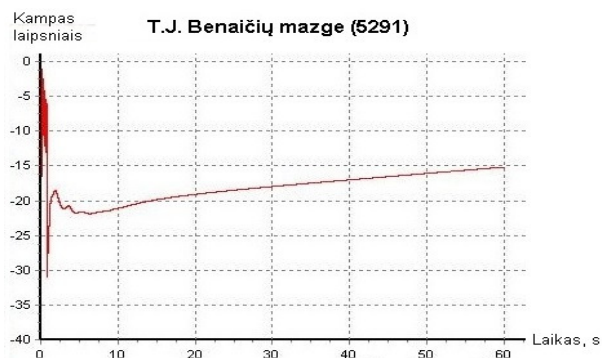
Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,84s.

15.4.1. lentelė. Atsistatymo laikas.

Mazgas	Laikas, s
Klaipėda (6831)	10
Bitėnai (6832)	12
Šyša (6835)	11
Benaičiai (5291)	18
Varduva (5471)	9
Priekulė (5349)	8

15.4.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,84	+
0,85	-
0,9	-



15.4.1. paveikslas. Stabilus režimas Benaičių mazge (t.j. – 0,84s)

15.5. Trumpas jungimas Varduva 110kV mazge (5471)

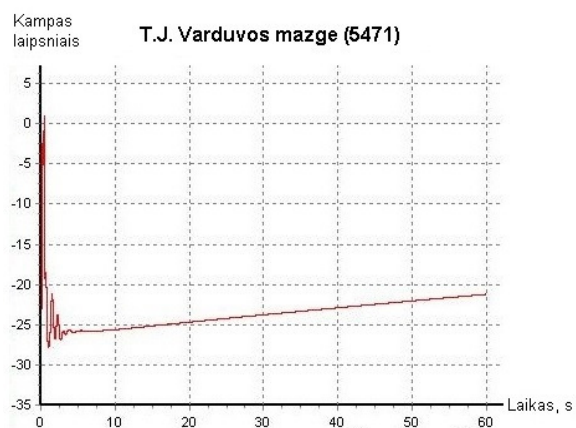
Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,57s.

15.5.1. lentelė. Atsistatymo laikas.

Mazgas	Laikas, s
Klaipėda (6831)	8
Bitėnai (6832)	11
Šyša (6835)	7
Benaičiai (5291)	8
Varduva (5471)	12
Priekulė (5349)	8

15.5.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,55	+
0,57	+
0,58	-
0,6	-



15.5.1. paveikslas. Stabilus režimas Varduvos mazge (t.j. – 0,57s)

15.6. Trumpas jungimas Priekulės 110kV mazge (5349)

Trikdžio laikas po kurio sistema stabilumo dar nepraranda – 0,43s.

15.6.1. lentelė. Atsistatymo laikas.

Mazgas	Laikas, s
Klaipėda (6831)	8
Bitėnai (6832)	12
Šyša (6835)	8
Benaičiai (5291)	6
Varduva (5471)	10
Priekulė (5349)	11

15.6.2. lentelė. Skaičiuoti trumpieji jungimai.

Trumpo jungimo laikas	Stabilumas
0,40	+
0,43	+
0,44	-
0,45	-



15.6.1. paveikslas. Stabilus režimas Priekulės mazge (t.j. – 0,43s)

16. Rezultatų analizė

Visi skaičiavimai atlikti naudojantis PSSE programa. Ištirta Lietuvos elektros energetikos sistemos vakarų ir pietvakarių regiono dinaminis stabilumas. Buvo priimta, kad vėjo elektrinių galia 2016 metais galėtų būti apie 450 MW, o 2030 metais apie 750 MW. Tokios galios pasirinktos ir su jomis atlikti skaičiavimai dėl to, kad siekta įvertinti Lietuvos elektros energetikos sistemos stabilumą pagal ambicingąjį planą. Buvo stebėta kaip sistema atsistato po įvesto trikdžio, buvo ieškomi kritiniai dinaminio stabilumo laikai, kada sistema jau iškrenta iš dinaminio stabilumo ir nebeatsistato.

Skaičiavimai atlikti keturiais etapais. Tirta žiemos maksimumo (Žmaks) režimas 2030 ir 2016 metais kai generuojama galia Lietuvoje yra didžiausia, atitinkamai 3367 MVA ir 2129 MVA. Taip pat tirta vasaros minimumo (Vmin) režimas 2030 ir 2016 metais. Rezultatų duomenys pateikiami lentelėje.

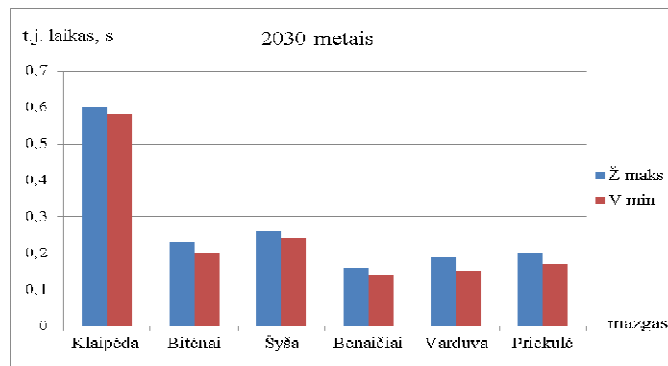
16.1. lentelė. Stabilumo ribos 2030 m.

Mazgas	2030 metai			
	Ž maks	V min	Laiko pokytis, s	Pokytis %
Klaipėda (6831)	0,60	0,58	0,02	3,33
Bitėnai (6832)	0,23	0,20	0,03	13,04
Šyša (6835)	0,26	0,24	0,02	7,69
Benaičiai (5291)	0,16	0,14	0,02	12,50
Varduva (5471)	0,19	0,15	0,04	21,05
Priekulė (5349)	0,20	0,17	0,03	15,00
Vidurkis			0,027	12,10

16.2. lentelė. Stabilumo ribos 2016 m.

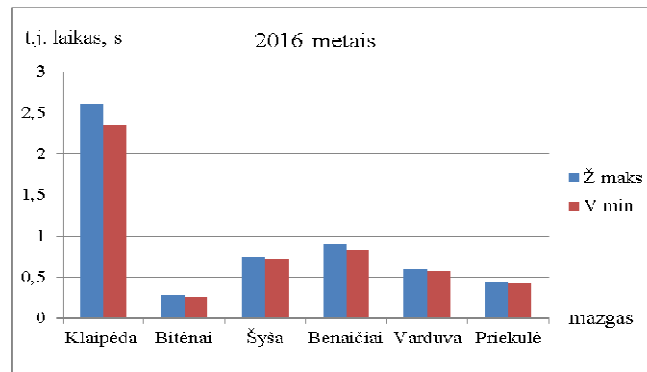
Mazgas	2016 metai			
	Ž maks	V min	Laiko pokytis, s	Pokytis %
Klaipėda (6831)	2,6	2,35	0,25	9,62
Bitėnai (6832)	0,28	0,26	0,02	7,14
Šyša (6835)	0,75	0,72	0,03	4,00
Benaičiai (5291)	0,9	0,84	0,06	6,67
Varduva (5471)	0,60	0,57	0,03	5,00
Priekulė (5349)	0,45	0,43	0,02	4,44
Vidurkis			0,068	6,14

Iš rezultatų matome, kad 2030 metais prie skaičiuojamos galios vasaros minimumo režimu trumpojo jungimo laikas yra trumpesnis negu žiemos maksimumo. Tai yra vasarą įvykus trumpajam jungimui sistema yra jautresnė trikdžiams ir dinaminio stabilumo ribos yra mažesnės. Sistemai reikės mažesnio trumpojo jungimo laiko kad iškristų iš stabilumo ir nebeatsistatytų. Taip yra todėl, kad vasarą daugiau generatorių yra išjungta, nes reikalinga apkrova vasaros minimumo laikotarpiu yra mažesnė nei žiemos maksimumo. Vėjo elektrinių galia abiem režimams yra tokia pati. Kadangi dalis generatorių vasaros minimumo režime atjungta rezervavimas nepagamintai galiai yra sunkiau pasiekiamas likusioms Lietuvos elektrinėms.



16.1. paveikslas. 2030 metų stabilumo ribos palyginimas vasaros minimumo ir žiemos maksimumo laikotarpiu.

2016 metų tyrimas atliktas pagal tokį patį principą kaip ir 2030 metams. 2016 metais prijungta vėjo elektrinių galia yra mažesnė. Priimta, kad jų galia bus 446 MW. Iš atliktų skaičiavimo rezultatų matome, kad vasaros minimumo režimu kaip ir 2030 metais trumpojo jungimo laikas yra mažesni nei žiemos maksimumo. Klaipėdos mazge įvedus trikdį dinaminis stabilumas prarandamas po ilgesnio laiko (\check{Z} maks – 2,6s ir V min – 2,35s). Tai rodo, kad Klaipėdos mazgas yra stipresnis ir įvykus trumpajam jungimui stabilumo greitai nepraras.



16.2. paveikslas. 2016 metų stabilumo ribos palyginimas vasaros minimumo ir žiemos maksimumo laikotarpiu.

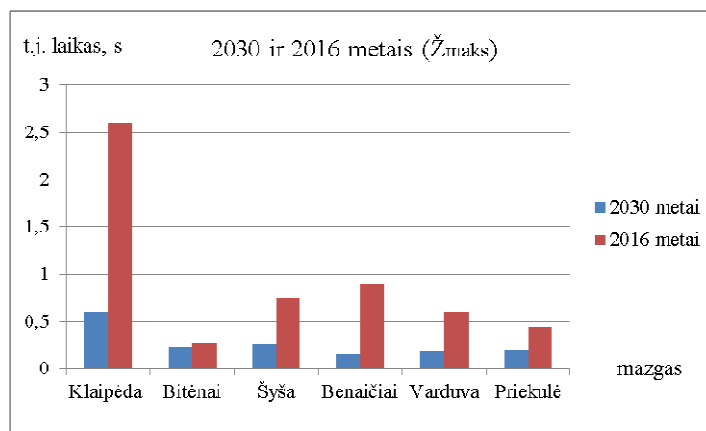
Lyginant trikdžio laiką 2030 ir 2016 metais po kurio sistema dar yra stabili trumpo jungimo laikas 2016 metais yra akivaizdžiai didesnis. Žiemos maksimumo režimu vidutiniškai 61,04 % didesnis nei 2030 metais, vasaros minimumo laikotarpiu vidutiniškai – 63,76 %. Tai rodo, kad padidėjus instaliuotai galiai nuo 446 MW iki 753 MW daugiau nei 300 MW matomas ryškus sistemos stabilumo sumažėjimas.

16.2. 2. lentelė. Trumpo jungimo laiko palyginimas Žmaks režimu.

Metai	2016	2030	Pokytis, s	Pokytis, %
Mazgas	Ž maks	Ž maks		
Klaipėda (6831)	2,6	0,6	2	76,92
Bitėnai (6832)	0,28	0,23	0,05	17,86
Šyša (6835)	0,75	0,26	0,49	65,33
Benaičiai (5291)	0,9	0,16	0,74	82,22
Varduva (5471)	0,6	0,19	0,41	68,33
Priekulė (5349)	0,45	0,2	0,25	55,56
Vidurkis			0,657	61,04

16.2. 3. lentelė. Trumpo jungimo laiko palyginimas Vmin režimu.

Metai	2016	2030	Pokytis, s	Pokytis, %
Mazgas	V min	V min		
Klaipėda (6831)	2,35	0,58	1,77	75,32
Bitėnai (6832)	0,26	0,2	0,06	23,08
Šyša (6835)	0,72	0,24	0,48	66,67
Benaičiai (5291)	0,84	0,14	0,7	83,33
Varduva (5471)	0,57	0,15	0,42	73,68
Priekulė (5349)	0,43	0,17	0,26	60,47
Vidurkis			0,615	63,76



16.3. paveikslas. 2016 ir 2030 metų stabilumo ribos palyginimas žiemos maksimumo laikotarpiu.

Atliekant tyrimą pastebėta, kad tolstant nuo trumpo jungimo vietos mazgo stabilumas yra geresnis ir mazgas atsistato greičiau. Vienas iš pavyzdžių: trumpas jungimas Bitėnų mazge. 2030 metų žiemos maksimumo režimas. Iš rezultatų lentelės (**16.1. lentelė.** Stabilumo ribos) matome, kad kritinis trikdžio laikas yra 0,23 sekundės. Rastos stabilumo ribos kituose tiriamuose mazguose pateiktos lentelėje (kitų mazgų grafikai pateikti priede):

12.2.1. lentelė. Nestabilumo ribos.

Mazgas	Kampas, laipsniais	Pokytis laipsniais
Klaipėda (6831)	47 – 43	4
Bitėnai (6832)	42 – 36	6
Šyša (6835)	45 – 40	5
Benaičiai (5291)	47 – 43	4
Varduva (5471)	41 – 37	4
Priekulė (5349)	41 – 45	4

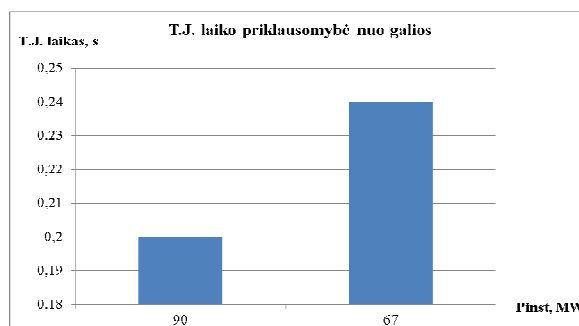
Buvo stebėta kokia amplitudė keičiasi įtampos fazės kampas kiekviename tirtame mazge, kiekvieno režimo atveju. Iš lentelės matome, kad kai trikdys yra Bitėnuose, kampo pokytis 6 laipsniai. Tolstant nuo trikdžio vietos, nuo Bitėnų mazgo kampo pokytis yra mažesnis.

Iš tirtų mazgų rezultatų lentelės taip pat pastebėta, kad silpniausi mazgai 2030 metai vasaros minimumo režimu yra Varduvos ir Benaičių mazgai. Trikdys programoje pašalinamas 0,14 sekundę, o šių mazgų kritiniai laikai yra 0,14s ir 0,15s. Vadinasi esant ilgesniam trumpo jungimo laikui arba sistemos sutrikimui prie tokios prijungtos galios tikėtinas šių mazgų nestabilumas.

Atlikus tyrimą taip pat pastebėta, kad mazguose, kur prijungta daugiau vėjo elektrinių, trumpojo jungimo laikas yra mažesnis. Sistema nepraranda stabilumo tik prie mažesnio trumpojo jungimo laiko. Rezultatai palyginami lentelėje. Tokia pati vėjo elektrinių galios įtaka trumpojo jungimo laikui pastebėta ir kituose režimuose.

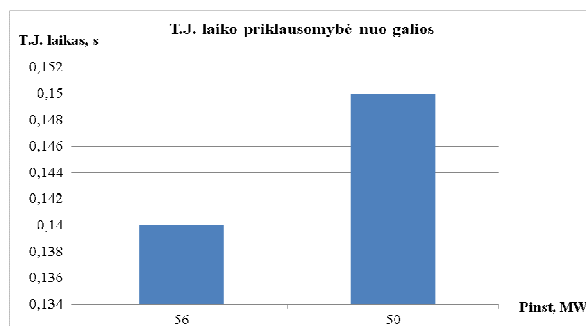
16.3. lentelė. Trumpo jungimo laiko priklausomybė nuo galios.

Mazgas 330kV	2030 metai, V_{min} trumpo jungimo laikas	VE galia P_{inst}, MW
Bitėnai (6832)	0,20	90
Šyša (6835)	0,24	67

**16.4. paveikslas.** Trumpo jungimo laiko priklausomybė nuo įdiegtos vėjo elektrinių galios.

16.4. lentelė. Trumpo jungimo laiko priklausomybė nuo galios.

Mazgas 110kV	2030 metai, Vmin trumpo jungimo laikas	VE galia Pinst, MW
Benaičiai (5291)	0,14	56
Varduva (5471)	0,15	50



16.5. paveikslas. Trumpo jungimo laiko priklausomybė nuo įdiegtos vėjo elektrinių galios.

17. Išvados

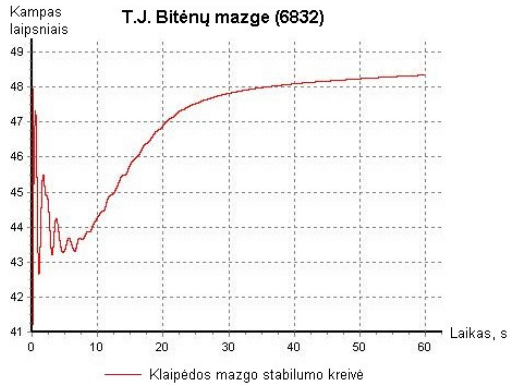
1. Darbe apžvelgta elektros energijos prognozės iki 2030 metų, vėjo elektrinių generatorių tipai bei modeliai, vėjo elektrinių paplitimas, didžiausi VE parkai Lietuvoje.
2. Atlikus Lietuvos vakarinės ir pietvakarinės dalies linijų apkrautumo apžvalgą pastebėta, kad norint plėsti vėjo elektrinių parkus, reikia atsižvelgti į tai, kad vasaros importo metu vakarinėje Lietuvos dalyje linijos bus perkrautos. Todėl siekiant didesnio pralaidumo reikalinga linijų rekonstrukcija.
3. Atlikus dinaminio stabilumo skaičiavimus 2016 ir 2030 metais žiemos maksimumo ir vasaros minimumo režimuose gauta, kad tolstant nuo trumpojo jungimo vietos, tolesniuose mazguose stabilumo ribos yra mažesnės. Sistema atsistato greičiau.
4. Mazguose, kur prijungta daugiau vėjo elektrinių, trumpojo jungimo laikas mažesnis. Bitėnų mazge prijungta vėjo elektrinių galia 90 MW trumpo jungimo laikas – 0,2s, Šyša mazge prijungta galia yra 67MW – trumpo jungimo laikas 0,24s, vasaros minimumo režime. Reiškia sistema nepraranda stabilumo tik prie mažesnio trumpojo jungimo laiko.
5. Iš tyrimo rezultatų pastebėta, kad trumpojo jungimo laikas, po kurio sistema neiškrenta iš stabilumo, vasaros minimumo skaičiavimuose yra mažesnis nei žiemos maksimumo skaičiavimuose. 2016 metais trumpo jungimo laikas mažesnis 6,14%, o 2030 metais – 12,10%. Taip yra dėl to, kad dalis generatorių yra atjungta dėl mažesnės apkrovos ir įvykus trumpam jungimui, reikalingas didesnis rezervavimas.
6. Lyginant 2016 metų vasaros minimumo ir žiemos maksimumo režimų rezultatus su 2030 metų režimais, gauta, kad trumpojo jungimo laikai 2016 metais yra ilgesni nei 2030 metais. Vasaros minimumo režimu ilgesni – 63,76 %, o žiemos maksimumo režimu – 61,04 %. Todėl, kad suminė galia atiduodama į Lietuvos elektros sistemos tinklą yra mažesnė.
7. Iš tyrimo pastebėta, kad t.j. laikas Klaipėdos mazge yra didesnis nei kitų mazgų. Klaipėdos mazgas yra stipresnis už kitus tirtus mazgus.

18. Literatūros sąrašas

1. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija. 2013 m. 12 mėn. Prieiga per internetą: <http://www.regula.lt/SiteAssets/aukcionai/2-aukcionas/2-12.pdf>
2. Elektros energetikos poreikių prognozės iki 2050 m. Prieiga per internetą: http://www.elektroklubas.lt/archyvas/index.php?option=com_content&task=view&id=1438&Itemid=92
3. Vėjo jėgainių tipai. Prieiga per internetą: <http://www.vejojegaines.lt/content/view/101/30/>
4. Lars Lindgen, Jorgen Svensson and Lars Gertmar, July 2012. “Generic models for wind power plants”
5. Anca D. Hansen, Poul Sorensen, Frede Blaabjerg and John Becho. Wind engineering volume 26, No.4, 2002. “Dynamic modelling of wind farm grid interaction.
6. Lucy Y. Pao ir Kathryn E. Johnson, June 10-12, 2009. “A tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms”.
7. Vėjo elektrinių plėtros galimybių analizė. 2009m. Prieiga per internetą: http://www.ena.lt/doc_atasi/VEPG_1_dalis.pdf
8. J.G. Slootweg, H. Polinder, W.L. Kling, 2001. “Dynamic modelling of wind turbine with doubly fed induction generator”
9. E. V. Nevardauskas. Vėjo energetikos įtaka elektros tinklui.
10. Anca D.Hansen, Poul Sorensen, Frede Blaabjerg ir John Becho, Wind engineering volume 26, No 4, 2002. “Dynamic modelling of wind farm grid interaction”.
11. Vėjo energetika Lietuvoje. 2011 m. Prieiga per internetą: http://lt.wikipedia.org/wiki/V%C4%97jo_energetika_Lietuvoje
12. Vėjo jėgainių plėtra Lietuvoje stringa biurokratinuose gniaužtuose. Prieiga per internetą: http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija_ir_energetika/S-12628/straipsnis/Vejo-jegainiu-pletra-Lietuvoje-stringa-biurokratinuose-gniauztuose-Video?l=2&p=1
13. Vėjo energetika Lietuvoje pasiekė plėtros ribas? Prieiga per internetą: <https://www.swedbank.lt/lt/articles/view/2107>

19. Priedai

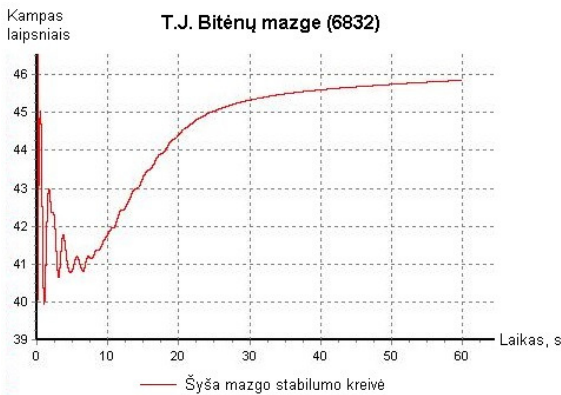
Kai trumpas jungimas Bitėnų mazge (2030m. Žmaks) gaunami tokie rezultatai kituose mazguose siekiant išsiaiškinti stabilumo ribas. Taip buvo tiriami visi mazgai visuose režimuose. Stebimas stabilumas tolstant nuo trikdžio vietos ir ieškomas kritinis taškas. Jei bent viename mazge pastebimas nestabilus režimas, sistema – nestabili.



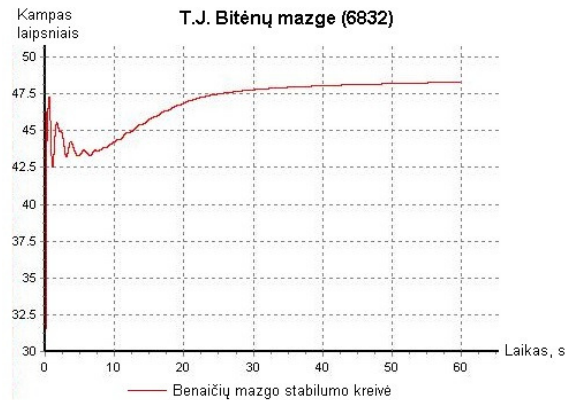
Klaipėdos mazgas



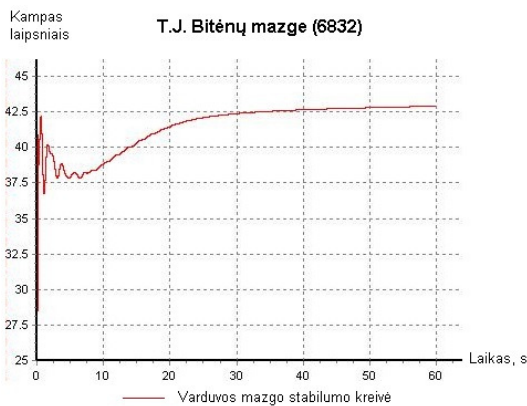
Bitėnų mazgas



Šyša mazgas



Benaičių mazgas



Varduvos mazgas



Priekulės mazgas