



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Baterijų energijos kaupimo sistemos su sintetine inercija įtakos elektros sistemos dažnio charakteristikoms tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Dovydas Galvydis**

Projekto autorius

**Doc. Almantas Bandza**

Vadovas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Baterijų energijos kaupimo sistemos su sintetine inercija įtakos elektros sistemos dažnio charakteristikoms tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Dovydas Galvydis**

Projekto autorius

**Doc. Almantas Bandza**

Vadovas

**Lekt. Ramūnas Deltuva**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Dovydas Galvydis

## **Baterijų energijos kaupimo sistemos su sintetinė inercija įtakos elektros sistemos dažnio charakteristikoms 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.

Dovydas Galvydis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Galvydis, Dovydas. Baterijų energijos kaupimo sistemos su sintetinė inercija įtakos elektros sistemos dažnio charakteristikoms tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Almantas Bandza; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: energijos kaupimo sistema, sintetinė inercija, elektros sistema.

Kaunas, 2021. 50 p.

### **Santrauka**

Baigiamojo magistro darbo tikslas - atlikti sintetinės inercijos, kuriamos baterijų energijos kaupimo sistemos, įtakos analizę elektros sistemos dažninėms charakteristikoms. Šis baigiamasis magistro tyrimas sudarytas iš trijų pagrindinių dalių. Visų pirma, pirmajame darbo skyriuje pateikiama literatūros apžvalga. Joje aptariami kitų autorių moksliniai darbai apie natūraliai susidarančios elektros sistemos inercijos mažėjimo priežastis, pasekmes bei problemos sprendimo būdus naudojant sintetinę inerciją, išgaunamą iš baterijų energijos kaupimo sistemų. Antroje dalyje aprašomas tiriamosios elektros sistemos modelis. Taip pat pateiktos modelyje naudojamos elementų bei jų valdymo sistemos, jas aprašančios lygtys bei schemas. Galutinėje, trečioje tyrimo dalyje, pateikiami bei analizuojami gauti darbo rezultatai. Juose atsispindi sinchroninių generatorių, sintetinės inercijos funkcijos bei jos valdiklio kintamųjų įtaka elektros sistemos dažnio charakteristikoms. Pabaigoje pasitelkus gautų rezultatų duomenis suformuotos tyrimo išvados.

Galvydis, Dovydas. Research of Battery Energy Storage System with Synthetic Inertia Impact on Frequency Characteristics of the Electric Power System. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Dr. Almantas Bandza; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: energy storage system, synthetic inertia, power system.

Kaunas, 2021. 50 p.

### **Summary**

The aim of Master's final degree thesis – to perform impact analysis of the synthetic inertia developed by the battery energy storage system on frequency characteristics of the electric power system. This research of Master's final degree consists of three main parts. First of all, the first chapter provides a review of the literature. It discusses the scientific work of other authors on the causes and consequences of the reduction of inertia by naturally occurring from electric power system and the ways of solving the problem using synthetic inertia extracted from battery energy storage systems. The second part describes the model of the investigated electric power system. The elements used in the model and their control systems, equations and schemes describing them are also presented. In the final, third part of the research, the obtained work results are presented and analyzed. They reflect the influence of synchronous generators, function of synthetic inertia and its controller variables on frequency characteristics of the electric power system. At the end, the research conclusions were formed using the data of the obtained results.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Santrumpų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Literatūros apžvalga .....</b>	<b>12</b>
1.1. Inercija elektros sistemoje .....	12
1.2. Inercijos deficitas elektros sistemoje.....	13
1.3. Elektros energijos kaupimo technologijos.....	16
1.4. Baterijos ir jų rūšys.....	17
1.5. Baterijų energijos kaupimo technologijos .....	18
1.6. Baterijų energijos kaupimo sistemos valdymas .....	20
1.7. BEKS su sintetinės inercijos funkcija įtaka sistemos dažnio charakteristikoms.....	21
<b>2. Tyrimo metodinė dalis .....</b>	<b>25</b>
2.1. Tyrimo schema ir jos elementai .....	25
2.2. Elektrinių turbinos ir jų valdymo sistemos.....	27
2.3. Elektrinių sinchroninių generatorių žadinimo sistemos .....	29
2.4. Vėjo elektrinių generatoriai ir jų valdymo sistema .....	31
2.5. Baterijų energijos kaupimo sistema ir jos valdymo sistema .....	34
2.6. Sintetinės inercijos valdiklis.....	36
2.7. Modeliuojamos elektros sistemos tyrimo scenarijus .....	37
<b>3. Tyrimo rezultatų dalis.....</b>	<b>38</b>
3.1. Sinchroninių generatorių skaičiaus įtaka elektros sistemos inercijai .....	38
3.2. BEKS sintetinės inercijos įtaka elektros sistemai .....	39
3.3. BEKS sintetinės inercijos valdiklio koeficiento įtaka elektros sistemai .....	42
3.4. Optimali sintetinės inercijos valdiklio reikšmė .....	46
<b>Išvados .....</b>	<b>48</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>49</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>51</b>
1 priedas. Modeliuojamos izoliuotos elektros sistemos schema DIgSILENT PowerFactory programinėje erdvėje .....	51
2 priedas. Dujų turbinos valdymo schema DIgSILENT PowerFactory programinėje erdvėje .....	52
3 priedas. Vandens turbinos valdymo schema DIgSILENT PowerFactory programinėje erdvėje .....	52
4 priedas. Sinchroninio generatoriaus su dujų turbina nuolatinės srovės tipo žadinimo sistemos blokinė schema DIgSILENT PowerFactory programinėje erdvėje.....	53
5 priedas. Sinchroninio generatoriaus su vandens turbina kintamosios srovės tipo žadinimo sistemos blokinė schema DIgSILENT PowerFactory programinėje erdvėje.....	53
6 priedas. Sintetinės inercijos valdiklio blokinė schema DIgSILENT PowerFactory programinėje erdvėje .....	53

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Modeliuojamos elektros sistemos elementų parametrai.....	26
<b>2 lentelė.</b> BEKS baterijų modeliavimo techniniai duomenys DIGSILENT programos erdvėje. ....	35
<b>3 lentelė.</b> Sinchroninių generatorių skaičiaus įtakos elektros sistemos dažniui tyrimo rezultatai. ...	39
<b>4 lentelė.</b> Baterijų energijos kaupimo sistemos su sintetine inercija įtaka elektros sistemos dažniui. .....	41
<b>5 lentelė.</b> BEKS sintetinės inercijos valdiklio koeficiento įtakos elektros sistemos dažniui rezultatai. .....	42
<b>6 lentelė.</b> BEKS sintetinės inercijos valdiklio koeficiento įtakos elektros sistemos dažniui rezultatai. .....	46

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Kinetinės energijos pokytis pagal elektros sistemos sudėtį: a) tradicinė elektros sistema; b) ateities elektros sistema be sintetinės inercijos; c) ateities elektros sistema su sintetinė inercija [3].	14
<b>2 pav.</b> Dažnio pokytis per tam tikrą laiką $t$ pagal elektros sistemos sudėtį: a) tradicinė elektros sistema; b) ateities elektros sistema be sintetinės inercijos; c) ateities elektros sistema su sintetinė inercija [3].	15
<b>3 pav.</b> Skirtingos inercijos vertės įtaka elektros sistemos dažniui [2].	15
<b>4 pav.</b> Sistemos inercijos 3-jų metų tendencija Jungtinės Karalystės elektros sistemoje [4].	16
<b>5 pav.</b> Baterijų energijos kaupimo sistemos prijungimo prie tinklo struktūrinė schema [7].	19
<b>6 pav.</b> Elektrocheminės energijos kaupimo sistemos globaliuoju mastu 2017 m. vidurio duomenys [5].	19
<b>7 pav.</b> Baterijų energijos kaupimo sistemos technologijų palyginimas elektros sistemos tinklo mastu [6].	20
<b>8 pav.</b> Inercijos valdiklio simuliacijos rezultatai [11].	21
<b>9 pav.</b> Dažnio nuokrypio kitimas po sistemos sutrikimo [13].	22
<b>10 pav.</b> Šiaurės Vokietijos elektros sistemos dažnio charakteristikos 2018 ir 2030 metų scenarijais [14].	23
<b>11 pav.</b> BEKS pristatomų koncepcijų dažnio charakteristikos 2030 metų scenarijuje [14].	24
<b>12 pav.</b> Vienlinijinė tiriamosios elektros sistemos schema.	25
<b>13 pav.</b> Dujų turbinos kartu su valdymo sistema blokinė schema [17].	28
<b>14 pav.</b> Vandens turbinos kartu su valdymo sistema blokinė schema [17].	28
<b>15 pav.</b> Sinchroninio generatoriaus su vandens turbina kintamosios srovės tipo žadinimo sistemos blokinė schema [18].	30
<b>16 pav.</b> Sinchroninio generatoriaus su dujų turbina nuolatinės srovės tipo žadinimo sistemos blokinė schema [18].	30
<b>17 pav.</b> Vėjo jėgainės su sinchroniniu generatoriumi ir tarpine nuolatinės srovės grandimi blokinė schema [19].	31
<b>18 pav.</b> Ataskaitinių sistemų palyginimas tarp dvifazės $d-q$ ir trifazės $abc$ sistemų vektorių [19].	33
<b>19 pav.</b> Baterijų energijos kaupimo sistemos blokinė schema.	34
<b>20 pav.</b> Sintetinės inercijos valdiklio blokinė schema [21].	36
<b>21 pav.</b> Sinchroninių generatorių skaičiaus įtaka elektros sistemos dažniui galių nebalanso metu.	38
<b>22 pav.</b> Elektros sistemos generuojančių el. energijų elementų galios kitimas, sistemos galių nebalanso metu, esant neprijungtai baterijų energijos kaupimo sistemai.	40
<b>23 pav.</b> Elektros sistemos generuojančių el. energijų elementų galios kitimas, sistemos galių nebalanso metu, esant prijungtai baterijų energijos kaupimo sistemai.	40
<b>24 pav.</b> Elektros sistemos dažnio kitimas galių nebalanso metu, esant prijungtai ir neprijungtai baterijų energijos kaupimo sistemai.	41
<b>25 pav.</b> Elektros sistemos dažnio kitimas galių nebalanso metu, kintant sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmei nuo 0 iki 200.	42
<b>26 pav.</b> Dažnio kitimo greitis bei dažnio nuokrypis nuo vardinio dažnio elektros sistemos galių nebalanso metu, kintant sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmei nuo 0 iki 200.	43
<b>27 pav.</b> Baterijų energijos kaupimo sistemos inercinė reakcija elektros sistemos galių nebalanso metu, kintant sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmei nuo 0 iki 200.	43
<b>28 pav.</b> Baterijų energijos kaupimo sistemos tiekiama galia elektros sistemos galių nebalanso metu, kintant sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmei nuo 0 iki 200.	44



<b>29 pav.</b> Baterijų energijos kaupimo sistemos baterijų išsikrovimo lygis elektros sistemos galių nebalanso metu, kintant sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmei nuo 0 iki 200. ....	45
<b>30 pav.</b> Elektros sistemos dažnio kitimas galių nebalanso metu, esant neprijungtai ir prijungtai BEKS, kai sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmė $H_{syn} = 175$ .....	46
<b>31 pav.</b> Elektros sistemos generuojančių el. energiją elementų galios kitimas, esant prijungtai BEKS, kai sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmė $H_{syn} = 175$ .....	47

## Santrumpų sąrašas

### Santrumpos:

EES – elektros energetikos sistema;

RoCoF – dažnio kitimo greitis (*angl. Rate of Change of Frequency*);

ADN – automatinis dažninis nukrovimas;

SLV – svyravimo lygčių valdymo metodas;

OSLV – optimizuotų svyravimo lygčių valdymo metodas;

IEEE - Elektros ir elektronikos inžinierių institutas (*angl. Institute of Electrical and Electronics Engineers*);

BEKS – baterijų energijos kaupimo sistema;

SG/VT – sinchroninis generatorius su vandens turbina;

SG/DT – sinchroninis generatorius su dujų turbina;

VEP – vėjo elektrinių parkas;

AC – kintamoji srovė (*angl. Alternating Current*);

DC – nuolatinė srovė (*angl. Direct Current*);

PMSG – sinchroninis generatorius su nuolatinės srovės magnetų žadinimo sistema (*angl. Permanent Magnet Synchronous Generator*);

IGBT - izoliuotosios uždūros dvipolis tranzistorius (*angl. Insulated-Gate Bipolar Transistor*);

PWM - impulsu pločio moduliacija (*angl. Pulse-Width Modulation*);

SOC – baterijų įkrovos būseną (*angl. State of Charge*).

## Įvadas

Vis populiarėjant ekologijos temai pasaulyje, pradama vykdyti aplinkos taršą didinančių objektų eliminavimą. Tai palietė ir elektros energetikos sritį, kurioje sparčiai ėmė augti atsinaujinančios energijos šaltinių paklausa. Bandant įveikti taršos problemą pasaulyje atsiranda kliūčių veikiančių kitas sritis, šiuo atveju energetikos sritį. Elektros energetikos sistemoje norint pasiekti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo mažinimo tikslus didinama atsinaujinančių energijos šaltinių elektros energijos generacija. Tai lemia didelę dažnio nestabilumo tikimybę sistemoje, kadangi mažėja sinchroninių mašinų tiekiamą generaciją sistemoje. Sinchroninės mašinos elektros sistemoje sudaro beveik visą sistemos inerciją, reikalingą sistemos dažnio stabilumui palaikyti. Vykdamas taršos mažinimo programą Europos energetikos srityje anglies dvideginio (CO<sub>2</sub>) išmetimas, kai kuriose vietovėse sumažėjo net iki 49 %, tačiau tai labai atsiliepė sistemos inercijai. Paašškėjo, jog kai kurių Europos šalių elektros sistemos inercijos lygis krito žemiau ribinės vertės [1]. Todėl vienas iš būdų išspręsti šią problemą, didinti elektros sistemos inerciją sintetiniu būdu išgaunamu iš baterijų energijos kaupimo sistemų.

Baterijų energijos kaupimo sistemos yra sparčiai besivystanti energijos kaupimo rūšis. Dėl greito ir tikslaus aktyviosios galios tiekimo į tinklą baterijų energijos kaupimo sistema puikiai tinka greitam dažnio reguliavimui panaudojant sintetinės inercijos funkciją. Sintetinė inercija – tai pirminio dažnio reguliavimo funkcija, kuri dirbtinai inicijuoja elektrinio sukimo momento atsaką į dažnio pokytį, pagal dažnio kitimo greičio per laiką kriterijų. Norint realizuoti visas baterijų energijos kaupimo sistemos galimybes tiekti sintetinę inerciją į tinklą, yra projektuojami specialūs valdikliai, papildantys valdymo sistemą.

Darbo tikslas – ištirti baterijų energijos kaupimo sistemos kuriamos sintetinės inercijos įtaką elektros sistemos dažninėms charakteristikoms.

Darbo uždaviniai:

1. Aptarti kitų autorių tiriamuosius darbus apie elektros sistemos inerciją, jos įtaką elektros sistemai bei galimybę inerciją išgauti sintetiniu būdu.
2. Aprašyti bei naudojantis programine įranga sumodeliuoti elektros sistemą, ištirti elektros sistemos dažnio charakteristikas, taikant ir netaikant baterijų energijos kaupimo sistemos kuriamą sintetinę inerciją.
3. Išanalizuoti natūraliai susidarančios inercijos kitimą tiriamojoje elektros sistemoje bei jos įtaką elektros sistemos dažnio charakteristikoms.
4. Atlikti sintetinės inercijos valdiklio kintamųjų įtakos analizę tiriamosios elektros sistemos dažnio charakteristikoms.
5. Surasti optimalius sintetinės inercijos valdiklio kintamųjų sprendinius tiriamajai elektros sistemai.

## 1. Literatūros apžvalga

### 1.1. Inercija elektros sistemoje

Fizikine prasme inerciją galima apibrėžti kaip kūno, turinčio tam tikrą masę, gebėjimu išlaikyti greitį ir judėjimo kryptį, veikiant jį pašalinėms jėgoms, arba tiesiog kūno pasipriešinimas esamo greičio ir jo krypties kaitai. Elektros energetikos sistemoje inercijos prasmė yra tokia pati. Ją sistemoje sudaro visuma prie sistemos prijungtų sinchroniškai besisukančių elektros įrenginių dalių, kaip pačių sinchroninių generatorių rotorius ar netgi prie jų prijungtų turbinų velenas. Inercijos dydis sistemoje yra proporcingas pastarųjų išvardintų elektros sistemą sudarančių elementų masei. Kuo įrenginių masė yra didesnė, tuo elektros sistemos inercija taip pat didesnė. Dėl šios priežasties priklauso elektros sistemos dažnio kitimo greitis. Atsiradus galios trūkumui sistemoje, dažnis kinta palengva per tam tikrą laiko tarpą, dėl to, kad sukaupta kinetinė energija besisukančiame kūne konversijos būdu perduodama į elektros tinklą. Kinetinė energija besisukančiame kūne aprašoma 1-ąja lygtimi [2].

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * I * (2 * \pi * f)^2 = \frac{1}{2} * I * \omega^2; \quad (1)$$

čia:  $I$  – besisukančio kūno (generatoriaus ar turbinos) inercijos momentas;  $f$  – vardinis generatoriaus sukimosi dažnis;  $\omega$  – kampinis generatoriaus sukimosi greitis.

Ši energija yra proporcinga generatoriaus vardinei galiai ir yra vadinama inercijos konstanta  $H_{gen}$ , kuri nusako, kokį laiko tarpą generatorius gali generuoti į tinklą nominalią galią, pasinaudodamas savyje sukaupta kinetine energija. Inercijos konstanta apskaičiuojama:

$$H_{gen} = \frac{\frac{1}{2} * I * \omega^2}{S_{gen}} = \frac{E_{kin}}{S_{gen}}; \quad (2)$$

čia:  $S_{gen}$  – nominali generatoriaus galia.

Kadangi visa elektros sistema priklauso nuo prie jos prijungtų sinchroninių generatorių sukimosi greičio galima apskaičiuoti visos sistemos inerciją  $H_{sist}$  naudojantis 3-ąja formule [2].

$$H_{sist} = \sum_i \frac{H_{gen,i} * S_{gen,i}}{S_{sist}} = \sum_i \frac{E_{kin,i}}{S_{sist}}; \quad (3)$$

čia:  $S_{sist}$  – bendra įrengtoji visų sistemoje esančių generatorių galia.

Galios nebalanso metu, būtent kai apkrovos galia yra didesnė negu generacijos galia, vyksta elektros sistemos dažnio kitimas, mažėjimas. Dažnio kitimo greitį elektros tinkle galima reguliuoti injektavus į tinklą papildomą elektros energiją, kuri sumažina galios nebalansą ir tuo pačiu sistemos dažnio kitimo greitį. Todėl didesnė elektros sistemos tinklo inercija lemia dažnio kitimo greičio mažėjimą ir prailgina laiko tarpą dažnio reguliavimo įrenginių suveikimui. Toliau 4-ąja lygtimi išreikšta koreliacija tarp generatoriaus kampinio sukimosi greičio ir galios balanso, sukuriama generuojamos ir apkrovos galių [3].

$$\frac{d \frac{I^* \omega^2}{2}}{dt} = P_G - P_A; \quad (4)$$

čia:  $P_G$  – generuojamoji galia;  $P_A$  – apkrovos galia.

Šios 4-osios lygties kairiojoje lygybės pusėje pateikta besisukančio kūno kinetinės energijos 1-osios formulės išvestinė. O 4-ąją lygtį išreiškus santykiniais vienetais ir naudojantis 3-ąja lygtimi gauname:

$$2 * H_{sist} * \omega_* * \frac{d\omega_*}{dt} = P_{G*} - P_{A*}. \quad (5)$$

Toliau priimant, jog kampinis visų generatorių greitis santykiniais vienetais yra lygus 1, gauname:

$$2 * H_{sist} * \frac{d\omega_*}{dt} = P_{G*} - P_{A*}. \quad (6)$$

Ši gauta 6-oji formulė ir minėtas inercijos apibrėžimas įrodo, jog bendra tradicinės elektros sistemos, kurioje vyrauja ne per galios elektroniką sujungti elektros energijos generavimo šaltiniai, inercijos vertė yra visų kartu sinchroniškai besisukančių generatorių pasipriešinimas elektros tinklo dažnio pokyčiui, naudojantis sukaupta kinetine energija, kai dažnio kitimas atsiranda dėl apkrovos ir generacijos galių nebalanso.

## 1.2. Inercijos deficitas elektros sistemoje

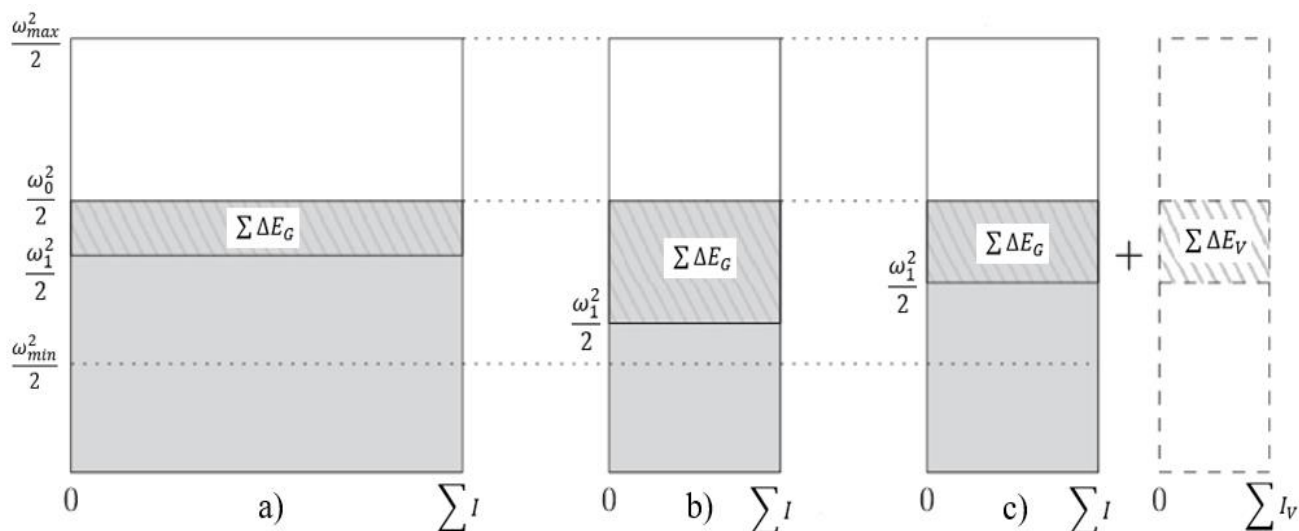
Inercijos trūkumas gali turėti didelių pasėkmių, nes kaip jau ir buvo minėta, tai lemia elektros sistemos dažnio kitimo spartą, apkrovos ir generacijos galių nebalanso metu. Kinetinės energijos pokytis galios nebalanso metu gali būti išreikštas 7-ąja lygtimi [3].

$$\Delta E = \sum \Delta E_G = \int (P_G - P_A) dt; \quad (7)$$

čia:  $\Delta E_G$  – generatorių kinetinės energijos pokytis.

Šioje 7-oje formulėje kinetinės energijos pokytis yra lygus elektros sistemoje instaliuotų generacinių šaltinių pokyčiui arba lygus galių nebalanso integralui pagal laiką.

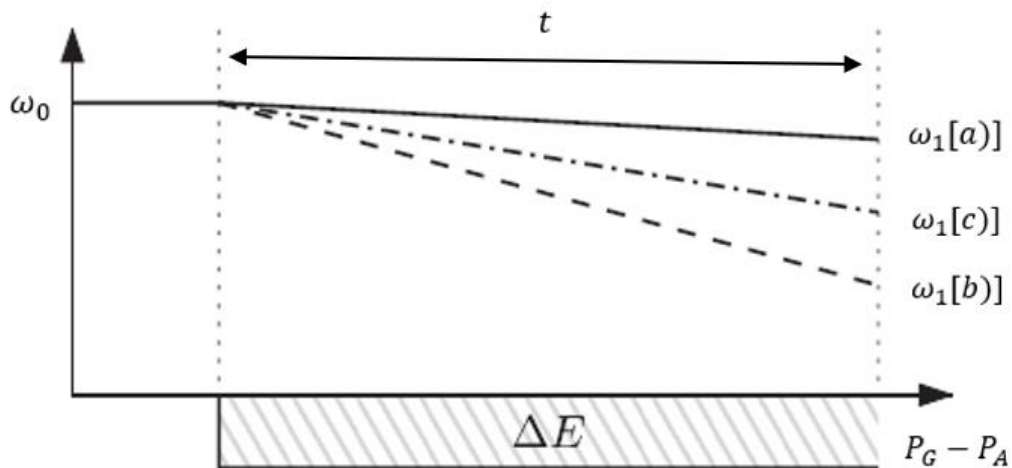
Inercijos trūkumo elektros sistemoje pasėkmės grafiškai pagal elektros sistemos sudėtį bei kinetinės energijos deficitą atvaizduotos 1-ajame paveiksle.



**1 pav.** Kinetinės energijos pokytis pagal elektros sistemos sudėtį: a) tradicinė elektros sistema; b) ateities elektros sistema be sintetinės inercijos; c) ateities elektros sistema su sintetine inercija [3].

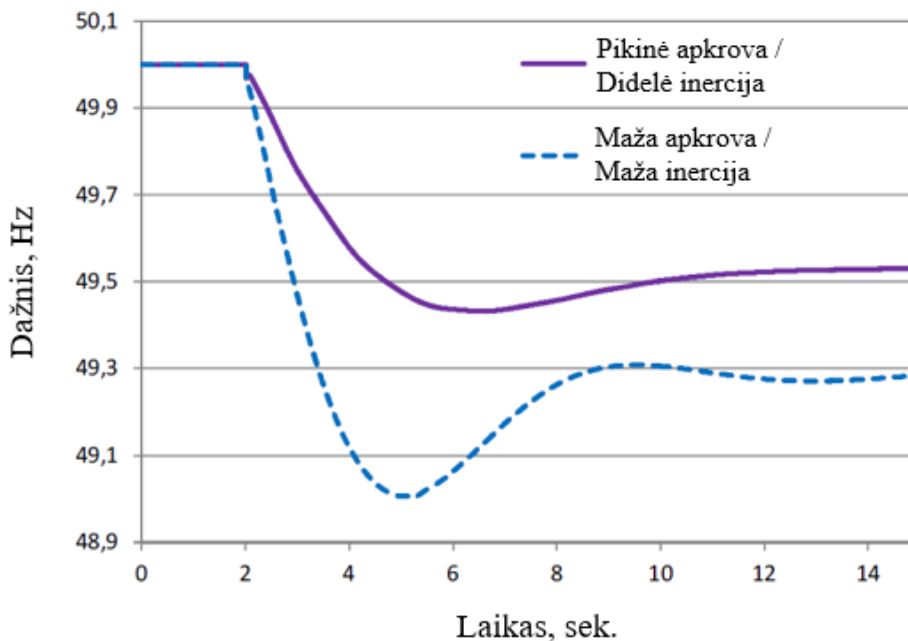
Šioje blokinėje diagramoje matome sukauptą elektros sistemos kinetinę energiją. Bloko plotis prilygsta sistemos suminiam inercijos momentui  $\Sigma I$ , o aukštis – elektros sistemos kampiniam dažniui  $\frac{\omega^2}{2}$ . Pilkoji bloko dalis, kurios aukštis visuose variantuose yra  $\frac{\omega_0^2}{2}$  atitinka vardinį sistemos darbo režimą. Toliau pilkosios dalies plotas, kuris užbrūkšniuotas pilkomis juostelėmis atitinka kinetinės energijos netekimą  $\Sigma \Delta E_G$  dėl galių nebalanso sistemoje. Taip pat 1-ajame paveiksle matyti, jog atsiradus galių nebalansui, kampinis dažnis sistemoje krinta ties  $\frac{\omega_1^2}{2}$  žyma per tam tikrą vienodą laiką  $t$ . Būtent kinetinės energijos trūkumo dydis ir skirasi kiekvienu grafike duotu pavyzdžiu. Tradicinėje elektros sistemoje (1 pav., a), kurioje vyrauja dauguma sinchroninių generatorių, kampinis sistemos dažnio sumažėjimas per tam tikrą laiką  $t$  yra mažesnis negu kituose duotuosiuose variantuose. O ateities elektros sistemoje (1 pav., b) dauguma sinchroninių generatorių yra keičiami atsinaujinančios energijos šaltinių generatorių arba kitomis energijos kaupimo sistemomis, kurios prie tinklo yra prijungtos per galios elektronikos įrenginius. Tačiau trečiajame variante, ateities elektros tinkle (1 pav., c), kuriame pastarųjų sistemų technologijose įdiegus sintetinės inercijos valdymo įrangą, galima padidinti elektros sistemos inerciją. Kaip matome 1-ajame paveikslėlyje ateities elektros sistemos su sintetine inercija (1 pav., c) kinetinės energijos pokytis yra mažesnis per tam tikrą laiko tarpą  $t$ , lyginant su sistema be sintetinės inercijos (1 pav., b).

Pateikiama dar viena diagrama įrodanti, skirtingų aukščiau nagrinėtų trijų elektros sistemos atvejų dažnio kritimą per tam tikrą laiką  $t$ . Iš šio paveikslėlio matome, jog kuo didesnė elektros sistemos inercija, tuo dažnio kritimo greitis ir paties dažnio kritimas per laiką  $t$  yra mažesnis, lyginant tradicinę ir ateities su sintetine inercija elektros sistemas (2 pav., a; c) su ateities be sintetinės inercijos elektros sistema (2 pav., b).



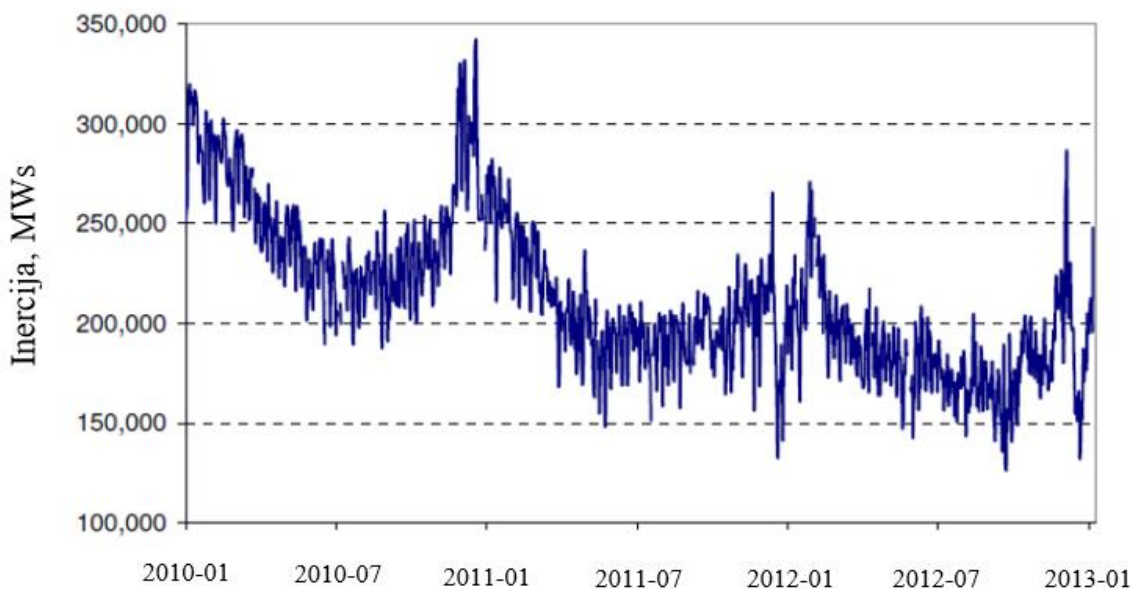
**2 pav.** Dažnio pokytis per tam tikrą laiką  $t$  pagal elektros sistemos sudėtį: a) tradicinė elektros sistema; b) ateities elektros sistema be sintetinės inercijos; c) ateities elektros sistema su sintetine inercija [3].

Taip pat dar viena inercijos deficito pasekmė matoma lyginant Airijos salų sezonines elektros sistemas. Vasaros sezono metu dėl mažos apkrovos elektros sistemoje yra prijungiami mažiau generatorių, tuomet sistemos inercija būna maža. Žiemos sezonu didėjančiai apkrovai patenkinti naudojama daugiau generuojamųjų šaltinių, tai lemia didesnę sistemos inerciją. Lyginant šiuos du variantus, pateiktus 3-ajame paveiksle, inercijos prasme sistemos galių nebalanso metu galime matyti, jog esant mažesnei sistemos inercijai (vasaros sezonui), dažnio kritimas ir kitimo greitis yra žymiai didesni. Ši tendencija buvo pastebėta galių nebalanso metu Airijos salų elektros sistemoje, kai bendroji sistemos inercija žiemos sezonu buvo 46,3 GW/s, esant aukščiausiai apkrovai, o vasaros sezonu – 22,9 GW/s esant mažiausiai apkrovai [2].



**3 pav.** Skirtingos inercijos vertės įtaka elektros sistemos dažniui [2].

Taigi elektros energijos sistemoms, turinčioms daug atsinaujinančios energijos šaltinių, matoma didelė jų įtaka sistemos inercijai. Remiantis atliktu tyrimu, stebint Jungtinės Karalystės elektros energetikos sistemos inercijos trijų metų tendenciją bei atsižvelgiant į tai, kad šios valstybės energetikos sistemoje vyrauja vėjo elektrinių generuojama energija nustatyta, kad inercija sumažėjo. Tai akivaizdžiai matosi pateiktame šio tyrimo rezultatų kreivėje, 4-ajame paveiksle. Inercijos sumažėjimą lėmė sinchroninės generacijos sumažėjimas, ją keičiant asinchroniniais ar per galios elektroniką prie tinklo prijungtais generaciniais šaltiniais [4].



**4 pav.** Sistemos inercijos 3-jų metų tendencija Jungtinės Karalystės elektros sistemoje [4].

### 1.3. Elektros energijos kaupimo technologijos

Elektros energijos kaupimas paprastai yra naudojamas vėliau atsirandančiam elektros energijos deficitui padengti. Jis vyksta, kai pirminė elektros energija yra paverčiama į kaupiamąją energijos formą, o vėliau esant poreikiui grąžinama atgal. Energijos kaupimo sistemų ir technologijų šiais laikais yra daugybė ir beveik visose energijos formose. Nors jų panaudojimas ir komercinis prieinamumas yra skirtingi, kiekviena technologija turi savo unikalių bruožų [5].

Šiuo metu dažniausiai naudojamos elektros energijos kaupimo technologijos yra [7, 12]:

- smagratinės (kaupimo rūšis kinetinė energija);
- kuro elementų;
- hidroakumuliacinės;
- elektrocheminės ar regeneracinės elektrocheminės (įvairios baterijos, akumulatoriai);
- suspausto oro;
- superkondensatorių;
- superlaidininkų (kaupimo rūšis magnetinė energija).

Visos šios elektros energijos kaupiklių technologijos, pagal jų panaudojimą, yra skirstomos į keturias kategorijas [9]:

- Mažos galios (keitiklių ar apsaugos įrenginių maitinimui);
- Vidutinės galios (individualioms elektros sistemoms ar miestų elektros energijos poreikiui patenkinti);



- Elektros energijos parametrų svyravimams mažinti;
- Elektros energijos kokybės užtikrinimui.

Pirmosios dvi kategorijos priklauso mažos galios elektros sistemoms. Jose elektros energijos kaupyklos gali būti naudojamos kinetinės (smagratinės), cheminės, suspausto oro, kuro elementų (vandenilio) energijos pavidalu arba superkondensatoriuose ar superlaidininkuose. Toliau trečiuoju ir ketvirtuoju numeriu minimos kategorijos priklauso didelės galios elektros sistemoms. Jose elektros energijos kaupyklos dažniausiai naudojamos: gravitacinės energijos (hidraulinės sistemos), šiluminės energijos, taip pat cheminės energijos (akumuliatoriai, srautinės baterijos) arba suspausto oro (kartu su skysčių ar gamtinių dujų saugyklomis) energijos pavidalu.

Aptarus galimas elektros energijos kaupimo technologijas, toliau gilinsimės į elektrocheminės energijos kaupimo rūšies kaupiklius – baterijas, kadangi šis darbas yra orientuotas į baterijų energijos kaupimo sistemos tyrimą.

#### **1.4. Baterijos ir jų rūšys**

Baterijos yra sudarytos iš atskirų mažesnių baterijų, vadinamų celėmis. Joms būdingi įkrovimo ir iškrovimo režimai. Įkrovimo režimu elektros energija yra verčiama chemine energija, iškrovimo režimu baterijoje esanti cheminė energija virsta į elektros energiją. Viso baterijų junginio srovės ir įtampos vertės priklauso nuo celių lygiagretaus ir nuoseklaus elektriškojo jungimo metodų. Baterijos yra vertinamos pagal jų išduodamą energiją (baterijos galia) ir talpą. Šių parametrų vertės nepriklauso viena nuo kitos, jų dydį lemia skirtingos baterijų technologijos. Taip pat kitos baterijas charakterizuojančios savybės yra jų eksploatacijos laikas, kuris yra nurodomas įkrovimo-iškrovimo ciklų skaičiumi. Toliau veikimo temperatūra, baterijos efektyvumas bei jos energijos tankis. Kadangi baterijos negali ilgai išlaikyti savo sukauptos energijos, svarbus parametras yra savaiminė baterijos iškrova. Labai svarbus parametras nurodantis baterijos iškrovimo laisvę yra iškrovos gylis, kadangi baterijos negali būti pilnai iškraunamos dėl jose vykstančių cheminių reakcijų [8].

Šiuo metu yra vykdoma akumuliatorių baterijų technologijų plėtra. Kuriamos įvairių tipų baterijos, kurių vienos yra jau sėkmingai naudojamos, o kitos vis dar tyrimo stadijoje. Jos dažniausiai yra skirstomos į skirtingas grupes atsižvelgiant į elektrolituose ir elektroduose naudojamą medžiagą bei eksploataavimo tvarką [6].

Elektros energijos sistemose iki šiol yra naudojamos tik giluminio iškrovos ciklo baterijos. Iš įvairovės akumuliatorių baterijų technologijų aptarsime labiausiai tinkamas elektros energijos tiekimo sistemoms [8]:

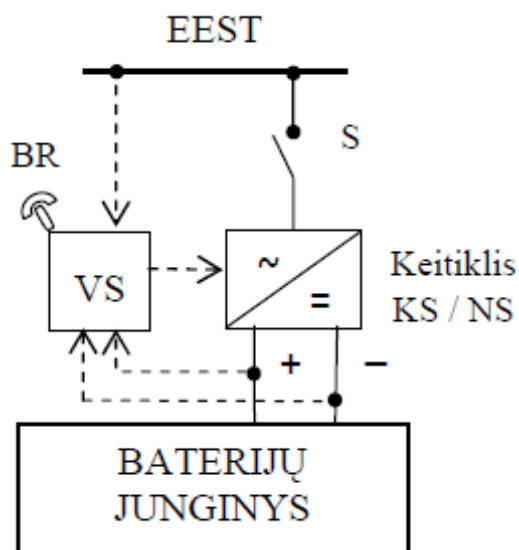
- Švino-rūgštinės baterijos. Šią bateriją sudaro tam tikros talpos plastikinis dėklas, suskirstytas į švino-rūgšties kameras, kuriose yra teigiamas švino dioksido elektrodas ir neigiamas korėtas švino elektrodas, atskirti amorfiškai akytomis medžiagomis ir panardinti į sieros rūgšties elektrolitą.
- Natrio sulfido (NaS) baterijos. Šias akumuliatorių baterijas sudaro teigiamas lydytos sieros elektrodas ir neigiamas lydyto natrio elektrodas, atskirti kietu beta-aliuminio oksido keramikos elektrolitu. Elektrolitas leidžia pro jį patekti tik teigiamiems natrio jonams ir susijungti su sieros elementu, kad susidarytų natrio polisulfidai. Iškrovos metu teigiami natrio jonai teka per elektrolitą, o elektronai teka pro akumuliatoriaus išorinę grandinę, sukurdami apie 2 V įtampą. Šiam baterijos proceso veikimui turi būti palaikoma apie 300°C temperatūra reakcijos vyksmui.

- Ličio jonų baterijos. Šių baterijų katodas yra sudarytas iš ličiu padengto metalo oksidu, o anodas pagamintas iš grafitinės anglies. Elektrolitą sudaro ličio druska, ištirpinta organiniuose karbonatuose. Įkraunant akumuliatorių, ličio atomai katode tampa jonais ir pereina per elektrolitą link anglies anodo, kur jungiasi su išoriniais elektronais ir yra patalpinami tarp anglies sluoksnių kaip ličio atomai. Iškvovimo metu šis procesas yra atvirkštinis.
- Aktyviųjų metalų baterijos. Šių baterijų anodai yra dažniausiai prieinami metalai su dideliu energijos tankiu, pavyzdžiui, aliuminis ar cinkas, kurie oksiduodamiesi išskiria elektronus. Katodas dažnai gaminamas iš akytos anglies struktūros arba metalo tinklo, padengto tinkamais katalizatoriais. Elektrolitai dažnai yra geri hidroksido (OH<sup>-</sup>) jonų laidininkai. Elektrolitai gali būti skysto pavidalo arba kietos polimero membranos, prisotintos kalio hidroksidu.
- Srautinės baterijos. Šio tipo baterijas sudaro du elektrolitų rezervuarai, iš kurių elektrolitai siurblio pagalba cirkuliuoja per elektrocheminį elementą, kurį sudaro katodas, anodas ir membraninis separatorius. Cheminė energija virsta elektra elektrocheminėje kameroje, elektrolitų tekėjimo metu. Abu elektrolitai atskirai laikomi didelėse talpyklose, esančiose už elektrocheminės kameros ribų. Rezervuarų dydis ir elektrolitų kiekis lemia šių baterijų energijos tankį. Tačiau srauto akumuliatorių galios tankis priklauso nuo reakcijų, vykstančių anode ir katode, greičio. Srauto baterijos dažnai vadinamos redokso (*angl. Redox*) srauto baterijomis, pagrįstomis oksidacijos redukcijos reakcija tarp dviejų sistemos elektrolitų.

Lyginant šias išvardintas baterijų rūšis tarpusavyje, nikelio-kadmio (NiCd) ir švino rūgšties baterijų rūšys yra puikūs impulsinės galios šaltiniai, tačiau akumulatoriai yra dideli, turi nuodingų sunkiųjų metalų ir patiria didelį savaiminį išsikrovimą. Natrio sulfido (NaS) baterija, nors ir daug mažesnė ir lengvesnė nei nikelio-kadmio (NiCd), tačiau jai reikalinga 300 °C temperatūra reakcijai palaikyti, todėl tai sukuria dideles nuolatinės šilumos sąnaudas. Aktyviųjų metalų akumulatoriai yra pigūs ir pasižymi dideliu energijos tankiu, tačiau juos labai sunku įkrauti. Ličio jonų, natrio sulfido (NaS) ir nikelio-kadmio (NiCd) baterijų rūšys yra naudojamos didelio galingumo akumuliatorių sistemose. Iš šių pastarųjų baterijų rūšių didžiausią potencialą turi ličio jonų baterijos. Be savo dydžio ir mažo svorio, ličio jonų akumulatoriai pasižymi didžiausiu energijos tankiu ir saugojimo efektyvumu, tačiau yra ir keli pagrindiniai ličio jonų technologijos trūkumai. Tai brangi kaina, dėl gamybos sudėtingumo, ir žalingas gilaus iškvovimo poveikis baterijos tarnavimo laikui. Srauto akumulatoriai taip pat yra perspektyvūs tiems atvejams, kai reikalingas ilgalaikis saugojimas dėl to, kad jie savaime neišsikrauna. Sistemos trūkumai yra mažas energijos tankis lyginant su kitais akumulatoriais, todėl elektrolito talpyklos yra didelės [8, 12].

### 1.5. Baterijų energijos kaupimo technologijos

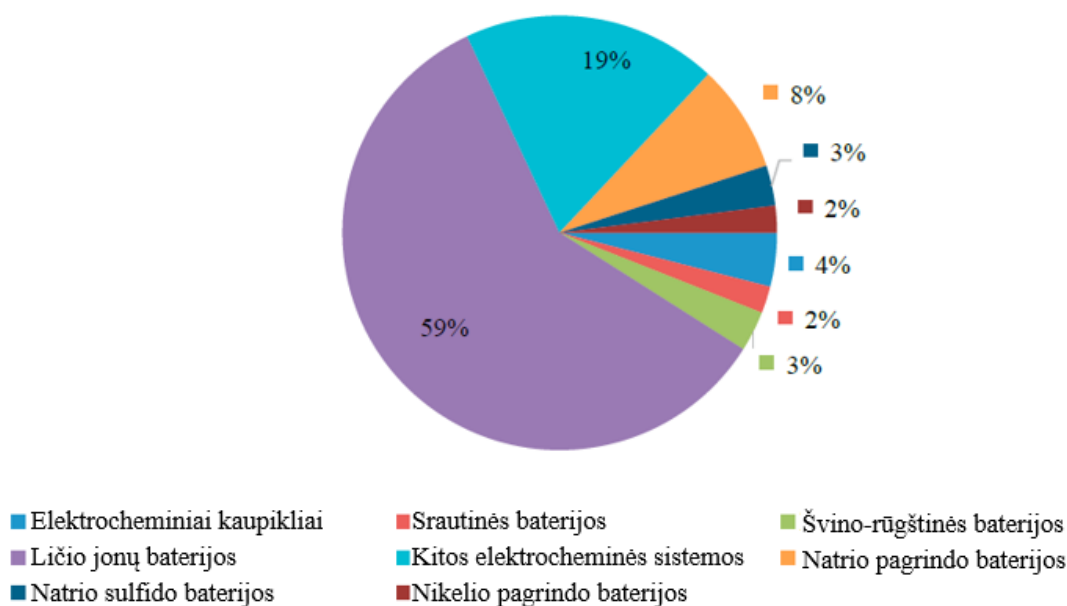
Baterijų energijos kaupimos sistema (BEKS) – tai sistema, pagal iškvovos trukmę priklausanti vidutinės iškvovos trukmės kaupykloms. Vidutinės iškvovos energijos kaupyklos savo sukauptą energiją gali tiekti nuo 1 iki 10 valandų laikotarpiu. Jų tipinė įrengtoji galia dažniausiai yra nuo 10 kW iki 10 MW, o energijos talpa – nuo 1 MWh iki 100 MWh. Šios kategorijos kaupyklos naudojamos galiai rezervuoti ir balansuoti elektros energetikos sistemos (EES) tinkle. Taip pat dažniui reguliuoti, pikinei energijai generuoti, generatorių apkrovoms išlyginti, joms veikiant energijos kaupimo arba regeneravimo režimais, ir didinti energijos tiekimo patikimumą. Kaupyklos struktūrinė schema pateikta 5-ajame paveiksle [7].



**5 pav.** Baterijų energijos kaupimo sistemos prijungimo prie tinklo struktūrinė schema [7].

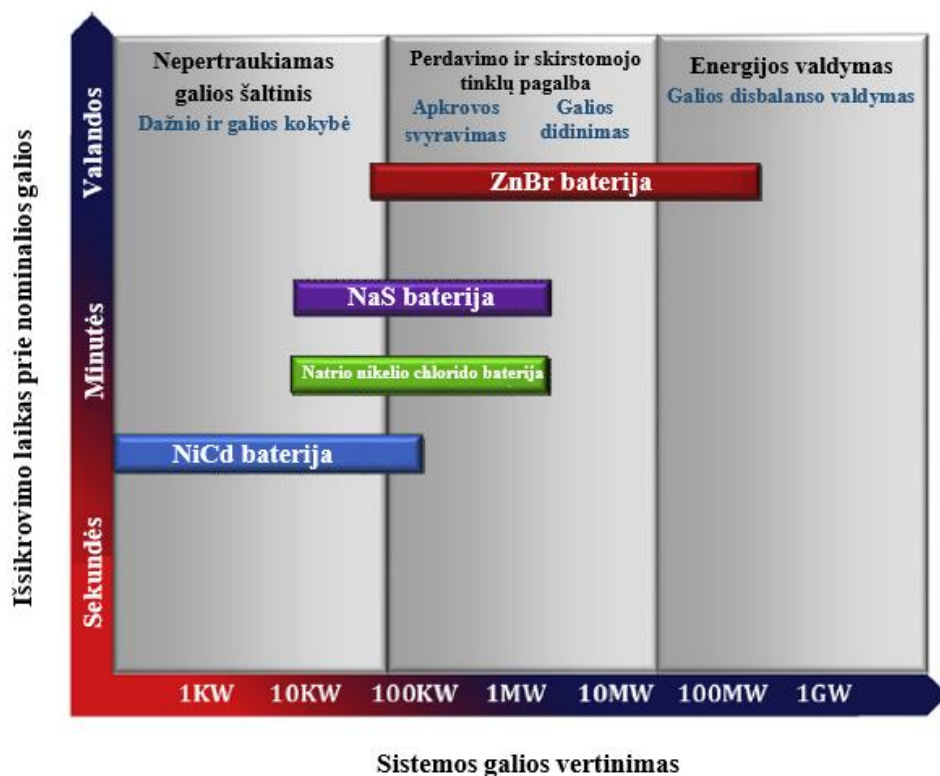
Šioje schemoje matome pagrindines BEKS dalis. Esant įjungtam jungikliui S baterijos yra įkraunamos arba iškraunamos per dvipusį kintamosios/nuolatinės srovės elektroninį galios keitiklį KS/NS. Kaupyklos valdymas yra realizuojamas per valdymo įrenginius VS, kurie prie EES yra prijungti bevieliu ryšiu su tinklo operatoriumi.

Baterijų energijos kaupimo technologijos priklauso elektrocheminės energijos kaupimo rūšiai. Pagal pateiktą elektrocheminių energijos kaupimo technologijų 2017 metų apžvalgos diagramą, 6-ajame paveiksle, matomas elektrocheminių kaupiklių ir baterijų skirtingų rūšių pasiskirstymas. Galima teigti, jog didžiąją dalį, net 77 % visų elektrocheminės energijos kaupimo rūšies sistemų, sudaro baterijų energijos kaupimo sistemos [5].



**6 pav.** Elektrocheminės energijos kaupimo sistemos globaliuoju mastu 2017 m. vidurio duomenys [5].

7-ajame paveiksle apžvelgtos kelios baterijų energijos kaupimo technologijos, kurios yra suskirstytos pagal išsikrovimo laiką, kadangi elektros sistemai pagal susidariusią situaciją gali prireikti trijų rūšių reagavimo režimų: greito, vidutinio ir lėto. Kiekvienam režimui gali būti pritaikyta skirtinga BEKS technologija [6].



7 pav. Baterijų energijos kaupimo sistemos technologijų palyginimas elektros sistemos tinklo mastu [6].

Šioje diagramoje (7 pav.) pavaizduota energijos kaupimo sistemos galios atidavimo į tinklą diapazonai ir jų pritaikymas trims elektros sistemos reagavimo režimams įgyvendinti. Kiekvienos iš pateiktų technologijų blokai atitinka vardinę galią ir galios palaikymo trukmę. Įvertinus pateikto grafiko (7 pav.) duomenis, galima spręsti, jog nikelio-kadmio (NiCd) baterijos technologija tinka greitam dažnio ir galios svyravimams mažinti bei stabilizuoti, natrio-nikelio-chloro bei natrio sulfido (NaS) baterijos tinka vidutiniam reagavimo režimui ir daugiau naudojamos perdavimo bei skirstomojo tinklų apkrovų svyravimams mažinti ir galiai sistemoje didinti. Trečioji kategorija, lėto išsikrovimo cinko-bromo (ZnBr) baterijos technologija, tinka tiek energijos valdymui, tiek perdavimo ir skirstomojo tinklų pagalbai.

### 1.6. Baterijų energijos kaupimo sistemos valdymas

Pagrindiniai baterijų energijos kaupimo sistemos naudojimo dažnio valdymui pranašumai yra trys. Visų pirma, ši sistema gali pakeisti greito paleidimo dujų turbinas, paruoštas naudoti bet kokių trikdžių atvejais. Antra, greitas reagavimas į dažnio pokytį gali pakeisti generatorius, todėl gali veikti kaip papildomas pirminio sistemos dažnio reguliatorius. Trečia, BEKS palaiko sistemos inercinį atsaką ir veikia kaip alternatyva sumažėjusiai inercijai [10]. Visi šie trys valdymo pranašumai yra įgyvendinami BEKS valdymo sistemoje. Šių pranašumų įgyvendinimui yra naudojamas dažnio kitimo greičio (*angl. Rate of Change of Frequency – RoCoF*) arba sintetinės inercijos valdiklis. Šis

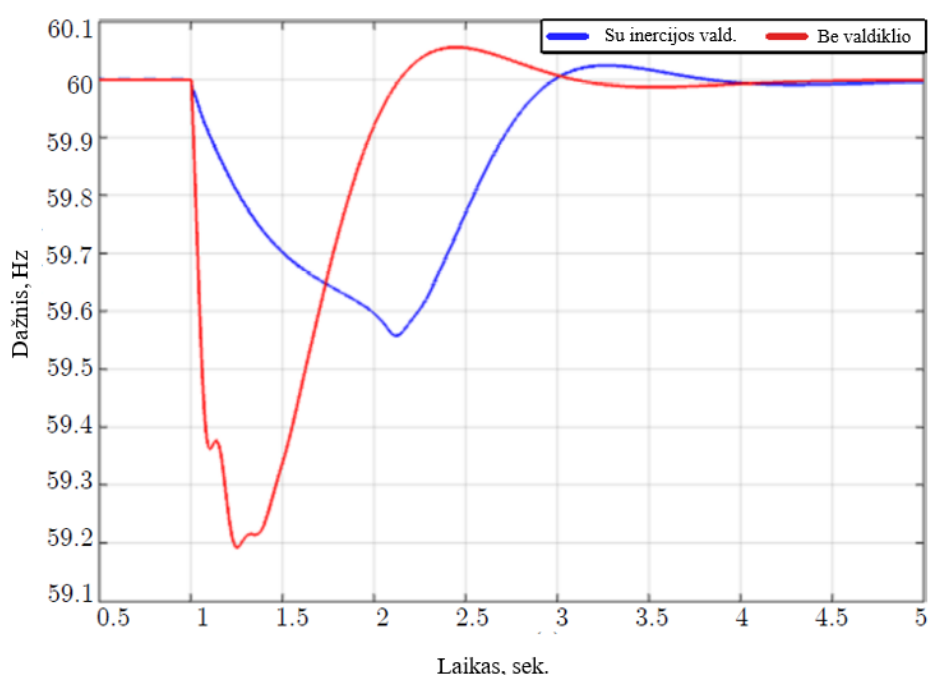
sintetinės inercijos valdiklis – tai baterijų energijos kaupimo sistemos funkcija, kuri sukauptą energiją gali greitai perduoti į elektros sistemą per pirmąsias trikties sekundes, dažnio kitimo stabilizavimui.

Baterijų energijos kaupimo sistema pati neturi inercijos, kuri būdinga masę turintiems besisukantiems kūnams, tačiau ši sistema skiriasi nuo kitų, prie tinklo prijungtų per galios elektroniką, sistemų. BEKS tam tikrą laiką gali tiekti į tinklą didesnę galią negu vardinė, kitaip nei esantys tos pačios galios saulės ir vėjo elektrinių generaciniai šaltiniai. Šį BEKS privalumą išpildyti padeda į valdymo sistemą diegiamas sintetinės inercijos valdiklis. Šis valdiklis reaguoja į staigų sistemos dažnio kitimą ir perduoda signalą į BEKS valdymo sistemą, kad sistema imituotų inercinį atsaką į elektros tinklo dažnio svyravimus. Valdiklio apibrėžtas inercinės galios atsakas bendrai išreiškiamas [11]:

$$P_{inert} = K_{inert} \left( \frac{df}{dt} \right) \quad (8)$$

čia:  $K_{inert}$  – proporcingumo koeficientas.

Sintetinės inercijos valdiklio veikimas pateikiamas atliktoje 60-ies Hz elektros sistemos galių nebalanso simuliacijoje. Simuliacijos rezultatai pateikiami 8-ajame paveiksle teigiamai atsiliepiant dažnio kitimo greičio vertei. Ji sumažėjo nuo 0,15 Hz/s iki 0,07 Hz/s, o mažiausia dažnio kritimo vertė padidėjo nuo 59,19 Hz/s iki 59,56 Hz [11].



8 pav. Inercijos valdiklio simuliacijos rezultatai [11].

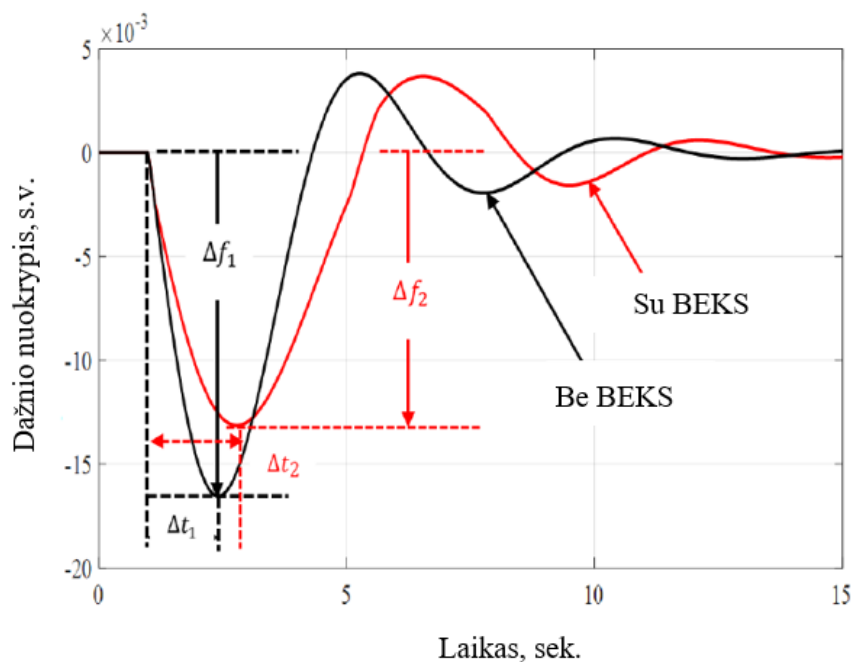
### 1.7. BEKS su sintetinės inercijos funkcija įtaka sistemos dažnio charakteristikoms

Sistemos patikimumui užtikrinti elektros energetikos sistemoje yra svarbu mažinti dažnio nuokrypį galių nebalanso metu. Kaip jau buvo minėta 1.1 skyriuje elektros sistemos dažnis priklauso nuo realios sistemos galių balanso. Įprastu elektros sistemos veikimo režimu dažnis yra griežtai reguliuojamas, reguliuojant elektros tiekimą pagal poreikį. Tačiau įvykus nenumatytiems atvejams sistemoje yra naudojami dažnio reguliavimo sistemos arba galios rezervai. Sistemos dažnio

reguliuojamas skirstomas į tris etapus. Tai pirminis dažnio reguliavimas, kurio tikslas yra per kelias sekundes reaguoti į bet kokią dažnio nuokrypį ir atkurti pusiausvyrą tarp generuojamos ir vartojamos energijos. Tačiau nesuveikus pirminiam dažnio reguliavimui suveikia antrinis, kuris dar vadinamas apkrovos dažnio valdymu. Pagrindinė jo funkcija yra ištaisyti atsiradusį dažnio nuokrypį ir atkurti vardinę sistemos dažnio vertę. Antrinis valdymas prasideda po kelių sekundžių ir gali tęstis iki 15 minučių. Tačiau prireikus perdavimo sistemos operatorius rankiniu būdu per 15 minučių turi įjungti tretinį dažnio reguliavimą, kurį sudaro jau minėtų rezervinių elektros sistemos elektrinių paleidimas [15].

Elektros sistemoje šie paeiliui naudojami dažnio valdymo režimai užtikrina, kad dėl dažnio kritimo nebus atjungiami generaciniai šaltiniai arba elektros vartotojai. Kaip jau žinome iš ankstesnių skyrių dažnio kritimo greitis gali būti labai staigus, dėl to gali nesuveikti dažnio reguliavimo įrenginių funkcija ir bus pradėta automatinio dažninio nukrovimo (ADN) funkcija [16].

Taip pat norint efektyviai išnaudoti baterijų energijos kaupimo sistemos su sintetinės inercijos funkcija galimybes, reikalinga valdymo strategija [13]. Strategijoje siūloma tiekiamą akumulatoriaus energiją kontroliuoti proporcingai dažnio pokyčio greičiui. Taip pat inercijos valdiklį paleisti tik esant dideliems sistemos trikdžiams. Žemiau, 9-ame paveiksle, pateikiami šios BEKS valdymo strategijos rezultatai sistemos dažnio charakteristikoms.



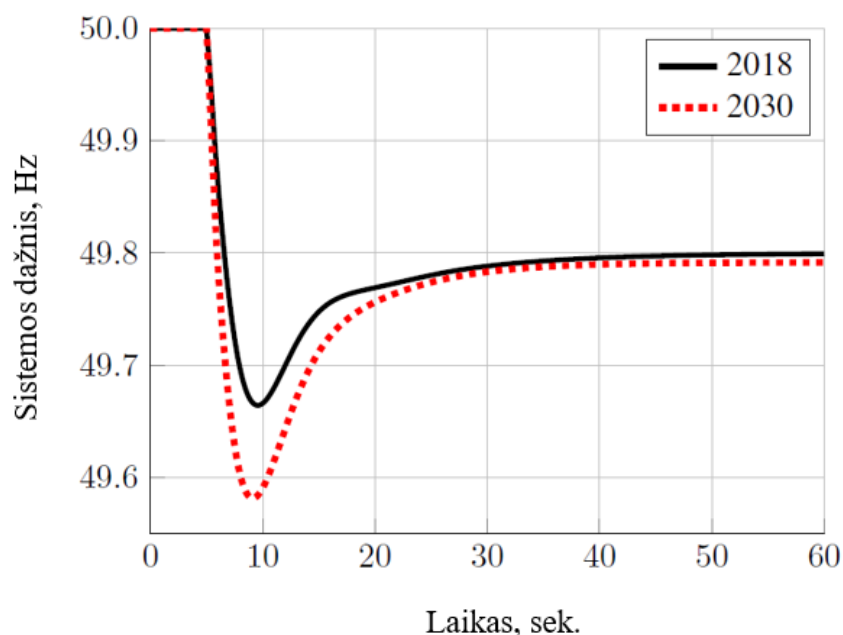
**9 pav.** Dažnio nuokrypio kitimas po sistemos sutrikimo [13].

Stebint dažnio nuokrypio kitimą po sistemos sutrikimo (9 pav.) matoma, kad be BEKS (juoda linija) dažnio žemiausia vertė  $\Delta f_1 = 0,0165$  s.v. ir laikas per kurį dažnis nukrenta iki mažiausios vertės yra  $\Delta t_1 = 1,5$  sek. Taigi dažnio kitimo greitis sistemoje be BEKS  $\Delta f_1 / \Delta t_1 = 0,011$  s.v./sek arba 0,66 Hz/sek. Kai naudojama BEKS (raudona linija), žemiausia dažnio vertė  $\Delta f_2 = 0,013$  s.v. ir laikas  $\Delta t_2 = 1,6$  sek. Todėl dažnio kritimo greitis sistemoje su BEKS yra lygus  $\Delta f_2 / \Delta t_2 = 0,008$  s.v./sek arba 0,48 Hz/sek.

Kitaip tariant, dažnio kitimo greičio vertė sumažėja nuo 0,66 Hz/sek iki 0,48 Hz/sek dėl padidėjusios inercijos elektros sistemoje iš BEKS. Taigi išnaudojant sintetinę inerciją baterijų energijos kaupimo

sistemoje pirminio dažnio reguliavimo metu galima sušvelninti pasekmes, atsiradusias didelio galių nebalanso metu.

Taip pat baterijų energijos kaupimo sistemos panaudojimo tinkamumo tyrimas buvo atliekamas šiaurės Vokietijoje, Hamburgo ir Šlėzvingo-Holšteino regionuose, kuriuose vyrauja puikios oro sąlygos vėjo jėgainėms. Buvo prognozuojama, jog vėjo jėgainių plėtra artimiausiu metu tęsis dėl planų įrengti didelius jūros vėjo jėgainių parkus Šiaurės Vokietijos jūroje. Be minėtų plėtros planų buvo tikimasi, kad iki 2030 metų bus atjungtos kelios didelės šiluminės elektrinės [14]. Taigi šiaurės Vokietijos tinklų plėtra yra pavyzdys, kaip energetikos sistema juda link galios elektronika pagrįstos elektros energijos generacijos ir mažos sistemos inercijos.



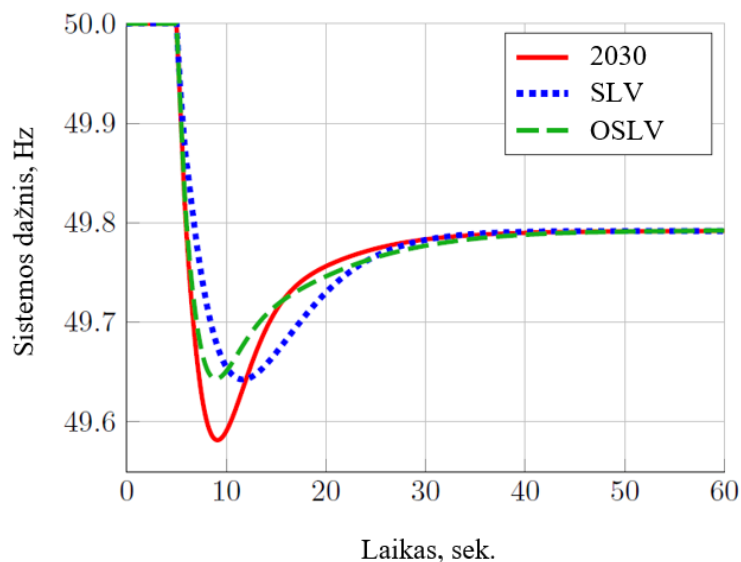
**10 pav.** Šiaurės Vokietijos elektros sistemos dažnio charakteristikos 2018 ir 2030 metų scenarijais [14].

Prognozėje nagrinėjami du BEKS valdymo metodai. Vienas iš jų svyravimo lygčių valdymo (SLV) optimizavimo metodas. Šio metodo tikslas yra kuo tiksliau imituoti trumpalaikės sinchroninės mašinos elgseną, kad būtų pakeistas sinchroninės mašinos sukimosi masės stabilizuojantis poveikis. Kitas metodas vadinamas optimizuotu svyravimo lygčių valdymu (OSLV) metodu. Antrojo metodo tikslas yra sumažinti BEKS įdiegtą ir generuojamą galias, užtikrinant vienodą dažnio stabilumą [14].

Visų pirma modeliavimo metu buvo sukurtos etaloninės dažnio stabilumo vertės, imituojant du tinklo trikties scenarijus, be BEKS. Dažnio vertės pateiktos 11-ajame paveiksle. Pagal 2018 metų scenarijų didžiausias dažnio nuokrypis atsiranda ties  $t = 9,56$  s. Sumažinus sistemos inercijos kiekį iki 67,7 %, taip sumažinant dažnio stabilumą 2030 metų scenarijuje, didžiausias nuokrypis atsiranda ties  $t = 9,11$  s ir yra didesnis už 2018 metų. Siekiant sumažinti numatomą dinaminio dažnio stabilumo sumažėjimą 2030 metais, yra pristatomos dvi BEKS koncepcijos. Abiejų koncepcijų modeliuose 2030 metais devynioms išjungtomis šiluminėms elektrinėms naudojama po viena baterijų energijos kaupimo sistemą [14].

Iš gautų rezultatų (11 pav.) matoma naujų baterijų energijos kaupimo sistemų koncepcijų įtaka elektros sistemos dažnio charakteristikoms. Abiejų koncepcijų pagalba pavyko sumažinti dažnio kritimo greitį ir dažnio kritimo žemiausiąją vertę. SLV BEKS koncepcijos bendra instaliuota galia

siekė 239,26 MW, o OSLV – 19,14MW. Tai atitinka 8 % SLV koncepcijos galios. OSLV koncepcijoje buvo derinami du valdymo parametrai, pagal kuriuos buvo formuojama BEKS generuojamoji galia. Dėl to reikiama dažnio stabilumui didžiausia aktyvioji galia buvo sumažinta iki 36,8%, o įdiegta BEKS galia - iki 8%, pasiekiant tą patį dinaminį dažnio nuokrypį, lyginant su SLV koncepcija [14]. Galutinė darbo išvada yra tokia, jog keičiant dažnio reguliavimo valdiklių parametrus baterijų energijos kaupimo sistemose galima pasiekti efektyvesnių dažnio valdymo elektros sistemoje rezultatų.



**11 pav.** BEKS pristatomų koncepcijų dažnio charakteristikos 2030 metų scenarijuje [14].

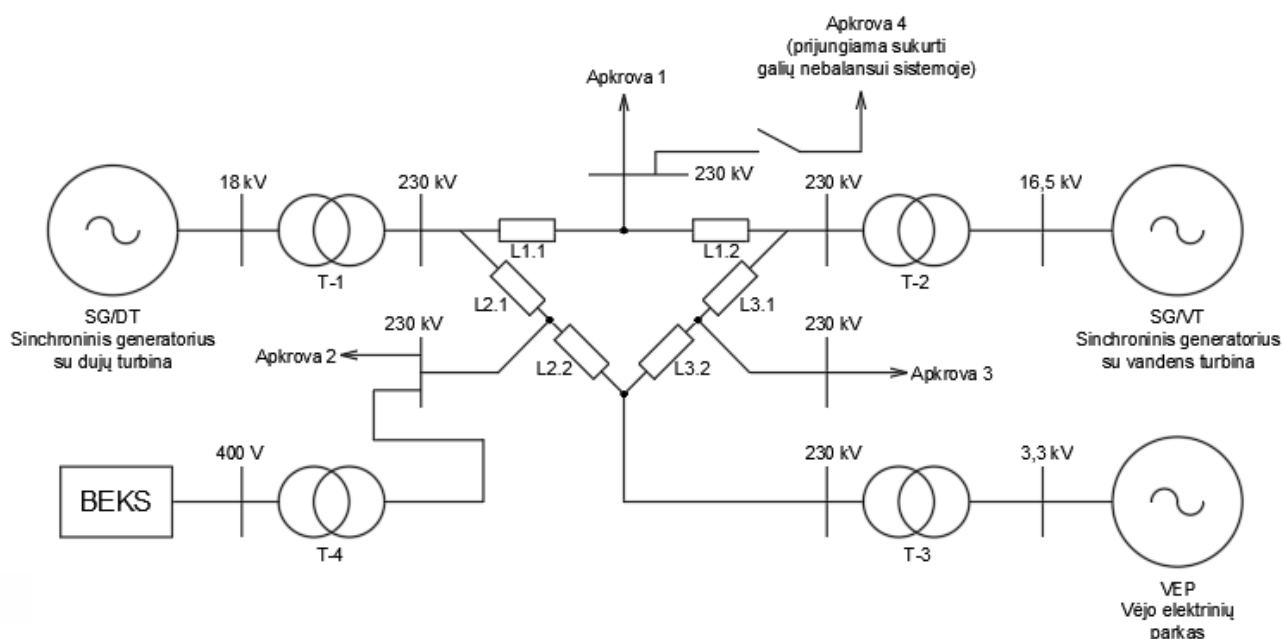


## 2. Tyrimo metodinė dalis

### 2.1. Tyrimo schema ir jos elementai

Sintetinės inercijos poveikio elektros sistemos dažnių charakteristikoms tyrimas šiame darbe yra atliekamas DIgSILENT PowerFactory programiniu paketu. Tam tikslui yra modeliuojama izoliuota elektros sistema, pagal IEEE (*angl. Institute of Electrical and Electronics Engineers*) mokslininkų sukurtą, 9-ių mazgų izoliuotos elektros sistemos architektūrą, tačiau patobulinta pagal šio darbo temą ir tikslą. 9-ių mazgų elektros sistema (*angl. IEEE 9 Bus system*) – tai žiedo tipo principu sujungta elektros sistema su trimis generaciniais įrenginiais ir trimis tarp jų išsidėsčiusiomis apkrovomis, sujungtomis elektros energijos perdavimo linijomis.

Patobulinta DIgSILENT programinėje erdvėje modeliuojama elektros sistema yra sudaryta viso iš 10-ies mazgų: dviejų sinchroninių generatorių, vieno vėjo elektrinių parko, sudaryto iš trisdešimties vėjo jėgainių, kurių kiekvienos galia 1,6 MW. Taip pat iš keturių galios transformatorių, šešių varžų, atstojančių elektros linijas, keturių apkrovų, prijungiamų prie 230 kV tinklo, iš kurių viena prijungiama per jungtuvą. Svarbiausias šio tyrimo elektros sistemos mazgas – baterijų energijos kaupimo sistema, kuri ir atliks sintetinės inercijos funkciją. Tiriamos elektros sistemos vienlinijinė schema pateikiama 12-ajame paveiksle, o programine įranga modeliuojamos sistemos schema 1-ajame priede.



12 pav. Vienlinijinė tiriamosios elektros sistemos schema.

Šios elektros sistemos generuojamoje dalyje yra pasirinkta modeliuoti dvi atsinaujinančių energijos šaltinių elektrinės. Didžiausios galios elektrinėje (SG/VT) yra naudojama vandens turbina, prie kurios prijungtas sinchroninis generatorius su kintamosios srovės žadinimo sistema. Vidutinės galios elektrinėje (SG/DT) – dujų turbina, su sinchroniniu generatoriumi ir nuolatinės srovės žadinimo sistema. Šiose elektrinėse turbinų, jų valdymo sistemos bei sinchroninio generatoriaus žadinimo sistemos pridedamos atskirais komponentais.

Kita atsinaujinančių energijos šaltinių elektrinė – prijungta prie tinklo – vėjo energijos elektrinė. Vėjo elektrinių parke elektros energiją generuoja trisdešimt vėjo jėgainių, kurių kiekvienos galia yra 1,6 MW. Taip pat kiekvieną vėjo jėgainę sudaro vėjo turbina, prie kurios prijungtas sinchroninis generatorius su nuolatinių magnetų žadinimo sistema bei tarpine nuolatinės srovės grandimi.

Sintetinei inercijai modeliuoti prie elektros sistemos prijungiama baterijų energijos kaupimo sistema, kurios vardinė galia yra 30 MW, o vardinė talpa – 6,48 MWh. BEKS prie tinklo prijungta per dvipusį keitiklį, kurio užduotis perduoti elektros energiją iš elektros sistemos į elektrocheminį kaupiklį ir atvirkščiai – iš elektrocheminio kaupiklio į elektros sistemą. Šios simuliuojamos elektros sistemos elementų galių pasiskirstymas pateiktas 1-oje lentelėje.

**1 lentelė.** Modeliuojamos elektros sistemos elementų parametrai.

Elementas elektros sistemoje	Žymėjimas	Parametras	Vertė
<b>Generuojamoji dalis</b>			
Dujų turbina su sinchroniniu generatoriumi	SG/DT	Vardinė galia, $S_{SG/DT}$	80 MVA
		Vardinė įtampa, $U_{SG/DT}$	18 kV
Vandens turbina su sinchroniniu generatoriumi	SG/VT	Vardinė galia, $S_{SG/VT}$	145 MVA
		Vardinė įtampa, $U_{SG/VT}$	16,5 kV
Vėjo elektrinių parkas	VEP	Vardinė galia, $S_{VEP}$	50 MVA
		Vardinė įtampa, $U_{VEP}$	3,3 kV
Baterijų energijos kaupimo sistema	BEKS	Vardinė galia, $P_{BEKS}$	30 MW
		Vardinė talpa, $C_{BEKS}$	6,48 MWh
		Vardinė įtampa, $U_{BEKS}$	0,4 kV
<b>Galios perdavimo įrenginiai</b>			
Galios transformatorius	T-1	Vardinė galia, $S_{T-1}$	150 MVA
		Transf. koeficientas, $k_{T-1}$	230/18 kV
	T-2	Vardinė galia, $S_{T-2}$	200 MVA
		Transf. koeficientas, $k_{T-2}$	230/16,5 kV
	T-3	Vardinė galia, $S_{T-3}$	50 MVA
		Transf. koeficientas, $k_{T-3}$	230/20 kV
	T-4	Vardinė galia, $S_{T-4}$	50 MVA
		Transf. koeficientas, $k_{T-4}$	20/3,3 kV
	T-5	Vardinė galia, $S_{T-5}$	50 MVA
		Transf. koeficientas, $k_{T-5}$	230/0,4 kV
El. energijos perdavimo linija	L <sub>1,1</sub>	Aktyvioji varža, $R_{L1,1}$	4,497 Ω
		Reaktyvioji varža, $X_{L1,1}$	38,088 Ω
		Pilnutinė varža, $Z_{L1,1}$	38,353 Ω
	L <sub>1,2</sub>	Aktyvioji varža, $R_{L1,2}$	6,295 Ω
		Reaktyvioji varža, $X_{L1,2}$	53,323 Ω
		Pilnutinė varža, $Z_{L1,2}$	53,693 Ω
	L <sub>2,1</sub>	Aktyvioji varža, $R_{L2,1}$	16,928 Ω
		Reaktyvioji varža, $X_{L2,1}$	85,169 Ω
		Pilnutinė varža, $Z_{L2,1}$	86,835 Ω
	L <sub>2,2</sub>	Aktyvioji varža, $R_{L2,2}$	5,290 Ω
		Reaktyvioji varža, $X_{L2,2}$	44,965 Ω
		Pilnutinė varža, $Z_{L2,2}$	45,275 Ω
	L <sub>3,1</sub>	Aktyvioji varža, $R_{L3,1}$	20,631 Ω
Reaktyvioji varža, $X_{L3,1}$		89,930 Ω	
Pilnutinė varža, $Z_{L3,1}$		92,266 Ω	
L <sub>3,2</sub>	Aktyvioji varža, $R_{L3,2}$	8,993 Ω	

Elementas elektros sistemoje	Žymėjimas	Parametras	Vertė
		Reaktyvioji varža, $X_{L3,2}$	48,668 $\Omega$
		Pilnutinė varža, $Z_{L3,2}$	49,492 $\Omega$
	L <sub>4</sub>	Aktyvioji varža, $R_{L4}$	1,569 $\Omega$
		Reaktyvioji varža, $X_{L4}$	10,096 $\Omega$
		Pilnutinė varža, $Z_{L4}$	10,217 $\Omega$
Vartojamoji dalis			
Apkrova	Apk-1	Aktyvioji galia, $P_{Apk-1}$	50 MW
		Reaktyvioji galia, $Q_{Apk-1}$	25 MVar
	Apk-2	Aktyvioji galia, $P_{Apk-2}$	75 MW
		Reaktyvioji galia, $Q_{Apk-2}$	35 MVar
	Apk-3	Aktyvioji galia, $P_{Apk-3}$	65 MW
		Reaktyvioji galia, $Q_{Apk-3}$	25 MVar
	Apk-4	Aktyvioji galia, $P_{Apk-4}$	40 MW
		Reaktyvioji galia, $Q_{Apk-4}$	15 MVar

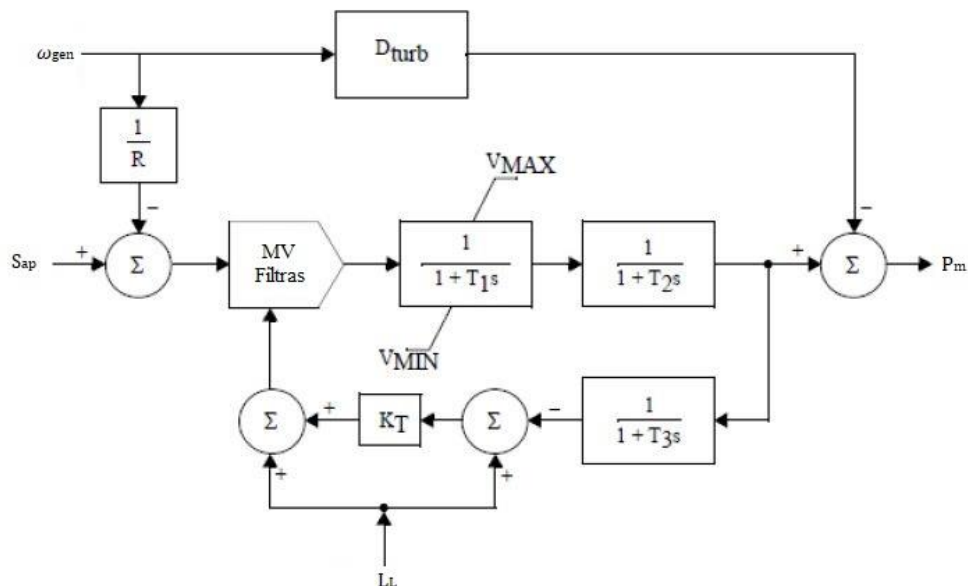
Taip pat didelę reikšmę turintys modeliuojamos sistemos rodikliai:

- Skaičiavimai DIGSILENT PowerFactory programinėje erdvėje atliekami naudojant efektyvių verčių (*angl. Root Mean Square - RMS*) skaičiavimo būdą.
- Elektros sistemos dažnis parinktas – 50 Hz.
- Parinktos generuojančių šaltinių inercijos konstantos:
  - Sinchroninio generatoriaus su dujų turbina inercijos konstanta – 2,083 sek.;
  - Sinchroninio generatoriaus su vandens turbina inercijos konstanta – 4,775 sek.;
  - Vėjo elektrinių parko, kiekvienos vėjo jėgainės esančio generatoriaus inercijos konstanta – 1 sek.
- Vėjo elektrinių parko jėgainių nominalus vėjo greitis 15 m/s, tačiau simuliacijos metu vėjo greitis elektrinių parke parinktas 13,5 m/s, todėl tiekama reali galia į tinklą yra 45 MW.
- Elektros sistemoje modeliuojama 4-oji apkrova, skirta sukurti sistemos galių nebalansui. Ji prie elektros sistemos prijungiama per jungtuvą. Prijungus Apk-4, po 20-ies sekundžių elektros sistemos stabilus veikimo, sukuriama generuojamos galios deficitas, kurio metu elektros sistemoje prasideda dažnio pokyčių procesai.
- Nepaminėti sistemos elementų parametrai paliekami pagal nutylėjimą.

## 2.2. Elektrinių turbinos ir jų valdymo sistemos

Turbina elektrinėje yra vienas iš pagrindinių elementų, padedančių dalyvauti elektros energijos gamyboje. Tai sudėtingas įrenginys bei įrenginių sistema, kuriai reikalingas atitinkamas valdymas. Šiame tyrime modeliuojamos dvi elektrinės su dujų ir vandens turbinomis bei jų valdymo sistemomis. Kiekvienos turbinos valdymo sistemos turi unikalią sandarą ir ypatumus. Toliau pateikiamos modeliuojamos turbinos, su jų valdymo sistemomis.

Dujų turbina – tai vienas iš energijos rūšies keitimo įrenginių (šiluminis variklis), kuris dujų degimo reakcijos sukuriama termo-mechaninę plėtimosi energiją paverčia į mechaninę, išgaunant sukimo momentą. Šis sukimo momentas panaudojamas elektros generatoriaus rotoriumi sukurti, kuris sukimo momento sukauptą energiją paverčia į elektros energiją. Šiame tyrime modeliuojama sunkiųjų dujų turbina su statizmo valdymu, pastovia apkrovos riba bei trimis laiko konstantomis. Dujų turbinos su valdymo sistema blokinė schema pateikta 13-ajame paveiksle.

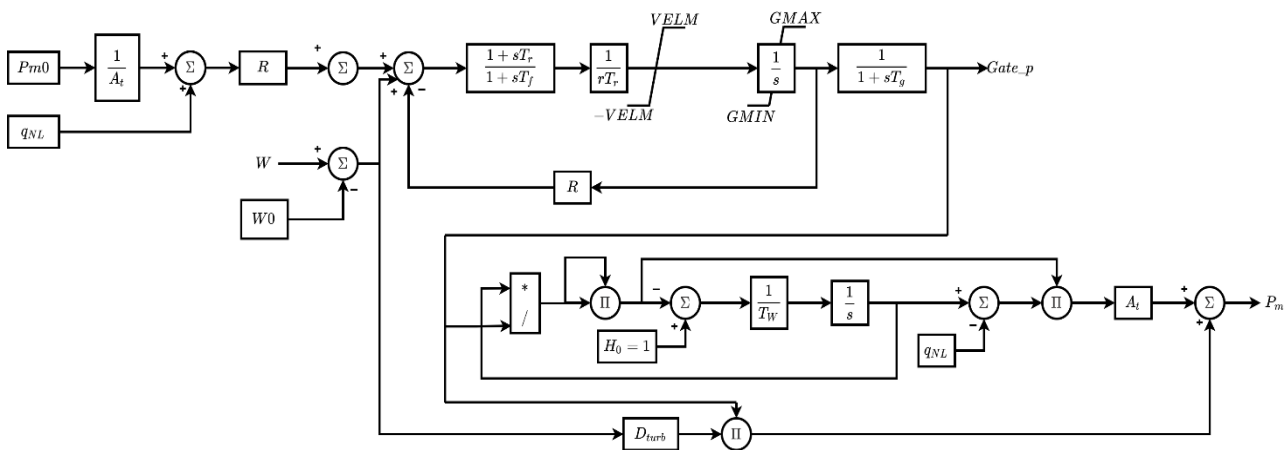


13 pav. Dujų turbinos kartu su valdymo sistema blokinė schema [17].

Dujų turbinos su valdymo sistema blokinės schemos kintamieji:  $\omega_{gen}$  – generatoriaus kampinis greitis;  $S_{ap}$  – ataskaitinė generatoriaus apkrovos vertė;  $D_{turb}$  – slopinimo koeficientas;  $R$  – statizmo koeficientas;  $K_T$  – valdymo stiprinimo koeficientas;  $L_L$  – apkrovos ribinė vertė;  $T_1$  – kuro vožtuvo laiko konstanta;  $T_2$  – turbinos laiko konstanta;  $T_3$  – apkrovos ribinė laiko konstanta;  $P_m$  – mechaninė galia.

Pagrindiniai trys įvesties signalai yra generatoriaus kampinis greitis ( $\omega_{gen}$ ), ataskaitinė generatoriaus apkrovos vertė ( $S_{ap}$ ) ir apkrovos ribinė vertė ( $L_L$ ). Rezultate gaunamas mechaninės energijos signalas ( $P_m$ ), kuris perduodamas generatoriui.

Vandens turbina yra energijos rūšies keitimo įtaisas arba variklis, kuris vandens sukaupta kinetinę arba potencinę energiją paverčia sukimo momentą turinčia mechanine energija. Tekantis vanduo pro hidroturbinos mentes, perduoda energija velenu į elektros generatorių, kuris sukimo energiją paverčia į elektros energiją. Šiame darbe modeliuojama tiesioginio modelio vandens turbina kartu su regulatoriumi bei servo varikliu, kurio užduotis yra valdyti vandens srauto sklendžių padėtį, kad išlaikyti pastovų generatoriaus greitį, o tuo pačiu ir elektros sistemos dažnį. Vandens turbinos su valdymo sistema blokinė schema pateikta 14-ame paveiksle.



14 pav. Vandens turbinos kartu su valdymo sistema blokinė schema [17].

Vandens turbinos su valdymo sistema blokinės schemos kintamieji:  $P_{m0}$  – pradinė mechaninė galia;  $A_t$  – turbinos stiprinimo koeficientas;  $q_{NL}$  – srauto greitis be apkrovos;  $R$  – nuolatinis statizmo koeficientas;  $W$  – generatoriaus kampinis greičio vertė;  $W_0$  – ataskaitinė kampinio greičio vertė;  $T_r$  – valdymo sistemos laiko konstanta;  $T_f$  – filtro laiko konstanta;  $r$  – laikinas statizmo koeficientas;  $s$  – diferenciacijos operatorius;  $T_g$  – servo variklio laiko konstanta;  $Gate_p$  – sklendžių padėtis;  $D_{turb}$  – slopinimo koeficientas;  $H_0$  – potencinė energija;  $T_w$  – vandens tėkmės laiko konstanta;  $P_m$  – mechaninė galia.

Taip pat verta paminėti, jog tiesioginio modelio vandens turbinoje yra nepaisoma sukuriama trintis, vandens tėkmės greitis kinta tiesiogiai atsidarant sklendėms, sklendžių atidarymo metu vandens smūgio banga nepaisoma ir turbinos išėjimo galia yra proporcinga vandens srauto greičio ir potencinės energijos sandaugai.

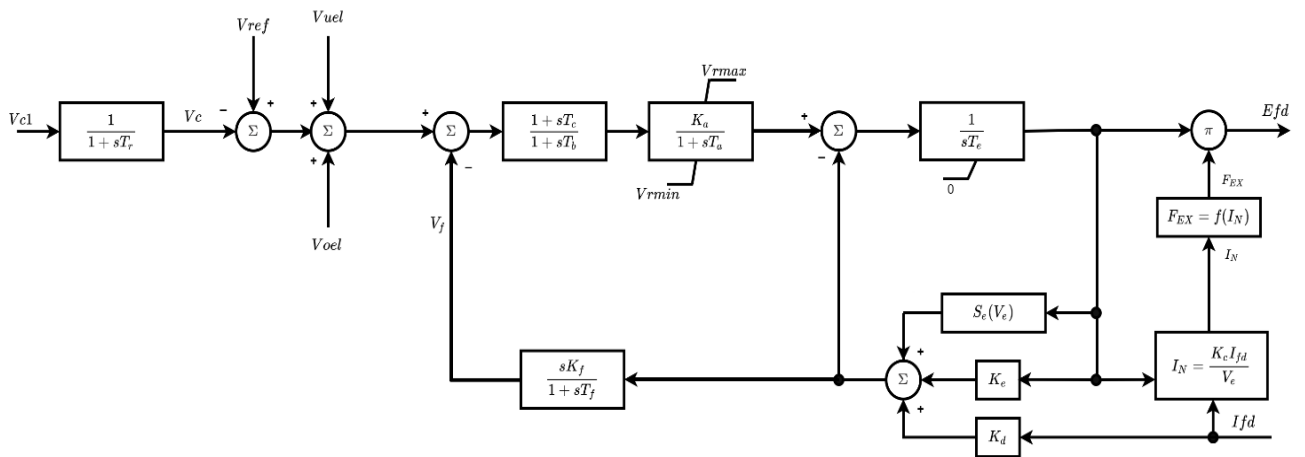
Dujų bei vandens turbinų modeliai su jų valdymo sistemomis DIgSILENT PowerFactory modeliavimo erdvėje pateikti atitinkamai 2-ajame bei 3-ajame prieduose.

### 2.3. Elektrinių sinchroninių generatorių žadinimo sistemos

Sinchroninio generatoriaus žadinimo sistema yra svarbus komponentas, naudojamas generatoriaus viduje sužadinti magnetiniam laukui tarp statoriaus ir rotoriaus apvijų. Šis procesas atliekamas, kai į rotoriaus apvijas yra tiekama nuolatinė elektros srovė, kuri aplink rotorių sukuria (indukuoja) magnetinį lauką. Pagal žadinimo sistemų energijos tiekimo šaltinį yra išskiriamos trys sinchroninių generatorių žadinimo sistemų tipai [18]:

1. Statinės (ST) žadinimo sistemos, kuriose žadinimui reikalinga energija yra tiekama naudojantis transformatoriais arba papildomomis generatoriaus grandinėmis ir elektros srovės lygintuvais;
2. Kintamosios srovės (AC) žadinimo sistemos, kuriose sinchroninio generatoriaus magnetinio lauko žadinimui reikalinga nuolatinė srovė gaunama pasitelkiant kintamosios srovės generatorių ir stacionarius arba besisukančius lygintuvus;
3. Nuolatinės srovės (DC) žadinimo sistemos, kuriose kaip šaltinis yra naudojamas nuolatinės srovės generatorius su komutatoriumi.

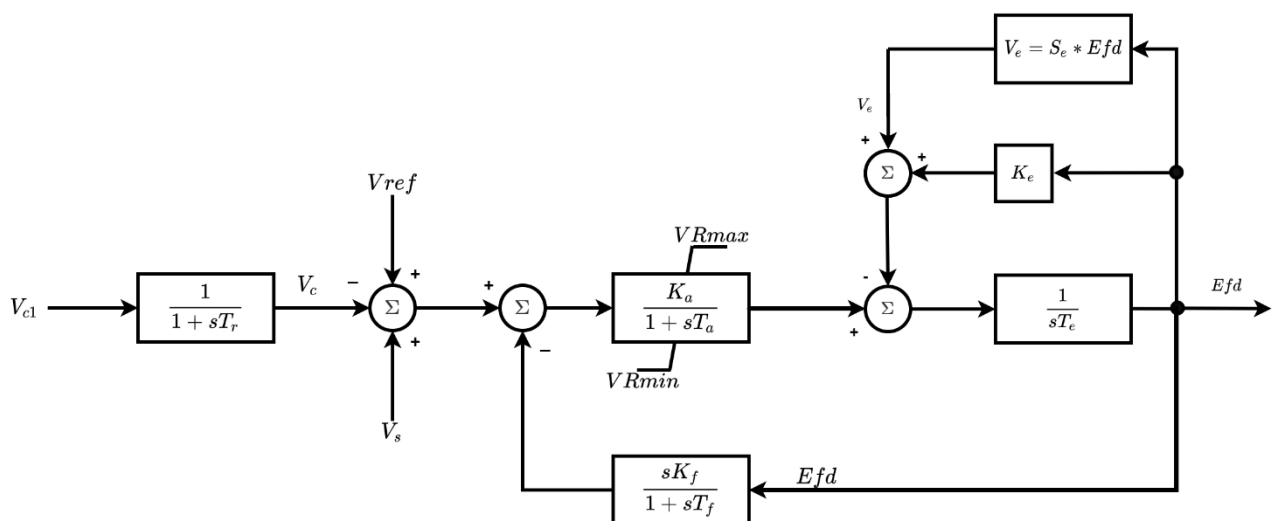
Šiame tyrime, elektrinių su sinchroniniais generatoriais, žadinimo sistemoms yra modeliuojami du žadinimo sistemų tipai. Tai kintamosios srovės žadinimo sistema, naudojama elektrinėje su vandens turbina, jos blokinė schema pateikta 15-ajame paveiksle, ir nuolatinės srovės žadinimo sistema, naudojama elektrinėje su dujų turbina, jos blokinė schema pateikta 16-ajame paveiksle.



**15 pav.** Sinchroninio generatoriaus su vandens turbina kintamosios srovės tipo žadinimo sistemos blokinė schema [18].

Kintamosios srovės žadinimo sistemos blokinės schemos kintamieji:  $V_{cl}$ ,  $V_c$  – generatoriaus gnybtų įtampa (prieš ir po filtro);  $T_r$  – regulatoriaus filtro laiko konstanta;  $V_{ref}$  – įtampos regulatoriaus ataskaitinė įtampa;  $V_{oel}$ ,  $V_{uel}$  – peržadinimo ir nedažadinimo įtampų ribinės vertės;  $V_f$  – žadinimo sistemos įtampa;  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_c$  – įtampos regulatoriaus laiko konstantos;  $K_a$  – įtampos regulatoriaus stiprinimo koeficientas;  $V_{max}$ ,  $V_{min}$  – maksimali ir minimali įtampos regulatoriaus įtampos vertės;  $T_e$  – žadinimo įrenginio laiko konstanta;  $K_e$  – žadinimo įrenginio laiko konstanta susijusi su žadinimo lauku,  $S_e$  – žadinimo įrenginio išsotinimo koeficientas,  $V_e$  – žadinimo įrenginio įtampa išsotinimo metu;  $K_d$  – demagnetizavimo koeficientas;  $K_c$  – srovės lygintuvo apkrovos koeficientas;  $E_{fd}$  – žadinimo sistemos išėjimo įtampa;  $I_{fd}$  – sinchroninio generatoriaus pradinė magnetinio lauko srovė;  $s$  – diferencijavimo operatorius.

Kintamosios srovės sinchroninio generatoriaus žadinimo sistemoje pagrindiniai trys įvesties signalai yra generatoriaus pradinė magnetinio lauko srovė ( $I_{fd}$ ), generatoriaus gnybtų įtampa ( $V_{cl}$ ) ir peržadinimo ir nedažadinimo įtampų ribinės vertės ( $V_{oel}$ ,  $V_{uel}$ ). Schemos rezultate gaunama žadinimo įtampa ( $E_{fd}$ ), kuri paduodama į generatoriaus žadinimo apviją.



**16 pav.** Sinchroninio generatoriaus su dujų turbina nuolatinės srovės tipo žadinimo sistemos blokinė schema [18].

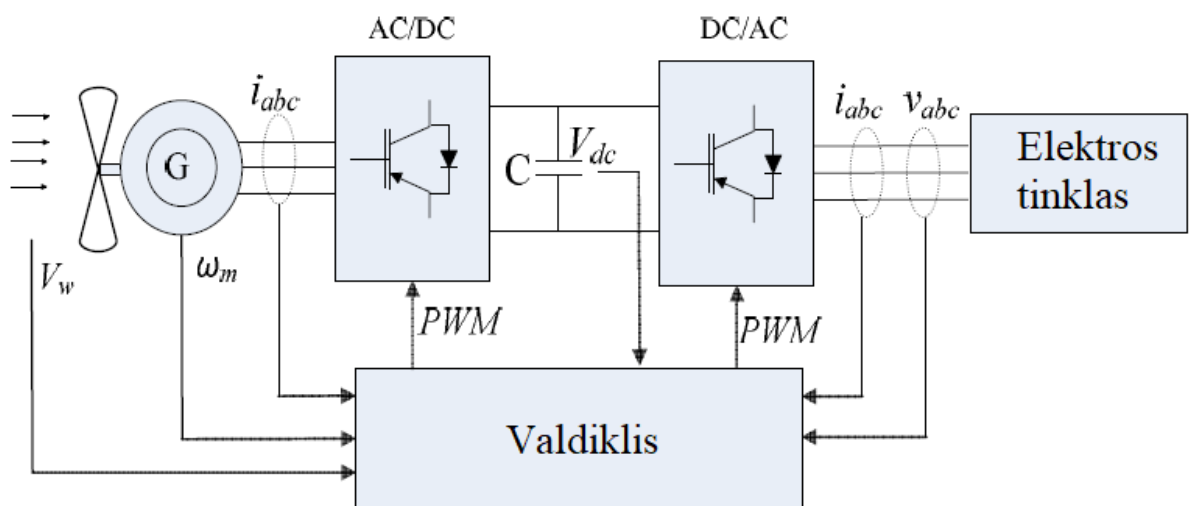
Nuolatinės srovės žadinimo sistemos blokinės schemos kintamieji:  $V_{cl}$ ,  $V_c$  – generatoriaus gnybtų įtampa (prieš ir po filtro);  $T_r$  – regulatoriaus filtro laiko konstanta;  $V_{ref}$  – įtampos regulatoriaus ataskaitinė įtampa;  $V_s$  – elektros sistemos stabilizatoriaus įtampa;  $K_a$  – įtampos regulatoriaus stiprinimo koeficientas;  $T_a$  – įtampos regulatoriaus laiko konstantos;  $V_{max}$ ,  $V_{min}$  – maksimali ir minimali įtampos regulatoriaus įtampos vertės;  $T_e$  – žadinimo įrenginio laiko konstanta;  $K_e$  – žadinimo įrenginio laiko konstanta susijusi su žadinimo lauku,  $S_e$  – žadinimo įrenginio išsotinimo koeficientas,  $V_e$  – žadinimo įrenginio įtampa išsotinimo metu;  $K_f$  – žadinimo įrenginio valdymo sistemos stabilizatoriaus stiprinimo koeficientas;  $T_f$  – žadinimo įrenginio valdymo sistemos stabilizatoriaus laiko konstanta;  $E_{fd}$  – žadinimo įrenginio išėjimo įtampa;  $s$  – diferencijavimo operatorius.

Nuolatinės srovės sinchroninio generatoriaus žadinimo sistemoje pagrindiniai įvesties signalai yra tik du, tai generatoriaus gnybtų įtampa ( $V_{cl}$ ) ir elektros sistemos stabilizatoriaus įtampa ( $V_s$ ). Schemos rezultate gaunamas žadinimo įtampos signalas ( $E_{fd}$ ), kuris perduodamas sinchroniniam generatoriui.

Tyrimo detalios, sinchroninių generatorių automatinų žadinimo įrenginių modeliuojamų DIgSILENT programiniame pakete, schemos pateiktos 4-jame ir 5-jame prieduose.

## 2.4. Vėjo elektrinių generatoriai ir jų valdymo sistema

Vėjo energijos jėgainė – tai atsinaujinančios energijos rūšies keitimo įrenginys, skirtas vėjo sukuriama kinetinę energiją paversti į elektros energiją. Tyrime modeliuojamas vėjo elektrinių parkas sudarytas iš trisdešimties vėjo jėgainių su sinchroniniais generatoriais, žadinamais nuolatinės srovės magnetų sistema (*angl. Permanent Magnet Synchronous Generator – PMSG*). Pagal konstrukciją visa pagaminta elektros energija į tinklą perduodama per nuolatinės srovės intarpo sistemą, kurią sudaro statoriaus ir tinklo dalies keitikliai. Blokinė, vėjo jėgainės su sinchroniniu generatoriumi ir nuolatinės srovės intarpo sistema, schema pateikta 17-ajame paveiksle.



**17 pav.** Vėjo jėgainės su sinchroniniu generatoriumi ir tarpine nuolatinės srovės grandimi blokinė schema [19].

Dinaminis sinchroninio generatoriaus su nuolatinėmis magnetų žadinimo sistema modelis gali būti aprašomas  $d-q$  ataskaitinėje sistemoje ir pateikiamas 19-ajame straipsnyje.  $D-q$  sistema yra unikali, jog ji kinta laike numatytu kampiniu dažniu, o reikiamiems elektros sistemos kintamiesiems –

įtampai, elektros srovei ar netgi magnetiniam srautui – skaičiuoti reikalingos tik dvi kintamųjų dedamosios, kai trifazėje *abc* sistemoje naudojamos trys. Todėl statoriaus įtampa *d-q* ataskaitinėje sistemoje išreiškiama 9-ąja ir 10-ąja formulėmis.

$$V_{gd} = R_g * i_d + L_d * \frac{di_d}{dt} + \frac{d\Psi_f}{dt} - \omega_e * L_q * i_q; \quad (9)$$

$$V_{gq} = R_g * i_q + L_q * \frac{di_q}{dt} + \frac{d\Psi_f}{dt} - \omega_e * (L_d * i_d + \Psi_f); \quad (10)$$

čia:  $L_q$  ir  $L_d$  – generatoriaus induktyvumas  $q$  ir  $d$  ašių ataskaitinėje sistemoje;  $R_g$  – statoriaus varža;  $\Psi_f$  – nuolatinis magnetinis srautas;  $\omega_e$  – elektrinis sinchroninio generatoriaus sukimosi greitis;  $i_d$  – srovės  $d$  ašyje dedamoji;  $i_q$  – srovės  $q$  ašyje dedamoji.

Taip pat elektrinis sinchroninio generatoriaus sukimosi greitis išreiškiamas 11-ąja formule.

$$\omega_e = (p_n/2) * \omega_m; \quad (11)$$

čia:  $p_n$  – polių porų skaičius sinchroniniame generatoriuje;  $\omega_m$  – mechaninis kampinis greitis.

Naudojantis Park transformacija *d-q* sistemos kintamieji iš trifazės sistemos kintamųjų gaunami naudojantis 12-ąja formule. Taip pat trifazės sistemos kintamuosius galime gauti naudojantis atvirkštinę Park transformaciją, kuri pateikiama 13-oje formulėje.

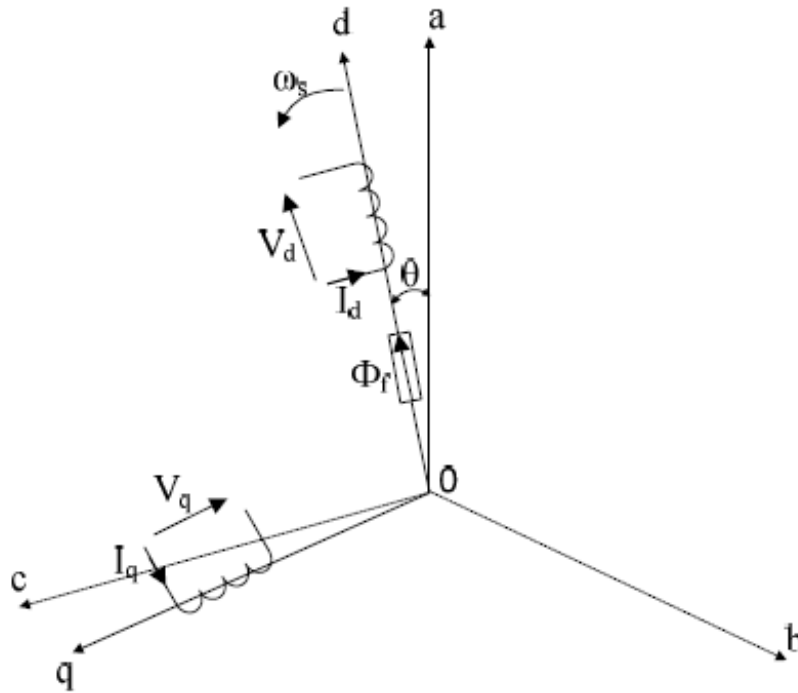
$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t & 1 \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix}; \quad (13)$$

čia:  $\omega t$  – rotoriaus kampinė padėtis.

Šių dvifazės *d-q* bei trifazės *abc* sistemų vektorinių diagramų skirtumai pateikti 18-ajame paveiksle.





**18 pav.** Ataskaitinių sistemų palyginimas tarp dvifazės  $d-q$  ir trifazės  $abc$  sistemų vektorių [19].

Kaip jau žinoma, generacinių įrenginių, šiuo atveju vėjo elektrinių, išėjime įtampa ir dažnis turi būti pastovūs dydžiai, todėl už šios užduoties sprendimą yra atsakingi nuolatinės srovės intarpo komponentai: statoriaus ir tinklo dalies keitikliai. Tinklo dalies keitiklis visada veikia pagal elektros tinklo dažnį, kai statoriaus dalies keitiklis – įvairaus dažnio diapazone. Šie nuolatinės srovės intarpo įrenginiai yra sudaryti iš puslaidininkinių įrenginių, izoliuotosios užtūros dvipolių tranzistorių (*angl. Insulated-Gate Bipolar Transistor – IGBT*), kurių valdymui yra naudojama impulso pločio moduliacijos (*angl. Pulse-Width Modulation – PWM*) sistema. Todėl ryšys tarp generatoriaus gnybtų įtampos  $V_G$  ir nuolatinės srovės intarpo įtampos  $V_{DC}$  per statoriaus dalies keitiklį yra išreiškiamas 14-ąja formule [20].

$$V_G = m_G \frac{1}{2\sqrt{2}} V_{DC}; \quad (14)$$

čia:  $m_G$  – impulso pločio moduliacijos koeficientas statoriaus dalies keitikliui.

Taip pat ryšys tarp elektros tinklo įtampos  $V_N$  ir nuolatinės srovės intarpo įtampos  $V_{DC}$  per tinklo dalies keitiklį išreiškiamas 15-ąja formule [20].

$$V_N = m_N \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} V_{DC}; \quad (15)$$

čia:  $m_N$  – impulso pločio moduliacijos koeficientas tinklo dalies keitikliui.

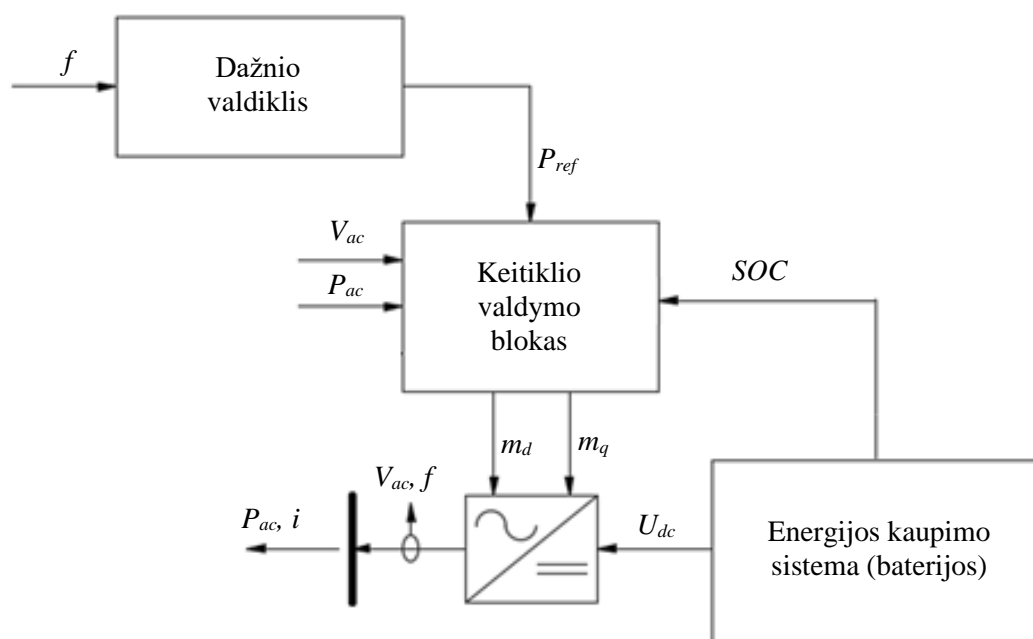
Impulso pločio moduliacijos koeficientai  $m_G$  ir  $m_N$  yra valdymo sistemos kintamieji. Šios pateiktos 14-ta ir 15-ta formulės galioja tik tuomet, kai tenkinama moduliacijos koeficiento sąlyga  $0 < m < 1$ .

Esant didesnėms moduliacijos koeficiento  $m$  vertėms, keitikliai išimagnetina ir atsiranda žemų dažnių harmonikų padidėjimas [20].

Šių vėjo elektrinių generatorių galia ir nuolatinės srovės intarpo įtampa yra valdoma statoriaus dalies keitikliu, kuris sinchroninio generatoriaus kuriamą kintamosios srovės įtampą paverčia nuolatinės srovės įtampa. Kadangi sinchroninis generatorius prijungtas prie tinklo per nuolatinės srovės intarpą, tai reiškia, kad jo rotoriaus sukimosi dažnis yra visiškai atskirtas nuo tinklo dažnio per valdomą keitiklį. Toks prijungimo būdas suteikia platų generatoriaus greičio varijavimo diapazoną. Tai ypač svarbu, kadangi efektyviam vėjo jėgainės darbu generatoriaus rotorius turi sukintis optimaliu greičiu atsižvelgiant į vėjo greitį. Toliau tinklo dalies keitiklis naudojamas perduoti aktyviąją galią iš statoriaus dalies keitiklio į elektros tinklą bei reguliuoti reaktyviąją galią, kuria sinchroninis generatorius keičiasi su elektros tinklu [20].

## 2.5. Baterijų energijos kaupimo sistema ir jos valdymo sistema

Šiame elektros sistemos modelyje baterijų energijos kaupimo sistema prie tinklo prijungiama per galios transformatorių. Pati baterijų energijos kaupimo sistema (BEKS) susideda iš dviejų subsistemų – galios konvertavimo sistemos, kuri keičia nuolatinės srovės įtampą į kintamosios srovės įtampą, bei energijos kaupimo sistemos. BEKS blokinė schema pateikta 19-ajame paveiksle.



19 pav. Baterijų energijos kaupimo sistemos blokinė schema.

Energijos kaupimo dalyje yra modeliuojamas svarbiausias įrenginys – baterijos. Tyrime pasirinktas modeliuoti apytikslis baterijos modelis tinkamas sintetinės inercijos įtakos elektros sistemos dažnio charakteristikų tyrimui. Baterija modeliuojama paprastos konstrukcijos be parazitinės reakcijos poveikio. Šiame modelyje pagrindinis baterijų parametras įkrovos būseną (*angl. State of Charge – SOC*) yra išskaičiuojamas 16-ąja formule [21].

$$U_{dc} = U_{max}SOC + U_{min}(1 - SOC) - I_{bat}Z_i ; \quad (16)$$

čia:  $U_{min}$  – iškrauto baterijų elemento įtampa;  $U_{max}$  – maksimali įkrauto baterijų elemento įtampa,  $I_{bat}$  – baterijos elemento srovė,  $Z_i$  – baterijos elemento vidinė varža.

Šio tyrimo metu energijos kaupimo sistemos parametrai DIgSILENT programiniame pakete aprašomi 2-oje lentelėje.

**2 lentelė.** BEKS baterijų modeliavimo techniniai duomenys DIgSILENT programos erdvėje.

Parametras	Vertė
Įkrovos būseną, %	80
Kiekvienos celės talpa, Ah	120
Minimali celės įtampa, V	12
Maksimali celės talpa, V	13,85
Vidinė celės varža, $\Omega$	0,001
Lygiagrečiai sujungtu celių skaičius, vnt.	60
Nuosekliai sujungtu celių skaičius, vnt.	65
Nominali baterijos įtampa, V	900

Toliau galios konvertavimo sistema modeliuojama naudojantis 2-jų lygių impulso pločio moduliacijos keitikliu (*angl. 2-level PWM converter*). Šis keitiklis yra valdomas vektoriniu būdu,  $d$ - $q$  ataskaitinėje sistemoje, pagal įtampą. Ataskaitinėje sistemoje  $d$  ašis representuoja aktyvią, o  $q$  – reaktyvią dedamąsias. Tiekiamą galią į tinklą galima išreikšti taip [22]:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(V_{ac,d} \times i_d + V_{ac,q} \times i_q) \\ Q = \frac{3}{2}(V_{ac,q} \times i_d - V_{ac,d} \times i_q) \end{cases}; \quad (17)$$

čia:  $P$  – aktyvioji galia,  $Q$  – reaktyvioji galia,  $V_{ac,d}$  – įtampos aktyvioji dedamoji,  $V_{ac,q}$  – įtampos reaktyvioji dedamoji,  $i_d$  – srovės aktyvioji dedamoji,  $i_q$  – srovės reaktyvioji dedamoji.

Kadangi instaliuota į tinklą BEKS dažniausiai naudojama tiekti arba vartoti aktyviąją galią, esant galios faktoriui  $\cos \varphi = 1$ , tai ataskaitinės sistemos  $d$  ašies įtampos vektoriaus ašis sutampa su elektros sistemos įtampos vektoriaus ašimi. Tuomet reaktyvioji įtampos dedamoji  $V_{ac,q} = 0$  ir tiekiamą aktyvioji galia išreiškiama formule:

$$P = 3/2(V_{ac,d} \times i_d + V_{ac,q} \times i_q); Q = 0 \quad (18)$$

Taip pat remiantis ataskaitine  $d$ - $q$  sistema ryšys tarp linijinės tinklo įtampos  $V_{ac}$ , kuri yra išreiškiama 19-ąja formule, ir nuolatinės srovės įtampos  $U_{dc}$  išreiškiamas [21]:

$$V_{ac} = V_{ac,d} + jV_{ac,q}; \quad (19)$$

$$V_{ac,d} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \times m_d \times U_{dc}; \quad (20)$$

$$V_{ac,q} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \times m_q \times U_{dc}; \quad (21)$$

čia:  $U_{dc}$  – nuolatinės srovės įtampa;  $m_d$  – moduliacijos koef. realioji dedamoji;  $m_q$  – moduliacijos koef. menamoji dedamoji.

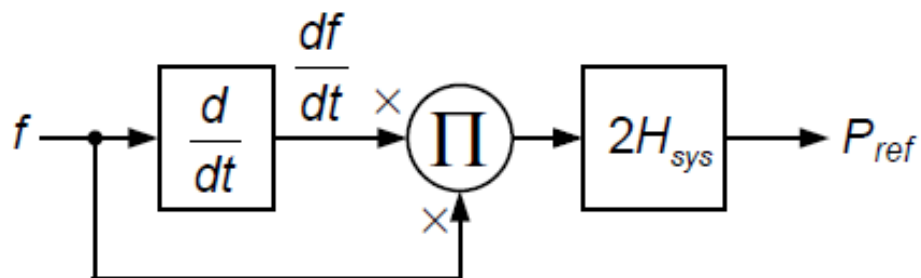
Norint, kad BEKS prisidėtų prie elektros sistemos inercijos, galios konvertavimo sistemos valdyme turi būti diegiamas atitinkamas sintetinės inercijos valdiklis.

## 2.6. Sintetinės inercijos valdiklis

Pagrindinio šio tyrimo tikslo, inercinio atsako į elektros sistemos dažnio kitimą baterijų energijos kaupimo sistemoje sužadinimą yra naudojamas specialus valdiklis, kitaip vadinamas kaip dažnio kitimo greičio (*angl. Rate of Change of Frequency – RoCoF*) arba sintetinės inercijos valdikliu. Valdiklis seka elektros tinklo dažnį, o šiam pradėjus kisti ir remiantis pateikta 15-ąja formule perduoda į BEKS galios konvertavimo sistemą signalą, imituoti inercinį atsaką į elektros sistemos dažnio svyravimus [21]. Sintetinės inercijos valdiklio blokinė schema pateikta 20-ajame paveiksle.

$$P_{Hsyn} = 2H_{syn}f_{sys} \frac{df_{sys}}{dt}; \quad (22)$$

čia:  $H_{syn}$  – sintetinės inercijos koeficientas;  $f_{sys}$  – sistemos dažnis.



20 pav. Sintetinės inercijos valdiklio blokinė schema [21].

Pagal sintetinės inercijos valdiklio blokinę schemą (20 pav.), įėjime paduodamas elektros tinklo dažnio  $f$  signalas. Toliau elektros tinklo dažnio signalas yra diferencijuojamas, o diferencijuota  $df/dt$  vertė lyginama su realiu elektros sistemos dažniu  $f$ . Gautas skirtuminis signalas dauginamas iš sintetinės inercijos  $H_{syn}$  koeficiento, padauginto iš dviejų. Taip valdiklio išėjime suformuojama inercinės galios vertė BEKS staigiai reaguoti į dažnio pokytį elektros sistemoje. Verta paminėti, jog sintetinės inercijos konstanta baterijų energijos kaupimo sistemoje priklauso nuo baterijos išsikrovimo greičio. Šio valdiklio schema DIGSILENT PowerFactory erdvėje pateikta 6-ajame priede.

## **2.7. Modeliuojamos elektros sistemos tyrimo scenarijus**

Elektros sistemos modeliavimas prasideda nuo sistemos elementų išdėstymo ir sujungimo pagal 2.1 skyriuje pateiktą 12-tą paveikslą, DIgSILENT PowerFactory programiniame pakete. Tuomet paleidžiama simuliacija ir nusistovėjus 50-ies Hz elektros sistemos dažniui po paleidimo, ties 20-ąja sekunde į tinklą jungtuvu yra įjungžiama apkrova. Įjungus papildomą apkrovą susidaro galių nebalansas tarp generuojamos ir vartojamos galių, padidėja vartojimas. Esant didesniai vartojimui elektros sistemos dažnis pradeda mažėti. Vykstant šiam dažnio kitimo reiškiniai stebimos sistemos dažnio reguliavimo tendencijos.

### 3. Tyrimo rezultatų dalis

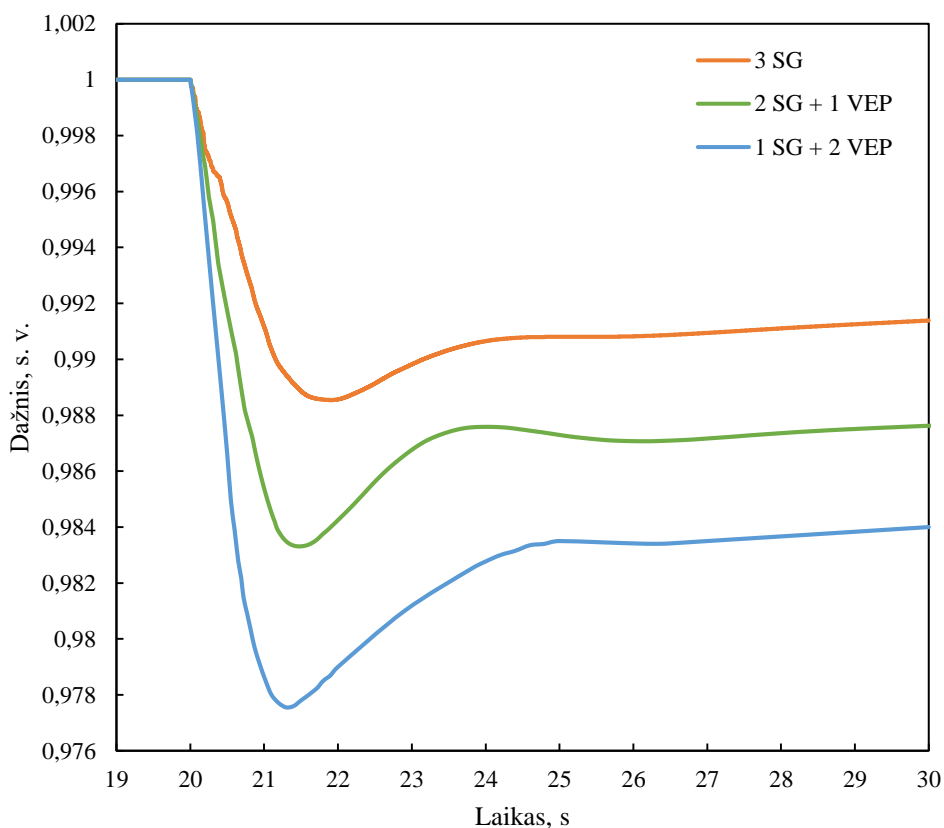
#### 3.1. Sinchroninių generatorių skaičiaus įtaka elektros sistemos inercijai

Visų pirma atliekame elektros sistemos inercijos kitimo tyrimą. Šiuo tyrimu nustatysime, kaip tiriamojoje izoliuotoje schemoje, pavaizduotoje 12-ajame paveiksle, keičiantis sinchroninių generatorių skaičiui ir sukūrus galių nebalansą (t.y. prijungus papildomą apkrovą), kinta elektros sistemos dažnio charakteristikos. Tyrimas atliekamas trimis bandymais:

- pirmuoju bandymu tiriama izoliuota sistema sudaryta iš trijų sinchroninių generatorių;
- antruoju bandymu – iš dviejų sinchroninių generatorių ir vieno vėjo elektrinių parko;
- trečiuoju bandymu – iš vieno sinchroninio generatoriaus ir dviejų vėjo elektrinių parkų.

Tiriamosios elektros sistemoje pirmuoju ir trečiuoju bandymais vieni elektros energijos šaltiniai keičiami iš sinchroninio generatoriaus į vėjo elektrinių parką ir atvirkščiai tokiu principu. Pirmojo bandymo metu vėjo elektrinių parkas (VEP) keičiamas identiška dujų turbinos elektrine su sinchroniniu generatoriumi (SG/DT), o trečiojo bandymo metu – atvirkščiai, dujų turbinos elektrinė su sinchroniniu generatoriumi (SG/DT) yra keičiama identišku vėjo elektrinių parku (VEP).

Taip pat verta pridurti, jog šios vėjo elektrinės prie tinklo yra prijungtos per galios elektroniką. Todėl atsiradus dažnio pokyčiui sistemoje, nesukuria inercijos ir nedalyvauja elektros sistemos dažnio valdyme. Kadangi VEP esantys valdikliai neišnaudoja generatoriaus rotorijoje sukauptos kinetinės energijos, stengdamiesi išlaikyti optimalų rotoriaus sukimosi greitį. Visi šių trijų bandymų elektros sistemos dažnio kitimo rezultatai pateikiami žemiau esančiame 21-ajame paveiksle ir 3-oje lentelėje.



21 pav. Sinchroninių generatorių skaičiaus įtaka elektros sistemos dažniui galių nebalanso metu.

### 3 lentelė. Sinchroninių generatorių skaičiaus įtakos elektros sistemos dažniui tyrimo rezultatai.

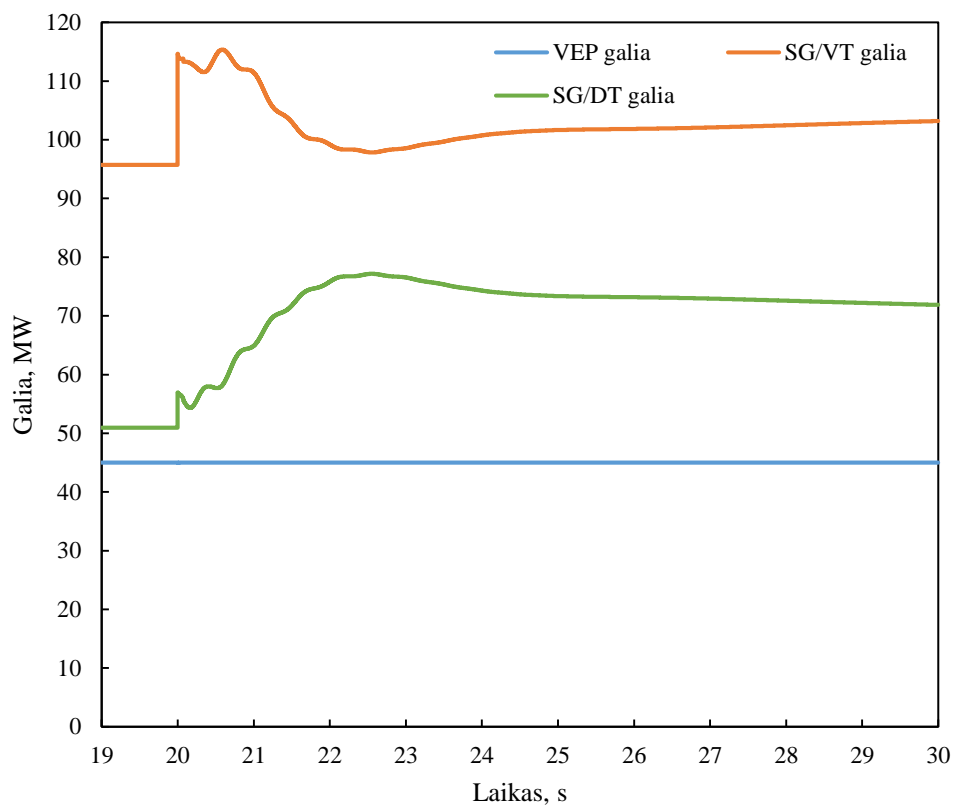
Band. Nr.	Elektros šaltinių konfigūracija sistemoje	Minimali dažnio vertė ( $f_{min}^n$ )		Dažnio nuokrypis ( $\Delta f^n$ )		Dažnio kitimo greitis ( $v_f^n$ )	
		s.v.	Hz	s.v.	Hz	s.v./s	Hz/s
1	3 SG	0,989	49,427	0,011	0,573	0,006	0,300
2	2 SG + 1 VEP	0,983	49,165	0,017	0,835	0,011	0,564
3	1 SG + 2 VEP	0,978	48,878	0,022	1,123	0,017	0,863

Pagal gautus tyrimo rezultatus yra matoma akivaizdi sinchroninių generatorių skaičiaus įtaka izoliuotos elektros sistemos inercijai. Pirmuoju bandymu dažnio nuokrypis  $\Delta f^1 = 0,011$  s.v. (0,573 Hz) ir dažnio kitimo greitis  $v_f^1 = 0,006$  s.v./s (0,300 Hz/s) tyrimo metu buvo mažiausi, o trečiuoju bandymu šie rodikliai buvo didžiausi ir siekė – dažnio nuokrypis  $\Delta f^3 = 0,022$  s.v. (1,123 Hz) ir dažnio kitimo greitis  $v_f^3 = 0,017$  s.v./s (0,863 Hz/s) vertes. Šie tyrimo rezultatai tik patvirtina, jog sistemos inercija yra labai svarbus parametras, siekiant išlaikyti stabilią elektros sistemą. Todėl norint sumažinti elektros sistemos inercijos stoką ir galimus dažnio nuokrypius dėl jos, kaip alternatyvą galima naudoti sintetinę inerciją, išgaunamą iš baterijų energijos kaupimo sistemų (BEKS).

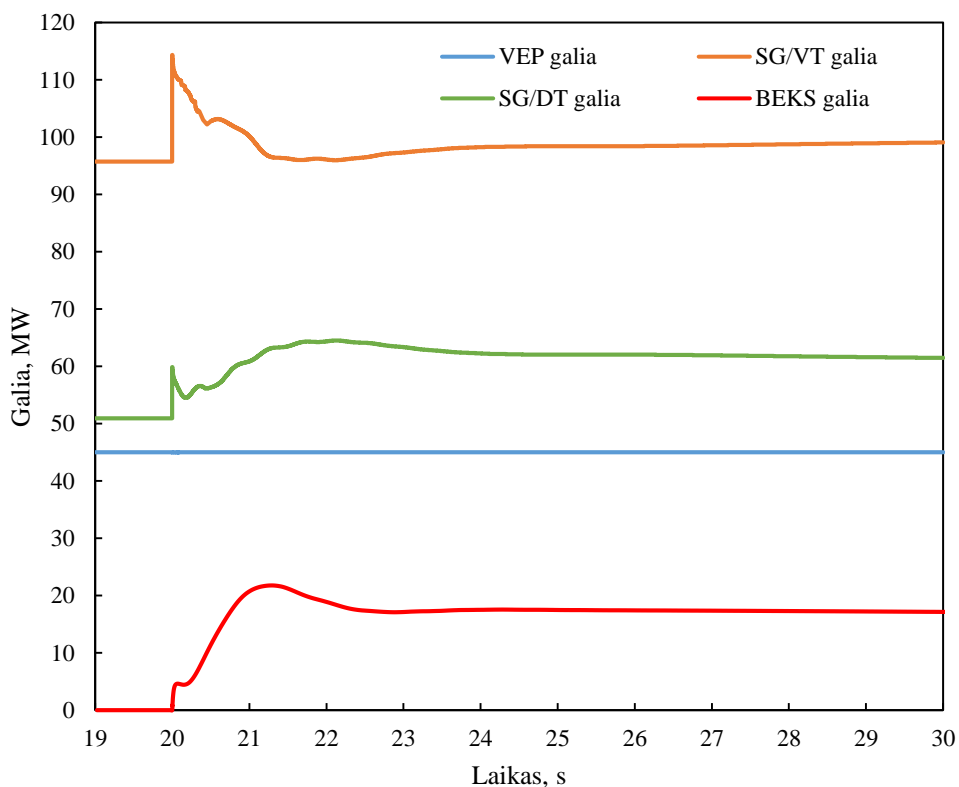
### 3.2. BEKS sintetinės inercijos įtaka elektros sistemai

Sekančiame tyrime atskleisime baterijų energijos kaupimo sistemos kuriamos sintetinės inercijos įtaką elektros sistemai. Tyrimą atliksime dviem bandymais, lyginsime tiriamąją izoliuotą elektros sistemą galių nebalanso metu neprijungus ir prijungus prie tinklo baterijų energijos kaupimo sistemą. Elektros sistemos generacinių elektros energijos šaltinių konfigūracija yra: 2 sinchroniniai generatoriai ir 1 vėjo elektrinių parkas. Baterijų energijos kaupimo sistemos, prijungimo prie tinklo atveju, sintetinės inercijos valdiklio koeficientas nustatomas ties  $H_{syn} = 100$ . Šio tyrimo abiejų bandymų rezultatai pateikiami žemiau esančioje 4-oje lentelėje ir 22-24 paveiksluose.

Pagal gautus tyrimo rezultatus elektros sistemos galių nebalanso metu matome, jog vėjo elektrinių parkas, elektros sistemos galios kitimo grafikuose (22, 23 pav.), tiek pirmuoju atveju be BEKS, tiek antruoju – su BEKS, nedalyvauja dažnio atkūrimo procese. Taip pat žiūrint toliau į šiuos galios kitimo grafikus, galių nebalanso metu ties 20-ąja sekunde matomas elektrinių su sinchroniniais generatoriais (SG/DT ir SG/VT) galios valdymo sistemų darbo rezultatas. Atsiradus galių nebalansui sistemoje, krintant dažniui, elektrinės su sinchroniniais generatoriais, padedamos galios valdymo sistemų, stengiasi kompensuoti galios trūkumą, didindamos į tinklą tiekiamą aktyviają galią. Antruoju atveju su BEKS, SG/DT ir SG/VT tiekiamą galią į tinklą, galių nebalanso elektros sistemoje metu, yra mažesnė 50-56 % lyginant su pirmuoju atveju, kai prie tinklo neprijungta baterijų energijos kaupimo sistema. Šį galios sumažėjimą lėmė BEKS su sintetinės inercijos valdikliu įsiterpimas į tinklą.



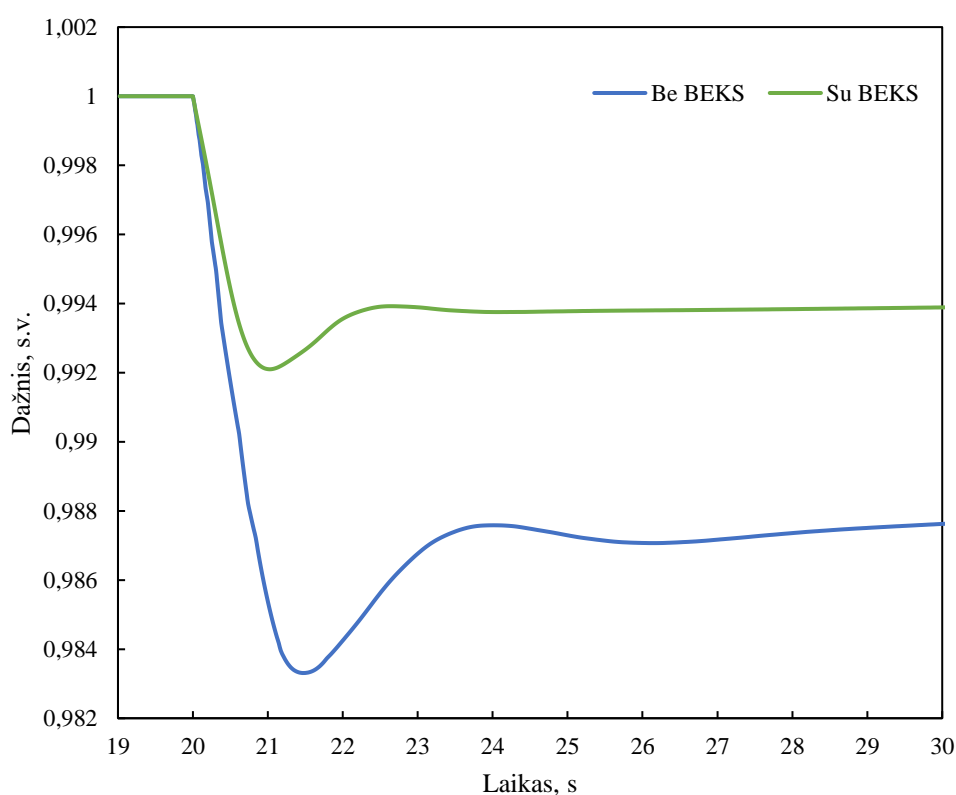
**22 pav.** Elektros sistemos generuojančių el. energiją elementų galios kitimas, sistemos galių nebalanso metu, esant neprijungtai baterijų energijos kaupimo sistemai.



**23 pav.** Elektros sistemos generuojančių el. energiją elementų galios kitimas, sistemos galių nebalanso metu, esant prijungtai baterijų energijos kaupimo sistemai.



Toliau, lyginant dažnio kitimą sistemos galių nebalanso metu tarp dviejų bandymų (24 pav.), taip pat matoma akivaizdi baterijų energijos kaupimo sistemos įtaka elektros sistemai. Pirmuoju bandymu avarinio režimo metu pasiekiami minimali dažnio vertė  $f_{min}^1 = 0,983$  s.v. (49,165 Hz), dažnio nuokrypis –  $\Delta f^1 = 0,017$  s.v. (0,835 Hz). Antruoju atveju, kai prijungiama baterijų energijos kaupimo sistema pasiekiami minimali dažnio vertė  $f_{min}^2 = 0,992$  s.v. (49,605 Hz), dažnio nuokrypis –  $\Delta f^2 = 0,008$  s.v. (0,395 Hz). Pagal šiuos rezultatus matomas minimalios dažnio vertės sumažėjimas  $\Delta f_{min} = 0,007$  s.v. (0,440 Hz), pasiekiamas galių nebalanso metu. Taip pat lyginant gautų kreivių nuožulnumą, pirmuoju atveju dažnio kreivė leidosi iki minimalios dažnio reikšmės statesniu kampu, negu antrojo bandymo kreivė. Tai reiškia, jog elektros sistemos be BEKS avariniu režimu dažnio pasikeitimo greičio vertė  $v_f^1 = 0,011$  s.v./s (0,564 Hz/s) yra didesnė negu atveju, kai prie tinklo prijungta BEKS  $v_f^2 = 0,0076$  s.v./s (0,382 Hz/s). Dažnio kitimo greitis prijungus BEKS sumažėjo  $\Delta v_f = 0,0034$  s.v./s (0,182 Hz/s).



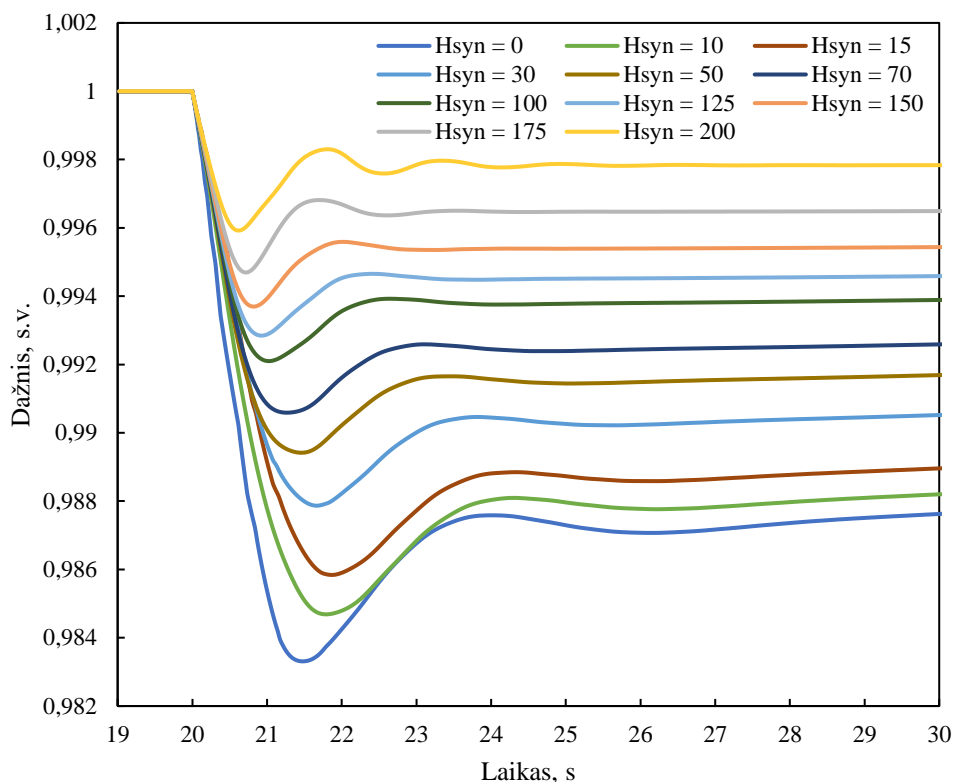
**24 pav.** Elektros sistemos dažnio kitimas galių nebalanso metu, esant prijungtai ir neprijungtai baterijų energijos kaupimo sistemai.

**4 lentelė.** Baterijų energijos kaupimo sistemos su sintetine inercija įtaka elektros sistemos dažniui.

Band. Nr.	Elektros sistemos konfigūracija	Minimali dažnio vertė ( $f_{min}^n$ )		Dažnio nuokrypis ( $\Delta f^n$ )		Dažnio kitimo greitis ( $v_f^n$ )	
		s.v.	Hz	s.v.	Hz	s.v./s	Hz/s
1	Be BEKS	0,983	49,165	0,017	0,835	0,011	0,564
2	Su BEKS	0,992	49,605	0,008	0,395	0,0076	0,382

### 3.3. BEKS sintetinės inercijos valdiklio koeficiento įtaka elektros sistemai

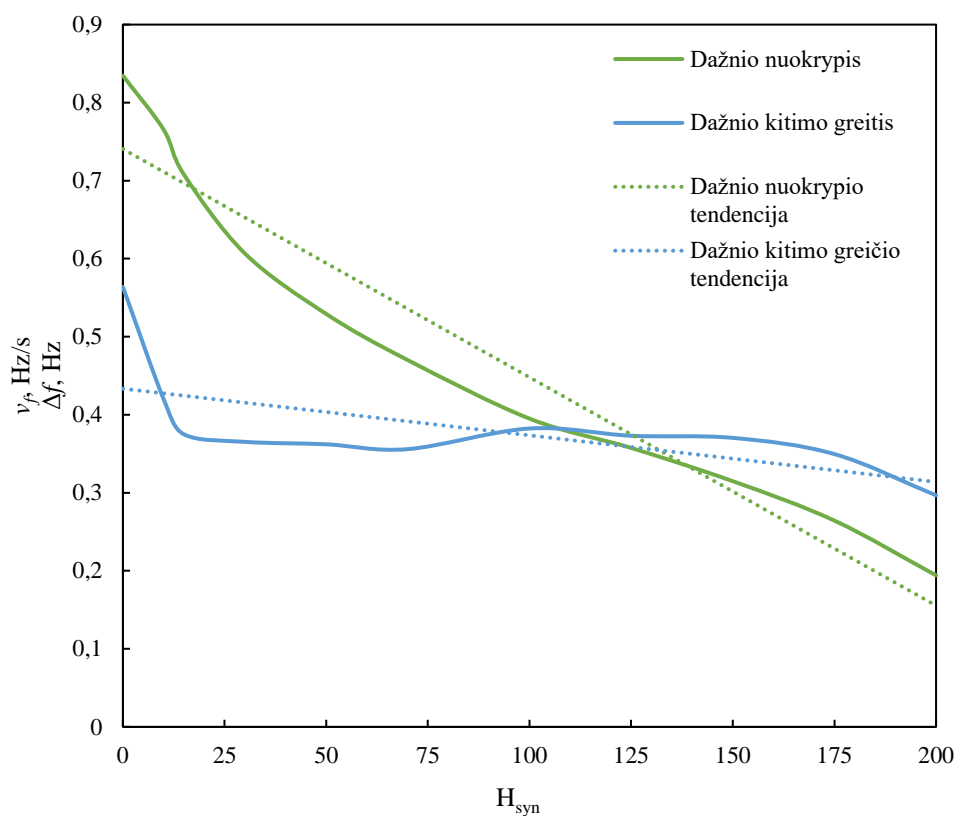
Dar vieno tyrimo metu atliekamas BEKS sintetinės inercijos valdiklio koeficiento keitimas, stebint elektros sistemos ir BEKS atsaką į dažnio pokytį. Sintetinės inercijos valdiklio koeficientas keičiamas nuo 0 iki 200, 5-30 diskretiškumu. Gauti rezultatai pateikiami 25-29 paveiksluose ir 5-oje lentelėje.



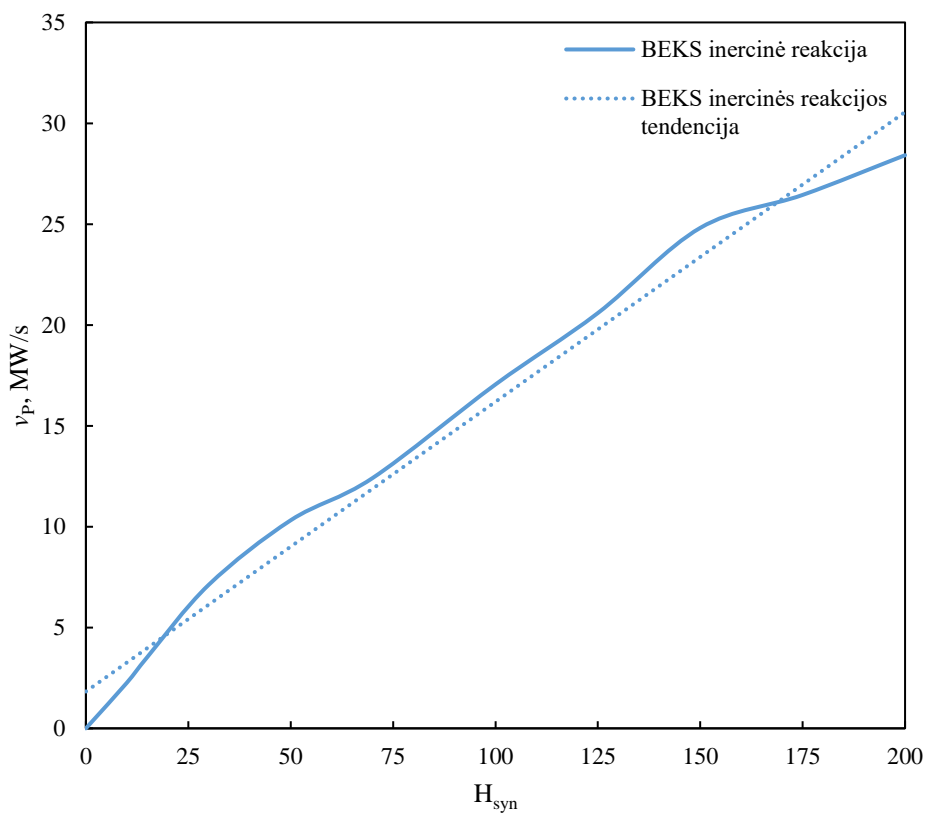
**25 pav.** Elektros sistemos dažnio kitimas galių nebalanso metu, kintant sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmei nuo 0 iki 200.

**5 lentelė.** BEKS sintetinės inercijos valdiklio koeficiento įtakos elektros sistemos dažniui rezultatai.

Band. Nr.	Sintetinės inercijos valdiklio koef. $H_{syn}$	Minimali dažnio vertė ( $f_{min}^n$ )		Dažnio nuokrypis ( $\Delta f^n$ )		Dažnio kitimo greitis ( $v_f^n$ )		BEKS inercinė reakcija ( $v_P^n$ )
		s.v.	Hz	s.v.	Hz	s.v./s	Hz/s	
1	0	0,983	49,165	0,017	0,835	0,0113	0,564	0
2	10	0,985	49,234	0,015	0,766	0,0084	0,420	2,260
3	15	0,986	49,292	0,014	0,708	0,0075	0,375	3,535
4	30	0,988	49,393	0,012	0,607	0,0073	0,365	7,119
5	50	0,989	49,571	0,011	0,529	0,0072	0,362	10,316
6	70	0,991	49,530	0,009	0,470	0,0071	0,356	12,411
7	100	0,992	49,605	0,008	0,395	0,0076	0,382	17,050
8	125	0,993	49,643	0,007	0,358	0,0075	0,373	20,592
9	150	0,994	49,685	0,006	0,315	0,0074	0,370	24,813
10	175	0,995	49,736	0,005	0,264	0,0070	0,350	26,447
11	200	0,996	49,806	0,004	0,194	0,0059	0,297	28,416



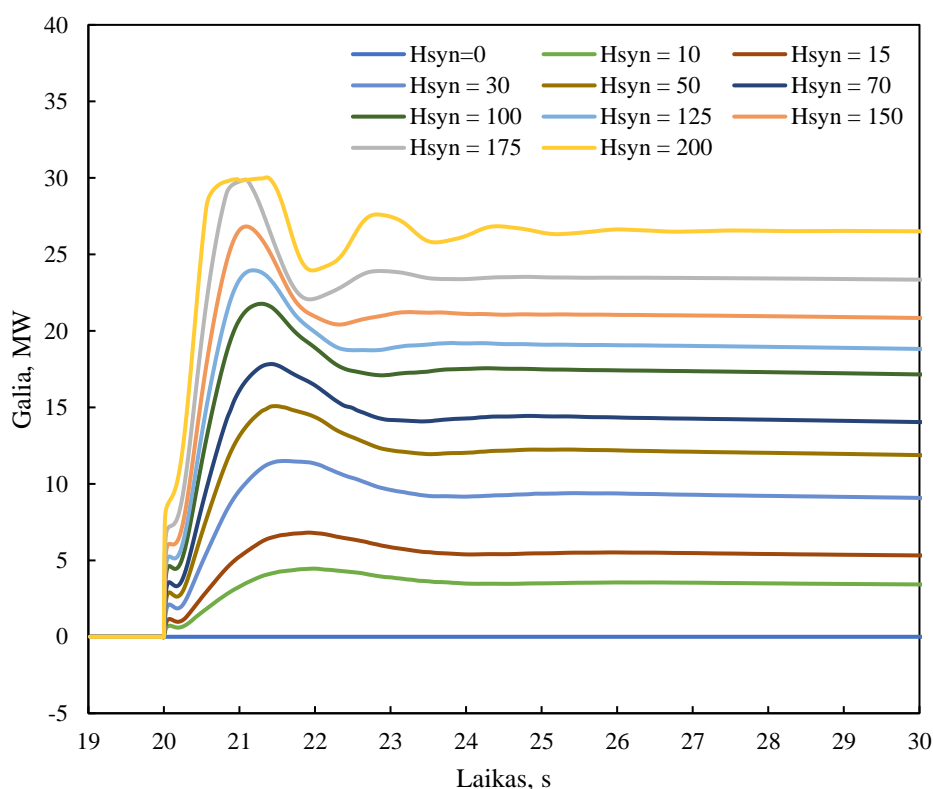
**26 pav.** Dažnio kitimo greitis bei dažnio nuokrypis nuo vardinio dažnio elektros sistemos galių nebalanso metu, kintant sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmei nuo 0 iki 200.



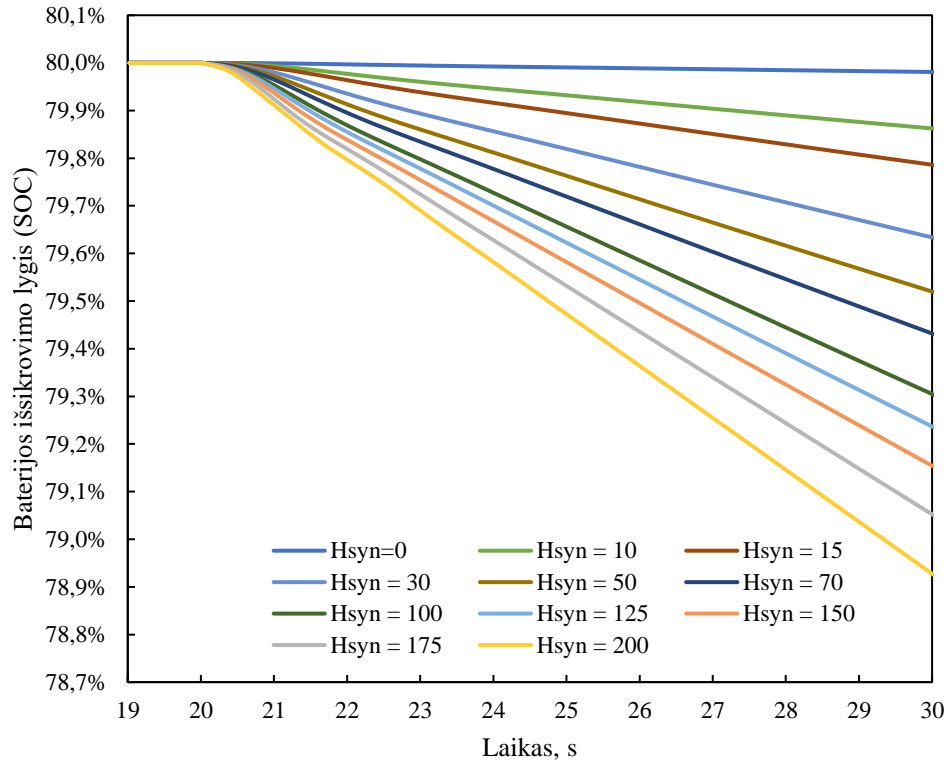
**27 pav.** Baterijų energijos kaupimo sistemos inercinė reakcija elektros sistemos galių nebalanso metu, kintant sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmei nuo 0 iki 200.

Pagal gautus šio tyrimo rezultatus matome, jog didinant sintetinės inercijos koeficiento vertę didėja baterijų energijos kaupimo sistemos inercinis atsakas elektros sistemai, mažinantis dažnio svyravimus galių nebalanso metu. Keičiant sintetinės inercijos koeficientą, dažnio nuokrypį galime sumažinti ~76 % atsižvelgiant į turimos elektros sistemos inerciją. Dažnio nuokrypis tiriamojoje izoliuotoje elektros sistemoje sumažėjo nuo 0,017 s.v. (0,835 Hz) iki 0,004 s.v. (0,194 Hz). Ši dažnio nuokrypio tendencija, kintant sintetinės inercijos koeficiento reikšmei, atspindi 26-ame paveiksle ir 5-oje lentelėje.

Taip pat didėjant sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmei mažėja elektros sistemos dažnio kitimo greitis avarinio režimo metu, kuris turi didelės įtakos elektros sistemos dažnio reguliavimo įrenginiams. Mažesnis dažnio kitimo greitis – ilgesnis laiko tarpas dažnio reguliavimo įrenginiams suveikti. Tyrime dažnio kitimo greitis didinant sintetinės inercijos koeficiento vertę buvo sumažintas ~47 %, nuo 0,0113 s.v./s (0,564 Hz/s) iki 0,0059 s.v./s (0,297 Hz/s). Ši dažnio kitimo greičio tendencija, kintant sintetinės inercijos koeficiento reikšmei, atspindi 26-ame paveiksle ir 5-oje lentelėje. Dažnio kitimo greičio vertė taip pat priklauso nuo esamos elektros sistemos inercijos.



**28 pav.** Baterijų energijos kaupimo sistemos tiekiamą galią elektros sistemos galių nebalanso metu, kintant sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmei nuo 0 iki 200.



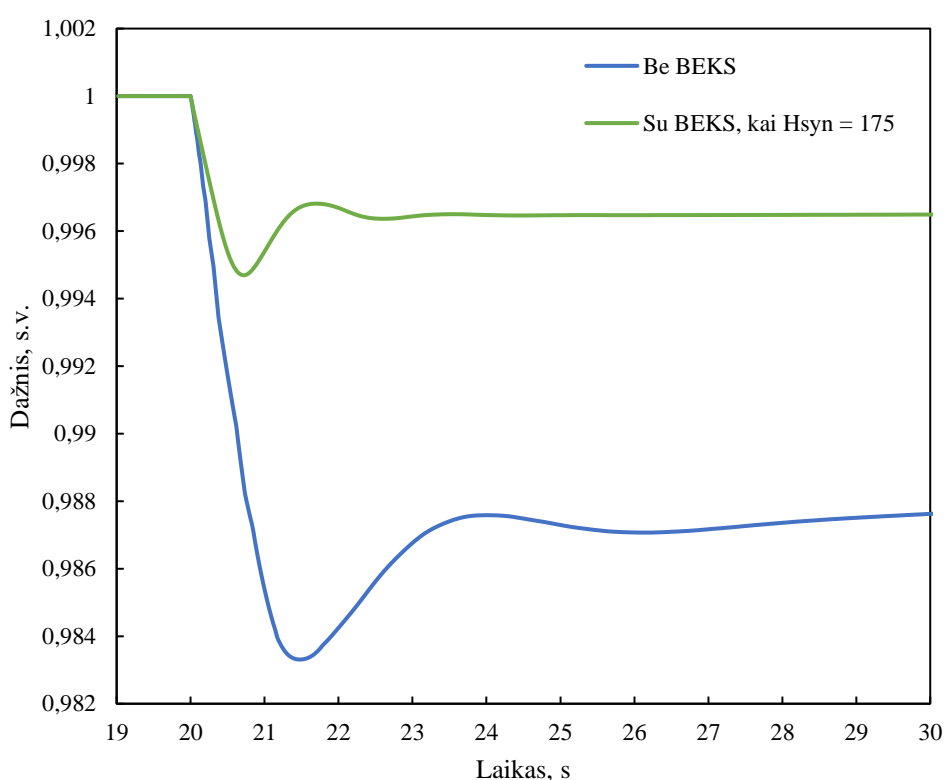
**29 pav.** Baterijų energijos kaupimo sistemos baterijų išsikrovimo lygis elektros sistemos galių nebalanso metu, kintant sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmei nuo 0 iki 200.

Kituose tyrimo rezultatuose, pateikiamuose 27-ame, 28-ame ir 29-ame paveiksluose, matoma BEKS inercinė reakcija, atiduodama galia į tinklą bei baterijų išsikrovimo lygis (*angl. State of Charge – SOC*), keičiantis sintetinės inercijos koeficientui. Iš BEKS tiekiamos galios į tinklą kreivių matomas sintetinės inercijos valdiklio poveikis. BEKS per trumpą laiko tarpą injektuoja į tinklą didelį aktyviosios galios kiekį, reikalingą sustabdyti dažnio kitimo greitį galių nebalanso metu elektros sistemoje. Taip pat didėjant sintetinės inercijos valdiklio reikšmei tiesiogiai didėja ir BEKS tiekiamą galia į tinklą, kuo didesnė valdiklio reikšmė, tuo BEKS inercinė reakcija yra didesnė (30, 31 pav.). Lyginant mažiausią modeliuojamą valdiklio reikšmę  $H_{syn} = 10$ , su didžiausia –  $H_{syn} = 200$ , inercinės reakcijos vertė pakito  $\Delta_{VP} = 26,156$  MW/s. Atvirkščiai sintetinės inercijos valdiklio reikšmė veikia pačias BEKS baterijas. Jų išsikrovimo lygis, didėjant valdiklio koeficiento reikšmei, per tą patį laiko tarpą sumažėdavo ~0,1% daugiau (29 pav.). Todėl pernelyg didelis sintetinės inercijos valdiklio koeficientas lemia baterijų energijos kaupimo sistemos greitesnę išsikrovimą.

Baterijų energijos kaupimo sistemos integravimas į elektros sistemą turi nemažai teigiamų aspektų, tačiau gali turėti ir neigiamų. Pagal gautus rezultatus pateikiamus 25-ame ir 28-ame paveiksluose yra matomas atsirandantis žalingas elektros sistemai reiškinys – švytavimas. Tyrimo rezultatuose matome, jog parinktas per didelis sintetinės inercijos koeficientas gali iššaukti elektros sistemos dažnio bei BEKS tiekiamos į tinklą galios švytavimus. Todėl labai svarbu sintetinės inercijos valdiklio koeficientą derinti kartu su kitų dažnio reguliavimo įrenginių parametrais, norint užtikrinti stabilų elektros sistemos dažnį.

### 3.4. Optimali sintetinės inercijos valdiklio reikšmė

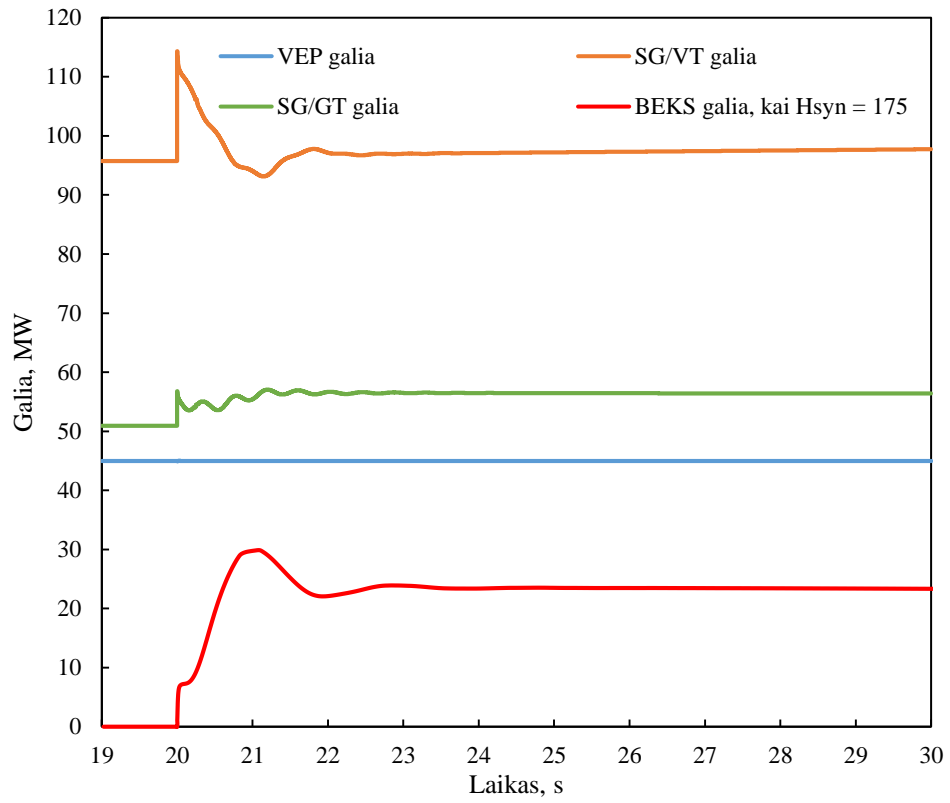
Siekiant atrasti optimalius baterijų energijos kaupimo sistemos sintetinės inercijos valdiklio sprendinius, reikia atsižvelgti individualiai į esamą elektros sistemos inerciją bei kitų dažnio reguliavimo sistemų parametrus. Kaip jau buvo aptarta ankstesniame 3.3 skyriuje, sintetinės inercijos valdiklio koeficiento keitimas leidžia sumažinti elektros sistemos dažnio kritimą avarinio režimo metu, tačiau per didelė koeficiento reikšmė gali pabloginti situaciją, sukeldama dažnio švytavimo reiškinį. Todėl išvengiant bet kokių švytavimo atsiradimo požymių, šio tyrimo modelio optimaliausia BEKS sintetinės inercijos valdiklio koeficiento vertė yra  $H_{syn} = 175$ . Ši valdiklio reikšmė leido sumažinti dažnio nuokrypį nuo nominalios dažnio vertės, nuo 0,983 s.v. (49,165 Hz) iki 0,995 s.v. (49,736 Hz). Taip pat sumažinti dažnio kitimo greitį nuo 0,0113 s.v./s (0,564 Hz/s) iki 0,007 s.v./s (0,350 Hz/s). Optimalaus sintetinės inercijos valdiklio tyrimo rezultatai bei kiti duomenys pateikti žemiau esančiuose 30-ame, 31-ame paveiksluose ir 6-oje lentelėje.



**30 pav.** Elektros sistemos dažnio kitimas galių nebalanso metu, esant neprijungtai ir prijungtai BEKS, kai sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmė  $H_{syn} = 175$ .

**6 lentelė.** BEKS sintetinės inercijos valdiklio koeficiento įtakos elektros sistemos dažniui rezultatai.

Elektros sistemos konfigūracija	Minimali dažnio vertė		Dažnio nuokrypis		Dažnio kitimo greitis		BEKS inercinė reakcija
	s.v.	Hz	s.v.	Hz	s.v./s	Hz/s	MW/s
Be BEKS	0,983	49,165	0,017	0,835	0,0113	0,564	0
Su BEKS, kai $H_{syn} = 175$	0,995	49,736	0,005	0,264	0,0070	0,350	26,447



**31 pav.** Elektros sistemos generuojančių el. energiją elementų galios kitimas, esant prijungtai BEKS, kai sintetinės inercijos valdiklio koeficiento reikšmė  $H_{syn} = 175$ .

## Išvados

1. Elektros sistemoje didėjant generacinių šaltinių, prijungtų prie tinklo per galios elektroniką, susiduriama su sistemos inercijos mažėjimu. Apžvelgus kitų autorių mokslinius darbus apie sistemos inerciją, atskleistas problemos sprendimo būdas – į elektros sistemą diegiant baterijų energijos kaupimo sistemas su dažnio reguliavimo įrenginiais, kurie atliktų sintetinės inercijos funkciją.
2. Tyrimui sumodeliuota izoliuota elektros sistema su keturiomis generacinėmis sistemomis, kurių bendra suminė gali siekia 305 MVA. Atlikus sintetinės inercijos funkcijos veikimo tyrimą, pastebėta, jog sintetinės inercijos valdiklis baterijų energijos kaupimo sistemoje, naudojant  $H_{syn}=100$  koeficiento vertę, sumažino dažnio kitimo greitį 0,182 Hz/s bei dažnio nuokrypį nuo vardinės 50-ies Hz sistemos vertės 0,44 Hz, sistemos galių nebalanso metu.
3. Atlikus elektros sistemos inercijos kitimo tyrimą, keičiantis sinchroninių generatorių skaičiui, gautas rezultatas patvirtino, jog didesnis sinchroninių generatorių skaičius sistemoje lemia dažnio kitimo greičio bei pasiekiamos minimalios vertės mažėjimą, galių nebalanso/avarijos metu. Tyrimo schemoje sumažėjus sinchroninių generatorių skaičiui nuo 3 iki 1, dažnio nuokrypis padidėjo 0,550 Hz, o dažnio kitimo greitis padidėjo 0,563 Hz/s.
4. Sintetinės inercijos koeficiento keitimas tiriamojoje schemoje leido sumažinti dažnio nuokrypį ~76 % bei dažnio kitimo greitį ~47 %, tačiau padidino baterijų išsikrovimo lygį per tam tikrą laiko tarpą ~1,1 %. Taip pat sintetinės inercijos valdiklio koeficientą reikia derinti kartu su elektros sistemos dažnio reguliavimo įrenginiais, dėl galimo dažnio bei galios švytavimo atsiradimo elektros sistemoje.
5. Siekiant optimalių baterijų energijos kaupimo sistemos sintetinės inercijos valdiklio rezultatų būtina atsižvelgti į esamus elektros sistemos rodiklius. Darbo metu izoliuotai elektros sistemos tyrimo schemai parinktas optimalus  $H_{syn}=175$  sintetinės inercijos valdiklio koeficientas, kuris sumažino dažnio kitimo greitį iki 0,350 Hz/s bei dažnio nuokrypį iki 0,264 Hz verčių.



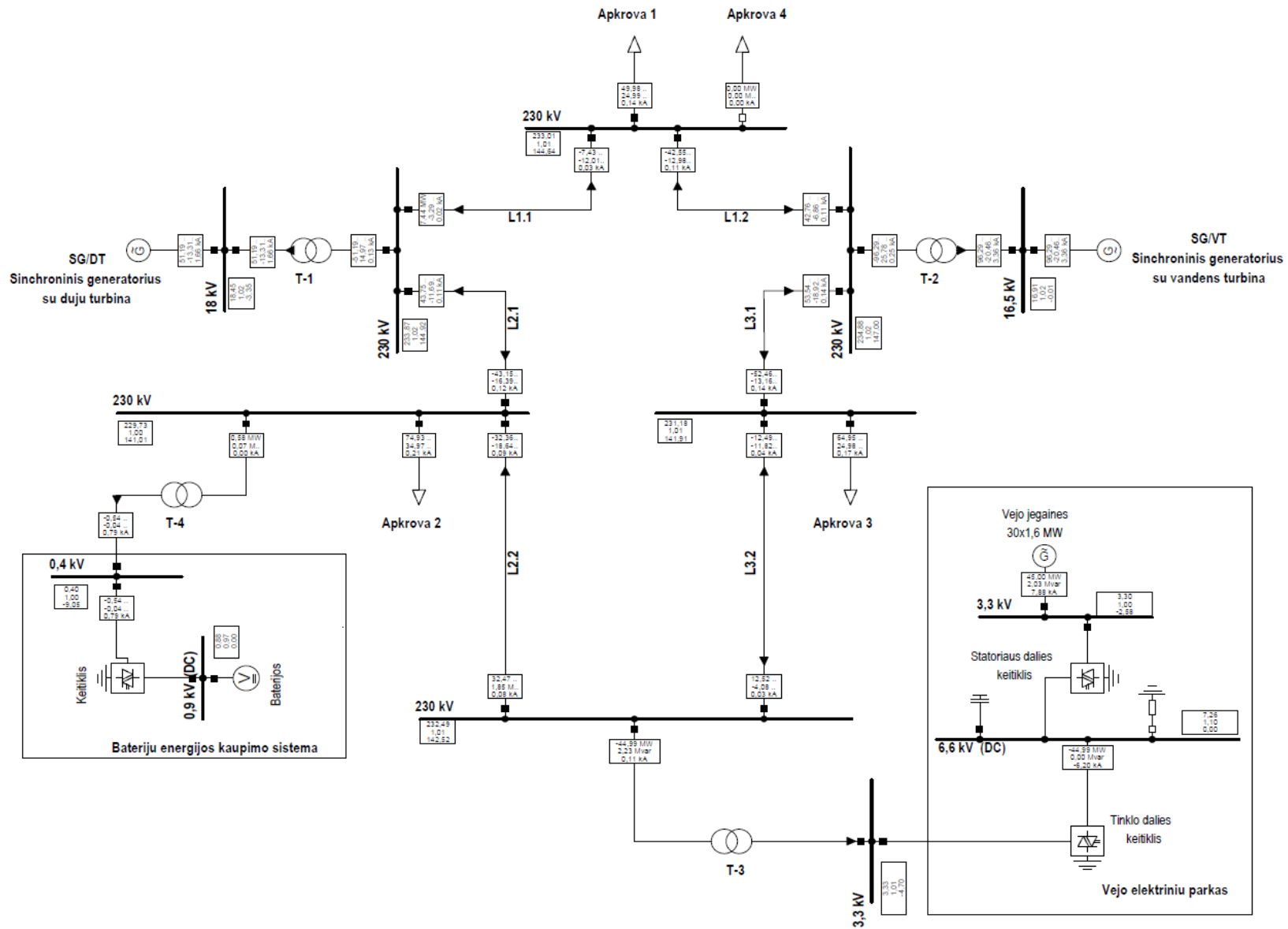
## Literatūros sąrašas

1. MEHIGAN, L. et al. Renewables in the European power system and the impact on system rotational inertia. In *Energy* [interaktyvus]. 2020, vol. 203, 117776. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.117776>
2. SPAHIC, E. et al. Impact of reduced system inertia on stable power system operation and an overview of possible solutions. In *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)* [interaktyvus]. IEEE, 2016, p. 1-5. ISSN: 1944-9933. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741714>
3. TIELENS, P., VAN HERTEM, D. The relevance of inertia in power systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. 2016, vol. 55, p. 999–1009. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.016>
4. LEELARUJI, Rujiroj, BOLLEN, Math. Synthetic inertia to improve frequency and how often it is needed [interaktyvus]. *Report 2015:224*. Energiforsk, 2015. ISBN: 9789176732243. Prieiga per internetą: <https://energiforsk.se/en/programme/wind-research-industry-network/reports/synthetic-inertia-to-improve-frequency-stability-and-how-often-it-is-needed/>
5. AZZUNI, A., BREYER, C. Energy security and energy storage technologies. In *Energy Procedia* [interaktyvus]. 2018, vol. 155, p. 237–258. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.053>
6. BAKHSHI YAMCHI, H. et al. A cost-efficient application of different battery energy storage technologies in microgrids considering load uncertainty. In *Journal of Energy Storage* [interaktyvus]. 2019, vol. 22, p. 17–26. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2019.01.023>
7. ADOMAVIČIUS, V., PUŠINAITIS, L., KAMINICKAS, M. Elektros energijos kaupimo priemonių šiuolaikinė būklė ir plėtros perspektyvos. *Publikuotas pasauliniame mokslo darbų tinkle ResearchGate*, 2016 [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/303315906>
8. DIVYA, K.C., ØSTERGAARD, J. Battery energy storage technology for power systems—An overview. In *Electric Power Systems Research* [interaktyvus]. 2009, vol. 79, no. 4, p. 511–520. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2008.09.017>
9. IBRAHIM, H. et al. Energy storage systems—Characteristics and comparisons. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. 2008, vol. 12, no. 5, p. 1221–1250. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2007.01.023>
10. ALHEJAJ, S.M., GONZALEZ-LONGATT, F.M. Impact of inertia emulation control of grid-scale BESS on power system frequency response. In *2016 International Conference for Students on Applied Engineering (ISCAE)* [interaktyvus]. IEEE, 2016, p. 254-258. ISBN: 978-1-4673-9053-8 Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1109/ICSAE.2016.7810198>
11. SILVA, M.F. et al. System Frequency Support by Synthetic Inertia Control via BESS. In *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)* [interaktyvus]. IEEE, 2019, p. 1-6. ISSN: 2643-8798. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1109/ISGT-LA.2019.8895342>
12. WANG, X., LIU, Y. Analysis of Energy Storage Technology and Their Application for Micro Grid. In *2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC)* [interaktyvus]. IEEE, 2017, p. 972-975. ISBN: 978-1-5386-5784-3. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1109/ICCTEC.2017.00215>

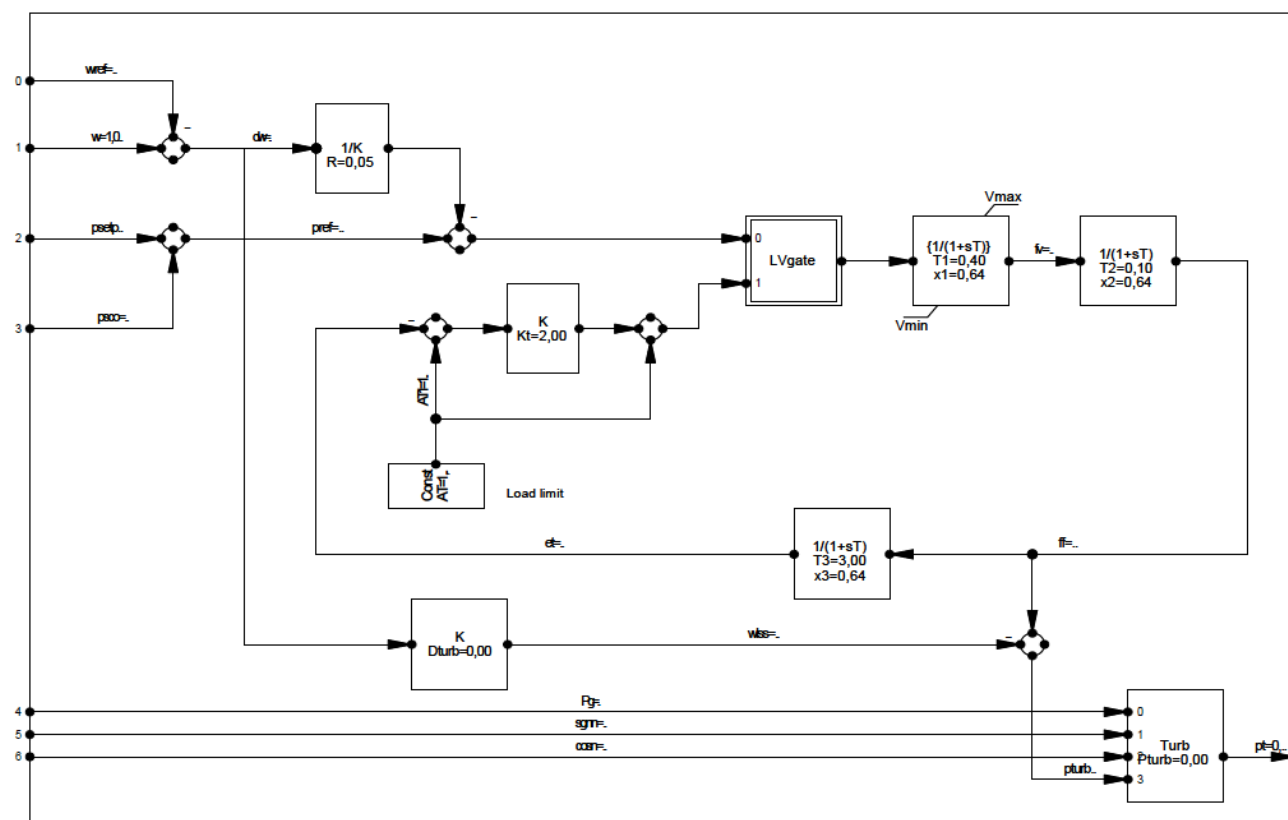
13. KAMRUL HASAN, A. et al. Application of Battery Energy Storage Systems to Enhance Power System Inertia. In *2019 29th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)* [interaktyvus]. IEEE, 2019, p. 1-6. ISSN: 2474-1507. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1109/AUPEC48547.2019.211941>
14. FRANZ, J. et al. Optimized Swing Equation Control for Battery Energy Storage Systems. In *2019 IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)* [interaktyvus]. IEEE, 2019, p. 1-6. ISSN: 2166-9546. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1109/CPE.2019.8862345>
15. RYCROFT, M. Synthetic inertia in grid with a high renewable energy content. *Articles: Energize* [interaktyvus]. EE Publishers, 2017. Prieiga per internetą: <https://www.ee.co.za/article/synthetic-inertia-grids-high-renewable-energy-content.html>
16. Svinkūnas, Gytis, Navickas, Algimantas. *Elektros energetikos pagrindai* [interaktyvus]. Kaunas: Technologija, 2013. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/1260/elektros-energetikos-pagrindai/>
17. PES-TR1 TECHNICAL REPORT, PSDP Committee; PSS Subcommittee. Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies [interaktyvus]. IEEE, 2013. Prieiga per internetą: [https://site.ieee.org/fw-pes/files/2013/01/PES\\_TR1.pdf](https://site.ieee.org/fw-pes/files/2013/01/PES_TR1.pdf)
18. IEEE Working Group. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. *IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005)*, 2016. ISBN: 978-1-5044-0855-4. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7553421>
19. AL-TOMA, A.S. et al. Modelling and simulation of load connected fixed blade wind turbine with permanent magnet synchronous generators. In *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)* [interaktyvus]. IEEE, 2015, p. 1-6. ISBN: 978-1-4673-9682-0. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1109/UPEC.2015.7339876>
20. Garcia-Hernandez, R.; Garduno-Ramirez, R. Modeling a Wind Turbine Synchronous Generator. *International Journal of Energy and Power (IJEP)* [ineraktyvus]. 2013, vol. 2 (03), p. 64-70. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/313970140\\_Modeling\\_a\\_Wind\\_Turbine\\_Synchronous\\_Generator](https://www.researchgate.net/publication/313970140_Modeling_a_Wind_Turbine_Synchronous_Generator)
21. ALHEJAJ, S.M., GONZALEZ-LONGATT, F.M. Investigation on grid-scale BESS providing inertial response support. In *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)* [interaktyvus]. IEEE, 2016, p. 1-6. ISBN: 978-1-4673-8848-1. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1109/POWERCON.2016.7754049>
22. QU, X., LI, X. A dynamic model of battery energy storage system based on the external characteristic equivalent. In *LEI, X. et al. Eds. MATEC Web of Conferences* [interaktyvus]. EDP Sciences, 2018, vol. 160 (03004). Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201816003004>

# Priedai

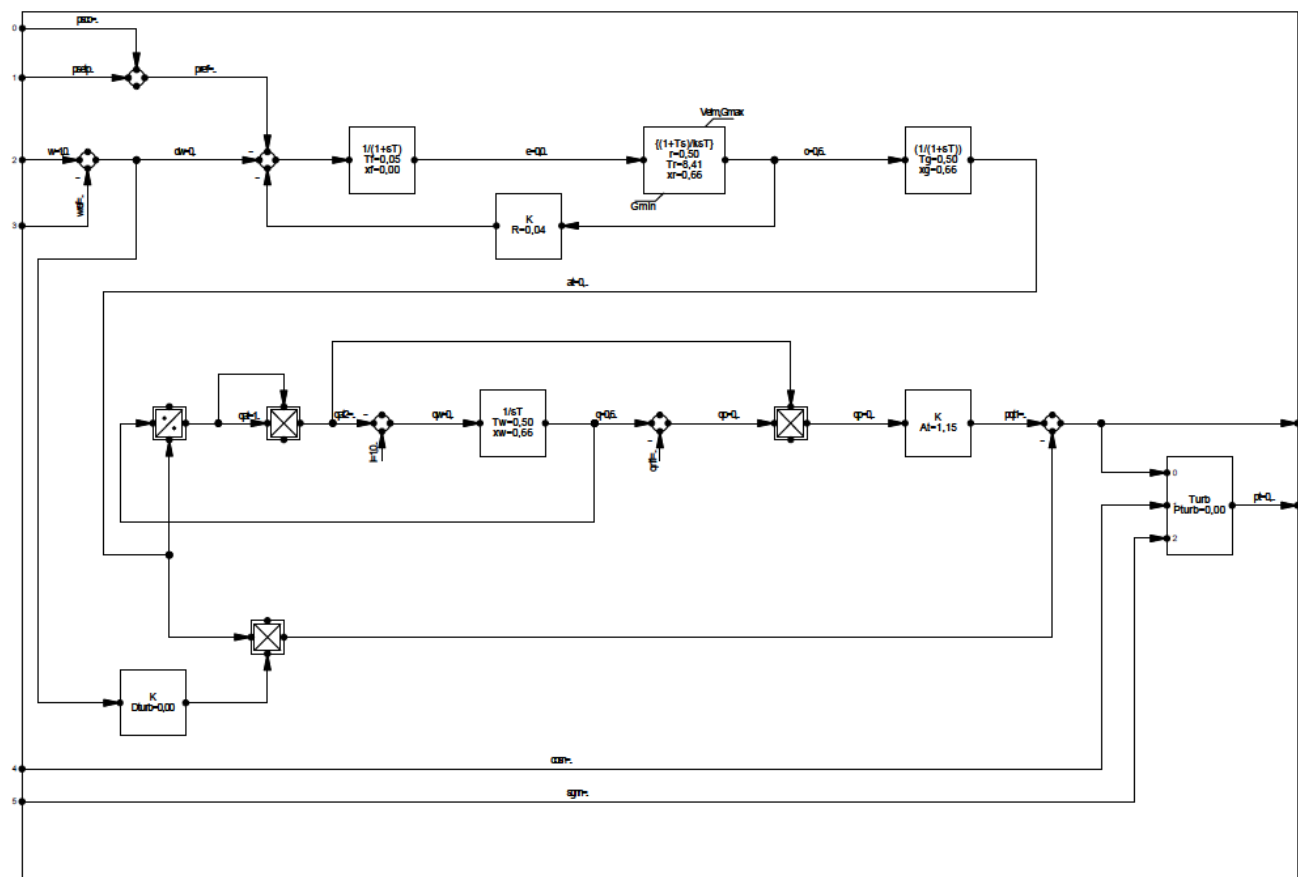
## 1 priedas. Modeliuojamos izoliuotos elektros sistemos schema DigSILENT PowerFactory programinėje erdvėje



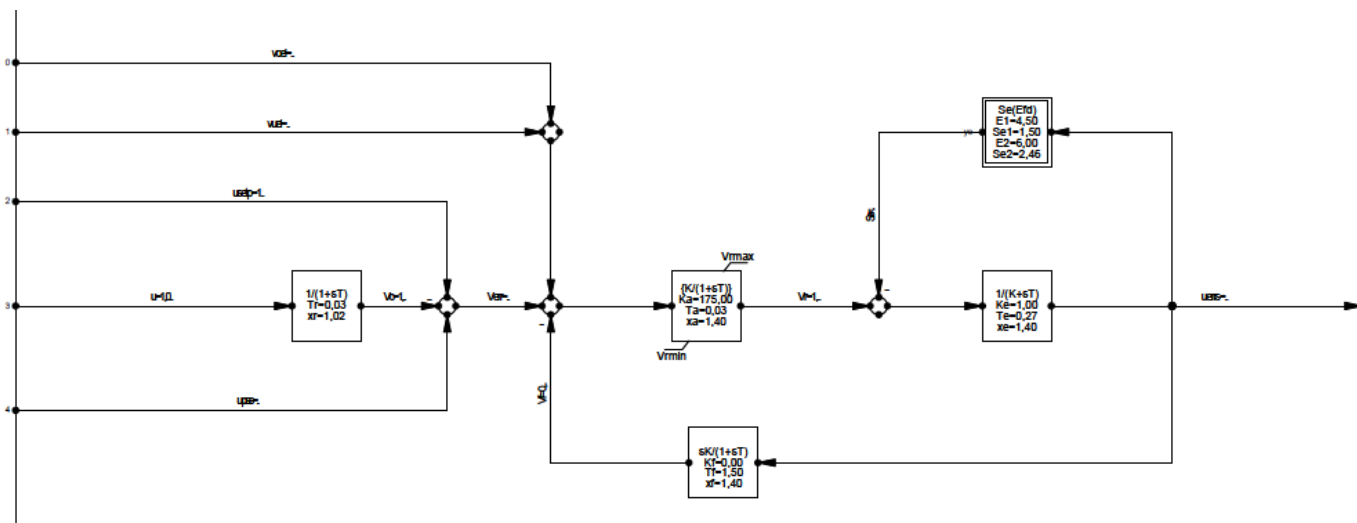
## 2 priedas. Dujų turbinos valdymo schema DIGSILENT PowerFactory programinėje erdvėje



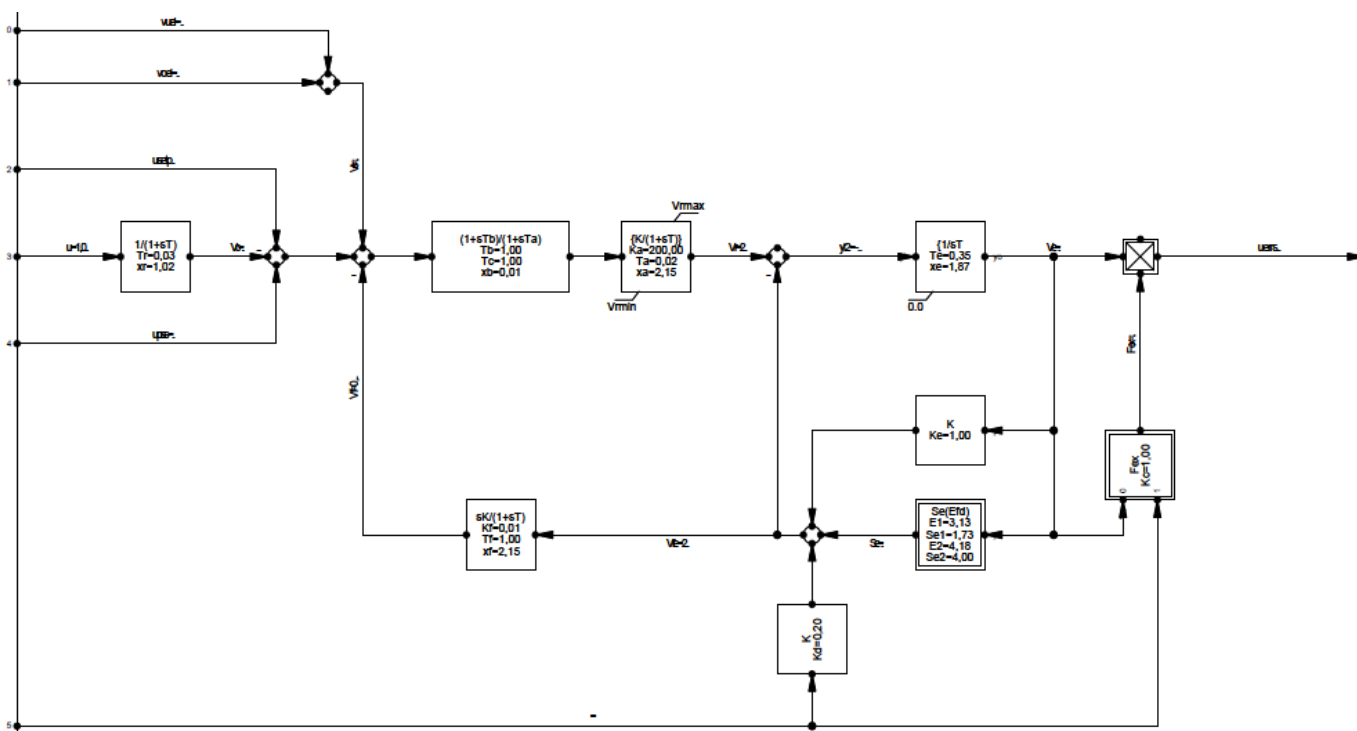
## 3 priedas. Vandens turbinos valdymo schema DIGSILENT PowerFactory programinėje erdvėje



**4 priedas. Sinchroninio generatoriaus su dujų turbina nuolatinės srovės tipo žadinimo sistemos blokinė schema DIGSILENT PowerFactory programinėje erdvėje**



**5 priedas. Sinchroninio generatoriaus su vandens turbina kintamosios srovės tipo žadinimo sistemos blokinė schema DIGSILENT PowerFactory programinėje erdvėje**



**6 priedas. Sintetinės inercijos valdiklio blokinė schema DIGSILENT PowerFactory programinėje erdvėje**

