



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Andrius Žukauskas

DIDŽIATALPIŲ KONDENSATORIŲ KAUPIMO SISTEMOS
VALDYMO MODELIS VĖJO ELEKTRINĖS GALIAI
BALANSUOTI

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Doc. dr. Vytautas Sučila

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**DIDŽIATALPIŲ KONDENSATORIŲ KAUPIMO SISTEMOS
VALDYMO MODELIS VĖJO ELEKTRINĖS GALIAI
BALANSUOTI**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

Vadovas

Doc. dr. Vytautas Sučila

Recenzentas

Projektą atliko

Andrius Žukauskas

KAUNAS, 2015

TURINYS

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

ĮVADAS	1
1. PROBLEMOS ANALIZĖ.....	1
2. TEORINIAI SPRENDIMAI	3
2.1 Vėjo galios balansavimo sistema	3
2.2 Vėjo elektrinė ir vėjo generuojama galia.....	5
2.3 Vėjo galios balansavimo sistemos valdymas	7
2.4 Didžiatalpiai kondensatoriai	11
2.4.1 Didžiatalpio kondensatoriaus elektrinis modelis	16
2.4.2 Didžiatalpio kondensatoriaus įkrovimas ir iškrovimas	16
2.4.3 Didžiatalpio kondensatoriaus savaiminis išsikrovimas	19
2.4.4 Didžiatalpio kondensatoriaus darbinė trukmė	20
2.5 Didžiatalpių kondensatorių energijos kaupimo sistemos parametrai	20
2.5.1 Didžiatalpių kondensatorių kaupiklių sistemos energija	20
2.5.2 Energijos kaupimo sistemos ekvivalentinė talpa ir varža	23
2.5.3 Energijos kaupimo sistemos balansavimas	24
3. TYRIMO REZULTATAI	26
3.1. Realus galios duomenys ir jų apdorojimas	26
3.2 Vėjo elektrinės galios balansavimo rezultatai	29
3.3 Vėjo elektrinės galios balansavimo sistemos ekonominiai skaičiavimai	33
3.3.1 Vėjo elektrinės galios balansavimo sistemos investiciniai kaštai ..	33
3.3.2 Vėjo elektrinės galios balansavimo sistemos investicinių kaštų optimizavimas	34

IŠVADOS	36
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	37
PRIEDAI	39
Priedas Nr.1. Didžiatalpių kondensatorių kaupimo sistemos valdymo modelio matematinis modelis	39

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

A	- vėjo elektrinės sparnų plotas, pro kurį juda oro srautas;
C_{DK}	- didžiatalpio kondensatoriaus talpa;
C_{ekv}	- ekvivalentinė kondensatorių sistemos talpa;
C_k	- kondensatoriaus talpa;
C_p	- galios koeficientas;
d	- kondensatorių išsikrovimo santykis;
d	- atstumas tarp kondensatoriaus elektrodų;
DOD	- kondensatoriaus išsikrovimo gylio dydis (angl. k. depth of discharge);
E_e	- kondensatorių sistemos efektyvi įkrauta energija;
E_{kr}	- kondensatorių sistemos įkrovimo energija;
E_{maks}	- maksimali energija, kurią sukaupia kondensatorių sistema;
f	- elektros šaltinio dažnis;
f_{HI}	- impulso pločio moduliacijos maksimalus perjungimo dažnis;
h	- histerezės juostos koeficientas;
I_D	- apkrovos srovė;
I_D	- nuolatinė didžiatalpio kondensatoriaus krovimo srovė;
I_{DK}	- didžiatalpio kondensatoriaus srovė;
$I_{įėjimo}$	- įėjimo srovė;
$I_{išėjimo}$	- išėjimo srovė;
$I_{iškr}$	- didžiatalpio kondensatoriaus iškrovimo srovė;
I_{kr}	- didžiatalpio kondensatoriaus krovimo srovė;
$I_{linijos}$	- vėjo elektrinės generuojama elektros srovė;
IPM	- impulso pločio moduliacija (angl. pulse width modulation);
IUDT	- izoliuotos užtūros dvipolis tranzistorius (angl. insulated gate bipolar transistor);
ki	- proporcinio integrinio valdiklio koeficientas;
kp	- proporcinio integrinio valdiklio koeficientas;
L_N	- linijos induktyvumas;
MOP lauko tranzistorius	- metalo oksido puslaidininkio lauko tranzistorius (angl. metal oxide semiconductor field effect transistor);
n	- eksponentės vertė;
N_l	- lygiagrečiai sujungtų didžiatalpių kondensatorių skaičius;

N_n	- nuosekliai sujungtų didžiatalpių kondensatorių skaičius;
PF	- pulsacijos faktorius, parametras nusakantis lygintuvo kokybę;
PI valdiklis	- proporcinis integrinis valdiklis (angl. proportional integral controler);
$P_{išk}$	- kondensatorių iškrovimo galia;
$P_{iškkr}$	- didžiatalpio kondensatoriaus iškrovimo galia;
P_{kr}	- didžiatalpio kondensatoriaus krovimo galia;
$P_{vėjo}$	- oro srauto sukuriama galia;
q	- elektros krūvis;
R_d	- didžiatalpio kondensatoriaus dielektriko difuzijos varža, įtakojanti savaiminį išsikrovimą;
R_{ekv}	- ekvivalentinė kondensatorių sistemos varža;
R_n	- didžiatalpio kondensatoriaus vidinė varža;
S	- kondensatoriaus elektrodų plotas;
SOC	- kondensatoriaus įkrovimo lygis (angl. state of charge);
U_{DK}	- didžiatalpio kondensatoriaus įtampa;
$U_{iėjimo}$	-įėjimo įtampa;
$U_{išėjimo}$	-išėjimo įtampa;
U_k	- kondensatoriaus įtampa;
U_{maks}	- maksimali kondensatorių sistemos įtampa;
U_{min}	- kondensatorių sistemos minimali įtampa iki kurios leidžiama išsikrauti kondensatoriams;
U_{MOD}	- lygintuvo moduliota įtampa DC pusėje;
v	- vėjo greitis;
ϵ	- dielektriko skvarba kondensatoriuje;
$\eta_{iškkr}$	- didžiatalpio kondensatoriaus iškrovimo naudingumo koeficientas;
η_{kr}	- didžiatalpio kondensatoriaus krovimo naudingumo koeficientas;
ρ	- oro tankis;
$\tau_{iš}$	- didžiatalpio kondensatoriaus savaiminio išsikrovimo laiko konstanta;
ϕ	- fazės pokyčio kampas;
ω_{Δ}	- trikampio formos signalo dažnis.

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

- 1.1 pav. Skirtingų kaupiklių galios ir energijos tankių parametrai
- 2.1 pav. Vėjo galios balansavimo modelis.
- 2.2 pav. Vėjo galios balansavimo sistema.
- 2.3 pav. Vėjo turbinos generuojama energija ir jos teorinis limitas.
- 2.4 pav. Vėjo galios balansavimo sistemos modelis ir jo valdymas
- 2.5 pav. IPM signalas ir moduluota įtampa
- 2.6 pav. PWM signalo generatorius naudojant periodinės imties metodą
- 2.7 pav. PWM signalo generatorius naudojant histerezės juostos metodą
- 2.8 pav. PWM signalo generatorius naudojant trikampio nešėjo metodą
- 2.9 pav. Didžiatalpio kondensatoriaus sandara
- 2.10 pav. Didžiatalpių kondensatorių tipai
- 2.11 pav. Dvigubo sluoksnio kondensatoriaus sanadara
- 2.12 pav. Didžiatalpio kondensatoriaus elektrinės grandinės modelis.
- 2.13 pav. Maxwell didžiatalpio kondensatoriaus BCAP0310 krovimo charakteristika
- 2.14 pav. Maxwell didžiatalpio kondensatoriaus BCAP0310 iškrovimo charakteristika
- 2.15 pav. Maxwell didžiatalpio kondensatoriaus BCAP0310 savaiminio išsikrovimo charakteristika.
- 2.16 pav. Didžiatalpių kondensatorių sistemos balansavimo schemos panaudojant rezistorius
- 2.17 pav. Didžiatalpių kondensatorių sistemos balansavimo schemos panaudojant DC/DC inverterį ir Zenerio diodus
- 3.1 pav. Vėjo elektrinės Vergnet GEV MP C galios kreivė
- 3.2 pav. Metinis vėjo elektrinės generuojamos elektros energijos grafikas
- 3.3 pav. Gegužės mėnesio 70 min generuojamos elektros energijos kitimas
- 3.4 pav. Gegužės mėnesio generuojamos elektros energijos kitimas: interpoliuota ir aproksimuota kreivės
- 3.5 pav. Kaupimo sistemos srovės ir įtampos grafikai
- 3.6 pav. Kaupimo sistemos galios duomenų grafikai, kai imties laikas $dt=1s$
- 3.7 pav. Kaupimo sistemos galios duomenų grafikai, kai imties laikas $dt=300s$
- 3.8 pav. Kaupimo sistemos galios duomenų grafikai, kai imties laikas $dt=600s$
- 3.9 pav. Energijos kiekio procentinis skirtumas nuo atsakitos taško esant skirtingoms imties laiko trukmėms.



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Andrius Žukauskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto

„Didžiatalpių kondensatorių kaupimo sistemos valdymo modelis vėjo elektrinės galiai balansuoti“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. gegužės 25 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Andriaus Žukausko** baigiamasis projektas tema „Didžiatalpių kondensatorių kaupimo sistemos valdymo modelis vėjo elektrinės galiai balansuoti“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Žukauskas A. Didžiatalpių kondensatorių kaupimo sistemos valdymo modelis vėjo elektrinės galiai balansuoti. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vytautas Sučila; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2015. 42 psl.

SANTRAUKA

Vėjo elektrinių generuojama elektros energija yra nestabili ir ją sunku panaudoti tiek prijungus prie tinklo, tiek prie įrenginių, dirbančių mikro tinkle. Siekiant sumažinti galios svyravimus elektros sistemoje, vėjo elektrinės generuojamos galios svyravimus galima balansuoti panaudojant didžiatalpių kondensatorių energijos kaupimo sistemą.

Šiame tyrime vėjo elektrinės galios balansavimo modelis susideda iš vėjo turbinos, kintamos srovės apkrovos ir vėjo galios balansavimo sistemos. Siekiant tiksliau išsiaiškinti modelio veikimo principus, laikome kad apkrova yra stabili ir nekintanti, o sistemos įtampa yra pastovi. Vėjo galios balansavimo sistemos veikimo principas yra paremtas pirmąja Kirchofo taisykle ir susideda iš didžiatalpių kondensatorių kaupiklių sistemos bei AC/DC dvipusio lygintuvo. AC/DC dvipusis lygintuvas turi šešis izoliuotos užtūros dvipolius tranzistorius, kurie yra valdomi impulso pločio moduliutu signalu. Šis signalas yra sugeneruojamas palyginus vėjo elektrinės generuojamos ir nuorodinės srovės duomenų vertes. O energijos kaupimo sistema susideda iš nuosekliai ir lygiagrečiai sujungtų didžiatalpių kondensatorių.

Teorinis vėjo elektrinės galios balansavimo modelis sudarytas pasinaudojus kompiuterine matematinio modeliavimo programa „Matlab“. Atlikus simuliacijas paaiškėjo, kad energijos kaupimo sistema sudaryta didžiatalpių kondensatorių gali subalansuoti vėjo elektrinės nepastovią galią. Tačiau vėjo galios balansavimo sistemos rezultatams įtakos turi srovės matavimo laiko trukmė.

Vėjo elektrinės balansavimo sistemos investicijos sudaro tik šešiolika procentų vėjo elektrinės įrengimo kainos. Toliau tobulinant šią sistemą galima užtikrinti pastovesnės elektros energijos tiekimą vartotojams ar kompensuoti vėjo prognozių trumpuoju periodu netikslumus, kas padėtų išlaikyti elektros energijos tinklą stabilesni ir sumažintų jo stabilizavimo kaštus.

Reikšminiai žodžiai: didžiatalpis kondensatorius, galios balansavimas, AC/DC lygintuvas, impulso pločio moduliacija.

Žukauskas A. Model of Storage Systems of Supercapacitors Control for Wind Power Balancing. Final project of master degree / supervisor doc. dr. Vytautas Sučila; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electrical Power Systems

Kaunas, 2015. 42 page.

SUMMARY

Electric power generated by wind power stations is unstable and difficult to use; both by connecting to the network or to the devices working in the micro network. In order to reduce power fluctuations in the electrical system, the power fluctuations generated by the wind power station can be balanced by using a supercapacitor energy storage system.

In this study, the model of power balancing of wind power station consists of a wind turbine, the alternative current load and wind power balancing system. In order to clearly identify operating principles of this model, we consider that the load is stable and unchanging, and the voltage is constant. The wind power balancing system operating principle is based on the first Kirchoff rule and consists of the system of supercapacitors and an AC/DC three-phase controlled rectifier. An AC/DC three-phase controlled rectifier has six insulated gate bipolar transistors, which are controlled by pulse width modulated signal. This signal is generated by comparing the data values of wind power generated current and reference current. The Energy storage system consists of a series of supercapacitors connected in series and parallel.

The Theoretical model of wind power capacity balancing is based on computerized mathematical modeling software „Matlab“. The simulations carried out showed that the energy storage system that consists of supercapacitors can balance unstable wind power capacity. However, the outcomes of the wind power balancing system are affected by the current measurement data sampling time duration. Increasing the measurement sample time duration results in the decrease of the data curve ripple of output result, but it also reduces the amount of balanced energy in comparison to the data deduction values.

The Wind power balancing system investment costs account for only sixteen percent of the wind power station installation price. The further development of this system to ensure stable electricity supply to consumers, or compensate for the short-term wind forecasting inaccuracies, who would maintain the power grid more stable and reduce the cost of stabilization.

Keywords: Wind turbine, supercapacitor, AC/DC three phase controlled rectifier, PWM.

IVADAS

Darbo aktualumas

Pasaulyje, per paskutinius dešimt metų, vėjo turbinų pardavimų skaičius didėja trisdešimt procentų per metus. Šiuo metu pasaulyje vėjo energija yra sparčiausiai auganti energijos rūšis. Tikimasi, kad per ateinančius dvidešimt metų vėjo jėgainių ir jų pagaminamos elektros energijos pasaulyje padvigubės. Tačiau energija, sukuriama vėjo jėgainių yra kintanti ir nepastovi. Staigus galios kitimas elektros sistemoje gali neigiamai įtakoti vietinius vartotojus, kurie yra jautrūs energijos galios kitimams, sumažina galimybes platesniam vėjo energetikos panaudojimui. Siekiant sumažinti galios svyravimus elektros sistemoje, vėjo elektrinės generuojamos galios svyravimus galima balansuoti panaudojant didžiatalpių kondensatorių energijos kaupimo sistemą.

Darbo tikslas

Sudaryti didžiatalpių kondensatorių energijos kaupimo sistemą ir jos valdymo modelį vėjo elektrinės generuojamai galiai balansuoti.

Darbo uždaviniai

1. Išanalizuoti didžiatalpių kondensatorių energijos kaupimo sistemą ir jos parametrus;
2. Sudaryti didžiatalpių kondensatorių energijos kaupimo sistemos matematinį modelį;
3. Nustatyti vėjo generuojamos galios balansavimo sistemos optimalią duomenų imties laiko trukmę.

1. PROBLEMOS ANALIZĖ

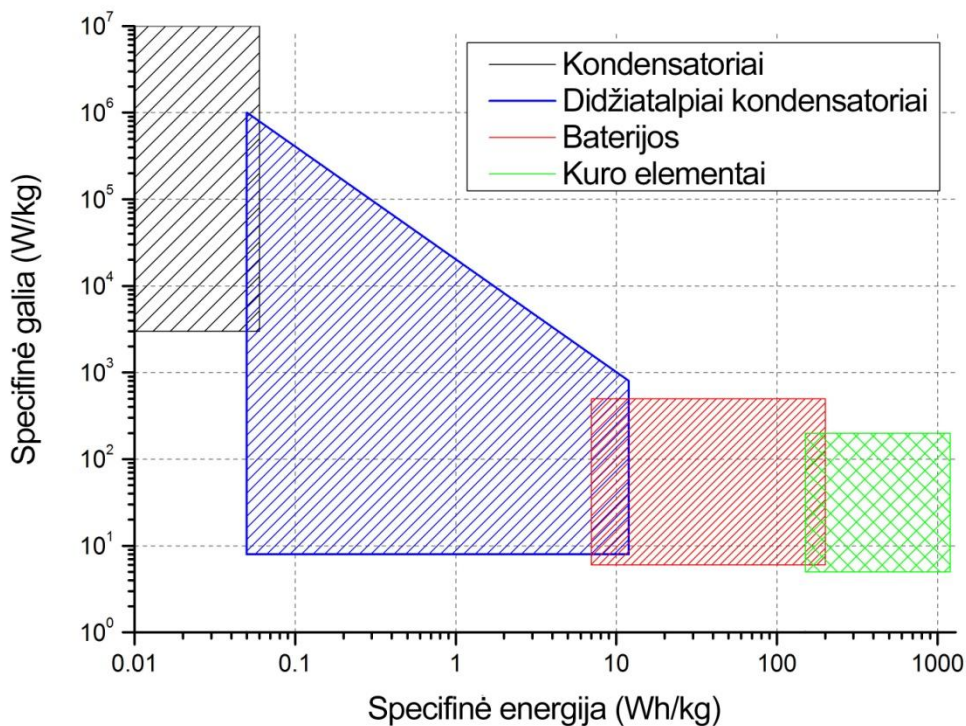
Viena iš pagrindinių problemų, gaminant energiją iš atsinaujinančių šaltinių, tokių kaip saulė ir vėjas, yra nepastovumas ir nepastovios energijos generavimas, kuris įtakoja elektros energijos kokybę tinkle. Kokybiška elektros energija galima tik stabilioje elektros energetikos sistemoje ir kasmet, didėjant „žaliosios“ elektros energijos kiekiui, išlaikyti stabilų elektros tinklą darosi vis sunkiau. Šios problemos sprendimui mokslininkai ir inžinieriai bando panaudoti daugybę sprendimų, deja, kiekvienas iš jų nėra idealus ir turi savo privalumus bei trūkumus. Pagrindiniai sprendimai yra šie: vėjo prognozė trumpuoju periodu, generuojamos energijos kaupimas kaupikliuose, trūkstamos energijos dalies kompensavimas, panaudojant variklius. Trumpai aptarsime visus šiuos būdus, jų privalumus bei trūkumus.

Vėjo prognozė trumpuoju periodu yra pats pigiausias būdas išlaikyti stabilią elektros energijos sistemą, nes tada, kai tiksliai žinome kada ir kiek turime energijos, ją galima suvartoti, pasitelkus išmaniųjų tinklų įrenginius arba pridėti iš kitų energijos generavimo šaltinių. Didžiausias šio sprendimo trukūmas yra jo tikslumas. Šiandien, pasitelkus neuronų tinklų, Kalmano filtro principus bei panaudojant visą turimą ir gaunamą meteorologinę informaciją iš palydovų realiu laiku, prognozės vidutinė absoliutinė paklaida (angl. Mean Absolute Error) yra 6%, prognozuojant vieną valandą į priekį, ir 28%, prognozuojant vieną parą į priekį. Tai nėra daug, žinant vėjo nepastovumą, tačiau Lietuvoje normaliomis veikimo sąlygomis staigieji įtampos pokyčiai neturi viršyti 5% nominalios įtampos, bet keletą kartų per dieną tam tikrais atvejais gali viršyti 10% [1].

Kompensuoti trūkstamą energijos dalį galima panaudojant vidaus degimo variklius ir generatorius [2]. Vidaus degimo variklių privalumas prieš hidro ar šiluminės elektrines yra greitaveika, t.y. galima greitai įjungti ir pradėti generuoti elektros energiją, taip pat greitai nutraukti energijos gavybą. Šis energijos valdymo būdas yra efektyvus, tačiau daug kainuoja kuras, reikalingas vidaus degimo varikliui bei nesprenžia CO₂ emisijos sumažinimo problemos, tai pat reikalingi papildomi įrenginiai, galintys suvartoti ar sukaupti energijos perteklių, kurį generuoja vėjo elektrinė.

Pats efektyviausias energijos valdymo būdas yra panaudojant energijos kaupiklių sistemą, tačiau jis yra pats brangiausias, dažnai viršijantis energijos gavybos kainą. Kaupiklių sistemos su baterijomis turi ribotą krovimų / iškrovimų ciklų skaičių ir jų darbinė trukmė yra maža, todėl reikalauja papildomų išlaidų, keičiant baterijų sistemas.

Šiame darbe yra aptartas didžiatalpių kondensatorių panaudojimas išlyginant galios šuolius vėjo energetikoje. Didžiatalpiai kondensatoriai lyginant su baterijomis turi didesnę galios tankį bei įkrovimų / iškrovimų ciklų skaičių, bet turi mažesnę energijos tankį nei baterijos. Dėl šių savo savybių



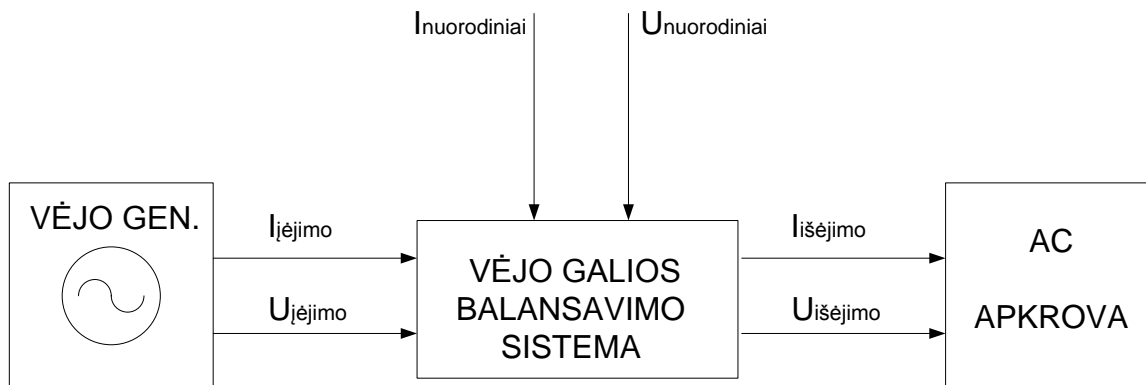
1.1 pav. Skirtingų kaupiklių galios ir energijos tankių parametrai [3]

didžiatapiai kondensatoriai nėra plačiai naudojami energetikoje, tačiau labai paplitę, naudojant įrenginiuose, kuriuose reikalingas greitas energijos įsisavinimas ir atidavimas t.y. automobilių pramonėje, vėjo turbinų sparnuotės valdymo įrenginiuose ir t.t. Dėl paplitimo elektromobilių pramonėje, šiuo metu į juos yra daug investuojama, didėja konkurencija tarp gamintojų, o nauji techniniai išradimai kasmet sumažina didžiatapių kondensatorių kainas.

2. TEORINIAI SPRENDIMAI

2.1. Vėjo galios balansavimo sistema

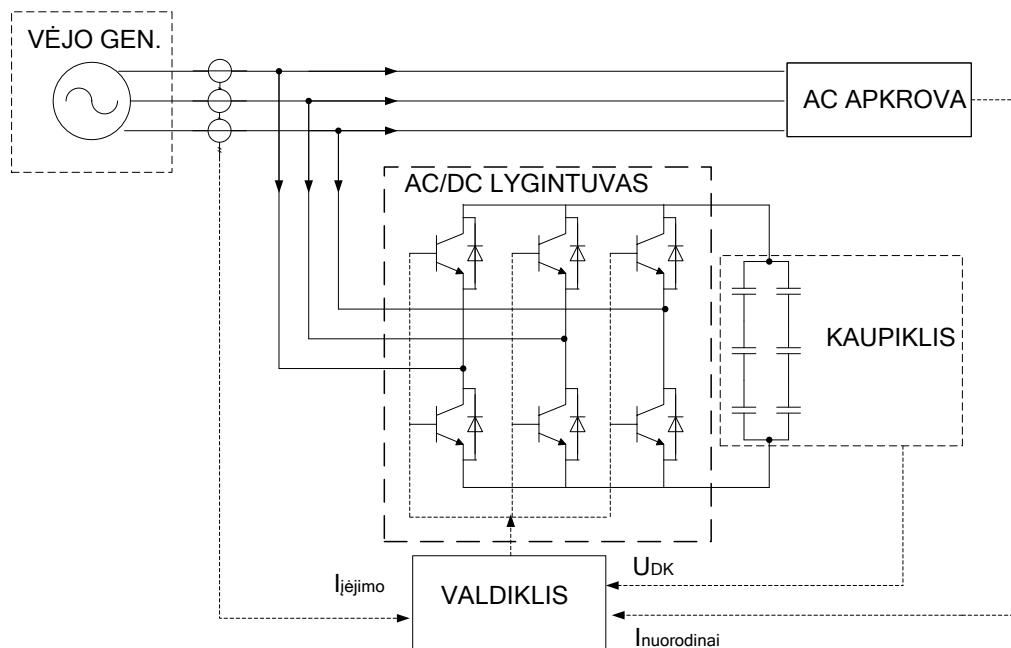
Vėjo galios balansavimo modelis susideda iš šių elementų: vėjo turbinos, AC apkrovos ir vėjo galios balansavimo sistemos (2.1. pav). Vėjo galios balansavimo sistemos įėjimo duomenys yra vėjo turbinos generuojamos srovės ir įtampos vertės. Šie duomenys balansavimo sistemoje yra palyginami su nuorodiniais duomenimis, t.y. nuorodine įtampa ir srove. Nuorodiniai duomenys yra duomenys, kuriuos norima gauti sistemos išėjime. Nuorodiniai duomenys realiame gyvenime gali būti apkrovos darbo arba vėjo prognozės grafikas.



2.1 pav. Vėjo galios balansavimo modelis.

Supaprastinant modelį laikome, kad AC apkrova yra pastovi ir nekintanti, o įtampa linijoje, tarp vėjo generatorius ir AC apkrovos, yra pastovi ($U_{įėjimo} = U_{išėjimo} = 400V$). Varža šioje linijoje laikoma, kad yra lygi nuliui ir dėl to nėra patiriami nuostoliai. O linijos tarp vėjo generatoriaus ir kaupimo sistemos atstumai yra minimalūs ir energijos nuostoliai lygūs nuliui.

Vėjo galios balansavimo sistema susideda iš didžiatapių kondensatorių kaupiklių sistemos, AC/DC dvipusio lygintuvo ir valdymo sistemos (2.2 pav). Valdymo sistema yra sudaryta iš srovės matavimo transformatorių, kurie matuoja vėjo elektrinės generuojamą momentinę srovę ir perduoda įėjimo duomenis į valdiklį. Šie duomenys valdiklyje konvertuojami į momentinės galios duomenis ($P = U_{įėjimo} I_{įėjimo}$) ir yra palyginami su



2.2 pav. Vėjo galios balansavimo sistema.

nuorodiniais momentinės galios duomenimis. Palyginus ir apdorojus duomenis, suformuojamas išvesties signalas, kuris perduodamas į AC/DC dvipusį lygintuvą. AC/DC dvipusis lygintuvas, gavęs išvesties signalą, įkrauna arba iškrauna didžiatalpių kondensatorių kaupiklių sistemą pastovia momentine srove. Balansavimo sistemos darbas yra paremtas pirma Kirchofo taisykle.

Didžiatalpių kondensatorių kaupiklių sistema siunčia į valdiklį duomenis apie kaupiklių įkrovimo gylį. Taip yra apsaugoma, kad kaupimo sistema nebūtų perkrauta arba iškrauta iki žemesnės įtampos nei galima minimali įtampa.

2.2. Vėjo elektrinė ir vėjo generuojama galia

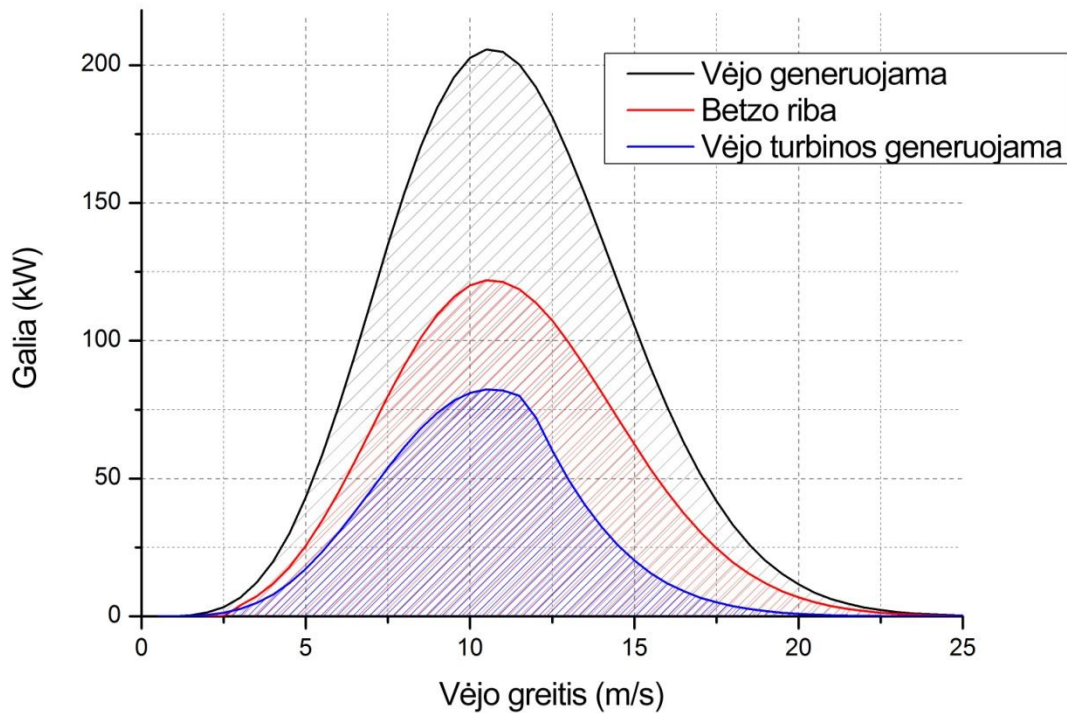
Vėjo turbina tai įrenginys, kuris verčia vėjo kinetinę energiją į elektrinę energiją. Vėjo turbiną sudaro sparnuotė, pro kurią juda oro srautas ir sukuria kėlimo jėgą, kuri priverčia sparnuotę sukstis. Sparnuotė mechaniškai yra sujungta su greičio dėže, kuri padidina sukimosi greitį iki generatoriui tinkamo greičio. Generatorius (dažniausiai naudojamas asinchroninis variklis) naudodamasis magnetiniu lauku, sukimosi energiją paverčia elektros energija. Dėl saugumo, kad vėjas nusulaužytų vėjo generatoriaus yra įrengiami mechaniniai stabdžiai, kurie įsijungia pasiekus ribinį vėjo greitį, dažniausiai jis siekia apie 25 m/s.

Oro srauto sukuriama galia priklauso nuo oro tankio, kuris yra 1.225 kg/m^3 , ploto, pro kurį juda oro srautas ir vėjo greičio (2.1) [4].

$$P_{vėjo} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3; \quad (2.1)$$

čia $P_{vėjo}$ – oro srauto sukuriama galia; ρ – oro tankis; A – plotas, pro kurį juda oro srautas; v – vėjo greitis.

Tačiau dėl savo geometrinių savybių vėjo turbina gali panaudoti tik apie 59,3% vėjo energijos. Šis koeficientas vadinamas Betzo koeficientu, kuris nusako vėjo turbina teorinio efektyvumo ribas. Realiai vėjo turbina efektyvumas yra dar mažesnis ir yra apie 25 – 45 % (2.3 pav.), priklausomai nuo vėjo turbina dizaino.



2.3 pav. Vėjo turbinos generuojama energija ir jos teorinis limitas.

Vėjo turbinos generuojama galia priklauso nuo oro tankio, sparnuotės ploto, vėjo greičio ir galios koeficiento, kuris teoriškai negali viršyti Betzo koeficiento (2.2) [4].

$$P_{vėjo_turbina} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot A \cdot v^3; \quad (2.2)$$

$$C_p = \frac{P_{vėjo}}{P_{vėjo_turbina}}; \quad (2.3)$$

čia $P_{vėjo}$ – oro srauto sukuriama galia; $P_{vėjo_turbina}$ – vėjo turbinos sukuriama galia, ρ – oro tankis; A – sparnuotės plotas; v – vėjo greitis, C_p – galios koeficientas.

Galios koeficientas C_p daugiausiai priklauso nuo sparnuotės geometrinių parametru, dizaino ir vėjo atakos kampo [4]. Esant skirtingiems vėjo greičiams galios koeficientas yra skirtingas ir tai įtakoja vėjo turbinos efektyvumą. Siekdami maksimaliai išnaudoti vėją ir jo generuojamą energiją gamintojai įdiegia sparnuotės kampo valdymo mechanizmą, kuris parenka sparnuotės ir vėjo atakos kampą maksimaliam galios koeficientui. Su šiuo mechanizmu pasiekama maksimali generuojama galia, pasiekus vidutinį vėjo greitį, taip pat

šiuo valdymo mechanizmu galima kontroliuoti ir generatoriaus apsisukimų skaičių bei generuojamos energijos dažnį.

2.3. Vėjo galios balansavimo sistemos valdymas

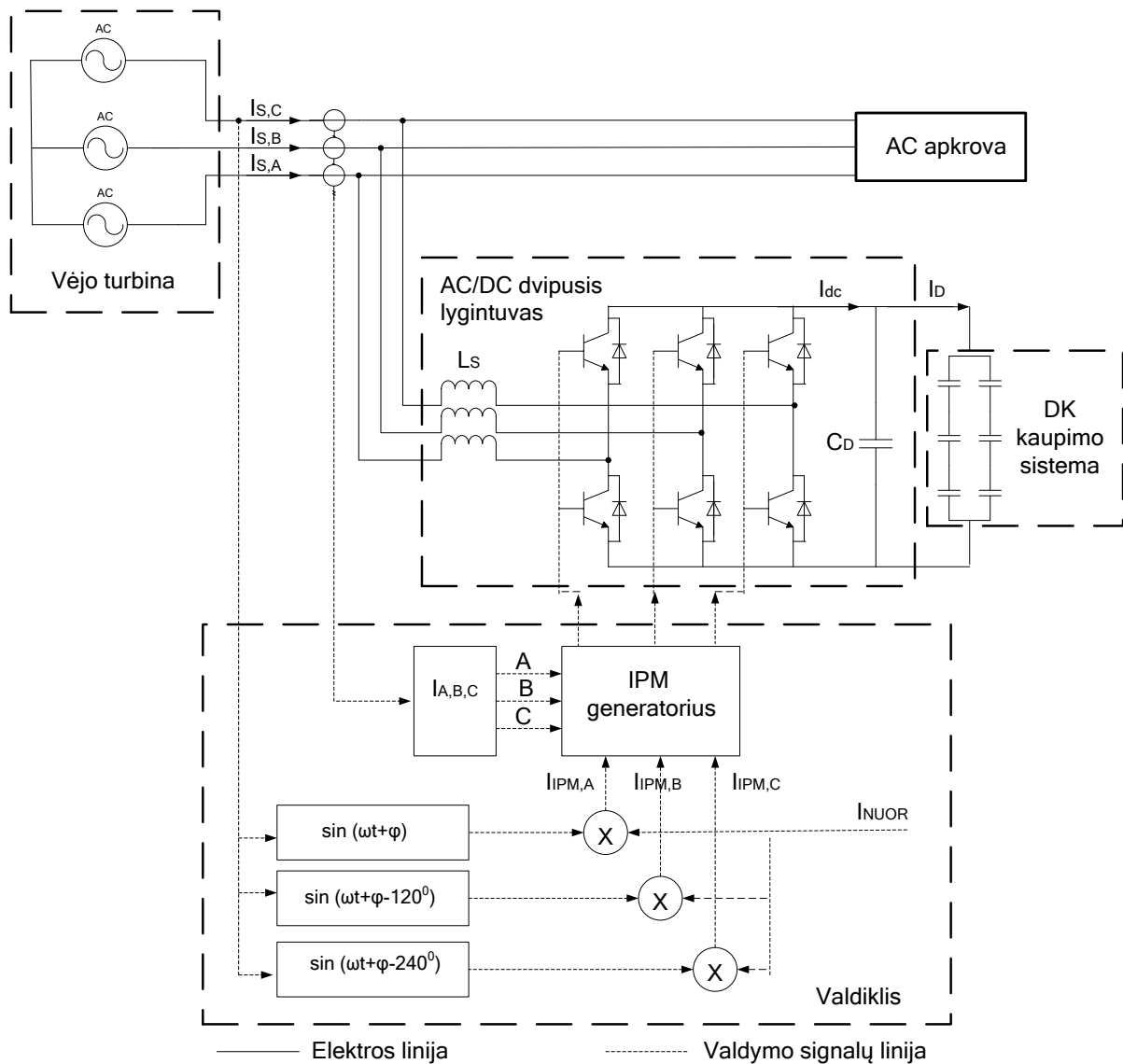
Vėjo galios balansavimo sistemos valdymui yra panaudotas AC/DC dvipusis lygintuvas, valdiklis ir srovės matavimo transformatoriai (2.4 pav.) AC/DC dvipusis lygintuvas yra skirtas keisti kintančios srovės elektros energiją į nuolatinės srovės elektros energiją. Yra skirtingų topologijų AC/DC lygintuvai, tačiau šiame darbe yra panaudotas trijų fazių dvipusis valdomas lygintuvas. Šios topologijos lygintuvas gali dirbti ir DC/AC režimu, t.y. dirbti kaip inverteris ir keisti nuolatinę srovę į kintamą. AC/DC dvipusis lygintuvas yra valdomas šešių izoliuotos užtūros dvipolių tranzistorių (toliau tekste IUDT, angl. insulated gate bipolar transistor). Šio tipo tranzistoriai gali valdyti 500 – 1700 V įtampas, turi didelę iki 100 kHz greitaveiką. Dėl nedidelės soties įtampos energijos nuostoliai yra mažesni nei naudojant metalo oksido puslaidininkio lauko tranzistorius (toliau tekste MOP lauko tranzistorius, angl. metal oxide semiconductor field effect transistor). Tranzistoriai yra valdomi signalu, kuris yra sudarytas impulso pločio moduliacijos (toliau tekste IPM, angl. pulse width modulation) būdu.

Vėjo galios balansavimo sistemos valdiklis į sistemą įvesta nuorodinę srovę sudaugina su sinusine funkcija, kuri turi tokį patį dažnį, fazės pokyčio kampą ϕ , kaip ir galios šaltinis (2.4. pav). Toliau sukurtas signalas I_{IPM} keliauja į IPM signalo generatorių, IPM signalo generatoriuje signalas I_{IPM} yra palyginamas su vėjo elektrinės generuojama srove, kurios vertės yra gaunamos pasinaudojus srovės transformatoriais. Palyginus šiuos srovės duomenis gaunami išvesties duomenys, kurie nusako, ar energijos kaupimo sistemą reikia įkrauti ar iškrauti, ir kokia srove. Iš šių duomenų yra generuojamas IPM signalas, kuris valdo tranzistorius.

Valdiklyje esantis paprastas kondensatorius yra naudojamas lygintuvo moduliotos nuolatinės srovės I_{dc} išlyginimui ir jo talpa apsiskaičiuojama pagal 2.4 formulę:

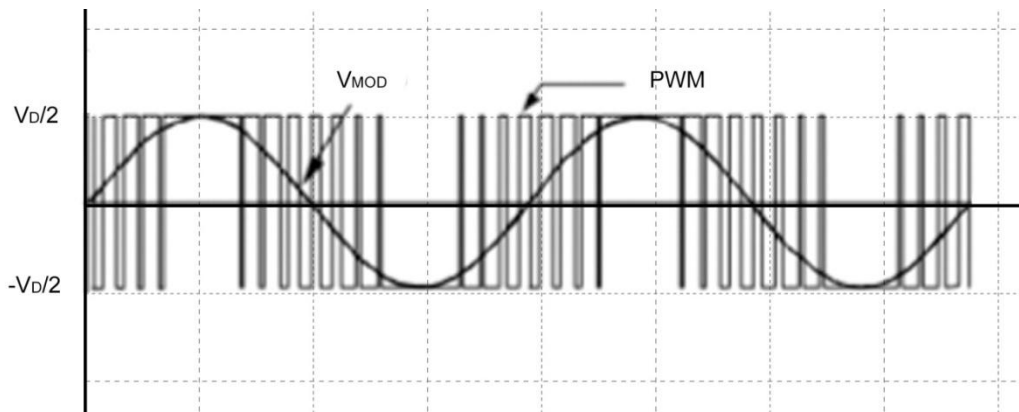
$$C_k = \frac{I_D}{2 \cdot f \cdot U_{MOD}} \quad (2.4)$$

čia C_k – kondensatoriaus talpa; I_D – apkrovos srovė, f – elektros šaltinio dažnis; U_{MOD} – lygintuvo moduluota įtampa DC pusėje.



2.4 pav. Vėjo galios balansavimo sistemos modelis ir jo valdymas

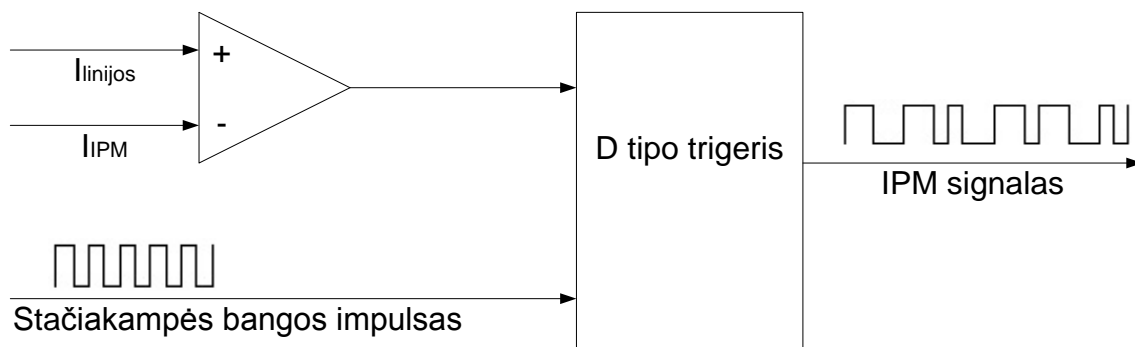
Impulso pločio moduliacija yra būdas suformuoti pulsuojančią signalą, kuriame yra užkoduotas tranzistoriaus atidarymo ir uždarymo trukmė. Atidarymo trukmės santykis su pastovia darbine trukme vadinama darbiniu ciklu (iš angl.k. duty cycle) ir yra išreiškiamas procentais. IPM modelis susideda iš pasikartojančio pulsuojančio signalo, kurio pagrindas yra įtampa U_{MOD} (2.5 pav.). Įtampos kitimo dažnis ir amplitudė priklauso nuo signalo darbinio ciklo ir amplitudės. Kad lygintuvas veiktų tinkamai IPM modelis turi generuoti signalą su tokiu pat dažniu kaip ir energijos šaltinis. Impulso pločio moduliacija galima valdyti ne tik aktyviają galią, bet ir reaktyviają galią, su galimybe koreguoti galios faktorių.



2.5 pav. IPM signalas ir moduluota įtampa [5]

Dažniausiai yra naudojami trijų tipų metodai norint sugeneruoti IPM signalą, kuris priverstų pagal tam tikrą dažnį atsidarinėti lygintuvo tranzistorius: periodinės imties (angl. periodical sampling), histerezės juostos (angl. hysteresis band) ir trikampio nešėjo (angl. triangular carrier).

Periodinės imties (angl. periodical sampling) metode yra lyginamas signalas I_{IPM} su $I_{linijos}$ ir šių signalų skirtumas siunčiamas į D tipo trigerį. D tipo trigeryje signalų skirtumas formuojamas pagal fiksuoto dažnio stačiakampės bangos signalą. Šio metodo privalumas yra tai, kad jį lengva realizuoti, nes reikia tik komparatoriaus ir D tipo trigerio kiekvienai fazei. Minimalus perjungimo laikas įtakojamas tik stačiakampės bangos signalo dažnio. Tačiau aktualus perjungimo dažnis nėra aiškiai aprašomas

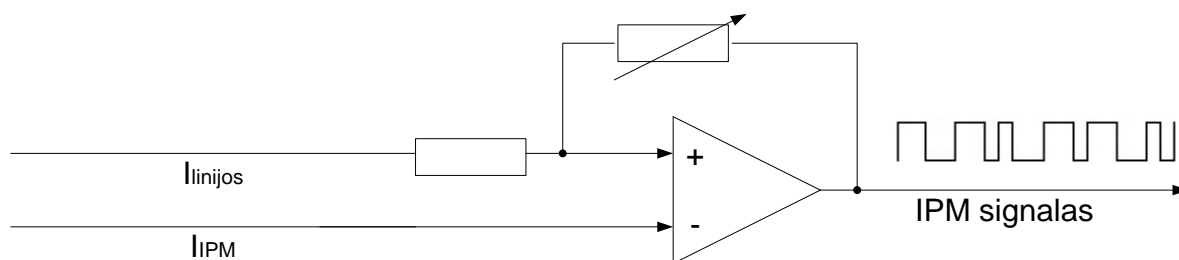


2.6 pav. IPM signalo generatorius, naudojant periodinės imties metodą [7]

Histerezės juostos (angl. hysteresis band) metodo metu tranzistoriais yra perjungiami, kai skirtumas tarp signalų I_{IPM} ir $I_{linijos}$ viršija fiksuotą vertę. Šiam metodui realizuoti reikia komporatorių su histereze kiekvienai fazei. Perjungimų dažnis nėra aprašomas, tačiau maksimalią vertę galima išreikšti formule (2.5)

$$f_{HI} = \frac{U_D}{4h \cdot L_S}; \quad (2.5)$$

čia f_{HI} – maksimalus perjungimo dažnis; h – histerezės juostos koeficientas, U_D – įtampa DC pusėje.



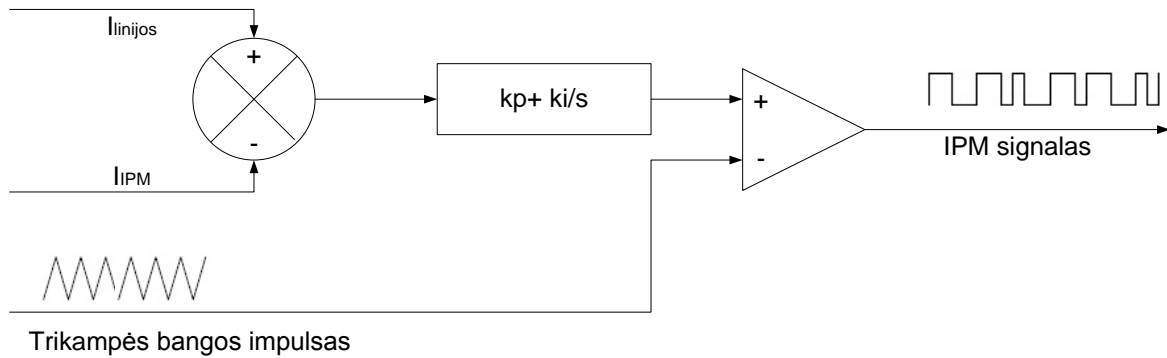
2.7 pav. IPM signalo generatorius naudojant histerezės juostos metodą [7]

Trikampio nešėjo (angl. triangular carrier) metodas yra labiau komplikuoatas lyginant su prieš tai aprašytais metodais. Šis metodas palygina I_{IPM} ir $I_{linijos}$ skirtumą su trikampio formos impulso signalu. Trikampės formos impulso signalas turi pastovių verčių amplitudę ir dažnį, bei vadinamas Trikampio nešėju (angl. triangular carrier). Lyginant su trikampiu impulso signalu I_{IPM} ir $I_{linijos}$ skirtumas yra apdorojama proporciniu integriniu valdikliu (toliau tekste PI valdiklis, angl. proportional-integral controller), kurio koeficientai k_p ir k_i buvo apskaičiuoti empiriškai (2.6; 2.7; [7]), ir po keletos operacijų, esant įvairioms sąlygomis, pasižymėjo geromis dinaminėmis savybėmis [7].

$$k_p = \frac{L_N \cdot \omega_\Delta}{2 \cdot U_D}; \quad (2.6)$$

$$k_i = \omega_\Delta \cdot k_p; \quad (2.7)$$

čia L_N – induktyvumas; ω_Δ – trikampio formos signalo dažnis; U_D – lygintuvo įtampa DC pusėje, k_i ir k_p – PI valdiklio koeficientai.



2.8 pav. IPM signalo generatorius naudojant trikampio nešėjo metodą [7]

Pagrindiniai parametrai nusakantys lygintuvo kokybę yra efektyvumas η (2.8) ir pulsacijos faktorius PF (2.7)[6]. Lygintuvo efektyvumas priklauso nuo galios P_D , kurią suvartoja apkrova, santykio su moduluota galia P_{dc} ir energijos nuostolių, kuriuos įtakoja diodų konstrukcija ir savybės.

$$\eta = \frac{P_D}{P_{dc} + p_d} \quad (2.8)$$

čia η – lygintuvo efektyvumas, P_{dc} – lygintuvo išėjimo galia; P_D – apkrovos galia; p_d – diodų energijos nuostoliai.

$$\eta = \frac{U_D \cdot I_D}{U_{MOD} \cdot I_{MOD} + R_d \cdot I_D^2}; \quad (2.9)$$

čia η – lygintuvo efektyvumas, U_D , I_D – apkrovos įtampa ir srovė, U_{MOD} , I_{MOD} – lygintuvo moduluotos įtampos ir srovės amplitudės, R_d – diodų varža.

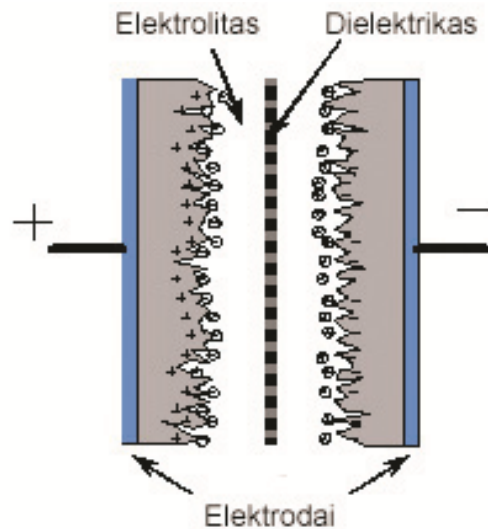
$$PF = \frac{\sqrt{U_D^2 - U_{MOD}^2}}{U_{MOD}}; \quad (2.10)$$

čia PF – pulsacijos faktorius, U_D – apkrovos įtampa, U_{MOD} – lygintuvo moduluota įtampa.

2.4. Didžiatalpiai kondensatoriai

Didžiatalpis kondensatorius – tai energijai kaupti skirtas kondensatorius, kurio talpa šimtus, tūkstančius ar daugiau kartų viršija įprastinių kondensatorių talpą (angl. high cap capacitor; high capacitance capacitor; supercapacitor; ultracapacitor). Kaip ir tradiciniai elektriniai kondensatoriai, didžiatalpiai kondensatoriai yra sudaryti iš atskirų elektrodų, kurių sukurtame magnetiniame lauke kaupia energiją. Siekinat padidinti didžiatalpio

kondensatoriaus talpą ir sumažinant tiesioginį elektrinių dalelių judėjimą tarp elektrodų, elektrodai yra atskirti dielektrine medžiaga (2.9 pav.).



2.9 pav. Didžiatalpio kondensatoriaus sandara

Elektros krūvis q yra tiesiogiai proporcingas įtampai U , esančiai tarp elektrodų ir kondensatoriaus talpai C_{DK} (2.11)

$$q = C_{DK} \cdot U ; \quad (2.11)$$

$$C_{DK} = \frac{q}{U} \quad (2.12)$$

čia C_{DK} – didžiatalpio kondensatoriaus talpa; q – elektros krūvis; U – įtampa tarp elektrodų.

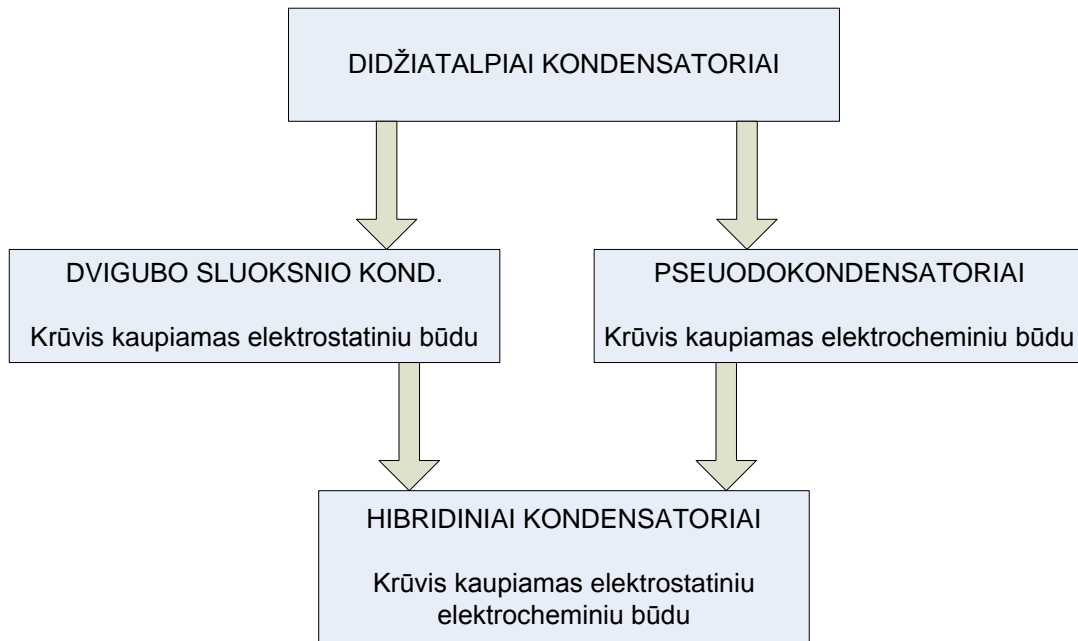
Taigi iš 2.12 formulės elektrinę talpą C_{DK} galime apibūdinti kaip kondensatoriaus gebėjimą sukaupti elektros krūvį, esant vienetinei įtampai tarp elektrodų.

Didžiatalpio kondensatoriaus talpa priklauso nuo elektrodų ploto, dielektriko skvarbos ir atvirkščiai proporcinga atstumui tarp elektrodų (2.13). Didžiatalpiei kondensatoriai nuo paprastų elektrinių kondensatorių skiriasi savo talpa, kuri gali būti tūkstančius kartų didesnė nei įprastų kondensatorių. Tai pasiekama pasitelkus nanotechnologijas, atstumai tarp elektrodų yra sumažinami iki minimumo naudojant geresnius dielektrikus, o „užauginus“ netolygius elektrodų paviršius, jų plotas padidėja šimtus kartų.

$$C_{DK} = \frac{\varepsilon \cdot S}{4\pi d} \quad (2.13)$$

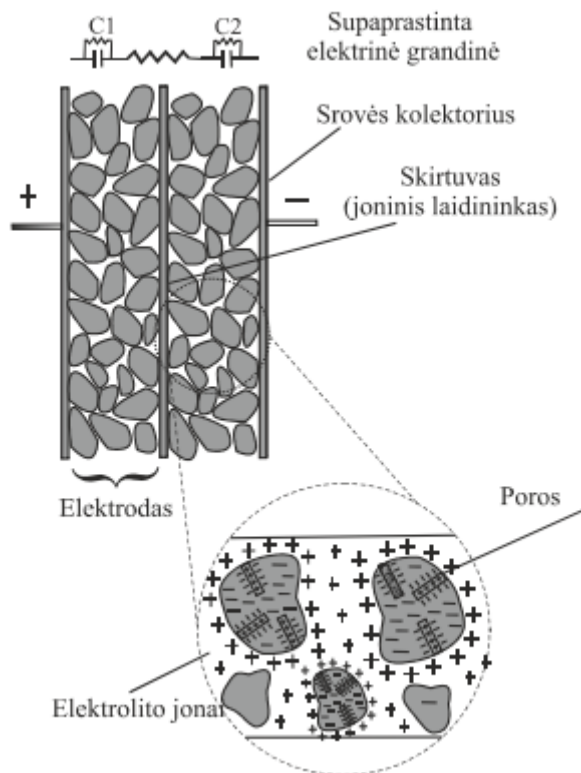
čia C_{DK} – didžiatalpio kondensatoriaus talpa; S – elektrodų plotas; d – atstumas tarp elektrodų; ε – dielektriko skvarba.

Pagal konstrukciją ir juose vykstančius elektrinius procesus didžiatalpiei kondensatoriai gali būti kelių tipų: dvigubo sluoksnio kondensatoriai (angl. double-layer capacitor), pseudokondensatoriai (angl. pseudocapacitor) ir hibridiniai kondensatoriai (angl. hybrid capacitor) (2.10 pav.)



2.10 pav. Didžiatalpių kondensatorių tipai

Dvigubo sluoksnio kondensatorių sudaro porėti anglies lakštai, elektrolitas ir tarp anglies lakštų esantis laidus skyriklis 2.11 pav. Prijungus prie kondensatoriaus išorinį šaltinį, skirtingą ženklą turintys jonai ir elektronai per porėtą skyriklį juda link priešingo ženklo elektrodų, taip sukurdami dvigubą sluoksnį, kuris susidaro tarp porėtų elektrodų paviršiaus ir elektrolito. Idealiu atveju krūvis yra kaupiamas dvigubajame elektros sluoksnyje ir sistemoje nevyksta Faradėjinės reakcijos. Todėl $\frac{dQ}{dU}$ yra pastovus dydis ir nepriklauso nuo įtampos.



2.11 pav. Dvigubo sluoksnio didžiatalpio kondensatoriaus sanadara [8]

Elektrolitas gali būti skystos dvigubo sluoksnio kondensatoriaus sandaros būsenos arba kietakūnis. Elektrodams gaminti dažniausiai naudojama aktyvinta anglis arba anglies nano vamzdeliai. Tokių dvigubo sluoksnio kondensatorių elektrodų paviršiaus plotas ($2000 \text{ m}^2/\text{g}$) yra žymiai didesnis negu tradicinių kondensatorių, o atstumas tarp krūvininkų sluoksnių yra $0,1 \text{ nm}$ [9]. Kondensatorių darbinės, elektrinės savybės bei ilgaamžiškumas priklauso nuo naudojamo elektrolito tipo (2.1 lentelė). Dvigubo sluoksnio kondensatoriai pasižymi ilgaamžiškumu, dideliu įkrovimų / iškrovimų skaičiumi.

2.1 lentelė. Didžiatalpių kondensatoriaus elektrodų ir elektrolito konstrukcinės medžiagos [9].

Elektrodo medžiaga	Tankis, g/cm^3	Elektrolitas	Talpa, F/g	Talpa F/cm^3
Anglies pluoštas	0,35	KOH	200	70
		Organinis	100	35
Juodoji anglis	1,0	KOH	95	95
Anglies airogelis	0,6	KOH	140	84
Silicio karbido (SiC) dalelių	0,7	KOH	175	126
		Organinis	100	72

Titano karbido (TiC) dalelių	0,5	KOH	220	110
		Organinis	120	60
Kietasis Rutenio oksidas (RuO ₂)	2,7	H ₂ SO ₄	150	405
Skystasis Rutenio oksidas (RuO ₂)	2,0	H ₂ SO ₄	650	1300

Pseudokondensatoriuose krūvio kaupimas ir atpalaidavimas vyksta dėl Faradėjaus procesų. Pseudotalpą lemia elektrocheminiai krūvio pernašos procesai, kuriuos, savo ruožtu, riboja aktyvios medžiagos kiekis ir prieinamas elektrolitui paviršiaus plotas [10]. Tokiuose kondensatoriuose krūvis yra pernešamas vykstant elektrocheminėms reakcijoms tarp elektrodo ir elektrolito. Tokių elektrocheminių reakcijų greitis ir krūvio pernašos greitis priklauso nuo įtampos esančios tarp elektrodų. Taigi talpa C, skirtingai nei dvigubo sluoksnio kondensatoriuose, priklausys nuo įtampos U (2.8).

$$C = \frac{dq}{dU} \quad (2.14)$$

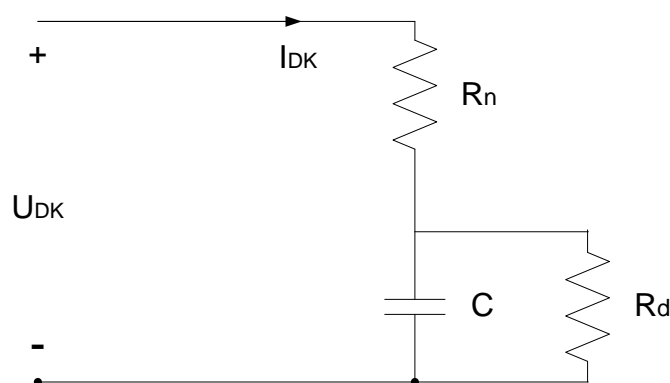
čia C – pseudokondensatoriaus talpa; q – pernešamas krūvis; U – įtampa tarp elektrodų.

Pseudokondensatoriuose krūvininkų kaupimas vyksta tik dėl elektrostatinių jėgų ir srovės stipris nepriklauso nuo įtampos esančios tarp elektrodų. Pseudokondensatoriuose turi būti vienodas migruojančių jonų ir elektronų skaičius. Taip pasiekiamos geriausios elektrinės charakteristikos. Šių kondensatorių gamybai naudojami polimerai ir metalo oksidai, pvz. Rutenio oksidas.

Hibridiniai kondensatoriai turi dvigubo sluoksnio ir pseudokondensatorių krūvio kaupimo mechanizmus, t.y. krūvis yra kaupiamas susidarant dvigubo sluoksnio krūvininkų telkiniams ir vykstant jonų ir elektronų mainams tarp elektrolito ir elektrodo. Kadangi hibridiniai kondensatoriai turi du krūvio kaupimo mechanizmus tai ir jų talpa yra didesnė už dvigubo sluoksnio ar pseudokondensatoriaus. Kaip ir prieš tai aptartų kondensatorių, hibridinių kondensatorių gamyboje dažniausiai naudojama anglis.

2.4.1. Didžiatalpio kondensatoriaus elektrinis modelis

Didžiatalpio kondensatoriaus elektrinis modelis yra pavaizduotas 2.9 paveikslėlyje, kur C_0 žymi ekvivalentinę talpą, kuri priklauso nuo atviros grandinės įtampos U_{DK} , R_n yra ekvivalentinė vidinė varža, kuri nuosekli talpai ir daugiausiai įtakoja energijos praradimus.



2.12 pav. Didžiatalpio kondensatoriaus elektrinės grandinės modelis

Modeliuojant superkondensatoriaus savaiminį išsikrovimą, panaudojame lygiagrečią ekvivalentinę varžą R_d . Geresniam dinaminiam modeliui būtų galima prijungti lygiagrečiai papildomą šaką su nuosekliai sujungta talpa ir varža, kurios yra įtakojamos elektronų judėjimo difuziniu būdu per dielektriką. Šis elektronų judėjimas didžiatalpio kondensatoriaus talpą įtakoja tik tuo atveju, kai krovimo trukmė siekia keletą valandų. Taigi, modeliuojant vienos valandos trukmės krovimo ir iškrovimo ciklą, į tai nebūtina atsižvelgti.

2.4.2. Didžiatalpio kondensatoriaus įkrovimas ir iškrovimas

Krovimo metu superkondensatoriaus įtampa tarp gnybtų priklauso nuo pradinės įtampos, esančios superkondensatoriuje U_0 , ir įtampos pokyčio dU (2.15) [11], kuris atsiranda sukaupus krūvininkų skaičių dQ per laiko trukmę dt . Dėl nuoseklosios vidinės varžos atsiranda įtampos kritimas U_{Rn} .

$$U_{SC} = U_0 + (dU - U_{Rn}); \quad (2.15)$$

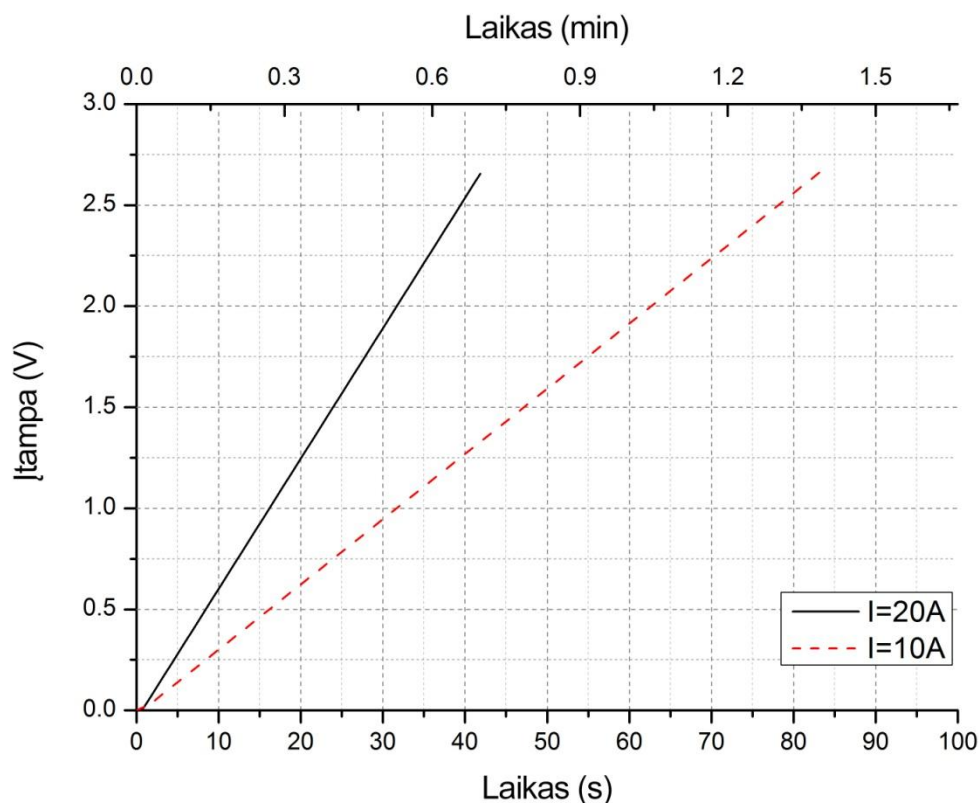
Įkrovos srovę galima išreikšti 2.16 formule:

$$I_{kr} = C \cdot \frac{dU}{dt} = \frac{P_{kr}}{U_{DK}}; \quad (2.16)$$

$$U = U_0 + \left(\frac{I_{kr}}{C} dt - I_{kr} \cdot R_n \right); \quad (2.17)$$

čia I_{kr} – kondensatorių sistemos įkrovos srovė; P_{kr} – kondensatorių sistemos įkrovos galia; U_{DK} – įtampa, prijungta prie didžiatalpio kondensatoriaus gnybtų; C – kondensatoriaus talpa.

Maxwell didžiatalpio kondensatoriaus BCAP0310 krovimo charakteristika, esant skirtingoms pastovioms įkrovos srovėms, kurių vertės yra 20 ir 10 amperų, yra pavaizduota 2.13 paveiksle.



2.13 pav. Maxwell didžiatalpio kondensatoriaus BCAP0310 įkrovos charakteristika.

Įtampos pokytis iškrovimo metu aprašomas žemiau esančiomis formulėmis ir priklauso nuo įtampos, esančios didžiatalpiame kondensatoriuje U_0 , ir įtampos pokyčio dU (2.18), kuris atsiranda „ištekėjus“ krūvininkų skaičių dQ per laiko trukmę dt . Dėl nuosekliosios vidinės varžos atsiranda įtampos kritimas U_{Rn} .

$$U_{DK} = U_0 - dU - U_{Rn}; \quad (2.18)$$

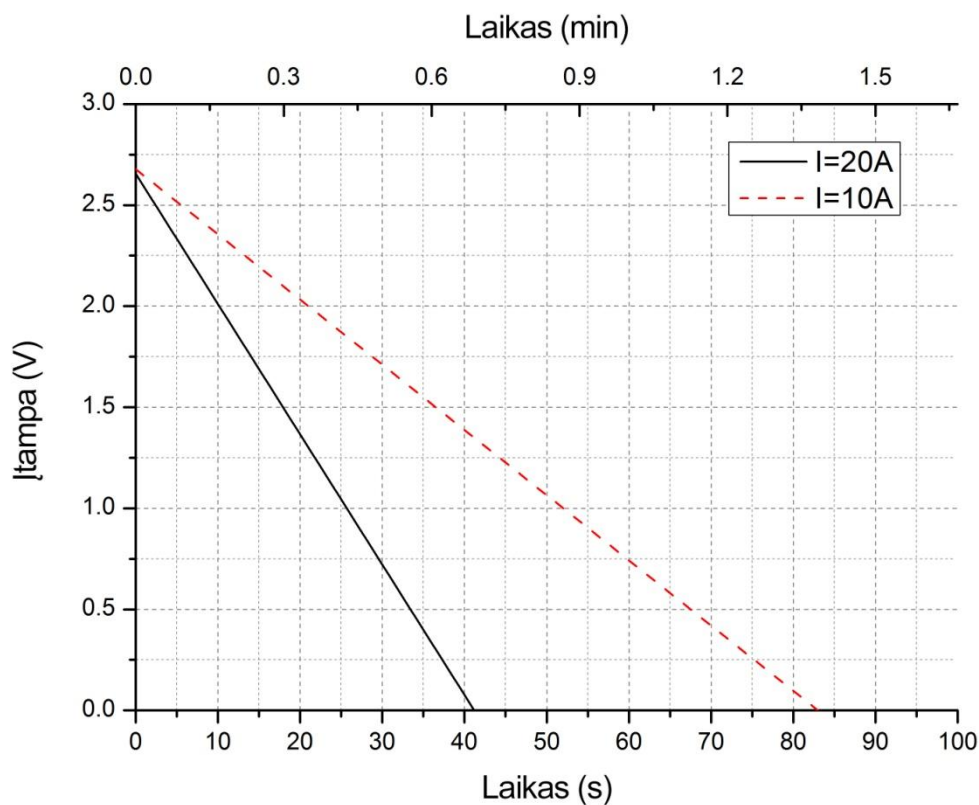
Įkrovos srovę galima išreikšti 2.19 formule:

$$I_{i\dot{s}kr} = C \cdot \frac{dU}{dt} = \frac{P_{i\dot{s}kr}}{U_{SK}}; \quad (2.19)$$

$$U = U_0 + \left(\frac{I_{i\dot{s}kr}}{C} dt - I_{i\dot{s}kr} \cdot R_n \right); \quad (2.20)$$

čia $I_{i\dot{s}kr}$ – kondensatorių sistemos įkrovos srovė; $P_{i\dot{s}kr}$ – kondensatorių sistemos įkrovos galia; U_{DK} – didžiatalpio kondensatoriaus gnybtų įtampa; C – didžiatalpio kondensatoriaus talpa.

Maxwell didžiatalpio kondensatoriaus BCAP0310 iškrovimo charakteristika, esant skirtingoms pastovioms iškrovimo srovėms, kurių vertės yra 20 ir 10 amperų, yra pavaizduota 2.14 paveiksle.



2.14 pav. Maxwell didžiatalpio kondensatoriaus BCAP0310 iškrovimo charakteristika.

Energijos nuostoliai krovimo ir iškrovimo metu, atsirandantys dėl vidinės varžos R_n yra $I^2 R_n$ dydžio ir kvadratiškai didėja didinant krovimo ar iškrovimo sroves.

2.4.3. Didžiatalpio kondensatoriaus savaiminis išsikrovimas

Savaiminis išsikrovimas vyksta tuo metu kai skirtingų ženklų krūvininkai pereina iš anodo į katodą ir atvirkščiai, difunduoja per dielektrinę užtvartą, o ne per apkrovą, esančią tarp elektrodų. Krūvininkai, judėdami per dielektrinę užtvartą, sukuria išsikrovimo srovę, kuri atvirkščiai proporcinga dielektriko difuzijos varžos dydžiui R_d . Todėl superkondensatoriaus elektrinės grandinės modelyje (2.9 pav.) yra pridėta varža R_d lygiagrečiai kondensatoriaus talpai.

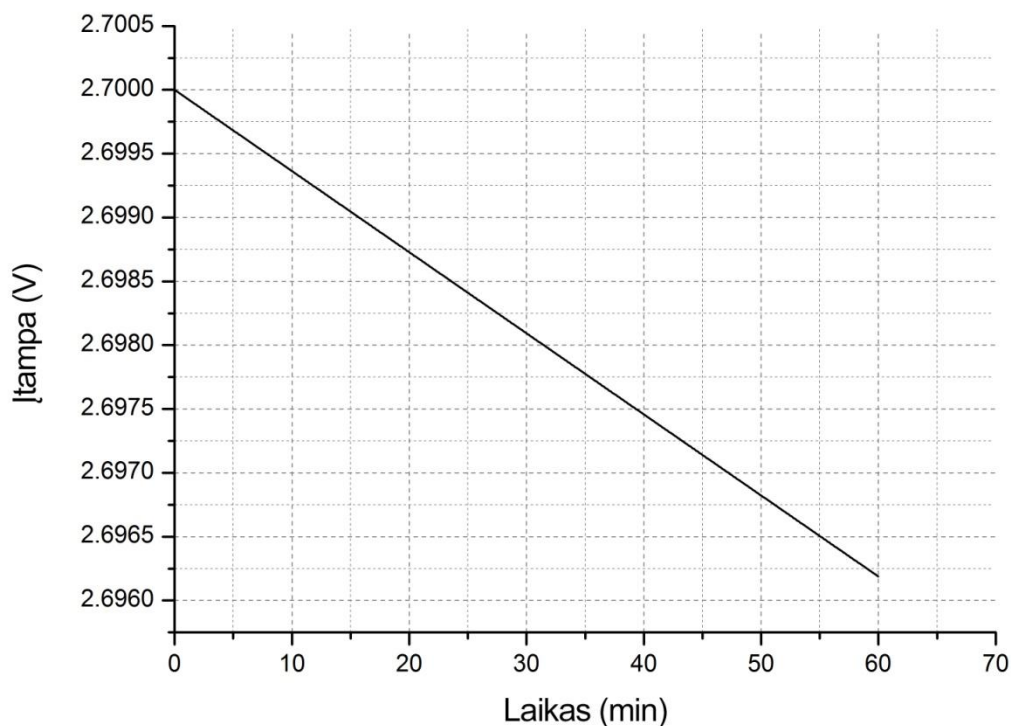
Savaiminio išsikrovimo srovės priklausomybę nuo laiko galima aprašyti 2.21 formule:

$$U(t) = U_0 \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau_{i\bar{s}}}\right)^n\right); \quad (2.21)$$

čia U – įtampos vertė po laiko t ; U_0 – pradinės įtampos vertė; n – eksponentės vertė, kai laiko intervalas t yra iki 1000s, tai $n=1$, kai t iki $5 \cdot 10^4$ s, tai $n=0.73$ [12];

$$\tau_{i\bar{s}} = R_d \cdot C_H; \quad (2.22)$$

čia $\tau_{i\bar{s}}$ – savaiminio išsikrovimo laiko konstanta; R_d - dielektriko difuzijos varžos dydis; C_H – talpa kaupiant krūvį Helmholtco būdu.



2.15 pav. Maxwell didžiatalpio kondensatoriaus BCAP0310 savaiminio išsikrovimo charakteristika.

Savaiminio išsikrovimo procesas yra gana ilgas, ir kaip matyti iš 2.15 paveikslėlio, po vienos valandos Maxwell kompanijos didžiatalpio kondensatoriaus BCAP0310 įtampos pokytis yra lygus $3,81 \cdot 10^{-3}$ voltams, o energijos nuostoliai atsirandantys dėl savaiminio išsikrovimo yra $1,2 \cdot 10^{-3}$ Wh.

2.4.4. Didžiatalpio kondensatoriaus darbinė trukmė

Didžiatalpie kondensatoriai turi didelį iškrovimo / įkrovimo ciklų skaičių, kuris priklausomai nuo gamintojo bei modelio gali siekti net vieną milijoną. Didžiatalpių kondensatorių gyvavimo trukmė yra ilgesnė už baterijų gyvavimo trukmę, tačiau yra keletas veiksnių, kurie gali įtakoti ir sutrumpinti didžiatalpių kondensatorių gyvavimo trukmę. Jei didžiatalpis kondensatorius yra veikiamas per aukštos įtampos ar temperatūros, jo gyvavimo trukmė gali ženkliai sumažėti. Taip pat reikia neviršyti leidžiamos maksimalios srovės vertės, nes srovė įtakoja I^2R_n energijos nuostolius ir pakelia didžiatalpio kondensatoriaus darbinę

temperatūrą. Didžiatalpio kondensatoriaus dėvėjimosi procesas įtakoja elektrolito reakcijas, kurios padidina vidinę varžą ir savaiminį išsikrovimą bei sumažina talpą.

2.2.5 Didžiatalpių kondensatorių energijos kaupimo sistemos parametrai

2.2.6.1 Didžiatalpių kondensatorių kaupiklių sistemos energija

Kadangi šiame tiriamajame darbe panaudotas dvigubo sluoksnio kondensatorius, tai šitame skyriuje yra aptarti šio tipo kondensatorių kaupimo sistemos elektriniai parametrai. Atskirus didžiatalpius kondensatorius galima sujungti į vieną sistemą. Nors atskiro didžiatalpio kondensatoriaus įtampa tarp elektrodų yra nedidelė, tačiau sujungiant kondensatorius nuosekliai, galima paaugštinti visos elektros kaupimo sistemos įtampą. Maksimali energija, kurią sukaupia sujungtų kondensatorių sistema, priklauso nuo kondensatorių sistemos ekvivalentinės talpos C_{ekv} (2.23).

$$E_{maks} = \frac{C_{ekv} \cdot U_{maks}^2}{2} \quad (2.23)$$

čia E_{maks} – maksimali energija, kurią sukaupia kondensatorių sistema; C_{ekv} – ekvivalentinė kondensatorių sistemos talpa; U_{maks} – maksimali kondensatorių sistemos įtampa.

Didžiatalpių kondensatorių sistemos momentinei išsikrovimo vertei aprašyti yra įvestas išsikrovimo gylio dydis (toliau tekste IGD , angl. depth of discharge). Šio dydžio matematinė išraiška yra pavaizduota 2.24 formulėje [13], ir parodo kiek procentų visos energijos yra jau iškrauta iš mūsų kondensatorių talpyklos. Pvz. turime 100Ah kaupiklį iš kurios iškrauname 30Ah, tai IGD dydis bus lygus 30%. Dydis atvirkščias išsikrovimo gylio dydžiui yra įkrovos būseną (toliau tekste IB , angl. state of charge), kuri parodo kiek procentų kondensatorių sistemos talpos yra įkrauta. Mūsų nagrinėjamame pavyzdyje IB dydis būtų 70%.

$$IGD = (100 - d) = 100 \cdot \left(1 - \frac{U_{min}}{U_{max}}\right); \quad (2.24)$$

$$d = \frac{U_{min}}{U_{maks}} \cdot 100\%. \quad (2.25)$$

čia IGD - išsikrovimo gylio dydis, d – išsikrovimo santykis, procentais, U_{maks} – maksimali kondensatorių sistemos įtampa; U_{min} – kondensatorių sistemos minimali įtampa iki kurios leidžiama išsikrauti kondensatoriams.

Minimali įtampa U_{min} yra reikalinga palaikyti galios valdymo operacijų režimą ir ją galime išreikšti 2.17 išraiška.

$$U_{min} = R_{ekv} \cdot I_{išk} = \sqrt{R_{ekv} \cdot P_{išk}}; \quad (2.26)$$

čia U_{min} – kondensatorių sistemos minimali įtampa iki kurios leidžiama išsikrauti kondensatoriams; R_{ekv} – ekvivalentinė kondensatorių sistemos varža; $I_{išk}$ – iškrovos srovė; $P_{išk}$ – iškrovos galia;

$$I_{išk} = \sqrt{\frac{P_{išk}}{R_{ekv}}}; \quad (2.27)$$

čia $I_{išk}$ – iškrovos srovė; R_{ekv} – ekvivalentinė kondensatorių sistemos varža; $P_{išk}$ – iškrovos galia;

Maksimali galia, kurią galima iškrauti iš kondensatorių sistemos, išreiškiama 2.28 formule:

$$P_{išk maks} = \frac{U_{maks}^2}{4 \cdot R_{ekv}}; \quad (2.28)$$

čia $P_{išk maks}$ – maksimali iškrovos galia; U_{maks} – maksimali kondensatorių sistemos įtampa; R_{ekv} – ekvivalentinė kondensatorių sistemos varža.

Jeigu esama įtampa U tenkina sąlygą $U_{min} < U < U_{maks}$, tai naudinga energija E_U , kurią gali tiekti kondensatorių sistema yra :

$$E_U = \frac{C_{ekv} (U_{maks} - U_{min})^2}{2}; \quad (2.29)$$

Padaliname 2.29 išraišką iš 2.23 išraiškos ir gauname

$$\frac{E_U}{E_{maks}} = \frac{(U_{maks} - U_{min})^2}{U_{maks}^2}; \quad (2.30)$$

$$\frac{E_U}{E_{maks}} = \left(1 - \frac{U_{min}}{U_{maks}}\right)^2; \quad (2.31)$$

Šią išraišką galime išsireikšti per išsikrovimo gylio koeficientą:

$$E_U = E_{maks} \left(1 - \left(\frac{d}{100}\right)^2\right); \quad (2.32)$$

Pilnutinę didžiatalpių kondensatorių sistemos talpą galime išreikšti per naudingą energiją ir maksimalią įtampą.

$$C_{P\text{ ekv}} = 2 \cdot \frac{E_U}{U_{maks}^2 \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{100}\right)^2\right)}; \quad (2.33)$$

2.5.2 Energijos kaupimo sistemos ekvivalentinė talpa ir varža

Talpa yra pagrindinis kondensatorių parametras. Didelė sistemos talpa leidžia laikyti didelį kiekį energijos, kurią galime panaudoti atsinaujinančioje energetikoje ar automobilių pramonėje. Tam, kad didžiatalpiai kondensatoriai galėtų dirbti aukštose įtampose ir efektingai išlaikyti energiją, reikia kondensatorius sujungti kombinacijomis: nuosekliai ir lygiagrečiai. Kad būtų efektyvi sistema, skaičius nuosekliai sujungtų kondensatorių N_n turi tenkinti 2.34 sąlygą.

$$N_n = \frac{U_{maks}}{U_k}; \quad (2.34)$$

čia N_n – nuosekliai sujungtų kondensatorių skaičius; U_{maks} – maksimali kondensatorių sistemos įtampa; U_k – kondensatoriaus įtampa.

O lygiagrečiai sujungtų kondensatorių skaičius N_l - 2.35:

$$N_l = \frac{N_n \cdot C_{ekv}}{C_k}; \quad (2.35)$$

čia N_l – lygiagrečiai sujungtų kondensatorių skaičius, kuris turi būti $N_l \geq 1$;
 N_n – nuosekliai sujungtų kondensatorių skaičius; C_{ekv} – ekvivalentinė kondensatorių sistemos talpa; C_k – kondensatoriaus talpa.

Taigi ekvivalentinė sistemos talpa yra lygi:

$$C_{ekv} = \frac{N_l \cdot C_k}{N_n}. \quad (2.36)$$

čia C_{ekv} – ekvivalentinė kondensatorių sistemos talpa; N_l – lygiagrečiai sujungtų kondensatorių skaičius, kuris turi būti $N_l \geq 1$; C_k – kondensatoriaus talpa; N_n – nuosekliai sujungtų kondensatorių skaičius.

Iš ekvivalentinės talpos išraiškos 2.36 matome, kad kuo didesnis kiekis kondensatorių sujungtų lygiagrečiai, tuo didesnė ekvivalentinė sistemos talpa. Ekvivalentinės varžos išraiška (2.37) yra atvirkščia ekvivalentinės talpos išraiškai (2.36).

$$R_{ekv} = \frac{N_n \cdot R_k}{N_l}. \quad (2.37)$$

čia R_{ekv} – ekvivalentinė kondensatorių sistemos varža; N_l – lygiagrečiai sujungtų kondensatorių skaičius, kuris turi būti $N_l \geq 1$; R_k – kondensatoriaus varža; N_n – nuosekliai sujungtų kondensatorių skaičius.

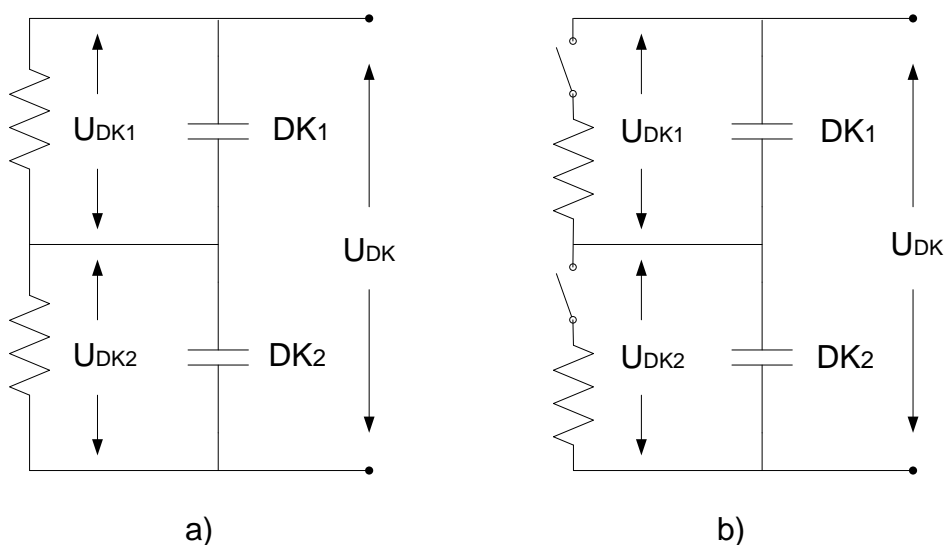
Taigi iš 2.37 išraiškos akivaizdžiai matosi, kad kuo didesnis skaičius kondensatorių yra sujungta lygiagrečiai, tuo mažesnė ekvivalentinė sistemos varža. Lygiagrečiai sujungtų kondensatorių skaičius reikalingas sumažinti energijos praradimus įkraunant ar iškraunant kondensatorių talpyklos sistemą.

2.5.3 Energijos kaupimo sistemos balansavimas

Energijos kaupimo sistemos susideda iš daugelio didžiatalpių kondensatorių sujungtų nuosekliai ir lygiagrečiai. Tačiau net ir to pačio gamintojo ir modelio didžiatalpie kondensatoriai ir jų parametrai nėra vienodi dėl defektų medžiagose ir gamybos procese. Dėl šių defektų kiekvieno didžiatalpio kondensatoriaus įtampa gali skirtis krovimo ar iškrovimo metu. Norint užtikrinti kiekvienam didžiatalpiui kondensatoriui maksimalią įtampos vertę ir jos neviršyti, reikalingas sistemos balansavimas. Sistemos balansavimui galime panaudoti pasyvias arba aktyvias schemas:

1. Pasyvus balansavimas panaudojant rezistorius yra pats paprasčiausias būdas subalansuoti sistemą. Rezistoriai yra sujungiami lygiagrečiai su kiekvienu didžiatalpiu kondensatoriumi (pav.2.16. a). Deja, šios sistemos energijos nuostoliai yra didžiausi. Be didelių energijos nuostolių, šios schemas dar vienas trūkumas yra tai, kad pasiekti maksimalią didžiatalpio kondensatoriaus įtampos vertę užtrunka žymiai ilgesnį laiko tarpą nei kitose schemose [14].

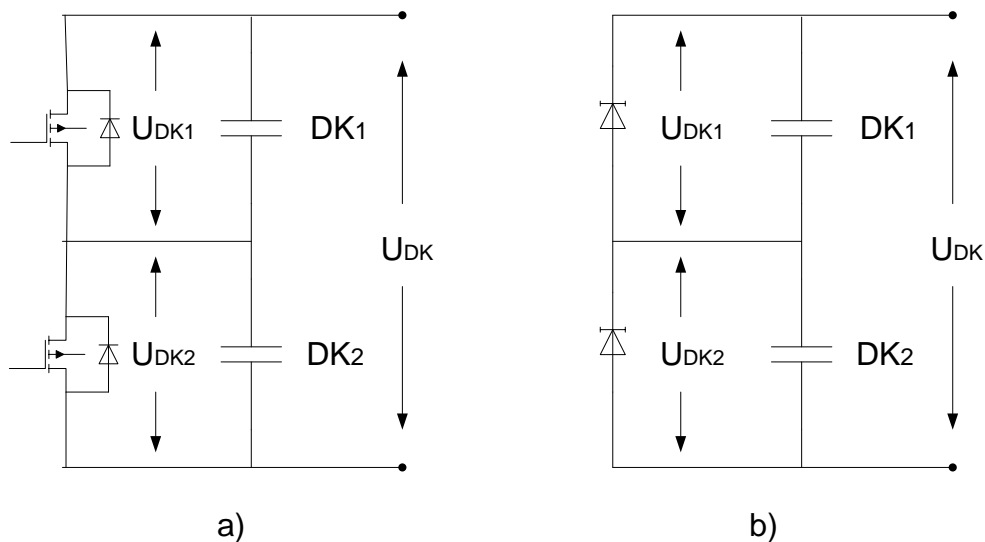
2. Panašus sistemos balansavimas kaip ir pasyviuoju būdu yra balansavimas panaudojant jungiklį ir rezistorių. Jungiklis su rezistoriumi yra sujungtas nuosekliai (pav. 2.16. b) ir jungiklis įjungia rezistorių kai didžiatalpio kondensatoriaus įtampa pasiekia maksimalią vertę. Pagrindinis trūkumas lyginant su pasyviuoju metodu yra tai, kad reikalauja kiekvieno didžiatalpio kondensatoriaus įtampos matavimų.



2.16 pav. Didžiatalpių kondensatorių sistemos balansavimo schemas panaudojant rezistorius [14].

3. Aktyviojo balansavimo schema panaudojant DC/DC konverterius pavaizduota pav.2.17. a). Kiekvieno didžiatalpio kondensatoriaus įtampa aktyviai yra lyginama su realiatyviai mažais konverteriais. Vieninteliai energijos praradimai yra praradimai inverteriuose, tačiau pagrindinis trūkumas yra tas, kad ši schema reikalauja papildomų komponentų ir yra sudėtinga.

4. Pats efektyviausias būdas yra panašus į pirmąjį būdą, bet vietoj rezistorių panaudojami Zenerio diodai (pav.2.17. b), kurie suteiktų galimybę srovės „perdavimui“ į kitą didžiatalpių kondensatorių. Šios schemas energijos nuostoliai yra priklausomi tik nuo diodo.

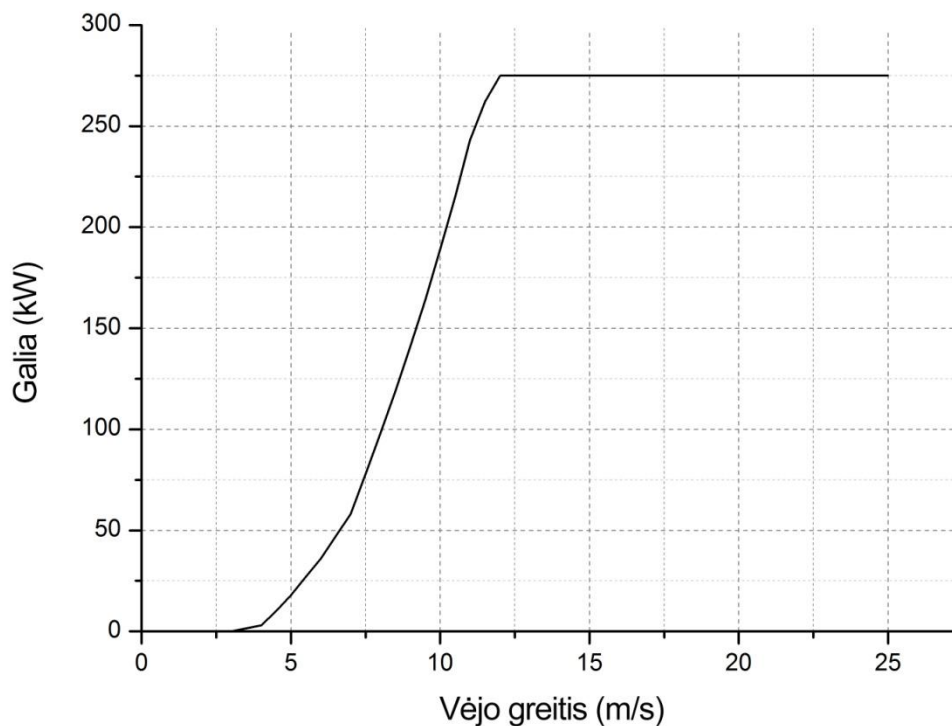


2.18 pav. Didžiatalpių kondensatorių sistemos balansavimo schemas panaudojant DC/DC konverterį ir Zenerio diodus [14].

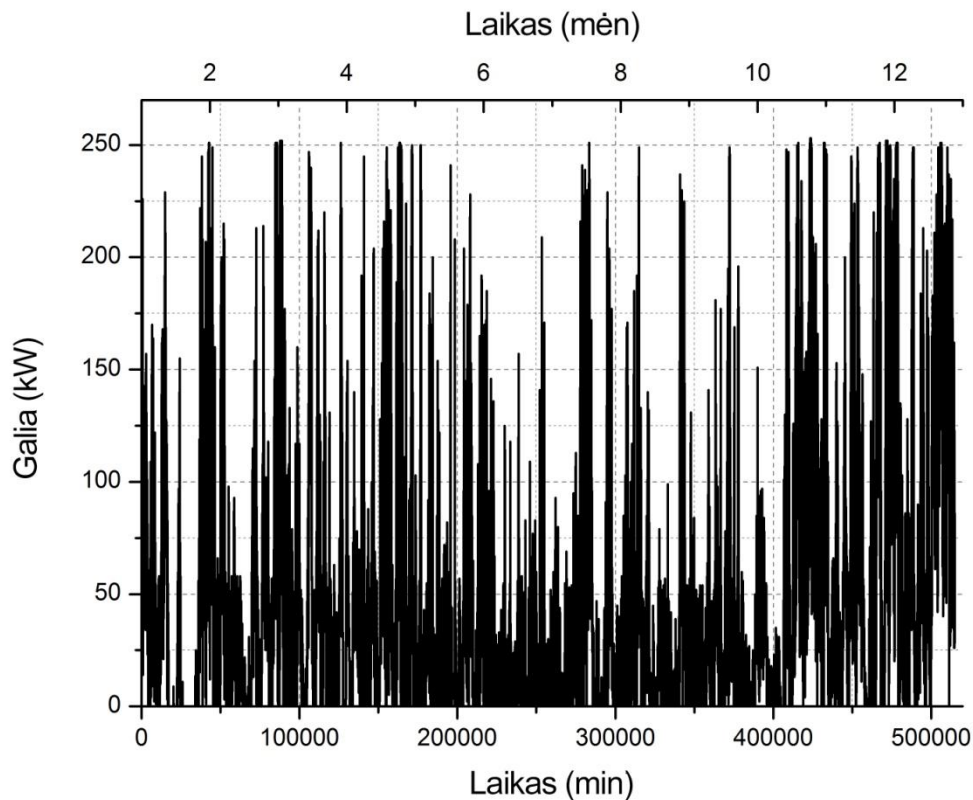
3. TYRIMO REZULTATAI

3.1. Realus galios duomenys ir jų apdorojimas

Tyrimui panaudoti Vergnet GEV MP C vėjo elektrinės jėgainės generuojamos galios duomenys. Stiebo aukštis yra 55 m. Maksimali generuojama elektros galia yra 250 kW, įtampa – 400 V, 50 Hz. Vėjo elektrinė pradeda generuoti elektros energiją, kai vėjo srautas pasiekia 3 m/s greitį, ir pradeda stabdyti, kai vėjo greitis pasiekia 25 m/s (3.1). Ši vėjo turbina susideda iš dviejų menčių sparnuotės, greičių dėžės, asinchroninio variklio, konverterio ir transformatoriaus.



3.1 pav. Vėjo elektrinės Vergnet GEV MP C galios kreivė

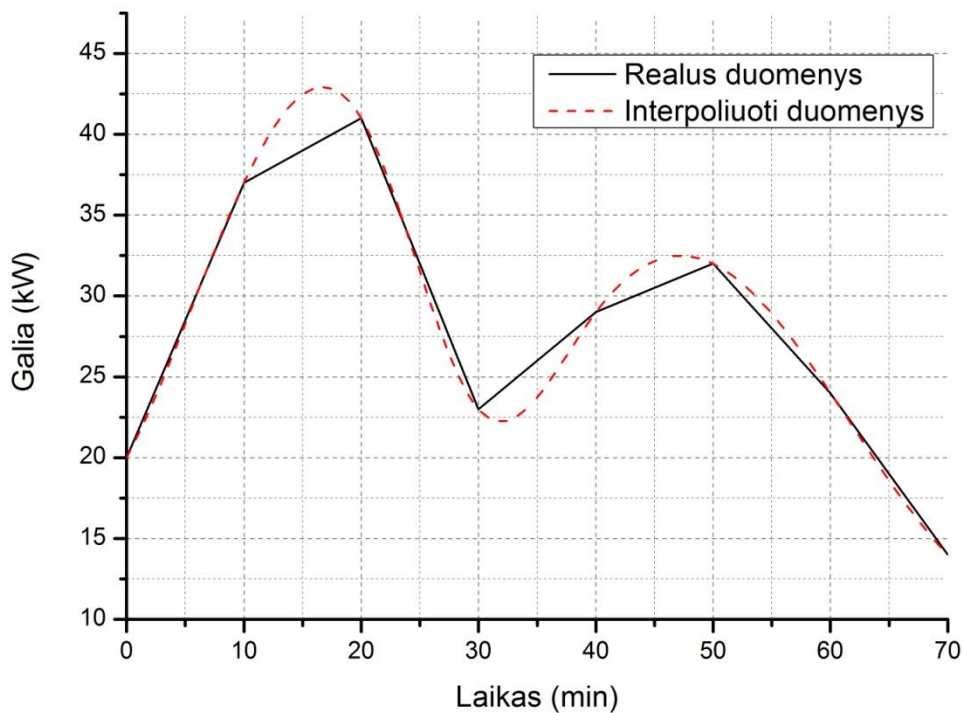


3.2 pav. Metinis vėjo elektrinės generuojamos elektros energijos grafikas

Vėjo elektrinė yra pastatyta Biržų rajone, kur vidutinis metinis vėjo greitis yra 5 m/s. Elektrinė yra tiesiogiai prijungta prie elektros tinklo. 2013 metų generuojamos galios grafikas yra pavaizduotas 3.2 pav. Galios duomenų matavimų imties laikas yra 10 min.

Generuojamos elektros energijos grafiko tyrimui pasirinktas gegužės mėnuo, ir išskirta septyniasdešimties minučių elektros generavimo kitimas nuo gegužės 2d 00 val. 10 min. iki 01 val. 20 min., kuris pavaizduotas 3.3 pav. Kaip matyti iš grafiko, per valandą laiko vėjo greitis ir generuojama elektros energija kito nepastoviai, grafike atsirado du maksimumai (pikai): 20-tą minutę galia pasiekė 41 kW vertę, 50-tą min. – 32 kW. Ir vienas minimumas, kai 30-tą minutę galia siekė 23 kW.

Turimi realūs duomenys yra interpoliuoti zonine trečiojo laipsnio polinomo interpoliacija (3.3 pav, raudona punktyrinė kreivė). Po šio duomenų apdorojimo turime duomenis su kuriais galime manipuluoti, pasirenkant įvairias imties laiko trukmes (pvz. vieną sekundę) ir surasti optimalų laiko tarpą, reikalingą tarp duomenų matavimų, kaupimo sistemos krovimo trukmės ir dėl energijos nuostolių optimizavimo.

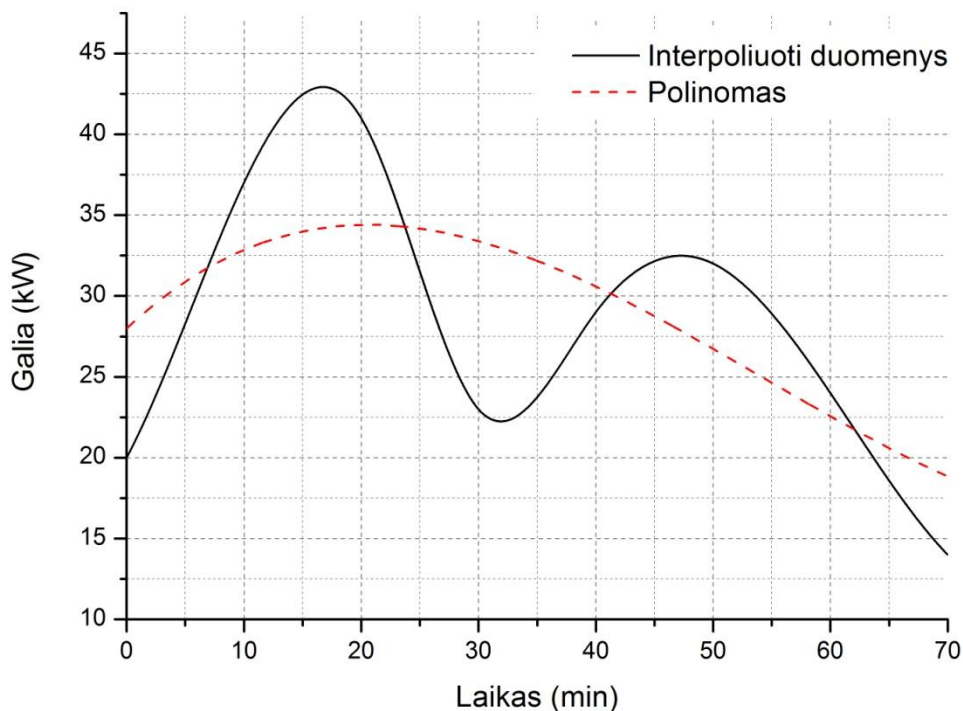


3.3 pav. Gegužės mėnesio 70-ties min generuojamos elektros energijos kitimas

Sistemos nuorodiniai ir teoriniai išėjimo galios duomenys laikomi realių duomenų trečios eilės polinomu (3.1; 3.4 pav.), pagal kurį ir skaičiuotas energijos kaupimo sistemos krovimo ir iškrovimo algoritmas.

$$y(x) = B_1x^1 + B_2x^2 + B_3x^3; \quad (3.1)$$

Teorinė energijos kaupimo sistemos pradinė įtampa 400 V ir talpa 147,89 F. Šios vertės yra teoriškai apskaičiuotos, sudarius modelį matematinio modeliavimo programa „Matlab“ (žr. priedą Nr. 1) kuomet išėjimo galios ir nuorodinės galios vertės yra lygios ir atitinka trečios eilės polinomo vertėms (pavaizduota 3.4 pav, raudona punktyrinė kreivė).

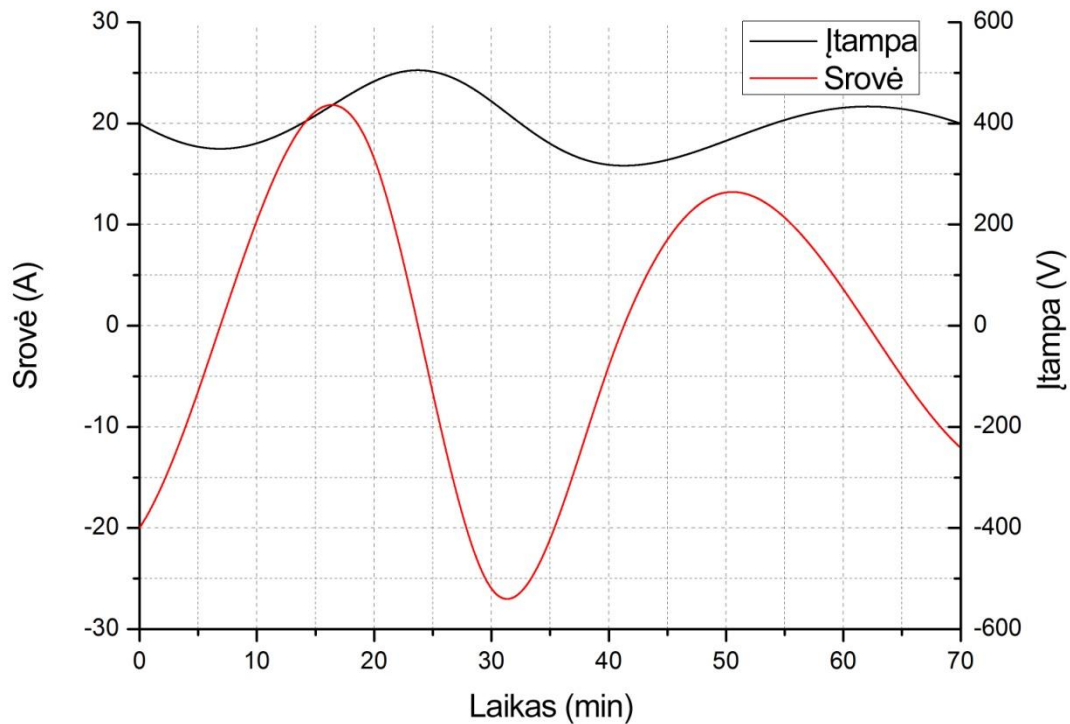


3.4 pav. Gegužės mėnesio generuojamos elektros energijos kitimas: interpoliuota ir aproksimuota kreivės

3.2. Vėjo elektrinės galios balansavimo rezultatai

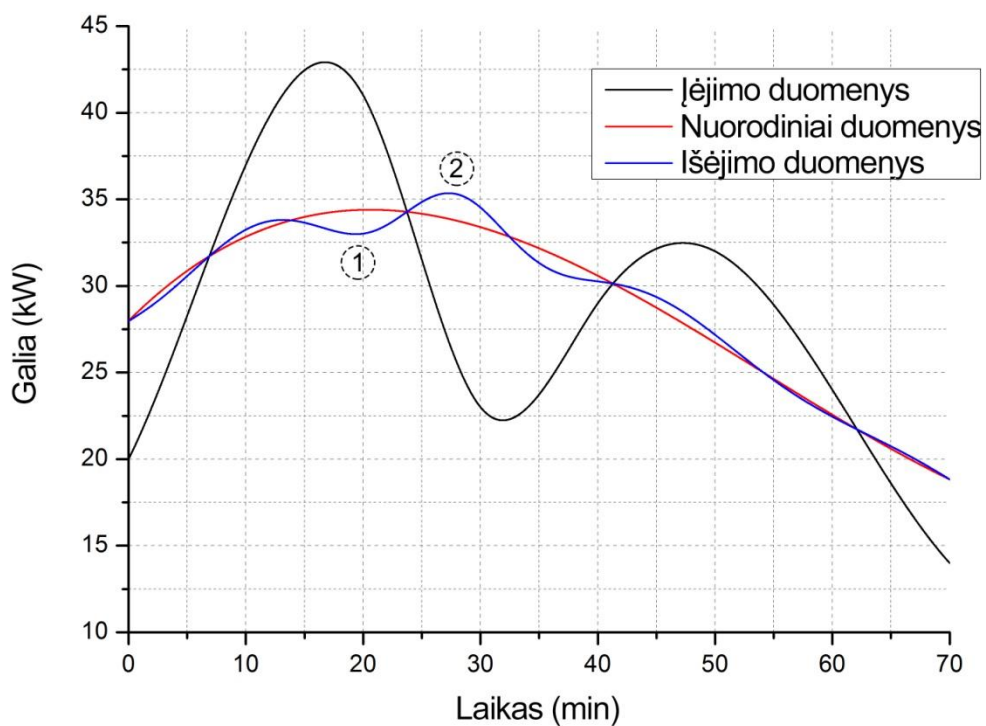
Energijos kaupimo sistemos krovimo ir iškrovimo srovė yra pavaizduota 3.5 pav., teigiama srovė vaizduoja kaupimo sistemos įkrovimą, o neigiama – iškrovimą. Iš 3.4 pav. matosi, kad įėjimo galios duomenų ir nuorodinių galios duomenų vertės yra vienodos keturiuose taškuose: 401, 1421, 2472, 3735 sekundėmis. Tuose taškuose įėjimo galios duomenys ir nuorodiniai galios duomenys yra lygūs ir kaupimo sistema nėra nei kraunama, nei iškraunama. Krovimo/iškrovimo srovė yra lygi nuliui. Energijos kaupimo sistema yra kraunama tol, kol įėjimo galios duomenų ir nuorodinių galios duomenų skirtumas yra teigiamas ir srovės vertė grafike (3.5 pav.) yra teigiamos vertės, t.y. įkrovimo srovės vertei pasiekus maksimumą ir pradėjus mažėti, didžiatalpių kondensatorių sistema yra kraunama, tačiau su mažesne srove. Tai atspindi įtampos ir srovės kreivės 3.5 paveiksle, kur energijos kaupimo sistemos įtampa didėja tol, kol įėjimo galios duomenų ir nuorodiniu galios duomenų skirtumas tampa lygus nuliui arba neigiamas. Kai įėjimo galios duomenų ir nuorodinių galios duomenų skirtumas tampa neigiamas kaupimo, sistema yra iškraunama ir iškrovimo srovės

vertė pagal grafiką (3.5 pav.) yra neigiama. Pagal tyrime naudojamus galios duomenis kaupimo sistemos maksimali įtampa pasiekia 501 V, tačiau, kad kaupimo sistema neprarastų galios, sistema negali išsikrauti daugiau nei 50 % maksimalios įtampos.

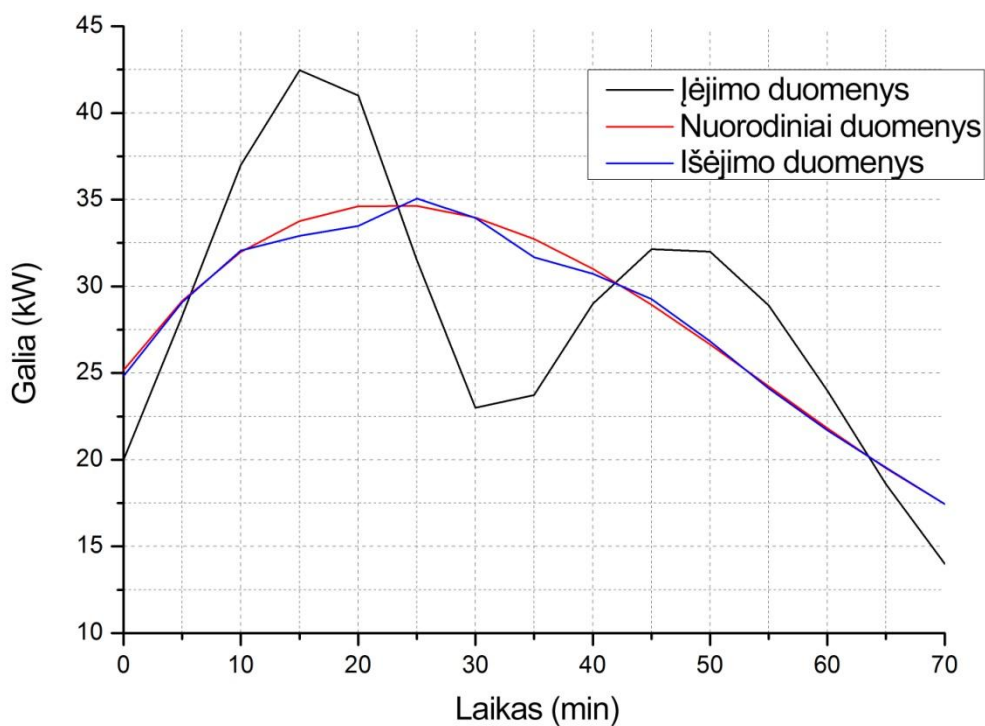


3.5 pav. Kaupimo sistemos srovės ir įtampos grafikai

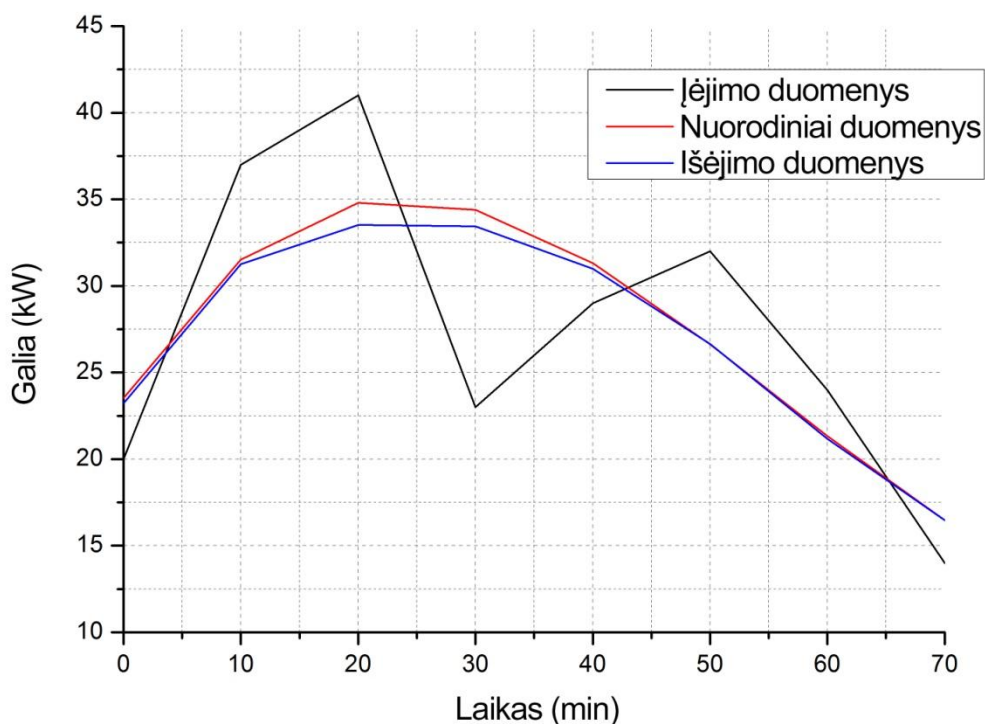
Galutiniai išėjimo galios duomenų rezultatai yra artimi nuorodiniams galios duomenų rezultatams, tačiau su tam tikrais nuokrypiais ir svyravimais (3.6 pav.). Galios išėjimo duomenų kreivės harmonikos atsiranda dėl didžiatalpių kondensatorių vidinės varžos ir dėl jos patiriamų energijos nuostolių. Galios išėjimo kreivės pikas nr.1. (3.6 pav.) atsirado dėl anksčiau aptartos vidinės varžos ir padidėjusios krovimo srovės, kurie įtakoja I^2R nuostolius. Kreivės pike nr.2 kaupimo sistemos iškrovimo srovė yra nedidelė ir patiriami ominiai nuostoliai nėra dideli, tačiau galios šuolis atsiranda dėl maksimalios kaupimo sistemos įtampos. Didinant duomenų imties laiko tarpą dt , svyravimai išnyksta, tačiau verčių nuokrypiai didėja. Kad geriau suprasti, kokią energijos dalį kaupimo sistema gali sukaupti ir tiekti į sistemą esant skirtingiems duomenų imties laikams išsireikštas procentine išraiška. Energijos kiekio atskaitos taškas yra sukaupta energija kai imties laikas yra 1s (122861 kWh), tyrime padaryta prielaida, kad šis energijos kiekis yra realus kiekis, kurį vėjo elektrinė sugene-



3.6 pav. Kaupimo sistemos galios duomenų grafikai, kai imties laikas $dt=1s$

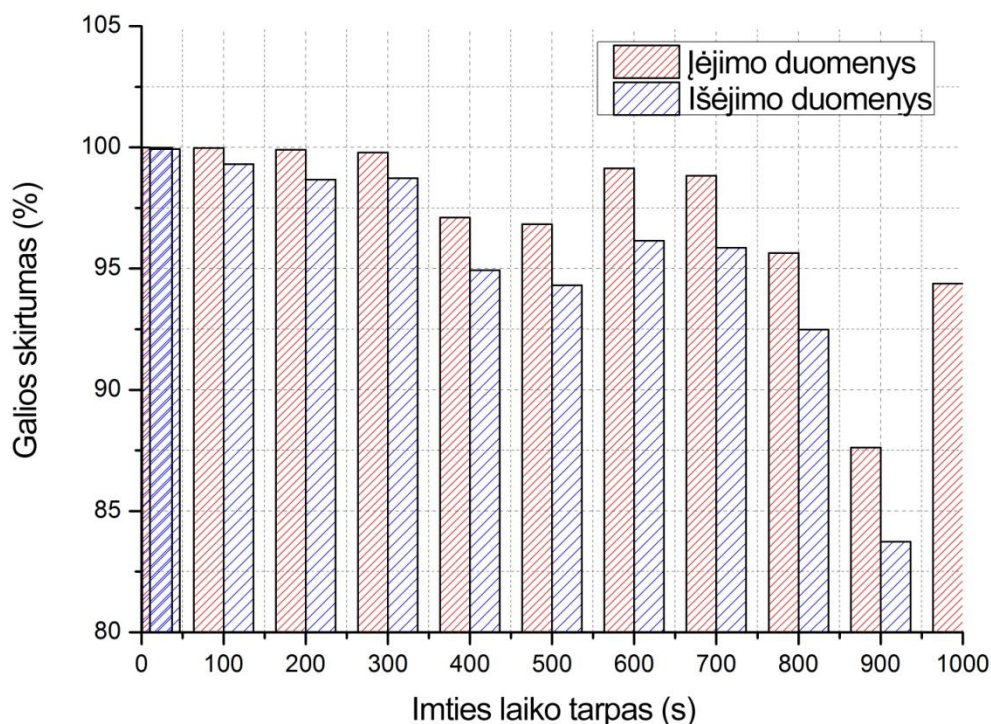


3.7 pav. Kaupimo sistemos galios duomenų grafikai, kai imties laikas $dt=300s$



3.8 pav. Kaupimo sistemos galios duomenų grafikai, kai imties laikas $dt=600s$

ruoja per vieną valandą. Didinant imties laiko trukmę iki 300s, galios įėjimo duomenų energijos kiekis (122596 kWh) skiriasi nuo atskaitos taško 0,22%, o pasiekus 900s imties trukmę, energijos kiekis (107644 kWh) skiriasi net 12,40%. Galios išėjimo energijos santykis su atskaitos tašku yra 1,27%, kai imties laiko tarpas yra 300s (121303 kWh) ir 16,26% kai – 900s (102880 kWh). Tyrime naudotų galios duomenų imties laikas yra 600s, o registruojamas energijos kiekis (121800 kWh) skiriasi nuo atskaitos taško 0,86%, išėjimo energija (118132 kWh) – 3,85%. Taigi optimaliausias duomenų imties laikas yra iki 300s.



3.9 pav. Energijos kiekio procentinis skirtumas nuo atskaitos duomenų verčių, esant skirtingoms imties laiko trukmėms.

3.3 Vėjo elektrinės galios balansavimo sistemos ekonominiai skaičiavimai

3.3.1 Vėjo elektrinės galios balansavimo sistemos investiciniai kaštai

Vėjo elektrinės balansavimo sistemos investicijos kaštų didžiąją dalį sudaro energijos kaupimo sistema sudaryta iš didžiatalpių kondensatorių. Didžiatalpių kondensatorių kaupimo sistemos matematinis modelis yra sudarytas pasitelkus Maxwell kompanijos didžiatalpių kondensatorių parametrų duomenys. Didžiatalpių kondensatorių modelis BCAP0350 yra parinktas apskaičiavus teorines kaupimo sistemos įtampas (400 V) ir talpos (147,89 F) vertes bei pilnutinę energijos kaupimo kainą. Šio modelio vieneto kaina yra mažiausia lyginant su kitais panašių techninių parametrų didžiatalpiaisiais kondensatoriais, kurių palyginimas yra pateikiamas 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Maxwell kompanijos didžiatalpių kondensatorių techniniai duomenys.

Didžiatalpių kondensatorių modelis	Nomin ali talpa, F	Nomin ali įtampa, V	Nomin ali varža, mΩ	Išsikrovi mo srovė, mA	Maksim ali srovė, A	Svori s, g	Išmatavimai, mm		Viene to kaina, Eur
							ilgis	diame- tras	
BCAP0150	150	2.7	14	0.50	40	32	50.00	25.00	10.43
BCAP0310	310	2.7	2.2	0.45	250	60	61.50	33.30	7.6
BCAP0350	350	2.7	3.2	0.30	170	60	61.50	33.30	7.3
BCAP0650	650	2.7	0.8	1.50	680	160	51.50	60.40	30.23

Energijos kaupimo sistemoje naudojami 9324 vienetai BCAP0350 modelio didžiatalpių kondensatorių. Nors panaudotų kondensatorių skaičius, lyginant su kitų techninių parametru didžiatalpiais kondensatoriais, nėra mažiausias, tačiau bendra sistemos kaina yra mažiausia (3.2 lentelė). Bendra energijos kaupimo sistemos varža yra 7,5 mΩ, talpa - 148,99 F, maksimali įtampa 500 V. Energijos kaupimo sistema neužima daug vietos, jos ilgis yra 54,76 cm metro, plotis - 23,31 cm, o aukštis – 55,35 cm. Visa energijos kaupimo sistemos kaina yra 68065 eurų, įskaitant ir sistemos balansavimo kainą.

3.2 lentelė. Didžiatalpių kondensatorių kaupimo sistemos duomenys.

Didžiatalpių kondensatorių pavadinimas	N_s^* , vnt	N_p^* , vnt	N^* , vnt	Nominali talpa, F	Varža, mΩ	Išmatavimai ^{**} , mm	Kaina, €
BCAP0150	148	146	21608	147,97	14,2	3700×50×3650	225370
BCAP0310	148	71	10508	148,72	4,6	4929×61,5×2364	74607
BCAP0350	148	63	9324	148,99	7,5	4929×61,5×2098	68065
BCAP0650	148	34	5032	149,32	3,5	8939×51,5×2054	152120

* nuosekliai N_s ir paraleliai N_p sujungtų didžiatalpių kondensatorių skaičius;

** didžiatalpių kondensatorių kaupimo sistemos išmatavimai ilgis×aukštis×plotis.

3.3.2 Vėjo elektrinės galios balansavimo sistemos investicinių kaštų optimizavimas

Vėjo elektrinės galios balansavimo sistemos investicinius kaštus būtų galima sumažinti sumažinus kaupimo sistemos įtampą dešimt kartų, tada panaudotų didžiatalpių kondensatorių skaičius sumažėtų iki 90 vienetų ir sistemos kaina nukristų iki 657 eurų. Tačiau naudojant DC/DC konverterį ar kitą įtampos transformavimo būdą, turi būti tenkinamas energijos tvermės dėsnis $P_{įėjimo} = P_{išėjimo}$, ir jeigu įtampa sumažėja dešimt kartų, tai

srovė padidėja dešimt kartų (pagal 3.2) . Tuo pačiu eksponentiškai padidėja ir ominiai energijos praradimai I^2R .

$$I_{\text{iėjimo}} U_{\text{iėjimo}} = I_{\text{išėjimo}} U_{\text{išėjimo}} ; \quad (3.2)$$

3.3 lentelė. Didžiataliųjų kondensatorių kaupimo sistemos energijos nuostoliai.

Sistemos įtampa, V	N*, vnt	Sistemos kaina, €	Energijos nuostoliai, kWh	Energijos nuostoliai, kWh/metus	Energijos nuostoliai, €/metus
500	9324	68065	5.81	50936	3820
5	90	657	620.22	5433156	407487

Pagal tyrimo metu naudotos kaupimo sistemos krovimo ir iškrovimo sroves, kai srovės matavimų imties trukmė yra 300s, sumažinus įtampa dešimt kartų, energijos nuostolis per metus padidėtų 5382 MWh (žr. lentelę Nr.3.3) . Jeigu vėjo generuojamos energijos supirkimo kaina yra 0,075 €, tai per metus būtų patirta 403667 eurų nuostolis, kuris viršija kaupimo sistemos išlaidas šešis kartus. Taigi optimizuoti sistemą, keičiant kaupimo sistemos įtampą yra neekonomiška.

IŠVADOS

1. Dėl skirtingo veikimo mechanizmo didžiatalpių kondensatorių krovimo/išsikrovimo greitis bei ciklų skaičius yra didesnis nei baterijų. Dėl šių savo savybių didžiatalpių kondensatoriai ir jų sistemos labiausiai tinka vėjo elektrinės galios balansavimui;
2. Sudarius vėjo elektrinės galios balansavimo matematinį modelį apskaičiuota didžiatalpių kondensatorių energijos kaupimo sistemos, reikalingos vėjo elektrinės galios balansavimui, maksimali įtampa 501 V, ekvivalentinė talpa 147,89 F ir vidinė ekvivalentinė varža 4,2 mΩ;
3. Tiksliausi vėjo elektrinės galios balansavimo matematinio modelio rezultatai yra gaunami kai matavimų imties laiko trukmė yra trumpesnė nei tris šimtai sekundžių ir skirtumas nuo atskaitos duomenų verčių siekia tik 1,27 %;
4. Vėjo elektrinės balansavimo sistemos investicijų kaštai siekia 70 tūkstančių eurų, kas sudaro tik 16% vėjo elektrinės įrengimo kainos. Toliau tobulinant šią sistemą galima užtikrinti pastovesnės elektros energijos tiekimą vartotojams ar kompensuoti vėjo prognozių trumpuoju periodu netikslumus, kas padėtų išlaikyti elektros energijos tinklą stabilesni ir sumažintų jo stabilizavimo kaštus.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

- 1 LST EN 50160:2010/AC:2010 .Viešųjų elektros tinklų įtampos charakteristikos;
- 2 S Hurtado, G Gostales, A de Lara. A new power stabilization control system based on making use of mechanical inertia of a variable-speed wind-turbine for stand-alone wind-diesel application. IEEE, 2002, 3326 - 3331;
- 3 R Kotz, M Claren. Principles and applications of electrochemical capacitor. Electrochimica Acta 45,2000, 2483-2498;
- 4 O Anaya-Lara, N Jenkins, J Ekanayake, P Cartwright, M Huges. Wind energy generation: modelling and control. A John Willey and Sons Ltd., UK, 2009, 289;
- 5 W Xu, H Kaizheng, Y Shije, X Bin. Simulation of three-phase voltage source PWM rectifier based on direct current control. Congress on Image and Signal processing, 2008, 195-198;
- 6 M. A. Boost and P. Ziogas, “State-of-the-Art PWM Techniques, a Critical Evaluation”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, N° 2, 1988, pp. 271-280,
- 7 J Dixon. Three-phase controlled rectifiers. Pontificia Universidad Catolica de Chile,,62;
- 8 A Burke. Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. Power Sources, 2000, 37–50;
- 9 Ž Kavaliauskas. Superkondensatorių su anglies elektrodais, suformuotais iš elektrolankinio išlydžio argono-acetileno plazmos ,tyrimas. VDU, Kaunas, 2010 m., 105;
- 10 A Chodosovskaja. Nanostruktūrinimo įtaka kobalto oksido pseudotalpai. VU, Vilnius, 2012, 95;
- 11 Charging of Ultracapacitors. Maxwell Technologies, USA, 2012, 5;
- 12 S Ban, J Zhang, L Zhang, K Tsay, D Song, X Zou. Charging and discharging electrochemical supercapacitors in the presence of both parallel leakage process and electrochemical decomposition of solvent. Electrochimica Acta 90, 2013, 542-549;
- 13 K Sahay, B Dwivedi. Design and analysis of supercapacitors energy storage system of energy stabilization of distribution network. Electrical Power Quality and Utilisation, Journal, vol.15, No.1, 2009, 25-33;
- 14 V Sedlakova, J Sikula, J Valsa, J Majzner, P Dvorak. Supercapacitor charge and self-discharge analysis.Brno University of Technology. Czech Republic. 2013.

- 15 Y. Diab, P. Venet, G. Rojat. Comparison of the different circuits used for balancing the voltage of supercapacitors: studying performance and lifetime of supercapacitor. ESSCAP, Nov. 2006, Lausanne, Switzerland.
- 16 W Xu, H Kaizheng, Y Shije, X Bin. Simulation of three-phase voltage source PWM rectifier based on direct current control. Congress on Image and Signal processing, 2008, 195-198;
- 17 A M Namisnyk. A survey of electrochemical supercapacitor technology. University of Technology, Sydney, 2003, 109
- 18 W Lajnef, J M Vinassa, O Briant, S Azzopardi, E Woïrgard. Characterization methods and modelling of ultracapacitors for use as peak power sources. Journal of Power Sources 168, 2007, 553-560;
- 19 Product comparison matrix. Maxwell Technologies, USA, 2015, 2;
- 20 LST 1412:1995. Puslaidininkiniai įtaisai. Terminai ir apibrėžimai;
- 21 LST P 1359:1995. Integriniai grandynai. Terminai ir apibrėžimai;
- 22 M S W Chan, K T Chau, C C Chan. Effective Charging Method for Ultracapacitor. Journal of Asian Electric Vehlice. Vol. 3, No.3, 2005, 771-776;
- 23 V Sagar, A Tejasri. Super-capacitor energy storage & wind power management system. IJESR, 2013, 5038-5045.

PRIEDAI

Priedas Nr.1. Didžiatalpių kondensatorių kaupimo sistemos valdymo modelio matematinis modelis

```
%% Ivedami duomenys
U=400      % V
t_mat=600  % trukme tarp matavimu sekundemis
t_trukme=4200 % matavimu trukme sekundemis
n=3       % polinomo laipsnis
%% ivedami duomenys end

%% Import the data
[~,~,raw] = xlsread('D:\KTU\magistrinis
darbas\Finalinis\Matlab\geguzes men 70min.xlsx','rezultatai','C4:C11');
RealigaliakW = reshape([raw{:}],size(raw));
clearvars raw;
%% import end

%% duomenu lenteles/skaiciavimas
time = (0:t_mat:t_trukme)';
Irealsk=RealigaliakW*1000/U;      % A

%% polinomas
poll = polyfit(time,RealigaliakW,n) % galios polinomas
pollx= time;
polly= polyval(poll,pollx);
Tgalios=table(time,RealigaliakW,polly)
%% polinomas end

%% srove
Irealsk=RealigaliakW*1000/U;      % A
Ipolsk=polly*1000/U; %A
dI=Irealsk-Ipolsk %A
Tsroves=table(time,Irealsk, Ipolsk,dI)
%% srove end

%% Grafikai
% 1 graf Reali galia kW vs laikas
figure(1);
plot(time, RealigaliakW)
title('Reali galia kW vs laikas');
xlabel('time, s');
ylabel('P, kW');
hold on
plot(pollx,polly,'r--')
grid
legend('Reali galia','polinomas');
hold off
% 2 graf Reali srove A vs laikas
figure(2);
plot(time,Irealsk)
title('Reali srove A vs laikas');
xlabel('time, s');
ylabel('I, A');
%% grafikai end

t_tarp=600; %laiko trukme tarp matavimu ir sroves perskaiciavimu
Req=0.0042;
```

```

Ceq=147.973;
Uscmin =0;%minimali kondesatoriaus itampa
Uscmax=400;
U01=400; %pradine kondensatoriaus itampa

%%spline
time2= (0:t_tarp:t_trukme)';
yy = spline(time,RealigaliakW,time2);
U=400
pollsp = polyfit(time2,yy,n);% galios polinomas
pollxsp= time2;
pollysp= polyval(pollsp,pollxsp);
figure(3)
plot(time2,yy, 'b', time2,pollysp, 'r')
legend('Realigalia spline','polinomas spline')
grid
title('galia spline vs laikas');
%%splie end

%%sroves skaiciavimas
Ispline=yy*1000/U; %A
Ipolsp=pollysp*1000/U; %A
dI=Ispline-Ipolsp; %A
Tsroves_spline=table(time2,Ispline, Ipolsp,dI);
%%sroves skaiciavimas end

% kondiko parametrai
Usc1=Uscmin;
Usc1 = zeros(size(time2, 1), 1);
Usc1(1) = U01 + dI(1)/Ceq*t_tarp+dI(1)*Req;
for tt = 2:size(time2, 1)
    Usc1(tt) = max(Usc1(tt-1) +dI(tt)/Ceq*t_tarp+dI(tt)*Req, 0);
end
Usc1(Usc1 > Uscmax) = Uscmax;
Usc1(Usc1 < U0) = U0;
Usc1 = Usc1 +dI./Ceq.*time2+dI.*Req;
%%end
figure(4)
plot (time2,Usc1,'r')
hold on
grid
plot (time2,Ispline, 'k', time2, Ipolsp, 'g', time2, dI,'y')
legend('Usc','I spl real','I pol spl', 'dI')
hold off
title('iejimo srove vs nuorodine srove vs laikas');
Psc=(Usc1.*dI)./1000;
P=yy-Psc;
figure(5)
plot (time2,P,'r',time2, pollysp, 'b')
hold on
grid
plot (time2,yy, 'k',time2, Psc, 'g')
legend('isejimo galia','nuorodine galiai','isejimo galia','kondensatoriaus galia')
hold off
title('isejimo galia vs nuorodine galia vs iejimo galia vs kondensatoriaus galia vs laikas');
figure(6)
plot(time2,Usc1, 'r', time2 ,dI,'b')
hold on
grid

```

```

plot (time2,yy, 'k',time2, pollysp, 'g')
legend('Usc','Isc','Reali galia','polinomas')
hold off
title('kondensatoriaus itampa vs kond srove vs iejimo galia vs
nuorodine galia vs laikas');
%%kondensatoriaus parametrai end

grafikams=table(time2,yy, pollysp,P)
P_reali_total=sum(yy)
P_sutvarkyta_total=sum(P)
P_skirtumas=P_reali_total-P_sutvarkyta_total
P_skirtumas_proc=P_sutvarkyta_total/P_reali_total*100

%%soc
Umaks=max(Usc1)
DOD=100*(1-Usc1/Umaks);
SOC=100-DOD;
figure(6)
plot(time2,SOC)
grid
title('ikrovos bukle vs laikas');
%%soc end

```