



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Saulės elektrinių įtakos trumpalaikiams įtampos kryčiams elektros tinkle tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Timotiejus Togobickij**

Projekto autorius

**Doc. Gytis Svinkūnas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2025**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Saulės elektrinių įtakos trumpalaikiams įtampos kryčiams elektros tinkle tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Timotiejus Togobickij**

Projekto autorius

**Doc. Gytis Svinkūnas**

Vadovas

**Asist. Almantas Bandza**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2025**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Timotiejus Togobickij

## **Saulės elektrinių įtakos trumpalaikiams įtampos kryčiams elektros tinkle 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.

Timotiejus Togobickij

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Togobickij, Timotiejus. Saulės elektrinių įtakos trumpalaikiams įtampos kryčiams elektros tinkle tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: inverteris, reaktyvioji galia, tinklo induktyvioji varža, įtampos lygis.

Kaunas, 2025. 67 p.

### **Santrauka**

Šiame darbe analizuojamos įtampos reguliavimo galimybės naudojant prie elektros tinklo prijungtą saulės keitiklį ir jo reaktyviosios galios valdymo funkcijas. Nors daugelis šiuolaikinių keitiklių turi įtampos reguliavimo funkcijas, jos dažnai įdiegiamos neatsižvelgiant į prijungto tinklo elektrines charakteristikas. Tačiau įtampos reguliavimo efektyvumas labai priklauso nuo tinklo varžų savybių, ypač nuo induktyviųjų ir reaktyviųjų komponentų santykio. Žemos įtampos tinkluose šis santykis paprastai yra mažas, todėl sumažėja kompensacijos efektyvumas, o aukštesnės įtampos tinkluose įtampos reguliavimui sąlygos yra palankesnės.

Šių efektų tyrimams eksperimentiškai buvo naudojamas 10 kW „SolarEdge“ saulės keitiklis, prijungtas prie fotovoltinių plokščių. Tinklo įtampa buvo keičiama naudojant 20 A srovės autotransformatorių, kuris leido tiksliai reguliuoti tinklo įtampą nuo 0 V iki 450 V. Ši konfigūracija leido imituoti tiek įtampos kritimus, tiek viršįtampius, o tai leido analizuoti keitiklio gebėjimą reaguoti į tokius trikdžius.

Tyrimas buvo atliktas dviem etapais. Pirmajame etape, taikant įvairius įtampos lygius be papildomų komponentų, buvo nustatytos keitiklio trumpalaikės ir ilgalaikės darbinės įtampos ribos. Antrajame etape į sistemą buvo įvesti skirtingo induktyvumo vertės išoriniai trifaziai induktoriai, siekiant įvertinti, kaip indukcinė apkrova veikia keitiklio įtampos kompensavimo elgseną. Visi matavimo duomenys buvo registruojami naudojant „Metrel MI 2895“ elektros energijos kokybės analizatorių.

Togobickij, Timotiejus. Investigation of Solar Power Plants Impact on Voltage Sags in Electric Grid. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Gytis Svinkūnas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: inverter, reactive power, network inductance, voltage level.

Kaunas, 2025. Number of pages 67.

### **Summary**

This paper examines the potential for voltage regulation using a grid-connected solar inverter and its power management functions. Although many modern inverters have voltage regulation functions, they are often implemented without taking into account the electrical characteristics of the connected grid. However, the efficiency of voltage regulation depends heavily on the characteristics of the grid impedances, especially the ratio of inductive to reactive components. In low-voltage grids, this ratio is usually low, which reduces the compensation efficiency, while in higher-voltage grids, the conditions for voltage regulation are more favorable.

A 10 kW SolarEdge solar inverter connected to photovoltaic panels was used experimentally to study these effects. The grid voltage was varied using a 20 A autotransformer, which allowed for precise regulation of the grid voltage from 0 V to 450 V. This configuration allowed for the simulation of both voltage sags and overvoltages, which allowed for the analysis of the inverter's ability to respond to such disturbances.

The study was conducted in two stages. In the first stage, the short-term and long-term operating voltage limits of the converter were determined by applying various voltage levels without additional components. In the second stage, external three-phase inductors of different inductance values were introduced into the system to evaluate how the inductive load affects the voltage compensation behavior of the converter. All measurement data were recorded using a Metrel MI 2895 power quality analyzer.

## Turinys

Lentelių sąrašas .....	7
Paveikslų sąrašas .....	8
Santrumpų ir terminų sąrašas .....	11
Įvadas.....	12
1. Keitiklių valdymo strategijos.....	13
2. PID valdymas įtampos reguliavimui keitikliuose .....	15
3. Tinklo įtampos valdymas keitikliais .....	18
4. Sistemos modeliavimas.....	21
5. Eksperimentiškai tiriamas saulės keitiklio minimalios ir maksimalios įtampos apsaugos suveikimo įtampos ir laikai, keičiant tinklo įtampą autotransformatoriumi.....	25
6. Eksperimentiškai tiriamas koku greičiu keičiasi keitiklio generuojama reaktyvioji galia reaguojant į įtampos pasikeitimus .....	29
7. Eksperimentiškai tiriami aktyviosios galios ribojimo parametrai nustatant, koku greičiu keičiasi keitiklio generuojama reaktyvioji galia reaguojant į valdymo signalo pasikeitimus ..	34
8. Eksperimentiškai tyrinėjama, kaip stipriai reaktyviosios galios valdymas gali sumažinti įtampos vertes keitiklio išėjime į sistemą įvedus induktorių.....	35
9. Eksperimentiškai tyrinėjama PID valdymo įtaka keitikliui.....	42
Išvados .....	44
Literatūros sąrašas .....	45
Priedai.....	47

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Varžų matavimų rezultatai .....	23
<b>2 lentelė.</b> Bandymų su trifaziais induktoriais rezultatai .....	41

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Įtampos ir srovės signalų sinusoidės: a) be fazės poslinkio, b) su fazės poslinkiu $\varphi > 0$ .....	18
<b>2 pav.</b> Keitiklio išėjimo įtampos vertės priklausomybė nuo tinklo dedamųjų [11]: a) bazinis tinklas; b) induktyvinis tinklas; c) bazinis ir induktyvinis tinklai kartu; d) bazinis tinklas, kai $\varphi > 0$ ; e) induktyvinis tinklas, kai $\varphi > 0$ ; f) bazinio ir induktyvinio tinklai, kai $\varphi > 0$ .....	19
<b>3 pav.</b> Tinklo maitinimo schema.....	21
<b>4 pav.</b> Modeliuojamoji schema strategijoms simuliuoti .....	22
<b>5 pav.</b> Eksperimentinio tyrimo schema.....	22
<b>6 pav.</b> Imituojamas trumpalaikis įtampos kritimas nuo 400V iki 300V .....	25
<b>7 pav.</b> Imituojamas ilgalaikis įtampos kritimas nuo 400V iki 300V.....	26
<b>8 pav.</b> Imituojamas trumpalaikis įtampos kritimas nuo 400V iki 250V .....	26
<b>9 pav.</b> Imituojamas trumpalaikis viršįtampis nuo 400V iki 430V .....	27
<b>10 pav.</b> Imituojamas ilgalaikis viršįtampis nuo 400V iki 450V .....	28
<b>11 pav.</b> „ESO A“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 400V iki 360V .....	29
<b>12 pav.</b> „ESO A“ režimo testavimas įtampai kylant nuo 360V iki 400V .....	30
<b>13 pav.</b> „ESO A“ režimo testavimas įtampai kylant nuo 400V iki 430V .....	30
<b>14 pav.</b> „ESO A“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V .....	30
<b>15 pav.</b> „ESO 0,4 kV“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V .....	31
<b>16 pav.</b> „Išplėstinės kreivės“ režimo su siūloma kreive testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 36-39 pav.).....	32
<b>17 pav.</b> „Išplėstinės kreivės“ režimo su modifikuota kreive testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 40-44 pav.).....	32
<b>18 pav.</b> Keitiklio reakcija į programinį galios apribojimą iki 1 kW (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 45 pav.).....	34
<b>19 pav.</b> Bazinio bandymo rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 46-49 pav.) .....	36
<b>20 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi su 1,33 mH induktyvumu rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 50-53 pav.) .....	37
<b>21 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi su 3,1 mH induktyvumu rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 54-57 pav.) .....	38
<b>22 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi su 9.42 mH induktyvumu rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V .....	39
<b>23 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi su 9.42 mH induktyvumu rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V (matavimai pratesni iki 60s, kad įsitikinti, kad sistema nusistovi).....	39
<b>24 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi su 9.42 mH induktyvumu rezultatai keičiant įtampą iš 360 V iki 400 V .....	40
<b>25 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi su 9.42 mH induktyvumu rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 400 V (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 58-61 pav.) .....	40
<b>26 pav.</b> PID kontrolės rezultatai esant trumpalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės: $K=1$ ; $I=0.05$ ; $D=0.01$ . .....	42
<b>27 pav.</b> PID kontrolės rezultatai esant ilgalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės: $K=1$ $I=0.05$ ; $D=0.01$ . Kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 62-69 pav. ....	42
<b>28 pav.</b> „ESO A“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 400V iki 360V .....	47
<b>29 pav.</b> „ESO A“ režimo testavimas įtampai kylant nuo 360 V iki 400V .....	47
<b>30 pav.</b> „ESO A“ režimo testavimas įtampai kylant nuo 400V iki 430V .....	48

<b>31 pav.</b> „ESO A“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V .....	48
<b>32 pav.</b> „ESO 0,4 kV“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 400V iki 360V .....	49
<b>33 pav.</b> „ESO 0,4 kV“ režimo testavimas įtampai kylant nuo 360 V iki 400V .....	49
<b>34 pav.</b> „ESO 0,4 kV“ režimo testavimas įtampai kylant nuo 400V iki 430V .....	50
<b>35 pav.</b> „ESO 0,4 kV“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V .....	50
<b>36 pav.</b> „Išplėstinės kreivės“ režimo su siūloma kreive testavimas įtampai krentant nuo 400V iki 360V .....	51
<b>37 pav.</b> „Išplėstinės kreivės“ režimo su siūloma kreive testavimas įtampai kylant nuo 360 V iki 400V .....	51
<b>38 pav.</b> „Išplėstinės kreivės“ režimo su siūloma kreive testavimas įtampai kylant nuo 400V iki 430V .....	52
<b>39 pav.</b> „Išplėstinės kreivės“ režimo su siūloma kreive testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V .....	52
<b>40 pav.</b> „Išplėstinės kreivės“ režimo su modifikuota kreive testavimas įtampai krentant nuo 400V iki 360V .....	53
<b>41 pav.</b> „Išplėstinės kreivės“ režimo su modifikuota kreive testavimas įtampai kylant nuo 360 V iki 400V .....	53
<b>42 pav.</b> „Išplėstinės kreivės“ režimo su modifikuota kreive testavimas įtampai kylant nuo 400V iki 430V .....	54
<b>43 pav.</b> „Išplėstinės kreivės“ režimo su modifikuota kreive testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V .....	54
<b>44 pav.</b> Tikrinama keitiklio reakcija į lėtą įtampos žeminimą iki inverterio atsijungimo .....	55
<b>45 pav.</b> Keitiklio reakcija į programinio apribojimo atšaukimą (maksimali galia 10 kW).....	55
<b>46 pav.</b> Bazinio bandymo rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V.....	56
<b>47 pav.</b> Bazinio bandymo rezultatai keičiant įtampą iš 360 V iki 400 V.....	56
<b>48 pav.</b> Bazinio bandymo rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 430 V.....	57
<b>49 pav.</b> Bazinio bandymo rezultatai keičiant įtampą iš 430 V iki 400 V.....	57
<b>50 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 1,33 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V .....	58
<b>51 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 1,33 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 360 V iki 400 V .....	58
<b>52 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 1,33 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 430 V .....	59
<b>53 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 1,33 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 430 V iki 400 V .....	59
<b>54 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 3,1 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V .....	60
<b>55 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 3,1 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 360 V iki 400 V .....	60
<b>56 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 3,1 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 430 V .....	61
<b>57 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 3,1 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 430 V iki 400 V .....	61
<b>58 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 9,42 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V .....	62

<b>59 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 9,42 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 360 V iki 400 V .....	62
<b>60 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 9,42 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 430 V .....	63
<b>61 pav.</b> Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 9,42 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 430 V iki 400 V .....	63
<b>62 pav.</b> PID kontrolės rezultatai esant trumpalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės: K=1; I=5; D=1 .....	64
<b>63 pav.</b> PID kontrolės rezultatai esant ilgalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės: K=1; I=5; D=1. ....	64
<b>64 pav.</b> PID kontrolės rezultatai esant trumpalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės: K=1; I=0.5; D=0.1 .....	65
<b>65 pav.</b> PID kontrolės rezultatai esant ilgalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės: K=1; I=0.5; D=0.1 .....	65
<b>66 pav.</b> PID kontrolės rezultatai esant trumpalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės: K=1; I=0.05; D=0.01 .....	66
<b>67 pav.</b> PID kontrolės rezultatai esant ilgalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės: K=1 I=0.05; D=0.01 .....	66
<b>68 pav.</b> PID kontrolės rezultatai esant trumpalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės: K=1; I=50; D=1 .....	67
<b>69 pav.</b> PID kontrolės rezultatai esant ilgalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės: K=1; I=50; D=1 .....	67

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

DPC – tiesioginis galios valdymas (angl. *Direct Power Control*).

DSP – skaitmeninio signalo procesorius (angl. *Digital Signal Processor*).

MPC – modelinis nuspėjamas valdymas (angl. *Model Predictive Control*).

PID – Proporcingas integralinis diferencialinis valdiklis (angl. *Proportional-Integral-Derivative control*).

POD – galios virpesių slopinimas (angl. *Power Oscillation Damping*).

PWM – impulsų pločio moduliaciją (angl. *Pulse-Width Modulation*).

SVM – erdvinio vektoriaus moduliacija (angl. *Space Vector Modulation*).

## Įvadas

Pastaraisiais metais saulės energijos keitikliai tapo plačiai prieinami ir šiandien sudaro pagrindinę decentralizuotos elektros energijos gamybos dalį. Vien Lietuvoje jau įrengta daugiau nei 130 000 saulės energijos keitiklių, nepaisant to vyriausybė teikia didelę paramą tolesnei plėtrai. Nacionaliniuose planuose, siekiant klimato politikos tikslų ir finansinių paskatų gaminantiems vartotojams, ateinančiais metais numatoma įrengti iki 300 000 keitikliais pagrįstų sistemų. Tačiau šis spartus augimas kelia naujų iššūkių tinklo stabilumui, ypač žemos įtampos skirstomuosiuose tinkluose.

Viena iš opiausių problemų yra įtampos kokybės blogėjimas. Didėjant paskirstytųjų energijos šaltinių skaičiui, įtampos lygis vietiniuose tinkluose dažnai viršija priimtinas ribas, ypač didelės saulės energijos gamybos ir mažo vietinio vartojimo laikotarpiais [1]. Daugeliu atvejų dėl šių viršįtampių saulės elektrinės automatiškai atjungiamos, todėl prarandama energija ir sumažėja sistemos patikimumas. Nepaisant to, kad šiuolaikiniuose keitikliuose yra pažangių funkcijų, tokių kaip dinaminis aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymas, šios funkcijos dažnai konfigūruojamos neatsižvelgiant į faktinius prijungto tinklo elektros parametrus.

Įtampos reguliavimo efektyvumas labai priklauso nuo tinklo varžių charakteristikų, ypač nuo induktyviųjų ir reaktyviųjų komponentų santykio [2]. Žemos įtampos tinkluose šis santykis paprastai yra mažas, o tai riboja keitiklio gebėjimą paveikti įtampą reguliuojant reaktyviąją galią. Priešingai, aukštesnės įtampos tinkluose, kurių reaktyvioji komponentė yra palankesnė, įtampos reguliavimas paprastai yra efektyvesnis. Nepaisant to, trūksta praktinių tyrimų ar lauko eksperimentų, analizuojančių, kaip išoriniai grandinės parametrai veikia keitiklio veikimą realioje tinklo aplinkoje.

Siekiant užpildyti minėtą spragą šio darbo tikslas – eksperimentiškai ištirti, kaip išorinių induktyviųjų komponentų įvedimas veikia prie tinklo prijungto keitiklio įtampos reguliavimo galimybes. Tyrimo metu imituojamos skirtingos tinklo sąlygos ir įtampos trikdžiai, naudojant 10 kW „SolarEdge“ keitiklį, prijungtą prie fotovoltinių plokščių, ir 20 A srovės autotransformatorių, galintį keisti tinklo įtampą nuo 0 V iki 450 V. Sistemingai įvedant kintamo induktyvumo trifazius induktorius, įvertinamas tinklo varžos poveikis reaktyviosios galios atsakui ir įtampos stabilizavimui. Matavimo duomenys renkami naudojant „Metrel MI 2895“ elektros energijos kokybės analizatorių.

Darbo uždaviniai:

1. išmatuoti elektros tinklo varžą, jungiant į tinklą papildomus elementus, pagal gautus rezultatus nustatyti, kokia tinklo varža ir koks induktorius reikalingas, kad maitinimo grandinėje tinklo induktyviųjų ir reaktyviųjų komponentų santykis būtų didesnis už 1;
2. ištirti saulės inverterio minimalios ir maksimalios įtampos apsaugos suveikimo įtampas ir laikus, keičiant tinklo įtampą autotransformatoriumi;
3. autotransformatoriumi keičiant inverterio maitinimo įtampą nustatyti koku greičiu keičiasi keitiklio generuojama reaktyvioji galia reaguojant į įtampos pasikeitimus;
4. keičiant aktyviosios galios ribojimo parametras nustatyti koku greičiu keičiasi keitiklio generuojama aktyvioji galia reaguojant į valdymo signalo pasikeitimus;
5. į inverterio maitinimo grandinę įjungus droselius nustatyti, koku mastu reaktyviosios galios valdymas gali kompensuoti įtampos vertes keitiklio išėjime.

## 1. Keitiklių valdymo strategijos

Perėjimas nuo centralizuotos gamybos prie paskirstytų energijos sistemų iš naujo apibrėžė keitiklių funkcinį vaidmenį elektros tinkluose. Be nuolatinės srovės iš atsinaujinančių šaltinių konvertavimo į kintamąją srovę, tinkamą integravimui į tinklą, keitikliams teko svarbi užduotis: prisidėti prie tinklo stabilumo. Dėl decentralizuoto jų pobūdžio ir programuojamo elgesio jie gali reaguoti į lokalizuotus tinklo trikdžius greičiau nei įprastinė centralizuota valdymo įranga [3]. Dėl to jie ypač vertingi žemos įtampos skirstomuosiuose tinkluose, kur įtampos kritimų, šuolių ir harmoninių iškraipymų poveikis dažnai yra ryškiausias, o tradiciniai reguliavimo metodai yra mažiausiai veiksmingi.

Norint suprasti, kaip keitikliai veikia tinklo stabilumą, būtina prisiminti pagrindinius energijos srauto ir įtampos atsako principus. Kintamosios srovės sistemoje yra dviejų tipų energija: aktyvioji galia ir reaktyvioji galia. Aktyvioji galia reiškia faktinę energiją, tiekiamą apkrovoms ir suvartojamą įrenginių. Reaktyvioji galia, nors ir nesunaudojama, yra reikalinga elektromagnetiniams laukams, būtiniams variklių, transformatorių ir kitų indukcinų komponentų veikimui, palaikyti. Šių dviejų energijos formų pusiausvyrą daro didelę įtaką įtampos stabilumui. Reaktyviosios galios padidėjimas gali padidinti vietinį įtampos lygį, o trūkumas gali sukelti įtampos kritimą. Todėl keitiklių pagrindu sukurtos sistemos, galinčios realiuoju laiku valdyti tiek aktyviają, tiek reaktyviają galią, yra labai svarbios įtampos reguliavimui ir tinklo trikdžių mažinimui.

Sukurta keletas keitiklių valdymo strategijų, skirtų reguliuoti galios išvestį ir palaikyti stabilų veikimą esant skirtingoms tinklo sąlygoms. Šios strategijos skiriasi sudėtingumu, reagavimo geba ir tinkamumu skirtingų tipų trikdžiams. Tarp jų proporcingo integralinio diferencialinio (angl. *Proportional-Integral-Derivative (PID)*) valdiklis yra vienas iš plačiausiai naudojamų dėl savo paprastumo, lengvo įgyvendinimo ir patikimo veikimo sistemose su santykinai nuspėjama dinamika. Nors PID valdymas bus išsamiai nagrinėjamas kitame skyriuje, svarbu pažymėti, kad jis veikia nuolat mažindamas paklaidą tarp išmatuoto parametro, pvz., įtampos, ir norimos nustatytos vertės, proporcingai, integraliai ir diferencialiai reguliuodamas keitiklio išvestį.

Modelinis nuspėjamasis valdymas (angl. *Model Predictive Control (MPC)*) siūlo pažangesnę alternatyvą. MPC naudoja matematinį sistemos modelį, kad numatytų būsimą elgseną ir nustatytų valdymo veiksmus, kurie optimizuoja našumą per nustatytą laikotarpį [5]. Dėl to jis ypač efektyvus scenarijuose, kuriuose yra laiko uždelsimų, apribojimų ar netiesinės dinamikos. Tačiau jo sudėtingumas ir skaičiavimo reikalavimai dažnai riboja jo praktinį pritaikymą realaus laiko valdymo aplinkoje.

Histerezės valdymas yra kitoks metodas, kai valdymą reglamentuoja paprastos viršutinės ir apatinės ribos [6]. Kai stebimas kintamasis nukrypsta už šių ribų, valdiklis inicijuoja korekcinius veiksmus, kurie leidžia pasiekti itin greitą reagavimo laiką. Šis metodas ypač naudingas sistemose, kurioms reikalinga greita pereinamųjų procesų korekcija, nors paprastai jis lemia kintamus perjungimo dažnius, kurie gali padidinti sistemos nuostolius ir elektromagnetinius trukdžius.

Tiesioginis galios valdymas (angl. *Direct Power Control (DPC)*) apeina įtampos ir srovės atjungimo poreikį, tiesiogiai valdydamas aktyviają ir reaktyviają galią pagal momentines tinklo sąlygas [7]. Pasirinkdamas optimalias perjungimo būsenas, DPC gali greitai reaguoti į trikdžius, todėl tinka taikymams, kuriems reikalingas didelis dinaminis našumas. Tačiau, kaip ir histerezės valdymas, DPC gali sukelti perjungimo netikslumų, kuriuos reikia valdyti naudojant tinkamą filtravimą.

Erdvinio vektoriaus moduliacija (angl. *Space Vector Modulation (SVM)*) pirmiausia skirta pagerinti bangos formos kokybę [8]. Ji sintetina norimą išėjimo įtampos vektorių, derindama iš anksto nustatytas perjungimo būsenas per kiekvieną valdymo periodą. Šis metodas pagerina įtampos tikslumą ir sumažina harmoninį iškraipymą, todėl tinka taikymams, kuriuose elektros energijos kokybė yra labai svarbi.

„Dq“ ašies valdymas transformuoja trifazius signalus į besisukantį atskaitos tašką, leisdamas atsietai valdyti aktyviąją ir reaktyviąją galią [2]. Ši technika supaprastina kitų valdymo strategijų, tokių kaip PID arba MPC, įgyvendinimą, konvertuodama sudėtingas kintamosios srovės bangos formas į nuolatinės srovės bangas, taip palengvindama paprastesnę analizę ir valdymą.

Nors valdymo strategijos pasirinkimas lemia, kaip efektyviai keitiklis gali reaguoti į tinklo sąlygas, lemiamą vaidmenį atlieka ir fizinės elektros sistemos savybės. Pagalbiniai komponentai, tokie kaip reaktoriai ir transformatoriai, yra būtini formuojant keitiklio veikimo aplinką. Pavyzdžiui, reaktoriai padeda išlyginti srovės tekėjimą, sumažinti perjungimo triukšmą ir slopinti pereinamuosius įvykius. Tai ypač naudinga didelės spartos valdymo taikymuose, kur staigūs įtampos ar srovės pokyčiai kitaip galėtų destabilizuoti sistemą. Kita vertus, transformatoriai užtikrina galvaninę izoliaciją ir leidžia pritaikyti įtampos lygį, o tai yra labai svarbu integruojant keitikius į tinklus su skirtingais įtampos standartais.

Galiausiai, tinklo elektrinė varža, ypač indukcinė ir reaktyvių komponentų santykis, daro tiesioginę įtaką įtampos reguliavimo efektyvumui valdant reaktyviąją galią. Mažos varžos santykio dominuojančiose tinkluose, keitiklio reaktyviosios galios dedamoji turi tik nedidelį poveikį įtampai. Priešingai, didelės varžos santykio tinkluose, reaktyviosios galios valdymas tampa žymiai efektyvesnis. Ši valdymo logikos ir tinklo varžos sąveika turi būti atidžiai įvertinta projektuojant arba derinant keitiklio reguliavimo strategijas, nes ji lemia, ar keitiklis veiks kaip efektyvus tinklą palaikantis įrenginys, ar liks pasyvus energijos šaltinis su ribota įtampos įtaka.

Šie svarstymai kartu sudaro teorinį pagrindą suprasti keitiklio pagrindu veikiančią įtampos reguliavimą. Jie taip pat patvirtina detalaus valdiklio, ypač PID valdiklio, projektavimo svarbą kaip pagrindinį patikimos ir adaptyvios elektros energijos sistemos integracijos elementą. Kitame skyriuje bus išsamiai nagrinėjama PID valdymo strategija, analizuojant jos struktūrą, derinimo metodus ir konkretų taikymą keitiklio pagrindu veikiančiam įtampos stabilizavimui.

Taip pat svarbu paminėti, kad be pagrindinių šiame skyriuje aptartų valdymo strategijų, šiuolaikiniai keitikliai taip pat turi palaikyti papildomas funkcijas, kurios padeda stabilizuoti elektros energijos sistemą realiuoju laiku. Du svarbūs pavyzdžiai yra sintetinė inercija ir galios virpesių slopinimas (angl. *Power Oscillation Damping (POD)*) [10]. Sintetinė inercija veikia didindama arba mažindama keitiklio aktyviąją galią, priklausomai nuo to, kaip greitai keičiasi tinklo dažnis ( $df/dt$ ). Šis pokyčio greitis turi sureaguoti per milisekundes, kad palaikytų tinklo stabilumą, ypač sistemose, kuriose nėra tradicinių besisukančių mašinų, tokių kaip dideli reaktoriai ir turbinos, kurios dėl savo mechaninės inercijos natūraliai priešinasi staigiems dažnio pokyčiams. POD naudojama aktyviosios galios virpesiams 0,1–1,1 Hz dažnių diapazone sumažinti, kurie gali atsirasti po gedimų arba perjungimo įvykių. Abi funkcijos turi atitikti griežtus perdavimo sistemos operatoriaus reikalavimus, įskaitant tai, kiek galios galima pakeisti ir kaip greitai keitiklis turi reaguoti.

## 2. PID valdymas įtampos reguliavimui keitikliuose

Proporcinio integralinio diferencialinio (PID) valdiklis yra vienas iš plačiausiai naudojamų valdymo mechanizmų galios elektronikoje dėl savo paprastumo, patikimumo ir pritaikomumo įvairiomis veikimo sąlygomis [4]. Keitiklių pagrindu veikiančiose sistemose PID valdikliai dažniausiai naudojami tiek aktyviajai, tiek reaktyviajai galiai valdyti, ypatingą dėmesį skiriant įtampos reguliavimui reaktyviosios galios koregavimu. Šiame skyriuje nagrinėjamas PID valdymo matematinis formulavimas, jo taikymas keitiklių pagrindu veikiančiam įtampos reguliavimui ir derinimo metodai bei iššūkiai, susiję su jo veikimo optimizavimu tiek trumpalaikiams trikdžiams, tiek ilgalaikiam stabilizavimui.

PID valdiklis veikia nuolat mažindamas paklaidą tarp išmatuoto proceso kintamojo (pvz., tinklo įtampos) ir norimos nustatytos vertės [4]. Jo valdymo išvestis  $u(t)$  sudaryta iš trijų narių:

$$\text{Valdymo signalas} = K_P \cdot e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt};$$

Čia:

- $e(t)$  – klaidos signalas, apibrėžiamas kaip skirtumas tarp bazinės įtampos ir išmatuotos įtampos;
- $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  – atitinkamai proporcinų, integralinių ir išvestinių komponentų derinimo parametrai.

Proporcinis narys sukuria išvestį, proporcingą dabartinei paklaidai, siūlydamas nedelsiant imtis taisomųjų veiksmų. Integralusis narys atsižvelgia į sukauptą praeities paklaidą, pašalindamas pastoviosios būsenos poslinkius, o diferencialinis narys prognozuoja būsimas paklaidos tendencijas, pagerindamas atsako laiką ir slopinimą.

Kalbant apie keitiklio valdymą, PID valdiklis paprastai reguliuoja į tinklą tiekiamos arba iš jo vartojamos reaktyviosios galios kiekį, kad ištaisytų įtampos nuokrypius [1]. Įtampa bendro sujungimo taške matuojama ir lyginama su iš anksto nustatyta atskaitos verte. Aptikus nuokrypį, PID valdiklis reguliuoja reaktyviosios galios išvestį, kad įtampa grįžtų į tikslinį lygį. Šis metodas ypač naudingas paskirstytosiose gamybos sistemose, kuriose įtampos reguliavimas turi būti atliekamas vietoje ir autonomiškai. Generuodamas reaktyviają galią įtampos kritimo metu arba vartodamas ją įtampos padidėjimo metu, keitiklis gali sušvelninti įtampos trikdžių poveikį, nesiremdamas išorine infrastruktūra.

Efektyvus PID valdymas labai priklauso nuo teisingo jo stiprinimo parametrų derinimo [4]. Prastai suderinti valdikliai gali sukelti per didelį viršijimą, svyravimus arba lėtą atsaką. Yra keli PID derinimo metodai, tokie kaip:

- Ziegler-Nichols metodas: klasikinis metodas, pagrįstas sistemos žingsniniu atsaku arba kritiniu stiprinimu.
- Bandymų ir klaidų derinimas: empirinis metodas, tinkantis sistemoms su neapibrėžta dinamika.
- Programinė įranga paremtas optimizavimas: modeliavimo įrankių arba optimizavimo algoritmų naudojimas optimaliems stiprinimo nustatymams rasti.

Keitiklių taikymuose derinimas turi atsižvelgti į greitą sistemos dinamiką ir elektrinį triukšmą. Be to, tinklo dedamosios gali skirtis priklausomai nuo paros laiko, apkrovos sąlygų ir tinklo topologijos, todėl kai kuriais atvejais statinio derinimo nepakanka. Adaptyvūs arba pagal stiprinimo grafiką

valdomi PID valdikliai gali būti naudojami dinaminiam parametru reguliavimui, tačiau jie padidina sudėtingumą ir gali būti nepalaikomi kai kurių keitiklių platformų.

PID valdomo keitiklio našumas gali labai skirtis priklausomai nuo įtampos trikdžio trukmės. Trumpalaikiams įtampos kritimams, trunkantiems mažiau nei sekundę, tinkamai suderintas PID valdiklis su dideliu proporcinio ir diferencialinio stiprinimu gali reaguoti pakankamai greitai, kad generuotų kompensacinę reaktyviąją galią [9]. Tačiau jei atsakas yra per agresyvus, jis gali sukelti viršijimą arba nestabilumą. Ilgalaikiams įtampos nuokrypiams integralinis komponentas tampa dominuojantis, palaipsniui pašalindamas bet kokią pastoviosios būsenos paklaidą. Pagrindinis iššūkis yra subalansuoti trumpalaikį reagavimą, reikalingą greitiems pereinamiesiems procesams, su ilgalaikiu stabilumu, reikalingu nuolatiniam įtampos reguliavimui. Šis kompromisas dažnai diktuoja stiprinimo verčių pasirinkimą.

Teoriškai PID valdikliai puikiai tinka įtampos kritimams kompensuoti didesnio induktyvumo tinkluose, kur reaktyviosios galios keitimas daro pastebimą poveikį vietiniams įtampos lygiams [2]. Tokiomis sąlygomis įtampos kritimą galima aptikti ir ištaisyti sparčiai padidinant talpinę reaktyviąją galią. Tačiau šios korekcijos efektyvumas priklauso tiek nuo trikdžių dydžio, tiek nuo keitiklio reaktyviosios galios talpos.

Kompensavimo greitį riboja valdiklio pralaidumas, matavimo vėlavimai ir vidinis keitiklio atsako laikas. Nepaisant to, sistemose, kuriose varžos santykis yra palankus, PID valdymas gali žymiai sumažinti įtampos kritimų gylį ir trukmę.

Žemos įtampos skirstomuosiuose tinkluose keitiklio matoma varža dažnai yra reaktyvinio pobūdžio. Tokioje aplinkoje reaktyviosios galios pokyčiai turi tik silpną poveikį įtampai. Tai riboja bet kokios reaktyviosios galios valdymo strategijos, įskaitant PID, gebėjimą efektyviai stabilizuoti įtampą. Tokiais atvejais net ir gerai suderintas valdiklis gali turėti mažai arba visai neturėti įtakos momentinei įtampai. Be to, didelių reaktyviosios galios kiekių tinkle generavimas gali padidinti nuostolius nepagerinant įtampos sąlygų. Tai pabrėžia poreikį įvertinti tinklo varžos charakteristikas prieš pasikliaujant PID pagrindu veikiančiu reaktyviosios galios valdymu.

Nors PID valdikliai suteikia vidinę keitiklio išvesties valdymo priemonę, jų efektyvumą gali reikšmingai paveikti išoriniai komponentai, tokie kaip reaktoriai. Pridėjus induktyvumą tarp keitiklio ir tinklo, padidėja reaktyviosios varžos dalis, taip pagerindama įtampos atsaką į reaktyviosios galios pokyčius [6]. Teoriškai tai perkelia sistemą į režimą, kuriame PID valdymas tampa daug efektyvesnis. Modifikuodami tinklo varžos charakteristikas, išoriniai induktoriai leidžia valdikliui pasiekti didesnę įtampos stabilumą su mažesne reaktyviosios galios generacija. Į šią valdymo logikos ir grandinės topologijos sąveiką turi būti atsižvelgta tiek projektuojant, tiek taikant lauko režimus.

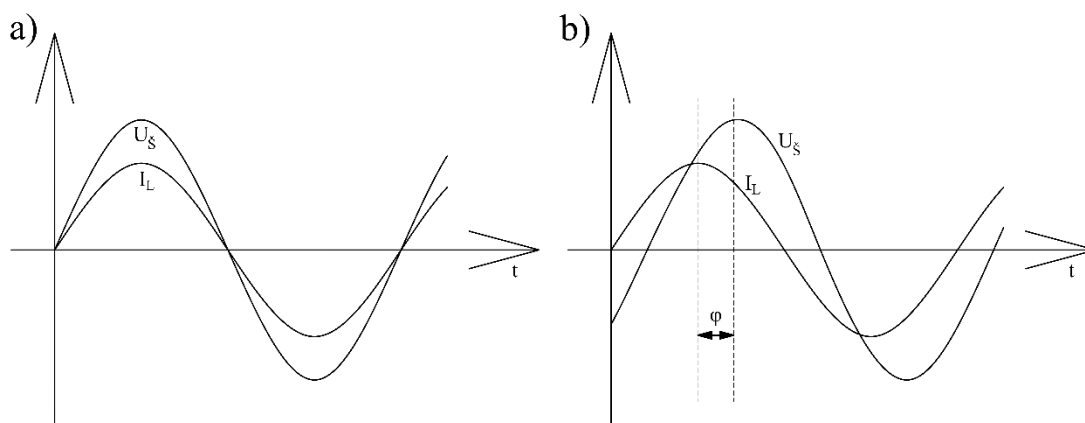
Gerai suderintas PID valdiklis siekia subalansuoti tris pagrindinius atsako rodiklius: minimalų vėlavimą, minimalų viršijimą ir greitą stabilizavimą. Vėlavimas atsiranda tiek dėl matavimo, tiek dėl įjungimo uždelimo. Viršijimas įvyksta, kai valdiklis reaguoja pernelyg agresyviai, dažnai dėl per didelio proporcinio stiprinimo arba nepakankamo slopinimo. Stabilizavimo laikas atspindi, kaip greitai sistema grįžta prie nominalios įtampos.

Keitiklių taikymuose per didelis vėlavimas arba viršijimas gali sukelti apsauginius atjungimus, todėl derinimas yra ypač svarbus. Todėl PID valdiklis turi būti kruopščiai suprojektuotas taip, kad

užtikrintų greitą, stabilų ir tikslų įtampos reguliavimą net ir esant tinklo neapibrėžtumui ir svyruojančioms apkrovoms.

### 3. Tinklo įtampos valdymas keitikliais

Inžinerijos požiūriu, prie tinklo prijungtas inverteris yra daugiau nei tik keitiklis – tai skaitmeniniu būdu valdoma galios elektronikos sistema, galinti realiuoju laiku generuoti tiksliai suformuotus išėjimo signalus. Funkciškai jis veikia kaip aukšto dažnio perjungimo įrenginys, valdomas vidinio mikrovaldiklio arba skaitmeninio signalo procesoriaus. Ši sistema įgyvendina impulsų pločio moduliaciją (angl. *Pulse-Width Modulation (PWM)*) – kuri konvertuoja nuolatinę srovę iš atsinaujinančio šaltinio į sinusoidinę kintamosios srovės bangos formą. Tačiau, skirtingai nei įprasti generatoriai, kurie valdomi tinklo įtampos ir dažnio, keitiklis aktyviai kontroliuoja savo išėjimo galią – aktyviai sintezuodamas tiek įtampos, tiek srovės bangos formas savo išėjimo gnybtuose. Kadangi šiuos signalus generuoja skaitmeninė logika, keitiklis gali pilnai kontroliuoti jų formą, dažnį, amplitudę ir, svarbiausia, fazės poslinkį, dar vadinamą fazės kampu.



**1 pav.** Įtampos ir srovės signalų sinusoidės: a) be fazės poslinkio, b) su fazės poslinkiu  $\varphi > 0$

Kintamosios srovės sistemose įtampa ( $U$ ) ir srovė ( $I$ ) kinta sinusoidiškai laike, o jų fazinis poslinkis, matuojamas kaip fazės kampas  $\varphi$ , turi tiesioginės įtakos perduodamiems galios komponentams. 1 paveiksle pavaizduoti du veikimo režimai: pirmuoju atveju (žr. 1 pav. a var.) įtampos ir srovės bangų formos yra be fazinio poslinkio, todėl vyksta grynai aktyvios galios mainai [11]. Tai reiškia, kad visa galia efektyviai paverčiama realiu, naudojamu darbu. Priešingai, antruoju atveju (žr. 1 pav. b var.) atsiranda fazinis poslinkis  $\varphi$  tarp įtampos ir srovės. Dėl šio poslinkio galia padalijama į du komponentus: aktyviają galią ( $P$ ) ir reaktyviają galią ( $Q$ ). Šie du komponentai apibūdina tariamąją galią  $S$ , kuri matuojama voltamperais [ $VA$ ]:

$$S = U \times I = \sqrt{P^2 + Q^2};$$

$$P = U \times I \times \cos(\varphi);$$

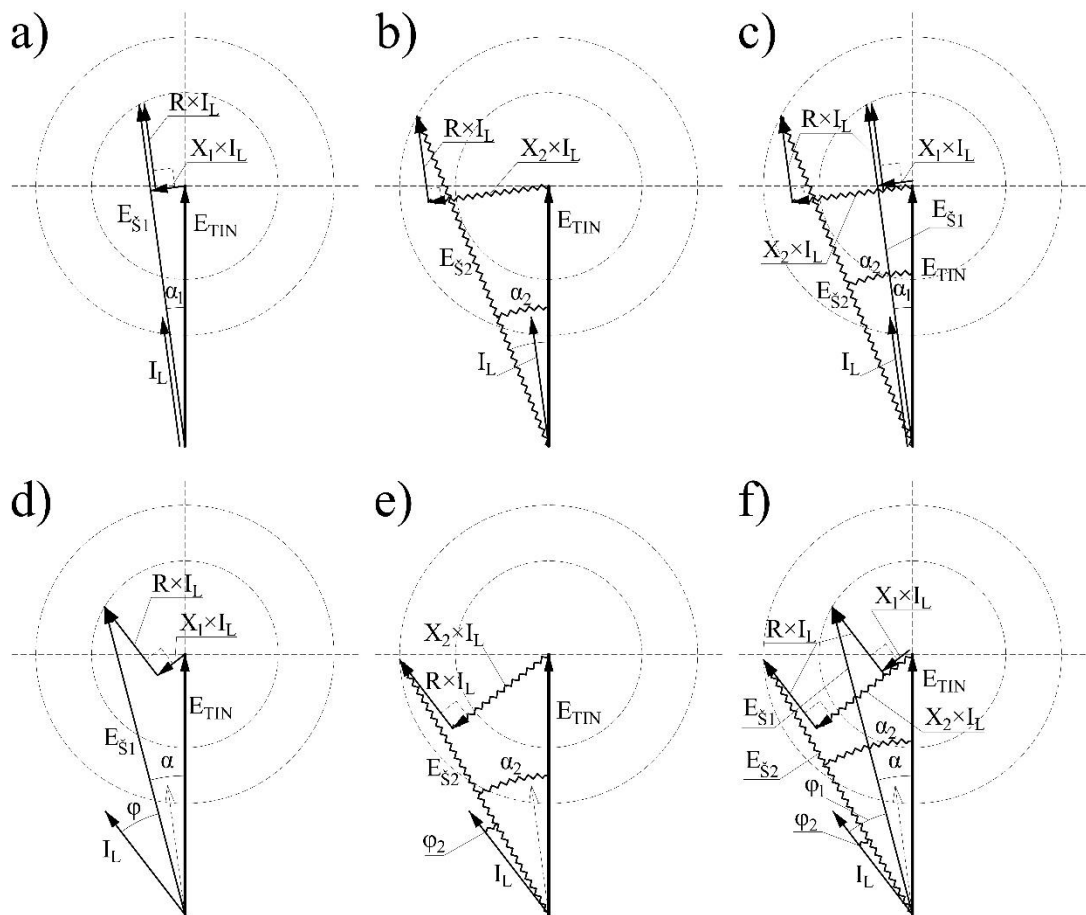
$$Q = U \times I \times \sin(\varphi);$$

Čia:

- $U$  ir  $I$  – reiškia įtampos ir srovės vertes;
- $\varphi$  – fazės kampas tarp jų.

Aktyvioji galia ( $P$ ) yra ta dalis, kuri atlieka realų darbą, pavyzdžiui, varo mašinas arba įkrauna įrenginius, o reaktyvioji galia ( $Q$ ) yra energija, kuri yra keičiama, bet nesunaudojama, daugiausia dėl

tinklo induktyvumo arba talpos. Ji palaiko elektrinius ir magnetinius laukus, būtinus transformatorių, variklių ir perdavimo linijų veikimui.



**2 pav.** Keitiklio išėjimo įtampos vertės priklausomybė nuo tinklo dedamųjų [11]: a) bazinis tinklas; b) induktyvinis tinklas; c) bazinis ir induktyvinis tinklai kartu; d) bazinis tinklas, kai  $\varphi > 0$ ; e) induktyvinis tinklas, kai  $\varphi > 0$ ; f) bazinio ir induktyvinio tinklai, kai  $\varphi > 0$

2 paveiksle pateikta vektorinė diagrama, iliustruoja elektrinius efektus, atsirandančius dėl fazinio kampo pokyčių. Bazinio tinklo sąlygomis (žr. 2 pav. a var.), keitiklio išėjimo įtampa  $E_{\xi}$  yra fazėje su linijos srove  $I_L$  ir dėl to atsirandantis įtampos kritimas tinklo varžose, kurias sudaro aktyvioji ( $R$ ) ir reaktyvioji ( $X$ ) varžos, vaizduojamas kaip du statmeni komponentai:  $R \times I_L$  ir  $X \times I_L$ . Kai fazės kampas  $\varphi = 0$ , šis trikampis yra siauras ir kompaktiškas, atitinkantis efektyvų energijos perdavimą su minimalia reaktyviaja įtaka.

Kai įvedamas fazės poslinkis  $\varphi$  (žr. 2 pav. d var.), srovės vektorius pasukamas, o tai pakeičia varžos vektorių kryptis ir projekcijas. Tai savo ruožtu tiesiogiai veikia tiek keitiklio išėjimo įtampą  $E_{\xi}$ , tiek aktyviosios ir reaktyviosios galių santykį. Šis geometrinis pokytis netiesiogiai rodo, kad keisdamas reaktyviają galią, keitiklis gali valdyti savo išėjimo įtampos kampą ir taip reguliuoti gaunamą įtampą prijungimo taške. Tai sudaro teorinį inverterio valdomos įtampos kompensavimo pagrindą.

Tačiau tokios kompensacijos mastą riboja varžos vektorių dydis. Jei vektoriai  $R \times I_L$  ir  $X \times I_L$  yra trumpi, inverterio gebėjimas paveikti tinklo įtampą valdant reaktyviają galią išlieka ribotas, kas reiškia, kad, norint padidinti kompensavimo galimybes, reikia ilginti šiuos vektorius. Kadangi padidinus aktyviają varžą ( $R$ ), padidėtų šiluminiai nuostoliai ir sumažėtų sistemos efektyvumas, tai

nėra tinkamas būdas. Priešingai, padidinus sistemos reaktyviąją varžą ( $X$ ), padidėja keitiklio valdymo sistemos skaičiavimo apkrovą, kuri turi skirti daugiau išteklių (pvz., vidinės atminties ir apdorojimo laiko), kad generuotų ir reguliuotų reikiamą reaktyviąją galią. Tačiau tai nėra labai jau didelė problema, nes normaliomis sąlygomis keitikliai paprastai neveikia visu savo pajėgumu.

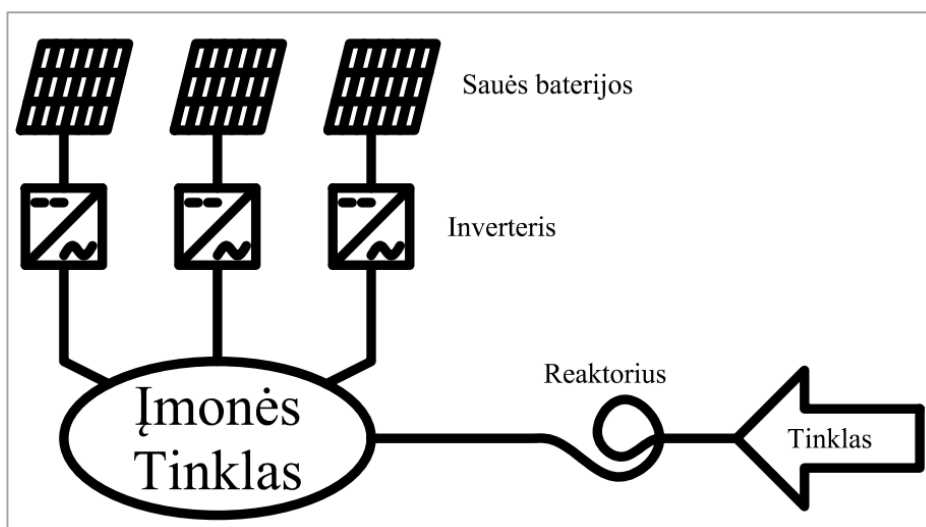
Todėl, norint išplėsti efektyvų įtampos kompensavimo diapazoną, galima padidinti sistemos reaktyviąją varžą į liniją įvedant išorinius induktorius. Kaip parodyta vektorinės diagramos b ir e atvejais, tai pailgina  $X \times I_L$  vektorių, o tai sustiprina inverterio gebėjimą paveikti įtampos trikampį. Kuo ilgesnė ši pusė, tuo jautresnė išėjimo įtampa tampa fazinio kampo  $\varphi$  pokyčiams, todėl reaktyviosios galios valdymas leidžia pasiekti didesnę kompensacinį efektą.

Šis tiesioginis ryšys tarp sistemos varžos, keitiklio valdymo kampo ir įtampos reguliavimo pajėgumo parodo, kad tinkamai formuojant tinklo varžą, ypač jos indukcinę dedamąją, tampa įmanoma pagerinti įtampos kompensacinį efektą nekeičiant keitiklio aktyvios galios dydžio ir nepakenkiant sistemos efektyvumui.

#### 4. Sistemos modeliavimas

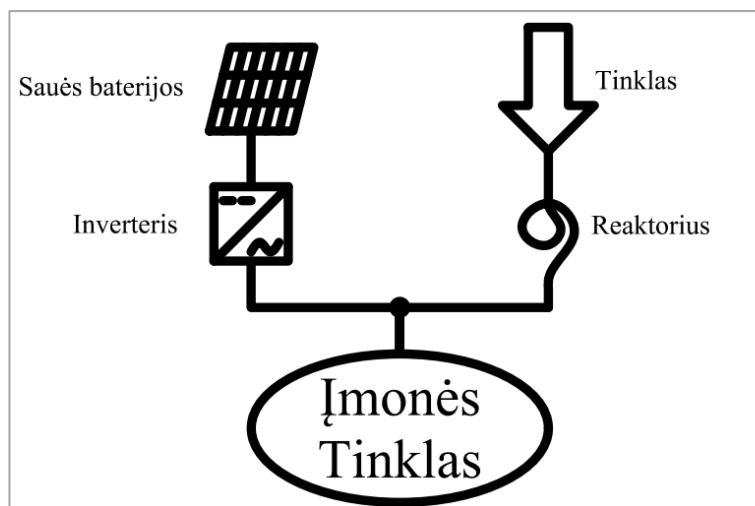
Siekiant įvertinti skirtingų keitiklių valdymo strategijų našumą be fizinių eksperimentų apribojimų ir rizikos, buvo sukurta modeliavimo aplinka, atspindinti pagrindinius realaus pasaulio elektros energijos sistemos aspektus. Pagrindinis šio modeliavimo tikslas – įvertinti, kaip gerai skirtingos strategijos reaguoja į trikdžius, ypač įtampos kritimus, ir kaip pagalbiniai komponentai, tokie kaip reaktoriai, veikia sistemos stabilumą. Modeliavimas taip pat leidžia koreguoti parametrus ir kontroliuoti bandymo sąlygas, kurios dažnai yra nepraktiškos veikiančioje tinklo aplinkoje.

Siekiant paremti šį modeliavimo metodą, buvo apibrėžtos dvi sistemos konfigūracijos, kaip parodyta 1 ir 2 paveiksluose.



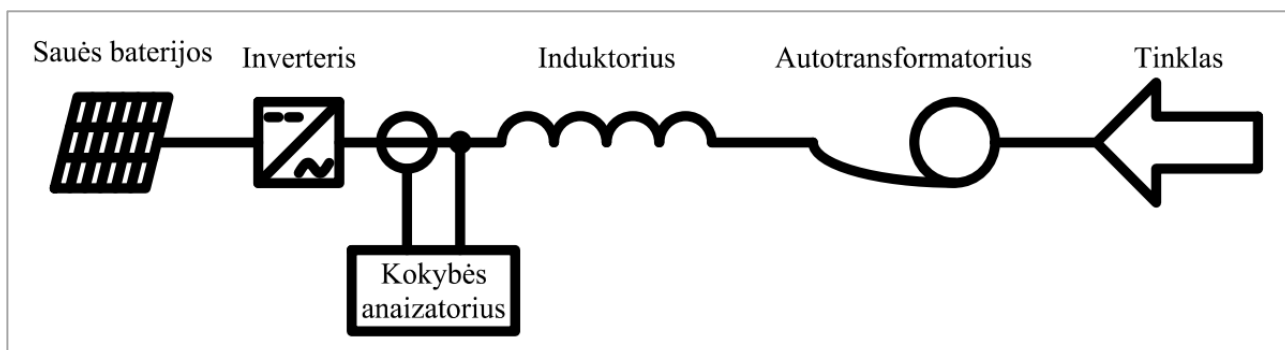
3 pav. Tinklo maitinimo schema

3 paveiksle pavaizduotas tipiškas pramoninio elektros energijos paskirstymo scenarijus, kai keli saulės keitikliai tiekia elektros energiją į gamyklos vidinę elektros energijos sistemą. Ši vidinė sistema yra prijungta prie viešojo tinklo per reaktorių. Reaktorius atlieka lemiamą vaidmenį formuojant srovės bangų formas, mažinant harmonikas ir palaikant reaktyviosios galios valdymą. Tokios konfigūracijos yra įprastos pramonėje, ypač ten, kur dideliu mastu diegiamos prie tinklo prijungtos saulės energijos sistemos. Reaktorius užtikrina stabilią ir filtruotą sąsają tarp decentralizuotų generatorių ir tinklo, užtikrindamas, kad keitiklio valdymo funkcijos išliktų veiksmingos esant kintančioms tinklo sąlygoms.



4 pav. Modeliuojamoji schema strategijoms simuliuoti

2 paveiksle parodytas supaprastintas lygiavertis modelis, naudojamas simuliacijos aplinkoje. Šioje versijoje vienas prie saulės baterijos prijungtas keitiklis yra prijungtas prie įmonės vidinio tinklo, o per reaktorių prijungiamas prie išorinio tinklo. Šis supaprastinimas yra tikslingas – jis išskiria esmines keitiklio, reaktoriaus ir tinklo sąveikas, leisdamas tiksliau įvertinti valdymo strategijas be nereikalingo sudėtingumo. Šiame modelyje reaktorių atlieka tą patį funkcinį vaidmenį kaip ir realioje sistemoje, sukurdamas valdomos varžos aplinką, skirtą tirti, kaip reaktyviosios galios valdymas gali paveikti įtampos elgseną.



5 pav. Eksperimentinio tyrimo schema

Siekiant patikrinti modeliavimo tikslumą ir užtikrinti jo atitikimą realioms sąlygoms, universiteto laboratorijoje buvo sukonstruota eksperimentinė sistema. Sistemą sudarė prie keitiklio prijungtos saulės baterijos, kurių išėjimo signalas tekėjo per įtampos ir srovės kokybės analizatorių „Metrel MI 2895“, kuris fiksavo bandymų rezultatus. Siekiant imituoti tinklo induktyvumą, po keitiklio nuosekliai buvo prijungtas trifazis induktorius. Tolesniam įtampos keitimui buvo naudojamas 20 A autotransformatorius, leidžiantis rankiniu būdu įvesti įtampos svyravimus. Visa sistema buvo prijungta prie laboratorinio tinklo, kuris leido tiksliai imituoti realias veikimo sąlygas.

Siekiant tiksliai atspindėti realias elektros sąlygas simuliacijoje, reikėjo įvertinti universiteto laboratorijos tinklo varžos charakteristikas. Šiuo tikslu buvo atliktas praktinis bandymas, siekiant

nustatyti sistemos aktyvines ir reaktyvines varžas. Fazių varžos vertės buvo matuojamos esant trims įtampos sąlygoms: 360 V, 400 V ir 430 V. Šie matavimai buvo atlikti esant trims konfigūracijoms:

1. bazinė sistema be papildomų elementų;
2. sistema su žinomu trifaziu induktoriumi, įvestu nuosekliai;
3. sistema su papildomu  $1\Omega$  rezistoriumi.

Remiantis šiomis konfigūracijomis, buvo užregistruotos kiekvienos fazės varžos vertės ir apskaičiuotos jų vidutinės vertės, atspindinčios bendrą sistemos elgseną. Šiems skaičiavimams naudota formulė buvo:

$$Z^2 = (R_{Tinklo} + R_{\text{žinom.ded.}})^2 + (X_{Tinklo} + X_{\text{žinom.ded.}})^2;$$

Čia:

- $Z$  – išmatuotas bendras varžos dydis konkrečiu atveju;
- $R_{Tinklo}$  ir  $X_{Tinklo}$  – nežinomos sistemos varžos;
- $R_{\text{žinom.ded.}}$  ir  $X_{\text{žinom.ded.}}$  – pridėti žinomi elementai (rezistorius arba induktorius).

Taikant šią lygtį įvairių konfigūracijų rezultatams, buvo galima apytiksliai nustatyti bazinės sistemos varžos ir reaktyvumo vertes. Tačiau pradiniai tiesioginiai lygčių sprendiniai lėmė nerealiai dideles reaktyviojo komponento vertes  $X_{Tinklo}$ , o tai rodo tam tikrą matavimo netikslumo lygį – greičiausiai dėl bandymo laidų varžos ar kitų nedidelių trikdžių matavimo metu.

**1 lentelė.** Varžų matavimų rezultatai

Bandymo nr.	V	360			400			430			
		Fazės	Z	$R_p$	$X_p$	Z	$R_p$	$X_p$	Z	$R_p$	$X_p$
			$\Omega$	$\Omega$	mH	$\Omega$	$\Omega$	mH	$\Omega$	$\Omega$	mH
1.	A0	0.48	0	0	0.43	0	0	0.48	0	0	
	B0	0.53	0	0	0.46	0	0	0.53	0	0	
	C0	0.54	0	0	0.47	0	0	0.48	0	0	
	<b>Vid.</b>	<b>0.52</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.45</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.50</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
2.	A0	0.96	0.3	0.41	0.82	0.3	0.41	0.92	0.3	0.41	
	B0	0.95	0.2	0.45	0.82	0.2	0.45	0.88	0.2	0.45	
	C0	0.98	0.2	0.39	0.88	0.2	0.39	0.90	0.2	0.39	
	<b>Vid.</b>	<b>0.96</b>	<b>0.23</b>	<b>0.42</b>	<b>0.84</b>	<b>0.23</b>	<b>0.42</b>	<b>0.90</b>	<b>0.23</b>	<b>0.42</b>	
3.	A0	1.51	1	0	1.50	1	0	1.48	1	0	
	B0	1.59	1	0	1.55	1	0	1.62	1	0	
	C0	1.54	1	0	1.50	1	0	1.55	1	0	
	<b>Vid.</b>	<b>1.55</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1.52</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1.55</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	

Siekiant tai pataisyti, varžų dydžiai buvo tikslinti naudojant apytikslį metodą. Rankiniu būdu buvo patikrinti galimų  $R_{Tinklo}$  ir  $X_{Tinklo}$  verčių diapazonai, o rezultatai buvo patvirtinti apskaičiuojant nuokrypį tarp išmatuotų ir numatomų varžų verčių. Interaktyviai mažinant paklaidą keliuose bandymo taškuose, buvo nustatyta, kad  $R_{Tinklo} = 0,5\Omega$  ir  $X_{Tinklo} = 0,11\Omega$  reikšmės geriausiai atitiko išmatuotus duomenis, o maksimalios nuokrypio paklaidos buvo mažesnės nei 1,5 %.

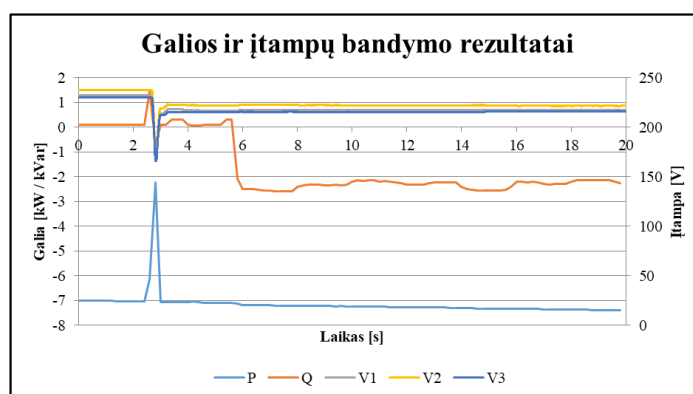
Šis rezultatas rodo, kad sistemoje vyrauja aktyvinė varža, o varžų santykis lygus:  $0.11/0.5 = 0.22$ . Tokioje konfigūracijoje keitiklio reaktyviosios galios valdymas turi ribotą įtaką įtampai. Norint efektyviai reguliuoti įtampą reaktyviosios galios valdymu, pageidautinas didesnis induktyviosios varžos santykis. Todėl vienas iš pagrindinių būsimų eksperimentų tikslų yra išbandyti, kaip pridėjus indukcinį elementą, tokių kaip induktoriai, galima pakeisti šį santykį ir pagerinti bandomojo keitiklio įtampos valdymo galimybes.

## 5. Eksperimentiškai tiriamas saulės keitiklio minimalios ir maksimalios įtampos apsaugos suveikimo įtampos ir laikai, keičiant tinklo įtampą autotransformatoriumi

Norint nustatyti, ar keitiklis gali kompensuoti įtampos kritimus valdydamas reaktyviosios galios generavimą, pirmiausia reikia patikrinti jo apsaugos ribas. Šis žingsnis užtikrina, kad visi vėlesni bandymai, susiję su įtampos trikdžiais ir reaktyviosios galios valdymu, išliktų saugiose keitiklio veikimo ribose. Šiam patikrinimui atlikti buvo realizuota eksperimentų serija, kurios metu įtampa buvo rankiniu būdu keičiama naudojant autotransformatorių. Įvairioms trukmėms buvo taikomi skirtingi įtampos lygiai, siekiant nustatyti diapazonus, kuriuose keitiklis galėtų toliau veikti nesukeldamas apsauginių išjungimų.

### 5.1. Imituojamas trumpalaikis įtampos kritimas nuo 400V iki 300V

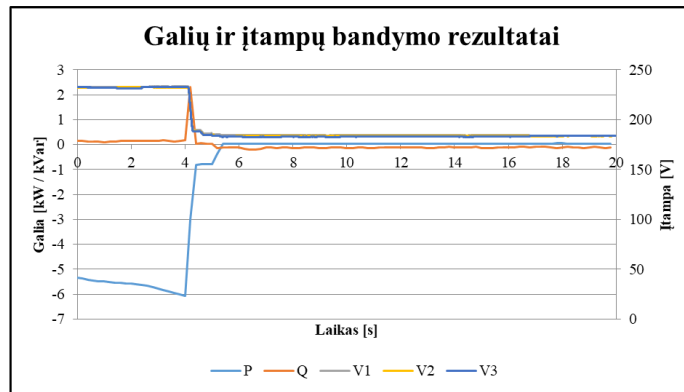
Keitiklio veikimas įtampos kritimo sąlygomis buvo įvertintas dviem atskirais eksperimentais, jam veikiant pagrindiniu režimu. Abiem atvejais įtampa buvo reguliuojama rankiniu būdu naudojant autotransformatorių.



6 pav. Imituojamas trumpalaikis įtampos kritimas nuo 400V iki 300V

Pirmajame eksperimente buvo taikomas trumpalaikis įtampos kritimas (nuo 0.2 iki 0.4 sekundės) nuo 400 V iki 300 V (žr. 6 pav.). Keitiklis šio įvykio metu veikė, o tai rodo, kad trumpo trikdžio metu jo apsaugos ribos nebuvo viršytos. Kaip ir tikėtasi, aktyvioji galia sumažėjo proporcingai įtampai, patvirtindama tiesioginę priklausomybę tarp aktyviosios galios generavimo ir maitinimo įtampos. Reaktyviosios galios reakcija buvo sudėtingesnė: iškart po įtampos kritimo trumpam padidėjo reaktyviosios galios suvartojimas. Tada, maždaug po 2,6 sekundės, keitiklis staiga pradėjo generuoti reaktyviąją galią, padidėdamas nuo 0 iki 2,5 kVAr. Ši reaktyviosios galios generavimas tęsėsi, nors ir įtampa, ir aktyvioji galia jau buvo stabilios, ir jokių tolesnių sistemos pokyčių nepastebėta.

Šis elgesys rodo, kad keitiklis bandė atlikti įtampos kompensavimą, tačiau kadangi keičiant sistemos sąlygas reakcija buvo lėta ir neefektyvi, galima daryti išvadą, kad pagrindiniu režimu keitiklis toleruoja trumpalaikius įtampos kritimus, tačiau neužtikrina reikšmingos dinaminės kompensacijos.

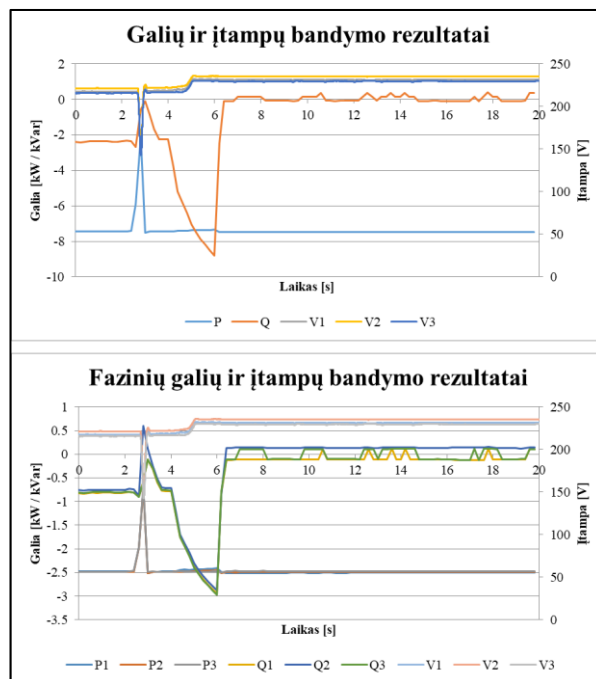


7 pav. Imituojamas ilgalaikis įtampos kritimas nuo 400V iki 300V

Antrojo eksperimento metu įtampa vėl buvo sumažinta nuo 400 V iki 300 V ir palikta tokia lygyje (žr. 7 pav.). Maždaug po 1,1 sekundės nuo įtampos kritimo pradžios keitiklis išsijungė, o tai rodo, kad 300 V yra jo veikimo diapazono ribose. Nors keitiklis gali toleruoti šią įtampą trumpą laiką, jis negali palaikyti ilgalaikio veikimo esant tokioms žemoms įtampos reikšmėms. Tai apibrėžia 300 V kaip trumpalaikio veikimo ribą, kurią peržengus suveikia vidinės keitiklio apsaugos atjungiančios keitiklį nuo tinklo.

### 5.2. Imituojamas trumpalaikis įtampos kritimas nuo 400V iki 250V

Panašus eksperimentas buvo atliktas siekiant įvertinti keitiklio elgseną esant didesniai įtampos kritimui, kai įtampa buvo greitai sumažinta nuo 400 V iki 250 V naudojant autotransformatorių (žr. 8 pav.). Kaip ir ankstesniu atveju, keitiklis veikė visą įvykio laiką, patvirtindamas, kad šis didesnis įtampos kritimas vis tiek neviršijo jo apsaugos slenksčių.



8 pav. Imituojamas trumpalaikis įtampos kritimas nuo 400V iki 250V

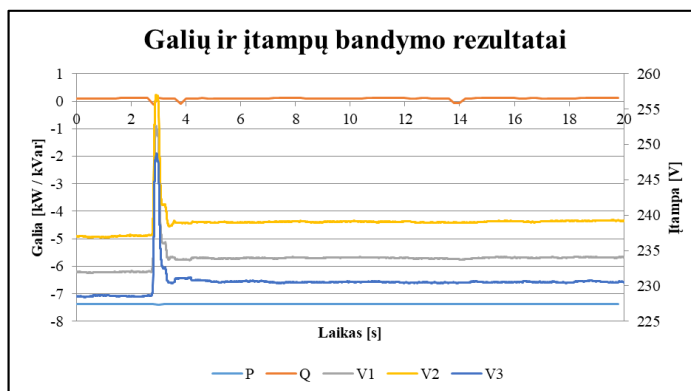
Aktyvioji galia vėl sumažėjo proporcingai įtampai, parodydama šiek tiek didesnę kritimą dėl padidėjusio įtampos kritimo, o tai sustiprina tiesioginę aktyviosios galios priklausomybę nuo maitinimo įtampos. Reaktyviosios galios atsakas atitiko praeitą eksperimentą, tačiau pasižymėjo keliais svarbiais skirtumais.

Iš pradžių reaktyviosios galios suvartojimas įtampos kritimo metu padidėjo labiau ir ilgesniam laikui. Po to sekė pastebimai greitesnis kompensacinis atsakas: maždaug po 1 sekundės nuo kritimo pradžios keitiklis pradėjo generuoti reaktyviąją galią, kuri sparčiai padidėjo nuo 2,4 kVAr iki 6,8 kVAr. Šiuo atveju reaktyviosios galios generacijos pakako įtampai padidinti 10 V. Tačiau po 2,1 sekundės kompensacinė reaktyvioji galia momentaliai grįžo iki 0 kVAr, bet pasiektas įtampos padidėjimas išliko.

Vėlesnių bandymų metu pastebėta, kad keitiklis nebegalėjo toleruoti įtampos kritimo žemiau 250 V; tokiomis sąlygomis keitiklis išsijunginėdavo, o tai rodo, kad buvo pasiekta apatinė jo vidinių apsaugų riba. Tai apibrėžia 250 V kaip minimalų toleruotiną šio keitiklio trumpalaikį įtampos lygį pagrindiniu režimu. Todėl būsimuose eksperimentiniuose scenarijuose nebus įtampos kritimų, peržengiančių šią ribą, nes jie viršija įrenginio veikimo diapazoną ir sukelia atjungimą. Šie rezultatai nustato praktinę apatinę įtampos vidinių apsaugų ribą ir pabrėžia keitiklio pagrindinio valdymo režimo apribojimus reaktyviosios galios kompensavimui.

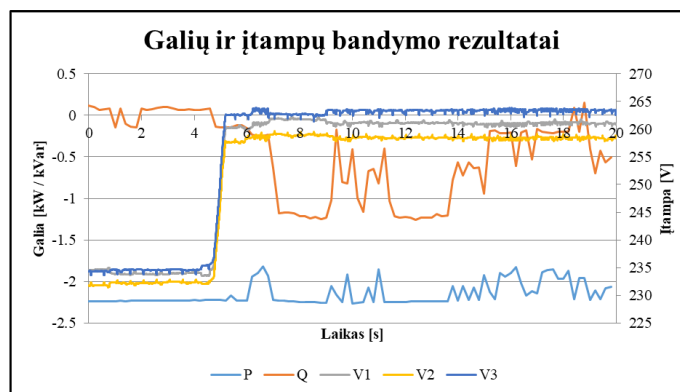
### 5.3. Imituojamas trumpalaikis įtampos padidėjimas nuo 400V iki 430V

Siekiant įvertinti keitiklio elgseną esant viršįtampio sąlygoms, buvo atlikti du eksperimentai. Abiem atvejais įtampa buvo rankiniu būdu padidinta naudojant autotransformatorių ir palaikoma padidintame lygyje, siekiant įvertinti, ar keitiklis liks veikiantis, ar išsijungs dėl viršįtampio apsaugos.



9 pav. Imituojamas trumpalaikis viršįtampis nuo 400V iki 430V

Pirmajame eksperimente įtampa trumpam buvo padidinta nuo 400 V iki 430 V (žr. 9 pav.). Viso įvykio metu keitiklis veikė stabiliai. Tiek aktyvioji, tiek reaktyvioji galia išliko stabili, be pastebimų svyravimų ar kompensavimo elgsenos. Tai rodo, kad pagrindiniu veikimo režimu keitiklis toleruoja trumpalaikius viršįtampius, nesukeldamas jokios apsauginės reakcijos ir nerodydamas nestabilumo požymių.



**10 pav.** Imituojamas ilgalaikis viršįtampis nuo 400V iki 450V

Antrajame eksperimente įtampa buvo padidinta nuo 400 V iki 450 V ir palaikoma tokiame lygyje (žr. 10 pav.), siekiant patikrinti keitiklio veikimą arti viršutinės jo veikimo diapazono ribos. Nors keitiklis neišsijungė, išėjimo įtampa buvo pastebimai nestabili. Tiek aktyviosios, tiek reaktyviosios galios vertės svyravo netolygiai, o tai rodo, kad keitiklis veikė arti įtampos tolerancijos ribos. Šis nestabilus veikimas reiškia, kad nors techniškai keitiklis gali veikti esant 450 V įtampai, bet tai vyksta suprastėjus elektros energijos kokybei.

Dėl įrangos apribojimų dabartinėje eksperimentinėje sistemoje negalima išbandyti aukštesnės nei 450 V įtampos. Todėl 430 V bus laikoma viršutine aukštos įtampos riba tolesnei analizei.

## 6. Eksperimentiškai tiriamas koku greičiu keičiasi keitiklio generuojama reaktyvioji galia reaguojant į įtampos pasikeitimus

Tiriamas keitiklis palaiko tris aktualius įtampos kompensavimo darbo režimus. Du iš šių režimų: „ESO A“ ir „ESO 0.4kV“, yra jau suprogramuoti ir veikia pagal gamintojo iš anksto nustatytą logiką. Jų vidiniai parametrai nėra prieinami rankiniam konfigūravimui ar stebėjimui, o tai riboja galimybę analizuoti ar tiksliai derinti jų elgseną įtampos sutrikimų metu.

Priešingai, trečiasis režimas, vadinamas „Išplėstinė kreivė“, suteikia pilną valdymą, leidžiant rankiniu būdu konfigūruoti reaktyviosios galios ir įtampos ( $Q(U)$ ) charakteristiką. Šis režimas suteikia reikiamą lankstumą apibrėžti, kaip keitiklis reaguoja į įtampos nukrypimus, generuojant arba vartojant reaktyviąją galią. Todėl yra labai svarbus norint išsamiai išanalizuoti keitiklio įtampos kompensavimo veikimą įvairiomis tinklo sąlygomis.

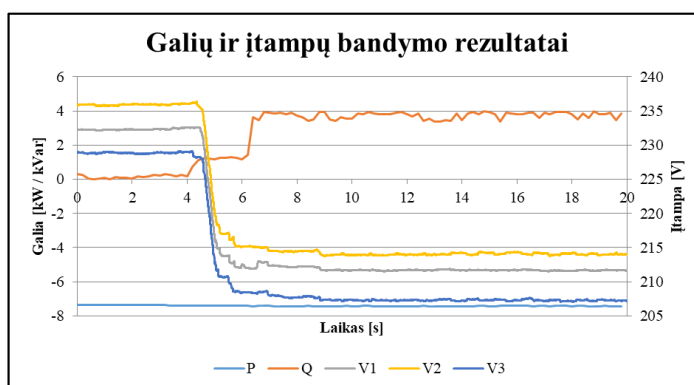
Siekiant įvertinti keitiklio elgseną taikant skirtingas įtampos kompensavimo strategijas, buvo atlikta keletas eksperimentų, naudojant visus tris galimus darbo režimus: „ESO A“, „ESO 0,4 kV“ ir „Išplėstinė kreivė“. Šių bandymų tikslas buvo įvertinti, kaip kiekvienas režimas reaguoja į staigius įtampos sutrikimus.

Remiantis ankstesnių eksperimentų rezultatais, bandymo taškais buvo pasirinkti trys kritiniai įtampos lygiai: 400 V (nominali įtampa), 430 V (viršįtampis) ir 360 V (įtampos kritimas). Šios vertės buvo pasirinktos siekiant užtikrinti, kad bandymai išliktų saugiaiame keitiklio veikimo diapazone, kartu sukeldami prasmingus sistemos atsakus lyginamajai analizei skirtinguose režimuose.

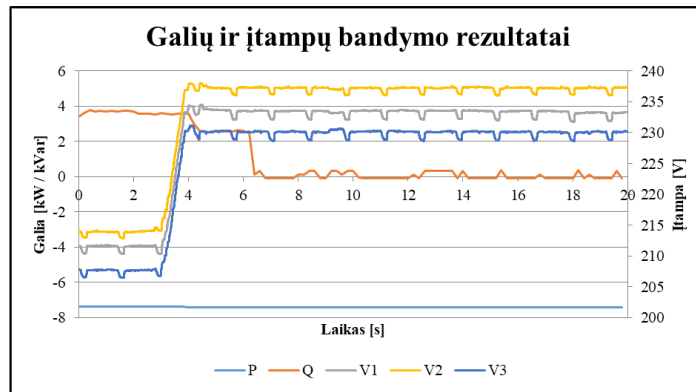
### 6.1. „ESO A“ režimo testavimas

„ESO A“ režimas buvo išbandytas keitiklį veikiant greitų įtampos pokyčių, kurių kiekvienas truko sekundės dalį ir buvo atliekamas naudojant autotransformatorių, seką. Buvo atlikti keturi atskiri matavimai, kurių kiekvienas atitiko skirtingą įtampos pokytį:

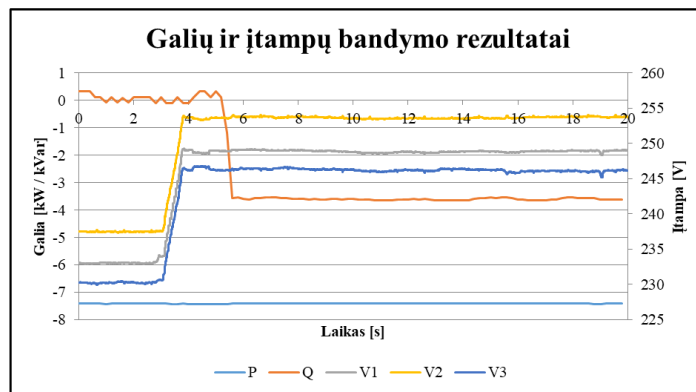
4. pasikeitimas nuo 400 V iki 360 V (žr. 11 pav.);
5. pasikeitimas nuo 360 V iki 400 V (žr. 12 pav.);
6. pasikeitimas nuo 400 V iki 430 V (žr. 13 pav.);
7. pasikeitimas nuo 430 V iki 400 V (žr. 14 pav.).



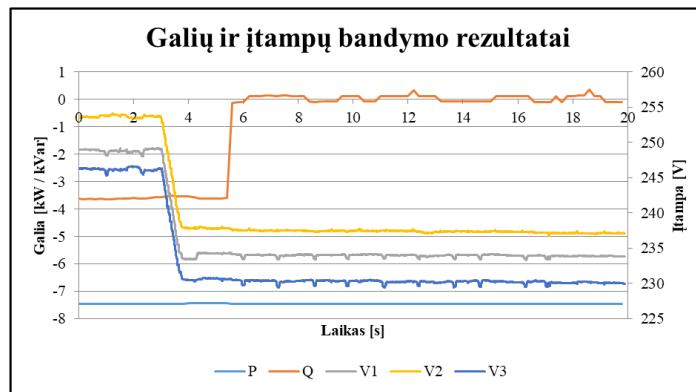
11 pav. „ESO A“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 400V iki 360V



12 pav. „ESO A“ režimo testavimas įtampai kylant nuo 360V iki 400V



13 pav. „ESO A“ režimo testavimas įtampai kylant nuo 400V iki 430V



14 pav. „ESO A“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V

Visų perėjimų metu aktyvioji galia ( $P$ ) išliko stabili, o tai rodo, kad keitiklis išlaikė pastovų galios konvertavimą nepaisant staigių įtampos svyravimų. Tai patvirtina, kad „ESO A“ režimu keitiklis patikimai palaiko aktyviosios galios tiekimą, nepaisant trumpalaikių įtampos nukrypimų.

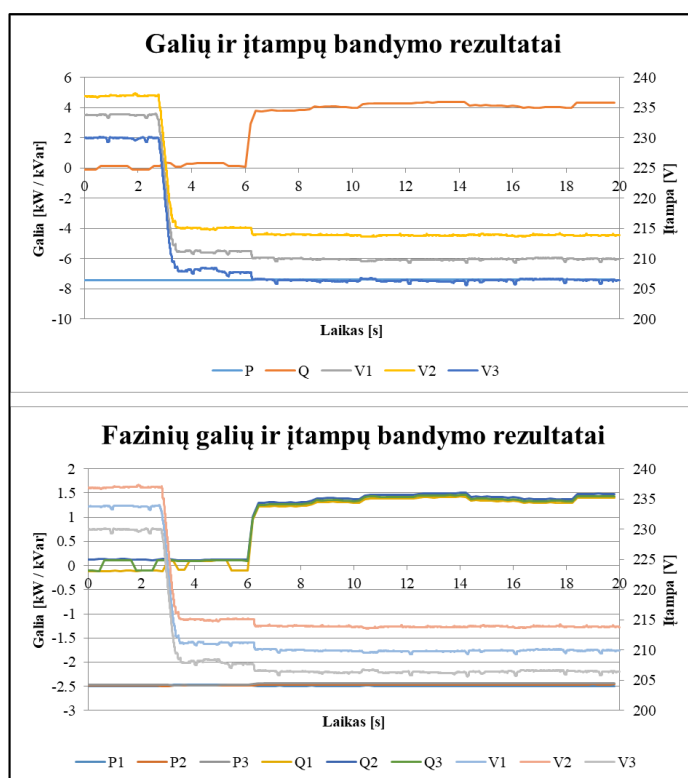
Priešingai, reaktyvioji galia ( $Q$ ) po kiekvieno įtampos pokyčio kito. Kiekvienu atveju reaktyvas palaipsniui keitėsi maždaug 3,8 kVAr, priklausomai nuo to, ar įtampa padidėjo, ar sumažėjo. Tai rodo, kad keitiklis bandė kompensuoti reaktyviają galią reaguodamas į įtampos trikdžius. Tačiau šių pokyčių mastas buvo toks mažas, kad jų poveikis bendram įtampos reguliavimui buvo praktiškai nereikšmingas. Todėl, nors „ESO A“ režime yra reaktyvusis kompensavimo mechanizmas, jo

poveikis yra minimalus ir nepakankamas, kad dinaminėmis sąlygomis būtų galima prasmingai palaikyti įtampą.

## 6.2. „ESO 0,4 kV“ režimo testavimas

Ta pati įtampos perėjimų seka buvo taikoma įvertinti keitiklio režimą „ESO 0.4 kV“. Kaip ir anksčiau, perėjimai buvo atlikti greitai naudojant autotransformatorių, o bandymą sudarė keturi matavimai:

1. pasikeitimas nuo 400 V iki 360 V (žr. 15 pav.);
2. pasikeitimas nuo 360 V iki 400 V (žr. 1 priedo 33 pav.);
3. pasikeitimas nuo 400 V iki 430 V (žr. 1 priedo 34 pav.);
4. pasikeitimas nuo 430 V iki 400 V (žr. 1 priedo 35 pav.).



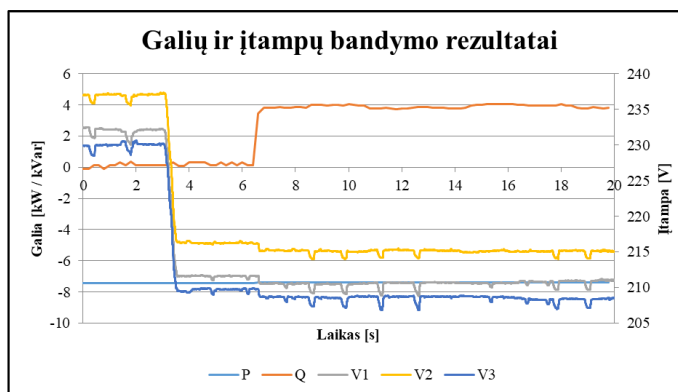
15 pav. „ESO 0,4 kV“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V

Bandymo rezultatai panašūs į tuos, kurie buvo stebėti „ESO A“ režimu. Aktyvioji galia išliko stabili esant visiems įtampos pokyčiams, patvirtindama, kad keitiklis ir toliau efektyviai reguliuoja aktyviosios galios konversiją svyruojančios įtampos sąlygomis.

Šiuo režimu keitiklio reaktyviosios galios kompensavimas parodė šiek tiek ryškesnį atsaką, tačiau su esminiu trūkumu. Kiekvienu atveju įtampos profilyje atsirado aiškiai matomas žingsnis; tačiau užuot sušvelninęs įtampos trikdį, keitiklio atsakas jį netgi sustiprino. Tiksliau, įtampos kritimo metu reaktyviosios galios reguliavimas sukėlė įtampos tolesnį kritimą maždaug 8,6 V, vietoj to, kad neutralizuotų kritimą. Tai rodo, kad keitiklis, veikiantis „ESO 0.4kV“ režimu, ne tik nesugebėjo efektyviai palaikyti įtampos, bet ir neigiamai prisidėjo prie įtampos stabilumo. Nors reaktyviosios galios valdymas buvo aktyvesnis, palyginti su „ESO A“, jo kryptis ir poveikis buvo neproduktyvūs ir dar labiau pabrėžė šio pagrindinio režimo apribojimus tinkamam įtampos kompensavimui.

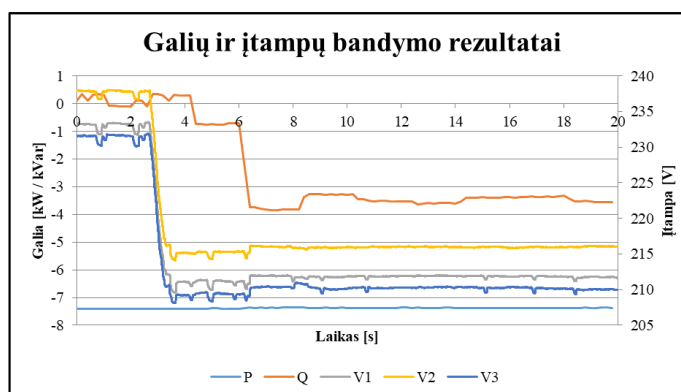
### 6.3. „Išplėstinės kreivės“ režimo testavimas

Ta pati įtampos perėjimų seka buvo taikoma keitikliui, veikiančiam „Išplėstinės kreivės“ režimu, kai  $Q(U)$  kreivė buvo palikta numatytojoje konfigūracijoje. Rezultatai buvo panašūs į tuos, kurie buvo stebėti „ESO 0.4kV“ režimu: aktyvioji galia išliko stabili visų įtampos pokyčių metu, o reaktyviosios galios reguliavimas turėjo matomą poveikį įtampos profiliui. Tačiau, kaip ir ankstesniame režime, kompensavimo atsakas vyko neteisinga kryptimi – įtampos nuokrypiai buvo sustiprinti, o ne sumažinti.



16 pav. „Išplėstinės kreivės“ režimo su siūloma kreive testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 36-39 pav.)

Tačiau pagrindinis „Išplėstinės kreivės“ režimo privalumas yra tas, kad jis leidžia visiškai rankiniu būdu valdyti  $Q(U)$  kreivę. Tai leidžia vartotojui iš naujo apibrėžti reaktyviosios galios atsaką į įtampos nuokrypius. Remiantis gautais rezultatais, kito bandymo metu  $Q(U)$  kreivės taškų ženklai bus pakeisti priešingais, siekiant užtikrinti, kad keitiklis tiekėtų arba vartotų reaktyviąją galią teisinga kryptimi, kad ir būtų neutralizuoti įtampos kritimai ir šuoliai.



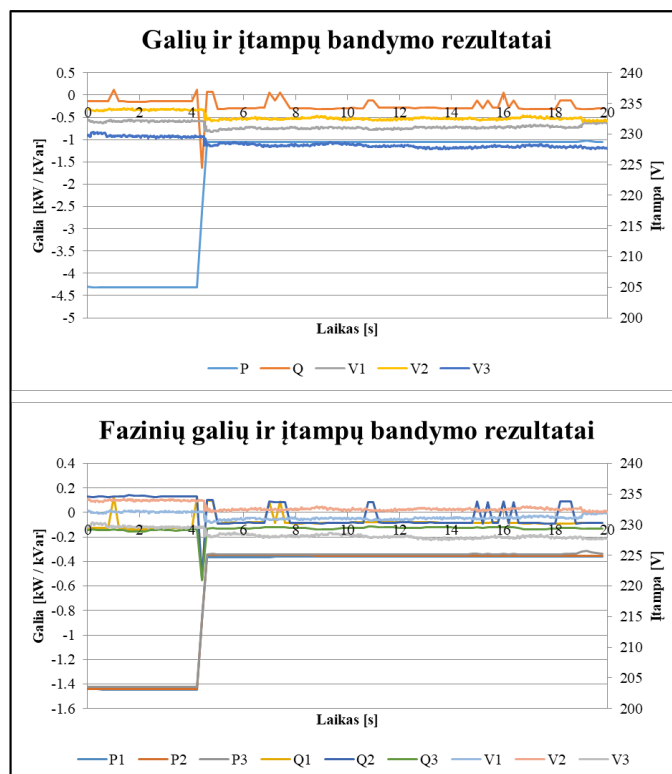
17 pav. „Išplėstinės kreivės“ režimo su modifikuota kreive testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 40-44 pav.)

Pakartojus šį eksperimentą sukeitus  $Q(U)$  kreivės taškų ženklus, reaktyviosios galios atsakas pasikeitė taip, kaip numatyta: kompensuojant įtampos pokyčius ir priešinant įtampos nuokrypiams, o ne juos stiprinant. Šis rezultatas patvirtina teisingą pasirinktinės  $Q(U)$  konfigūracijos veikimą ir atitinka numatytą tikslą – sumažinti įtampos svyravimus valdant reaktyviąją galią. Atlikus šią

pagrindinę korekciją, toliau bus analizuojama, kaip galima padidinti įtampos kompensavimo efektyvumą.

## 7. Eksperimentiškai tiriami aktyviosios galios ribojimo parametrai nustatant, koku greičiu keičiasi keitiklio generuojama reaktyvioji galia reaguojant į valdymo signalo pasikeitimus

Dabar, kai patvirtinta, kad keitiklis gali užtikrinti tam tikrą įtampos kompensavimo lygį, kitas žingsnis buvo išbandyti ar keitiklis gali pakankamai greitai keisti generuojamos galios kiekį. Norint tai įvertinti, buvo atlikta eksperimentų serija, kurios metu rankiniu būdu buvo keičiami keitiklio programiniai nustatymai, siekiant laikinai apriboti jo energijos generavimą. Taip pat buvo matuojamas atsako laikas, kai šie apribojimai buvo pašalinti ir keitiklis galėjo grįžti prie pilnos galios.



**18 pav.** Keitiklio reakcija į programinę galios apribojimą iki 1 kW (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 45 pav.)

Rezultatai parodė, kad keitiklis gali greitai ir patikimai reguliuoti savo aktyviosios galios generavimą. Visais bandymų atvejais keitiklis reagavo tiek į išėjimo apribojimų nustatymą, tiek į jų pašalinimą maždaug per 0,5 sekundės. Jis sugebėjo sumažinti savo galią apie 80 % ir vėliau atkurti ją iki pilno pajėgumo be jokių nestabilumo ar vėlavimo požymių. Tai rodo didelį keitiklio aktyviosios galios valdymo mechanizmo reagavimo laipsnį ir patikimumą.

Reaktyvioji galia šių perėjimų metu parodė tik nedidelius momentinius pokyčius, tačiau apskritai išliko stabili su nedideliais svyravimais. Tai rodo, kad keitiklis efektyviai išlaikė reaktyviosios galios valdymą net ir tada, kai aktyviosios galios lygiai buvo dinamiškai keičiami.

Visuose eksperimentuose 80 % aktyviosios galios sumažėjimas lėmė nedidelį, bet išmatuojamą maždaug 1-2 % įtampos kitimą. Nepaisant to, sistemos įtampa išliko priimtinoje ribose, o tai rodo, kad greitas keitiklio galios reguliavimas neturėjo neigiamos įtakos bendram įtampos stabilumui. Šie rezultatai patvirtina keitiklio gebėjimą greitai ir efektyviai reguliuoti aktyviają galią, todėl jis tinka taikymams, kuriems reikalingas dinaminis galios valdymas.

## 8. Eksperimentiškai tyrinėjama, kaip stipriai reaktyviosios galios valdymas gali sumažinti įtampos vertes keitiklio išėjime į sistemą įvedus induktorius

Patvirtinus, kad keitiklis, veikdamas „Išplėstinės kreivės“ režimu, gali atlikti įtampos kompensavimą, kitas tikslas buvo padidinti šią kompensaciją nuo vos pastebimos iki aiškiai išmatuojamos ir funkciškai reikšmingos.

Siekiant šio tikslo, buvo atlikta eksperimentų serija naudojant išorines indukcinės apkrovas – buvo tikrinama, ar jos gali sustiprinti keitiklio reaktyviosios galios atsaką ir pagerinti įtampos kompensavimą. Keturi atskiri eksperimentai buvo atlikti identiškomis sąlygomis, kiekvienas iš jų atitiko skirtingą indukcinės apkrovos lygį:

- 1 eksperimentas: be išorinio induktoriaus (bazinis) ( $X_1/R = 0.22$ );
- 2 eksperimentas: trifazis induktorius su 1,33 mH induktyvumu ( $X_2/R = 0.6$ );
- 3 eksperimentas: trifazis induktorius su 3.1 mH induktyvumu ( $X_3/R = 1.22$ );
- 4 eksperimentas: trifazis induktorius su 9,42 mH induktyvumu ( $X_4/R = 3.32$ ).

Kiekvienam eksperimentui keitiklis buvo veikiamas keturiais greitais įtampos perėjimais naudojant autotransformatorių. Po kiekvieno perėjimo naujas įtampos lygis buvo palaikomas pastovus, siekiant stebėti, kaip ir kada keitiklis pradės įtampos kompensaciją. Ypatingas dėmesys buvo skiriamas reaktyviosios galios atsako laikui ir greičiui. Įtampos keitimo seka buvo tokia:

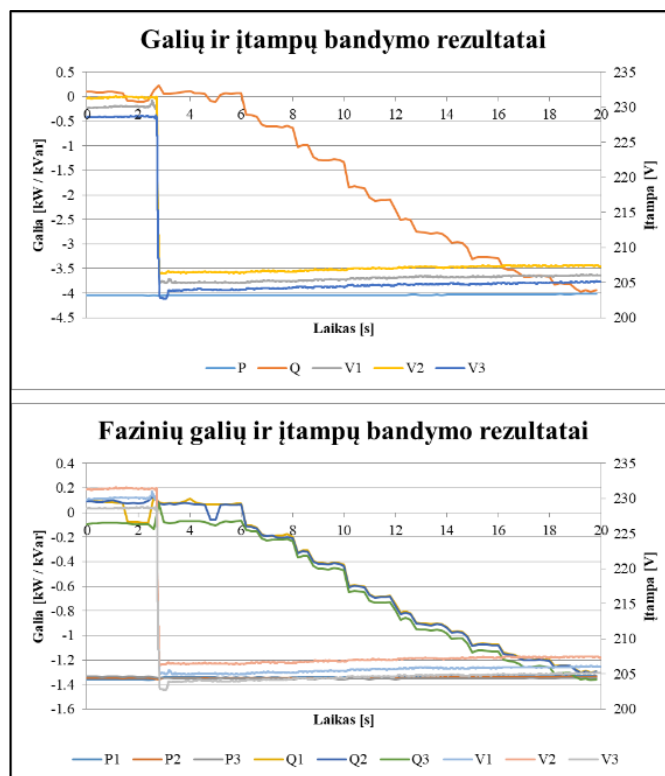
1. įtampa pakeista iš 400 V iki 360 V ir palaikoma;
2. įtampa pakeista iš 360 V iki 400 V ir palaikoma;
3. įtampa pakeista iš 400 V iki 430 V ir palaikoma;
4. įtampa pakeista iš 430 V iki 400 V ir palaikoma.

Šie aiškūs laipsniški įtampos pokyčiai leido tiksliai išmatuoti keitiklio kompensavimo elgseną esant skirtingoms indukcinėms sąlygoms. Tikslas buvo nustatyti, ar įvedus išorinį induktyvumą, būtų galima greičiau ar stipriau reaktyviosios galios atsakus, o tai galiausiai užtikrintų efektyvesnę įtampos stabilizavimą.

### 8.1. Baziniai bandymai be induktorių

Pirmajame eksperimente, atliktame be jokių išorinių induktorių ( $X_1/R = 0.22$ ), keitiklis demonstravo laukiamą elgseną, remiantis ankstesniais stebėjimais. Aktyvioji galia išliko pastovi viso bandymo metu, o tai rodo stabilų galios konversiją nepakitusios apkrovos sąlygomis.

Reaktyvioji galia pradėjo keistis praėjus maždaug po 3,2 sekundės po kiekvieno įtampos žingsnio taikymo. Ji palaipsniui mažėjo nuo 0 iki neigiamų 4 kVAr per maždaug 13 sekundžių. Dėl šios reaktyviosios galios injekcijos įtampa padidėjo maždaug 2–4 V, o tai patvirtina, kad keitiklio kompensavimo mechanizmas buvo aktyvus ir funkciškai suderintas su numatytu atsaku, nors įtampos padidėjimas ir buvo nedidelis.



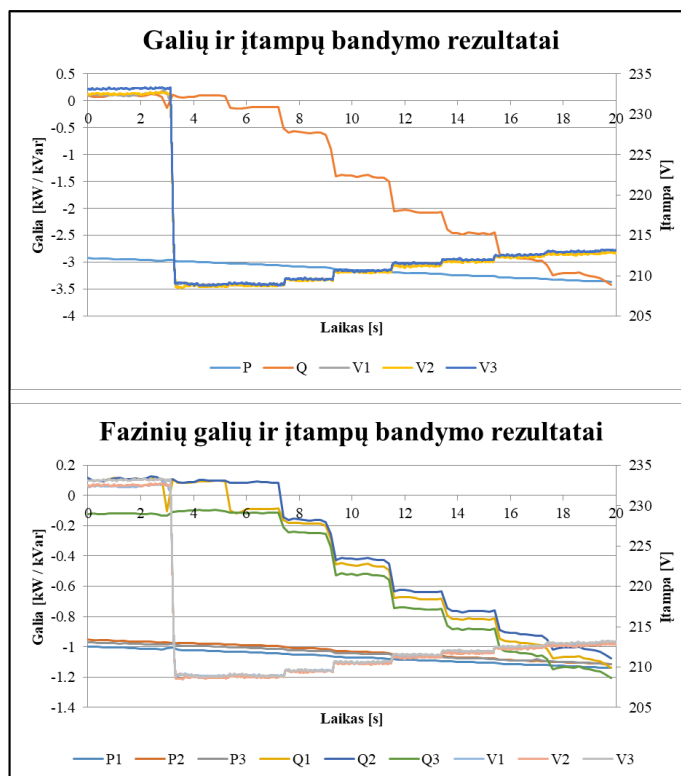
**19 pav.** Bazinio bandymo rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 46-49 pav.)

## 8.2. Bandymai su trifaziu induktoriumi su 1,33 mH induktyvumu

Antrajame eksperimente ( $X_2/R = 0.6$ ), prie sistemos prijungus 1,33 mH trifazį induktorių, keitiklis parodė panašų kompensavimo modelį kaip ir baziniu atveju, tačiau su akivaizdžiai padidėjusiu efektu. Aktyvioji galia išliko pastovi viso bandymo metu, o tai rodo, kad indukcinė apkrova neturėjo įtakos keitiklio gebėjimui palaikyti aktyviosios galios tiekimą.

Reaktyvioji galia pradėjo keistis praėjus maždaug 2 sekundėms po kiekvieno įtampos pasikeitimo – anksčiau nei pirmajame eksperimente – ir toliau tolygiai didėjo per visą likusio matavimo laikotarpį (per 14 sekundžių). Nors šį kartą reaktyvioji galia kito tik 3,5 kVAr, šis nuolatinis kitimas lėmė žymiai didesnę įtampos atsigavimą: įtampos padidėjimas pakilo nuo pradinių 1–2 V, stebėtų baziniu atveju, iki maždaug 7 V.

Šis rezultatas rodo, kad pridėjus 1,33 mH induktorių, padidėjo keitiklio kompensavimo atsakas tiek greičio, tiek efektyvumo požiūriu. Tai reiškia, kad išorinis induktyvumas gali atlikti pagrindinį vaidmenį stiprinant keitiklio įtampos palaikymo galimybes.



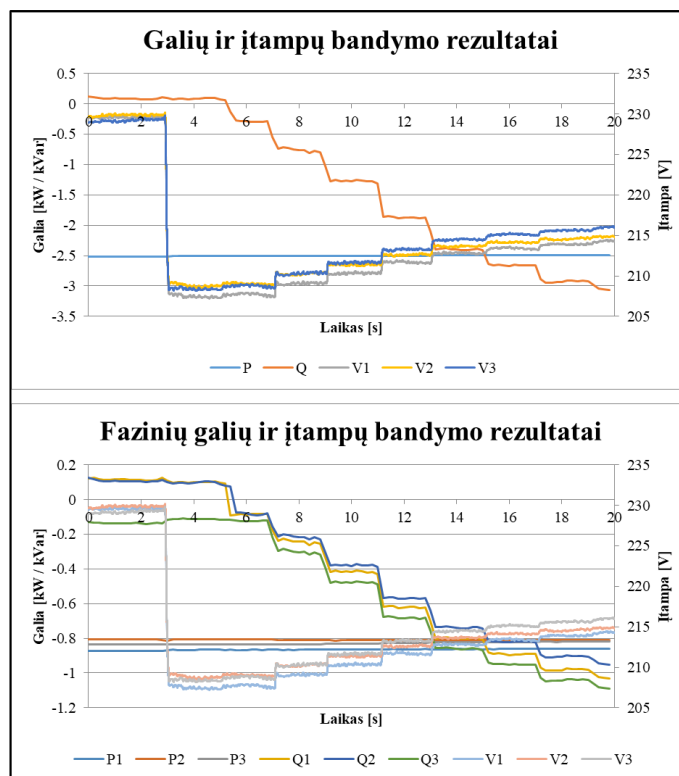
**20 pav.** Bandymo su trifaziu induktoriumi su 1,33 mH induktyvumu rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 50-53 pav.)

### 8.3. Bandymai su trifaziu induktoriumi su 3.1 mH induktyvumu

Trečiajame eksperimente ( $X_3/R = 1.22$ ), naudojant 3.1 mH trifazį induktorių, keitiklio elgsena taip pat atitiko ankstesnius bandymus, tačiau įtampos kompensavimo poveikis tapo dar ryškesnis. Aktyvioji galia išliko pastovi viso matavimo metu, patvirtindama, kad papildomas induktyvumas netrukdo aktyviosios galios tiekimui (nedidelis pasikeitimas atsirado dėl padidėjusio debesuotumo, tai taip pat patvirtina, stabilus jo kitimas).

Reaktyvioji galia pradėjo keistis praėjus maždaug 2,2 sekundės po įtampos žingsnio taikymo ir toliau tolygiai kito likusį matavimą trukusį 14,4 sekundės. Šiuo atveju reaktyvioji galia padidėjo nuo maždaug 0,1 kVAr iki 1 kVAr. Nors absoliuti reaktyviosios galios vertė buvo mažesnė nei ankstesniame eksperimente, poveikis įtampai buvo žymiai didesnis: įtampa padidėjo apie 12 V, o tai atitinka maždaug 30 % pradinio įtampos kritimo.

Šie rezultatai rodo, kad su 3.1 mH induktoriumi keitiklis sugebėjo pasiekti stipresnę įtampos atkūrimą negu su 1.33 mH induktoriumi. Tai pabrėžia ne tik reaktyviosios galios dydžio svarbą, bet ir tai, kaip keitiklis sąveikauja su išorine indukcinė apkrova, kai yra siekiama pagerinti bendrą kompensavimo efektą.

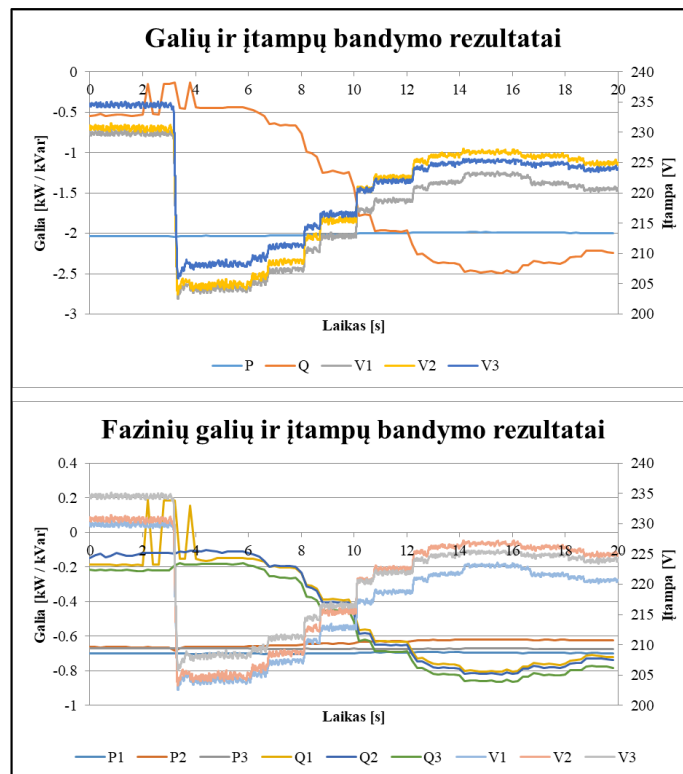


**21 pav.** Bandymo su trifaziu induktoriumi su 3,1 mH induktyvumu rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 54-57 pav.)

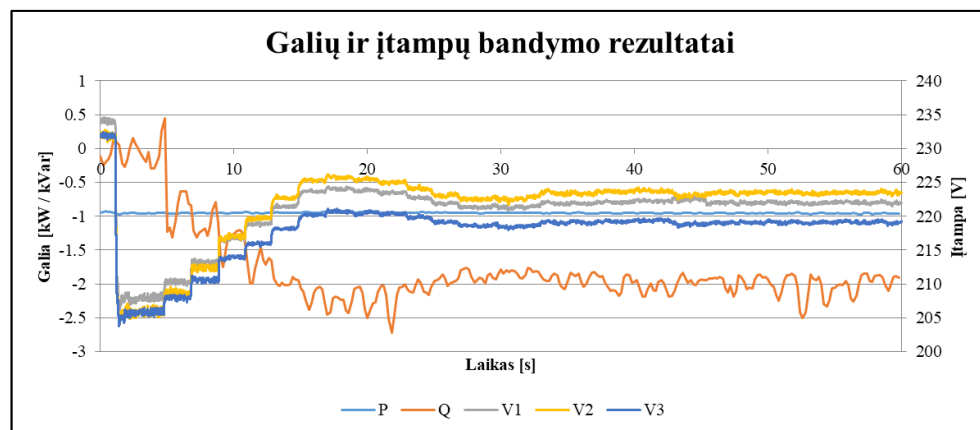
#### 8.4. Bandymai su trifaziu induktoriumi su 9,42 mH induktyvumu

Tas pats eksperimentas buvo pakartotas naudojant 9,42 mH trifazį induktorių ( $X_4/R = 3.32$ ) ir rezultatai atitiko tas pačias bendrąsias tendencijas, pastebėtas ankstesniuose bandymuose, nors efektai buvo žymiai sustiprinti.

Kaip ir visais ankstesniais atvejais, aktyvioji galia išliko stabili viso bandymo metu. Tačiau reaktyviosios galios atsakas buvo gana nedidelis, per tą patį laiko intervalą kintantis nuo  $-0,14$  kVAr iki  $-0,8$  kVAr. Nepaisant riboto reaktyviosios galios dydžio, įtampos kompensavimas buvo labai efektyvus: keitklis pasiekė maždaug 33 V įtampos atkūrimą, beveik atkurdamas sistemos įtampą beveik iki pradinės vertės. Taip pat, kadangi 20 sekundžių matavimo kreivėje matomas nedidelis galios nuokrypis į mažėjimo pusę, buvo padaryti pakartotiniai, 60 sekundžių matavimai, kurių metu buvo įsitikinta, kad įtampa nusistovi kompensuotoje būsenoje.



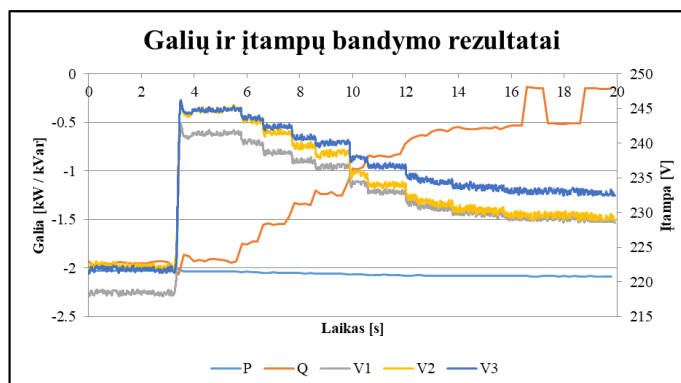
**22 pav.** Bandymo su trifaziu induktoriumi su 9.42 mH induktyvumu rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V



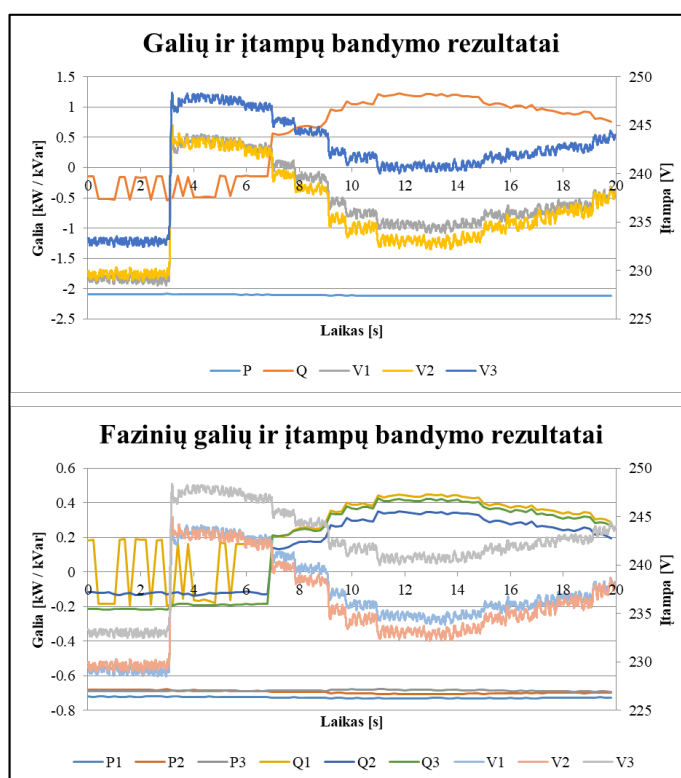
**23 pav.** Bandymo su trifaziu induktoriumi su 9.42 mH induktyvumu rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V (matavimai pratesni iki 60s, kad įsitikinti, kad sistema nusistovi)

Šio eksperimento metu gerokai išryškėjo reiškinys, pastebėtas ir ankstesniuose bandymuose, tačiau anksčiau jis nebuvo pakankamai reikšmingas ir nereikalavo išsamios apžvalgos. Ankstesniais atvejais įtampos kompensavimo efektai buvo per maži, kad sukeltų kokių nors pastebimų šalutinių poveikių. Tačiau šiame eksperimente pasiekus stipresnę kompensaciją, problema tapo pakankamai didelė ir į ją teko atkreipti dėmesį: kai bandymo metu buvo atkuriamą įtampa nuo 360 V iki 400 V, keitklis trumpam viršijo norimą 400 V vertę, sukeldamas laikiną įtampos šuolį iki 425 V, o tik palapsniui nusistovėjus įtampa sugrįžo į nominalias vertės.

Kita vertus, ši problema nekilo, kai įtampa buvo pakeista nuo 400 V iki 430 V. Kadangi tai buvo įtampos padidėjimas, o ne atsigavimas po kompensuoto įtampos kritimo, todėl papildomo viršijimo nepastebėta. Tačiau reikėtų atkreipti dėmesį, kad jei sistema staiga padidėtų nuo 360 V iki 430 V, keitiklis greičiausiai išsijungtų dėl vidinių įtampos apsaugos ribų viršijimo. Tai pabrėžia, kad reikia atidžiai kontroliuoti atsigaunančios įtampos pokyčius, kai yra taikomi stiprūs įtampos kompensavimo efektai, ypač jei dirbama netoli keitiklio veikimo ribų.



**24 pav.** Bandymo su trifaziu induktoriumi su 9.42 mH induktyvumu rezultatai keičiant įtampą iš 360 V iki 400 V



**25 pav.** Bandymo su trifaziu induktoriumi su 9.42 mH induktyvumu rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 400 V (kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 58-61 pav.)

### 8.5. Bandymų su trifaziais induktoriais išvados

Visų keturių eksperimentų rezultatai atskleidžia aiškia keitiklio įtampos kompensavimo elgsenos tendenciją. Didėjant išorinio induktoriaus dydžiui, įtampos kompensacija tampa žymiai efektyvesnė:

įtampos pokytis padidėja nuo 1–2 V baziniu atveju ( $X_4/R = 0,22$ ) iki net 33 V, kai naudojamas 9,42 mH induktorius ( $X_4/R = 3,32$ ). Įdomu tai, kad ši pagerinta kompensacija buvo pasiekta, kai keitiklio reaktyvios galios pasikeitimas buvo daug mažesnis. Baziniu atveju, be jokio induktoriaus, reaktyvios galios pasikeitimas siekė net 4,0 kVAr, tačiau gauta įtampos kompensacinis kitimas buvo minimalus ir vos pastebimas. Priešingai, prijungus didelį išorinį induktorių, užteko tik 0,8 kVAr reaktyviosios galios, kad būtų atkurta apie 80 % viso įtampos kritimo. Tai rodo, kad bazinėje konfigūracijoje keitiklis jau veikė maksimaliu galingumu, bandydamas kompensuoti įtampos kritimą, tačiau šių pastangų efektyvumą ribojo maža sistemos varža. Pridėtas induktyvumas nepakeitė keitiklio logikos – jis pakeitė sistemos atsaką, leisdamas net ir nedideliame reaktyviosios galios kiekiui sukelti daug didesnę įtampos korekciją.

Šie rezultatai atitinka naudojamą teoriją. Kaip ir buvo prognozuota, padidinus reaktyviają komponentę ( $X$ ) grandinėje, pailgėja  $X \times I_L$  vektoriaus ilgis, o tai padidina įtampos jautrumą fazės kampo koregavimui. Tai leidžia gauti didesnius įtampos pokyčius esant mažesnėms reaktyviosios galios vertėms. Kitaip tariant, ilgesnis indukcinis vektorius pagerina keitiklio geometrinį svertą keičiant fazės kampą, todėl galima efektyviau kompensuoti įtampą naudojant tą patį arba net mažesnę reaktyviosios galios kiekį.

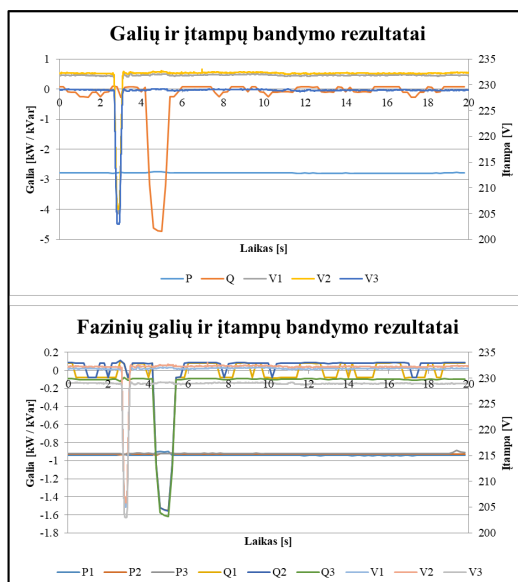
Tai patvirtina, kad įtampos reguliavimo efektyvumas priklauso ne tik nuo pasirinktos įtampos valdymo strategijos, bet ir nuo aplinkinės sistemos elektrinių savybių. Išorinių indukcinų komponentų konfigūracija daro tiesioginę įtaką reaktyviosios galios valdymo poveikiui sujungimo taške, o tai pabrėžia, kad konfigūruojant keitiklį, tinkamas sistemos įvertinimas yra ne mažiau svarbus nei valdymo logika.

**2 lentelė.** Bandymų su trifaziais induktoriais rezultatai

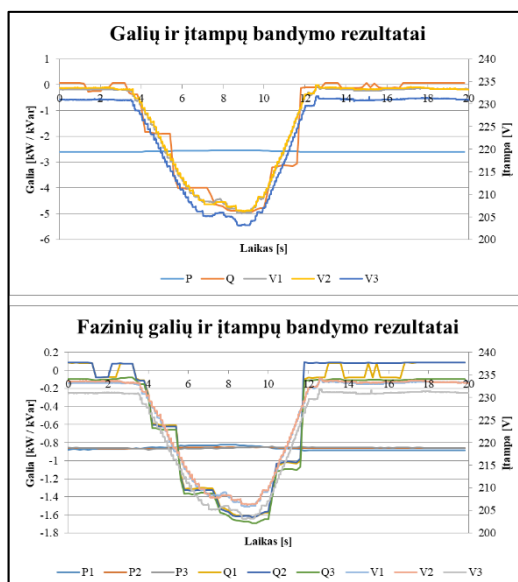
Eksperimentas	$X/R$	Reaktyviosios galios kitimo reikšmės (vid.), kVAr	Įtampos kitimo reikšmės (vid.), V
Be išorinio induktoriaus (bazinis)	0,22	4 kVAr	1 – 2 V
Trifazis induktorius su 1,33 mH induktyvumu	0,6	3,5 kVAr	7 V
Trifazis induktorius su 3.1 mH induktyvumu	1,22	0,9 kVAr	12 V
Trifazis induktorius su 9,42 mH induktyvumu	3,32	0,66 kVAr	33 V

## 9. Eksperimentiškai tyrinėjama PID valdymo įtaka keitikliui

Šiame tyrime vertintas keitiklis turėjo konfigūruojamą PID valdymą reaktyviajai galiai valdyti, reaguojant į įtampos nukrypimus. Siekiant įvertinti jo veikimą, kiekvienas PID parametrų rinkinys buvo išbandytas dviem atskiromis sąlygomis: vykstant trumpalaikiams įtampos kritimams ir ilgalaikiams įtampos kritimams. Pagrindinis tikslas buvo nustatyti, ar keitiklis aptikęs įtampos trikdį iš karto suaktyvins reaktyviosios galios gaminimą arba vartojimą, ypač pirmaisiais įtampos kritimo momentais.



26 pav. PID kontrolės rezultatai esant trumpalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės:  $K=1$ ;  $I=0.05$ ;  $D=0.01$ .



27 pav. PID kontrolės rezultatai esant ilgalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės:  $K=1$   $I=0.05$ ;  $D=0.01$ .  
Kitų bandymų rezultatus žr. 1 priedo 62-69 pav.

Eksperimentiniai rezultatai parodė, kad nė viena iš išbandytų PID konfigūracijų efektyviai nereagavo į trumpalaikius įtampos kritimus. Kiekvienu atveju, prieš pradėdant keitiklio reaktyviosios galios

generavimą, buvo maždaug 1–2 sekundžių vėlavimas. Šis vėlavimas pasireiškė nepriklausomai nuo taikomų proporcinių, integralinių ar diferencialinių stiprinimo koeficientų, o tai rodo, kad valdymo atsakas iš esmės yra per lėtas, kad būtų naudingas greitai įtampos korekcijai. Šie duomenys rodo vidinius vėlavimus arba konservatyvią valdymo logiką keitiklio programinėje įrangoje.

Nepaisant šio apribojimo, viena PID konfigūracija – konkrečiai  $K=1$ ,  $I=0,05$  ir  $D=0,01$  – ilgalaikio įtampos kritimo bandymo metu davė palankesnę rezultatą. Esant ilgalaikiam įtampos kritimui, šis derinimas leido keitikliui palaipsniui suderinti savo reaktyviosios galios išvestį su įtampos kritimu. Nors atsakas išliko dalinai uždelstas, reaktyvioji galia pakankamai tiksliai sekė įtampos kritimo profilį, o tai rodo, kad keitiklis sugebėjo prisitaikyti prie lėtesnių įtampos pokyčių. Ši konfigūracija parodė, kad gerai suderintas PID valdymas gali sėkmingai aptikti ir reaguoti į ilgalaikius nuokrypius, net jei jam trūksta greitiems pereinamiesiems procesams reikalingo jautrumo.

## Išvados

1. Nustatyta, kad universiteto laboratorijos tinklo varžų  $X/R$  santykis yra lygus 0,22, o tai yra gerokai mažiau nei optimali vertė ( $X/R \geq 1$ ), kuri yra reikalinga efektyviam įtampos kompensavimui.
2. Eksperimentai parodė, kad keitiklis išsijungė iš karto, kai įtampa nukrenta žemiau 200 V, bet atlaiko trumpalaikę 300 V įtampa. Taip pat keitiklis išsijungia, kai įtampa viršija 450 V.
3. Eksperimentai parodė, kad reaktyvioji galia pradeda reaguoti maždaug po 2 sekundžių nuo įtampos kritimo, o stabilizacija įvyksta per 10–13 sekundžių. Šie rezultatai patvirtina, kad reaktyviosios galios valdymo atsakas yra santykinai lėtas.
4. Eksperimentai parodė, kad aktyvioji galia į programinius apribojimus reagoja beveik akimirksniu, per sekundės dalį, o tai rodo jos tinkamumą greito valdymo taikymams arba sintetinio tinklo palaikymo funkcijoms.
5. Eksperimentai parodė, kad įdiegus skirtingo dydžio išorinius induktorius ir veikiant keitiklio reaktyviosios galios valdymo režimu, įtampos svyravimus galima beveik visiškai kompensuoti, kai  $X_4/R = 3.32$ .
6. Eksperimentai parodė, kad nors labai trumpalaikių įtampos kritimų negalima efektyviai sušvelninti dėl uždelsto reaktyviosios galios atsako, ilgesni įtampos nuokrypiai buvo sėkmingai stabilizuoti. Tai parodo, kad tinkamai parinkus papildomą induktorių ir keitiklio nustatymus, galima gerokai pagerinti įtampos reguliavimą ir tinklo pralaidumą.

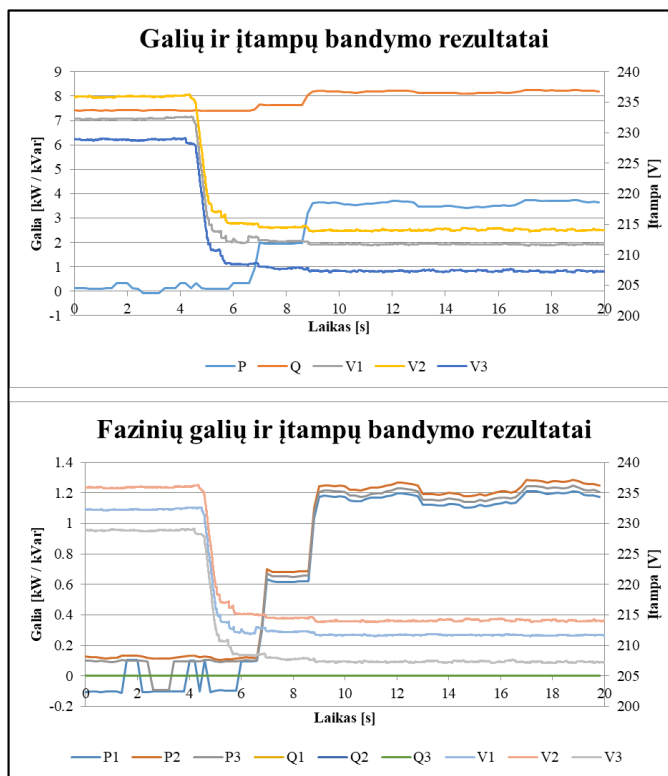
## Literatūros sąrašas

1. ALMEIDA, Dilini, Jagadeesh PASUPULETI, Janaka EKANAYAKE. *Comparison of reactive power control techniques for solar PV inverters to mitigate voltage rise in low-voltage grids*. Electronics, 2021.
2. YAZDANI, A., IRAVANI, R. *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2010. ISBN 978-0-470-52156-4.
3. ROCABERT, J., LUNA, A., BLAABJERG, F., RODRIGUEZ, P. *Control of power converters in AC microgrids*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11), 4734–4749.
4. ÅSTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T. *PID controllers: theory, design, and tuning*. 2nd ed. Research Triangle Park: ISA, 1995. ISBN 978-1-55617-516-9.
5. SAHOO, S. K. *A review of control strategies of power converters for PV systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59, 492–504.
6. MOHAN, N., UNDELAND, T. M., ROBBINS, W. P. *Power electronics: converters, applications, and design*. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2003. ISBN 978-0-471-22693-2.
7. TEODORESCU, R., LISERRE, M., RODRIGUEZ, P. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011. ISBN 978-0-470-05751-3.
8. BLAABJERG, F., TEODORESCU, R., LISERRE, M., TIMBUS, A. V. *Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5), 1398–1409.
9. BOLLEN, M. H. J. *Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions*. New York: IEEE Press, 2000. ISBN 978-0-7803-4713-7.
10. LITGRID AB. *Reikalavimai sintetinės inercijos ir galios svyravimų slopinimo įrengimui: priedas Nr. 1091930\_52*. Vilnius, 2023.
11. SVINKŪNAS, G., NAVICKAS, A. *Elektros energetikos pagrindai: mokomoji knyga*. 3-ioji pataisyta ir papildyta laida. Kaunas: Technologija, 2024. ISBN 978-609-02-1872-3.
12. ALBUQUERQUE, Fabio L., Adélio J. MORAES, Geraldo C. GUIMARÃES, Sérgio M.R. SANHUEZA, Alexandre R. VAZ. *Photovoltaic solar system connected to the electric power grid operating as active power generator and reactive power compensator*. Solar Energy, 2010, 84.
13. WANG, Xianbo, Zhixin YANG, Bo FAN, Wei XU. *Control strategy of three-phase photovoltaic inverter under low-voltage ride-through condition*. Mathematical Problems in Engineering, 2015, Article ID 790584.
14. AFRIN, Nadia, Fuwen YANG, Junwei LU. *Voltage support strategy for PV inverter to enhance dynamic voltage stability of islanded microgrid*. Electrical Power and Energy Systems, 2020, 121, 106059. p. 1–10. ISSN 0142-0615.
15. PENIZZOTTO, F., PRINGLES, R. M., OLSINA, F. *Real options valuation of photovoltaic power investments in existing buildings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019.
16. EN 50160. *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*. Brussels: CENELEC, 2010.
17. IEEE. IEEE Std 1159-2019: *Recommended practice for monitoring electric power quality*. New York: IEEE, 2019.
18. OGATA, K. *Modern control engineering*. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. ISBN 978-0-13-615673-4.

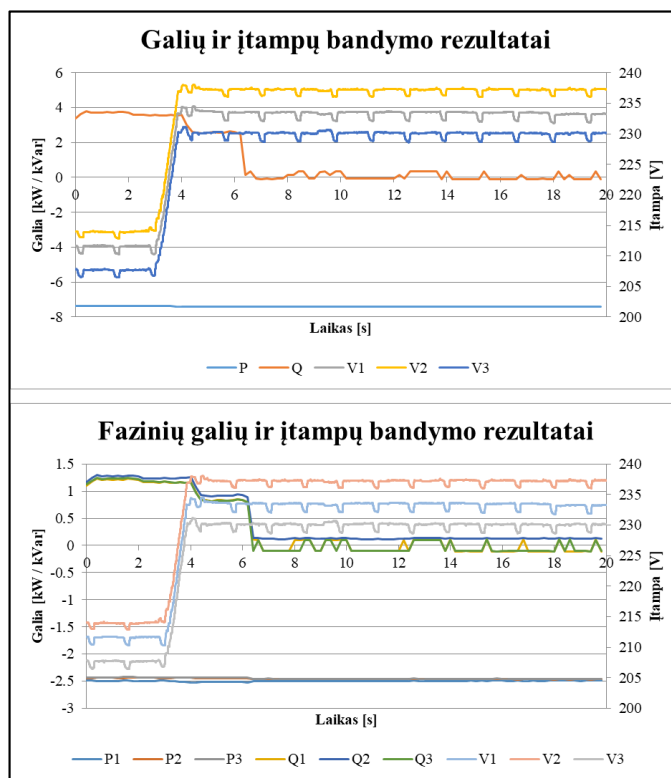
19. KUNDUR, P. *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, 1994. ISBN 978-0-07-035958-1.
20. MILANOVIC, J. V., et al. *Effect of fault level on voltage sag magnitude and duration*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15(1), 236–241.
21. CIGRÉ. *Benchmarking of control strategies for distributed resources with inverter interfaces*. CIGRÉ Brochure 671, Paris, 2016.
22. VDE. VDE-AR-N 4105:2018-11: *Technical requirements for the connection and parallel operation of generating plants in low-voltage networks*. Berlin: VDE Verlag, 2018.
23. IEA PVPS. *Do it locally: local voltage support by distributed generation*. IEA PVPS Report T14-08:2017.
24. GUERRERO, J. M., VASQUEZ, J. C., MENOUS, J., VICTOR, M. A., TEODORESCU, R. *Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(6), 158–172.
25. BOLLEN, M. H. J. *The influence of motor reacceleration on voltage sags*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1995, 31(4), 667–674.
26. GUERRERO, J. M., CHANDORKAR, M., LEE, T. L., LOH, P. C. *Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part I: Decentralized and hierarchical control*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(4), 1254–1262.
27. KATIRAEI, F., IRAVANI, M. *Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(4), 1821–1831.
28. TAMRAKAR, U., et al. *A new approach for Volt-VAR control for inverter-connected distributed generation*. In: *Proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2016.
29. TEODORESCU, R., LISERRE, M., RODRIGUEZ, P. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011. ISBN 978-0-470-05751-3.
30. IEEE Std 1547-2018: *Standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces*. New York: IEEE, 2018.

## Priedai

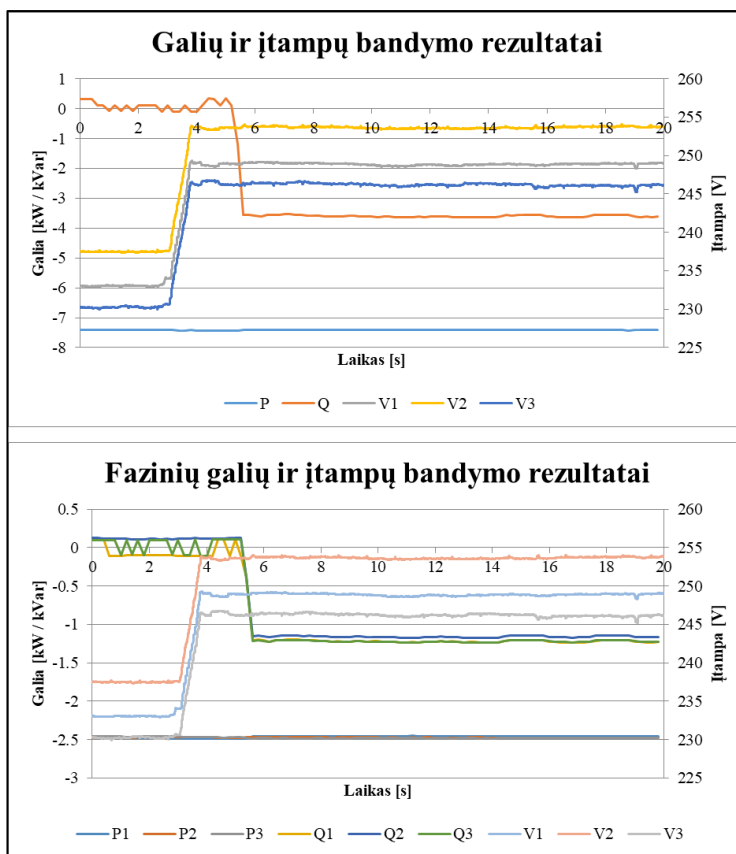
### 1 priedas. Eksperimentų matavimų rezultatai



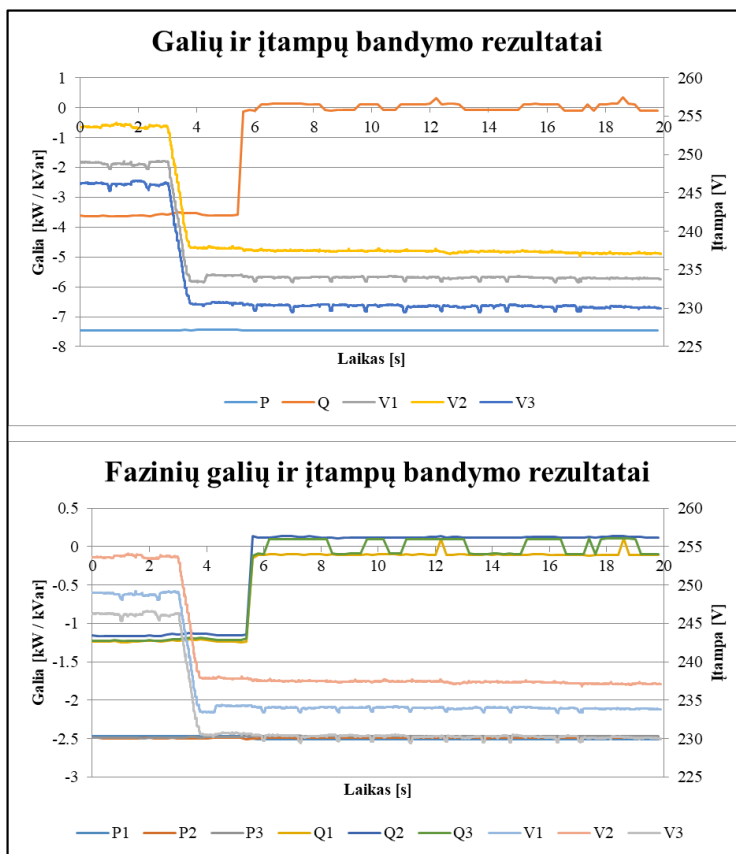
28 pav. „ESO A“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 400V iki 360V



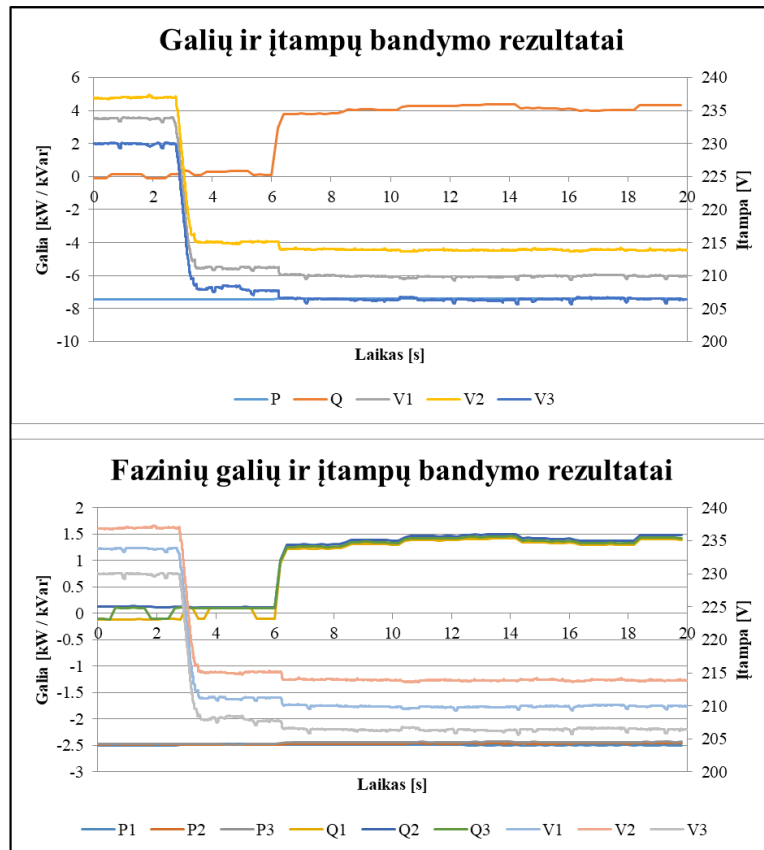
29 pav. „ESO A“ režimo testavimas įtampai kylant nuo 360 V iki 400V



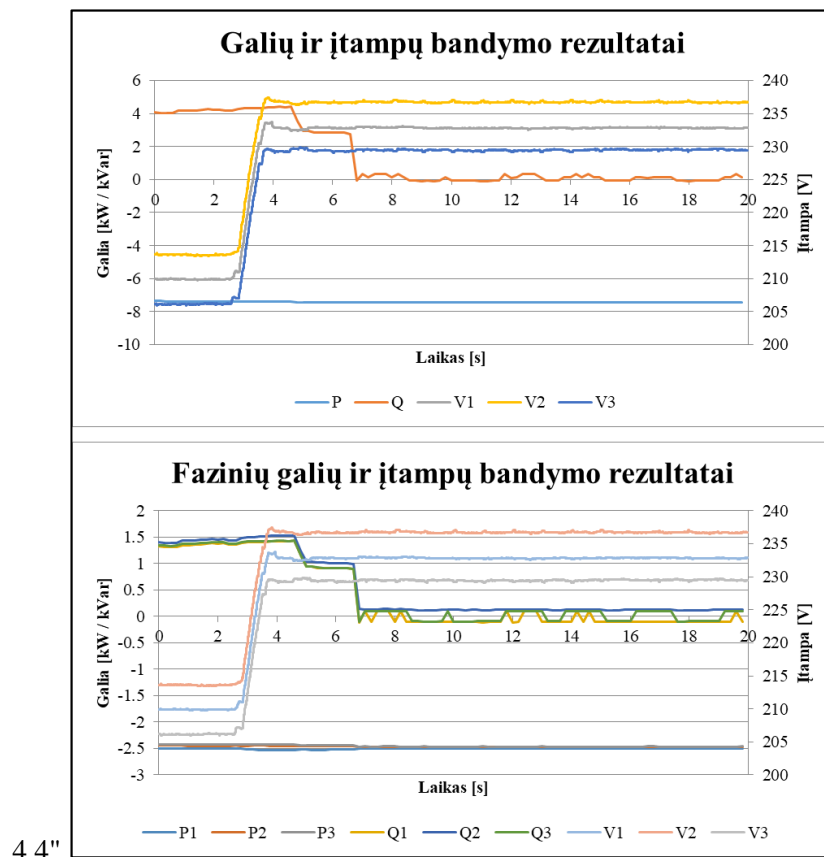
30 pav. „ESO A“ režimo testavimas įtampai kylant nuo 400V iki 430V



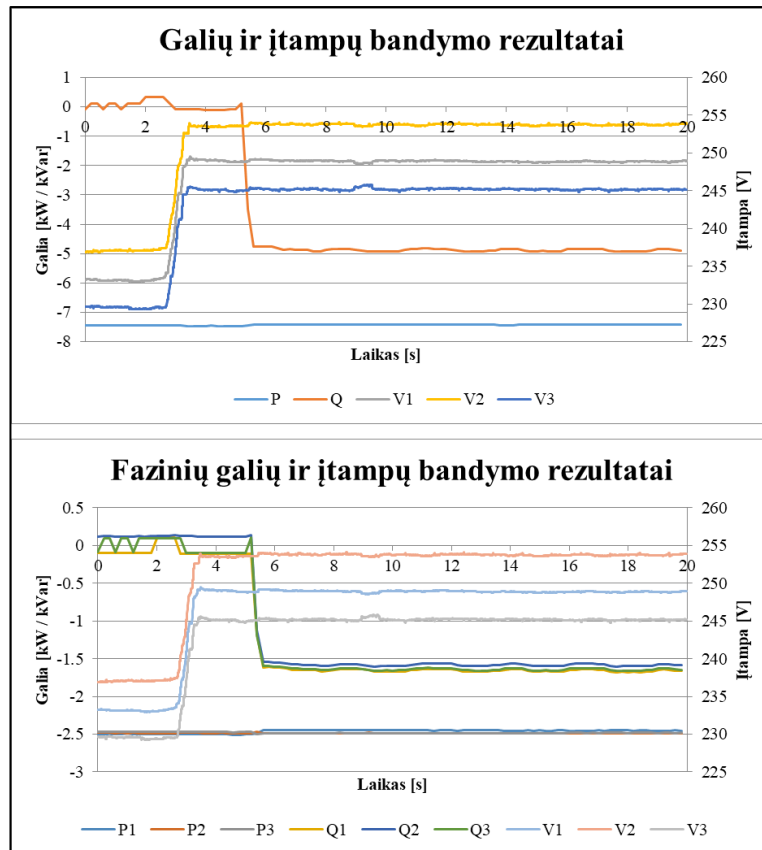
31 pav. „ESO A“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V



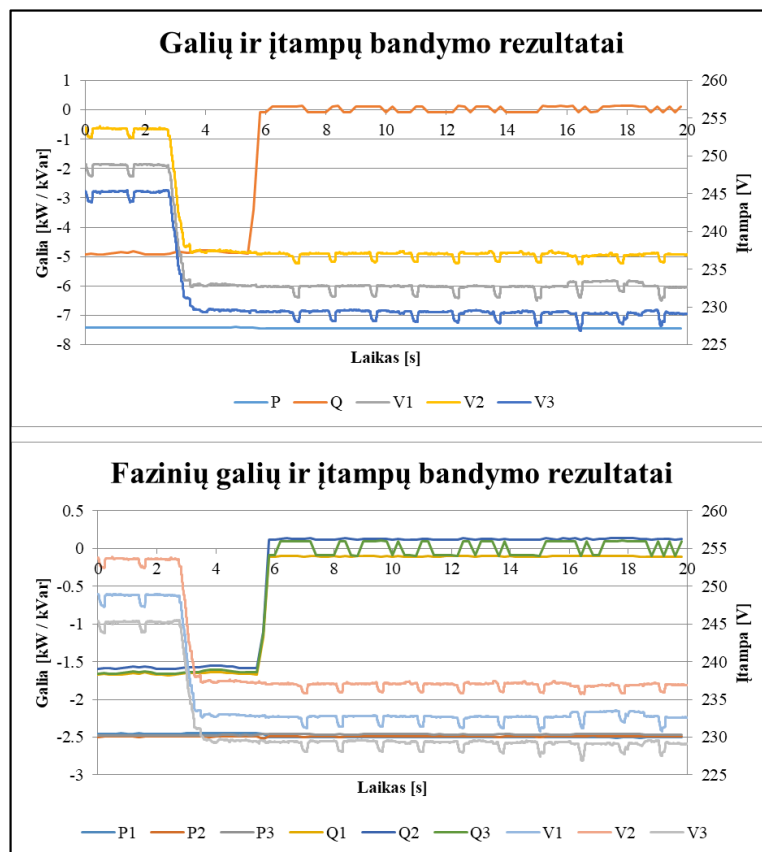
32 pav. „ESO 0,4 kV“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 400V iki 360V



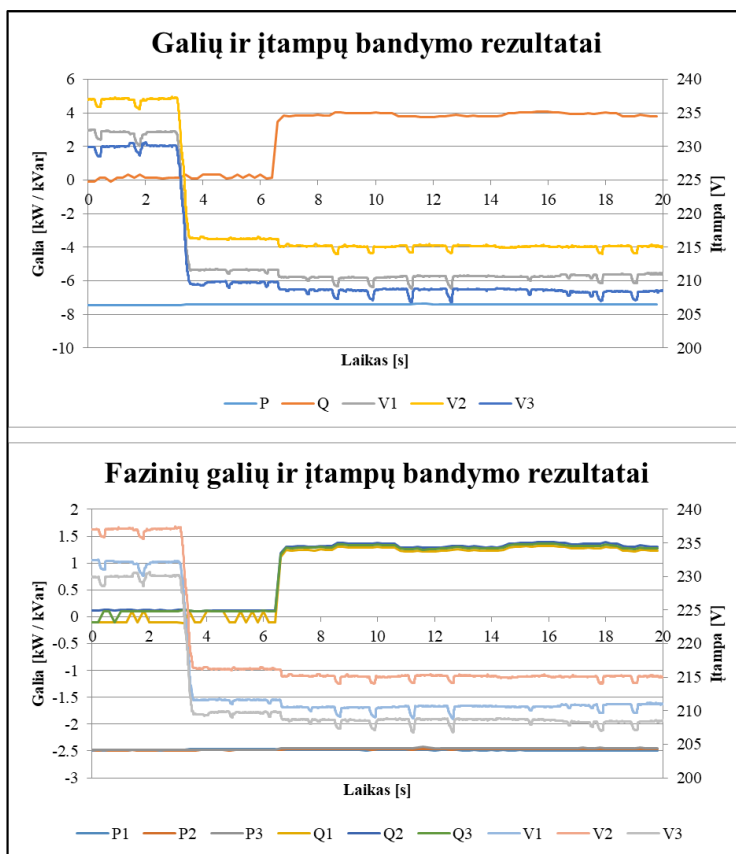
33 pav. „ESO 0,4 kV“ režimo testavimas įtampai kylant nuo 360 V iki 400V



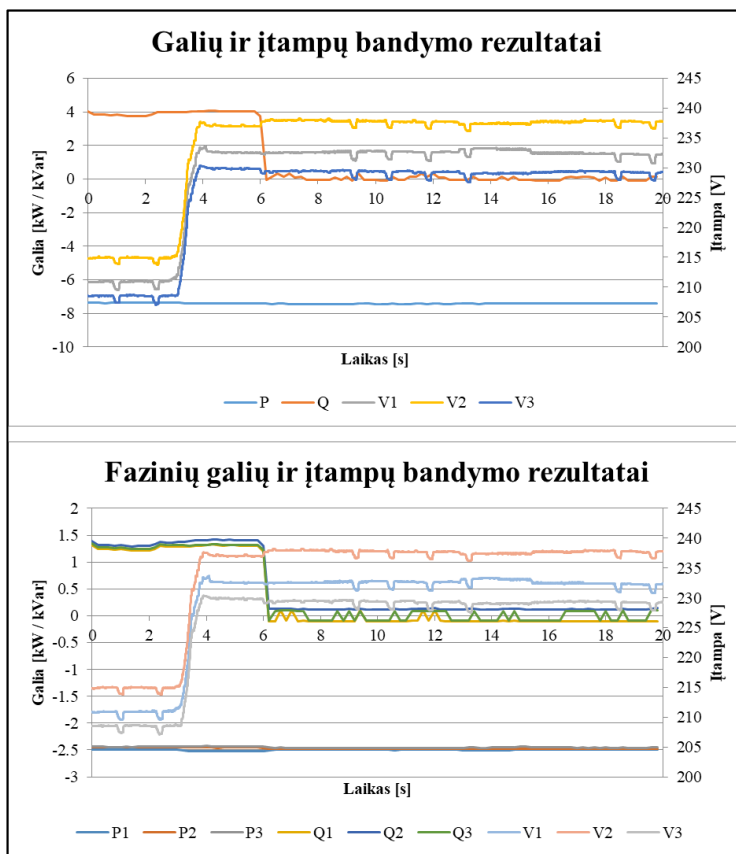
34 pav. „ESO 0,4 kV“ režimo testavimas įtampai kylant nuo 400V iki 430V



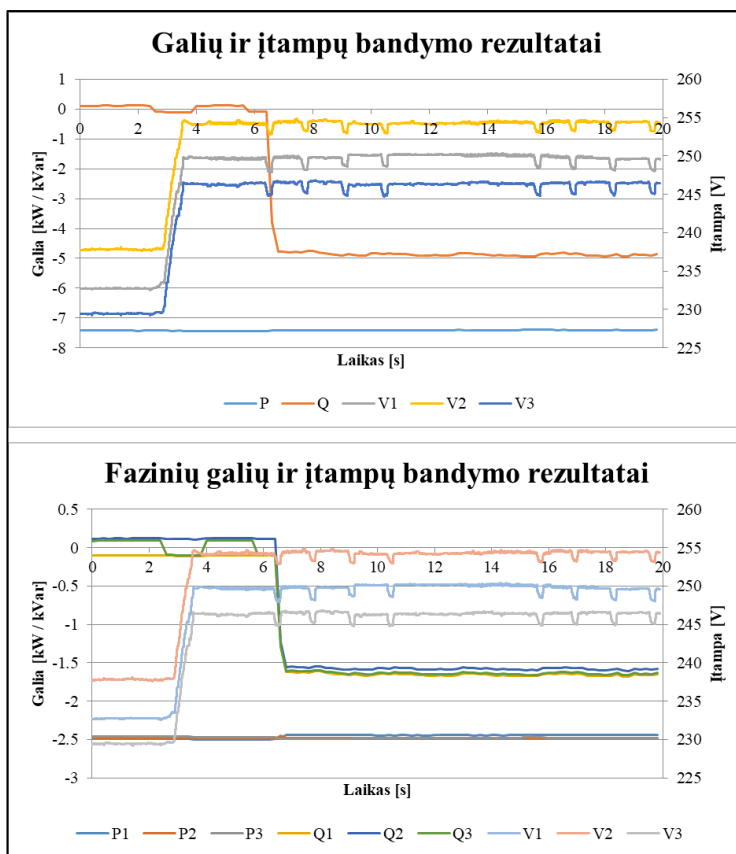
35 pav. „ESO 0,4 kV“ režimo testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V



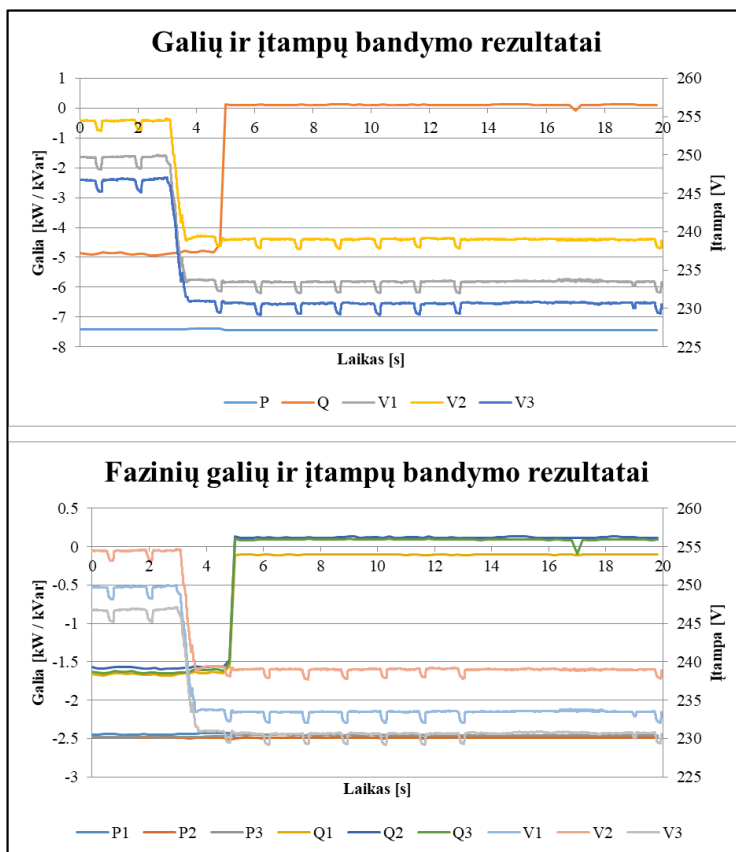
36 pav. „Išplėstinės kreivės“ režimo su siūloma kreive testavimas įtampai krentant nuo 400V iki 360V



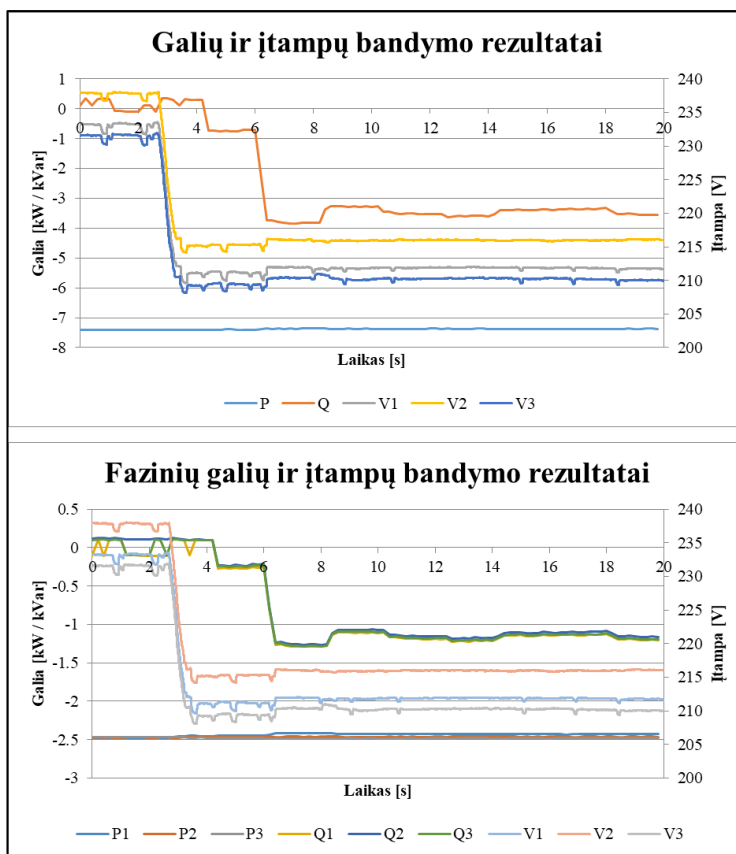
37 pav. „Išplėstinės kreivės“ režimo su siūloma kreive testavimas įtampai kylant nuo 360 V iki 400V



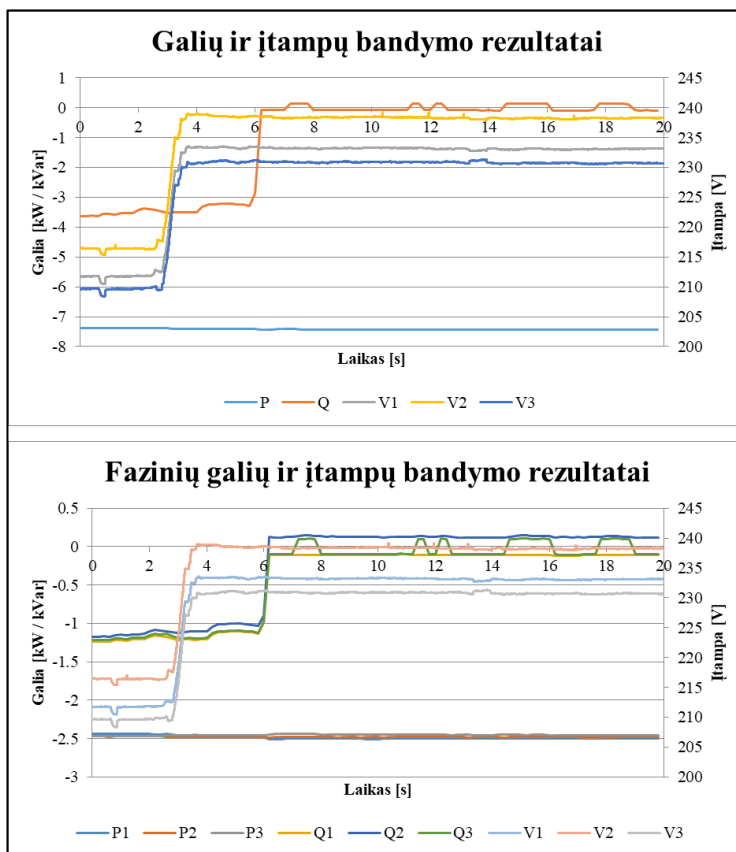
38 pav. „Išplėstinės kreivės“ režimo su siūloma kreive testavimas įtampai kylant nuo 400V iki 430V



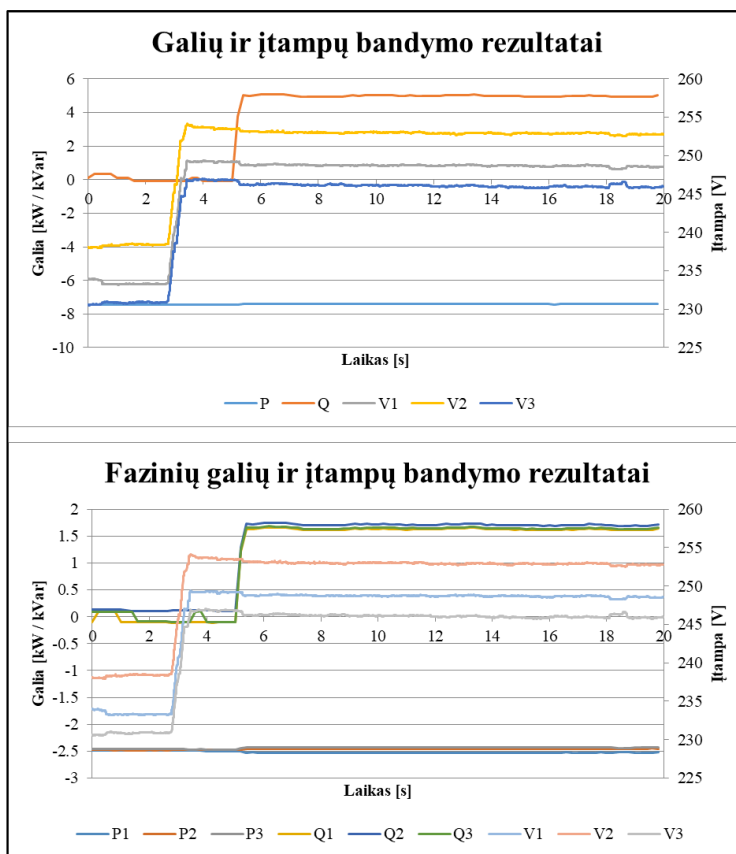
39 pav. „Išplėstinės kreivės“ režimo su siūloma kreive testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V



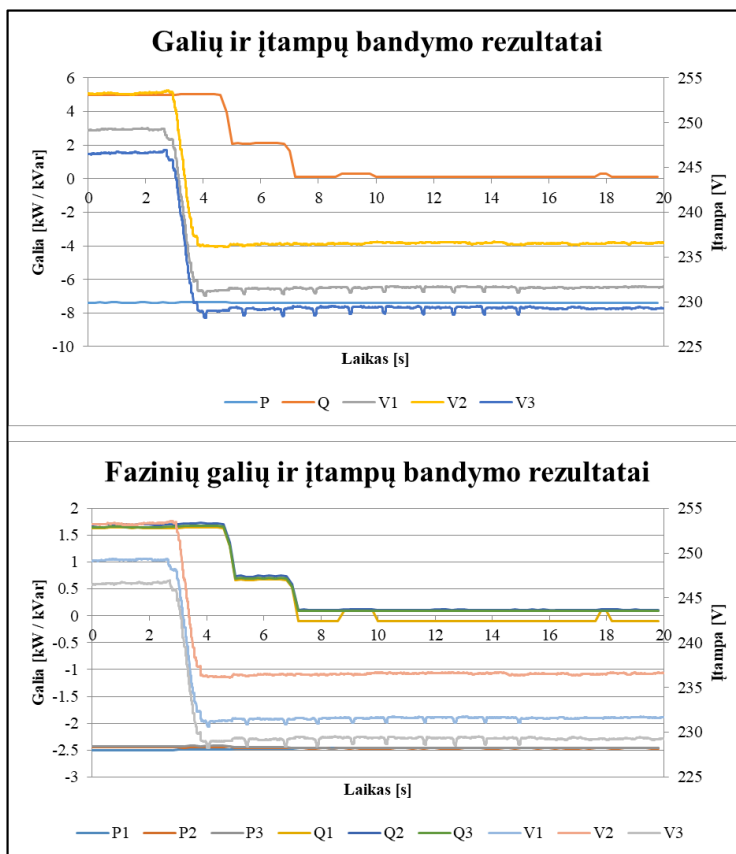
40 pav. „Išplėstinės kreivės“ režimo su modifikuota kreive testavimas įtampai krentant nuo 400V iki 360V



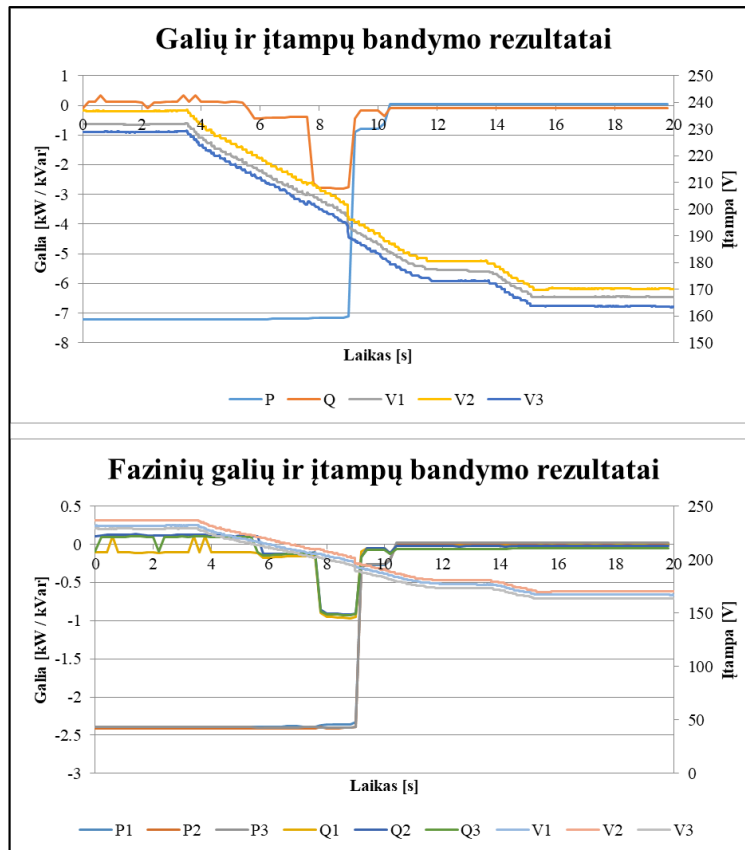
41 pav. „Išplėstinės kreivės“ režimo su modifikuota kreive testavimas įtampai kylant nuo 360 V iki 400V



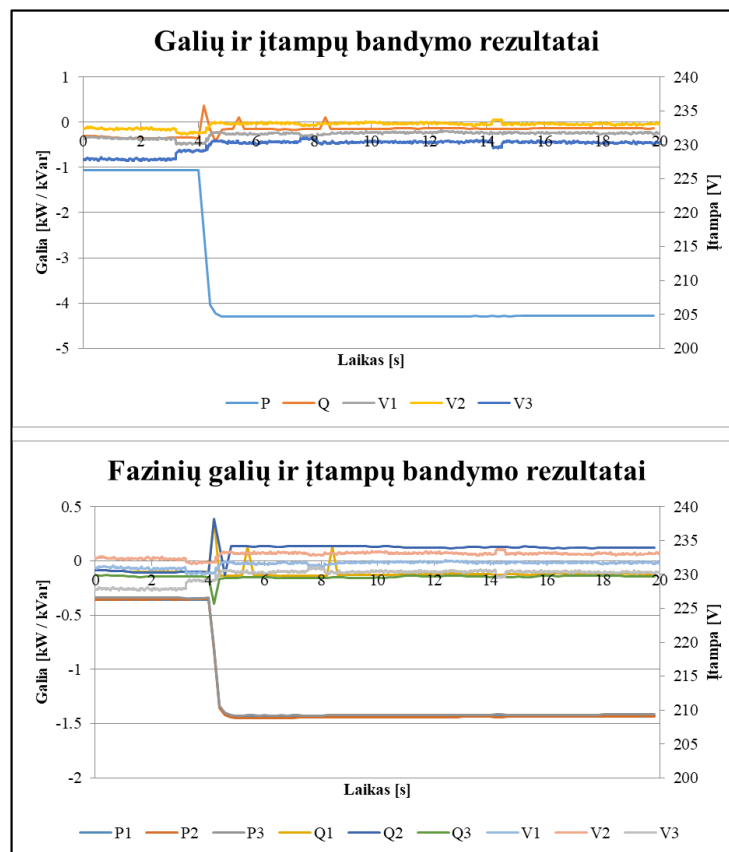
42 pav. „Išplėstinės kreivės“ režimo su modifikuota kreive testavimas įtampai kylant nuo 400V iki 430V



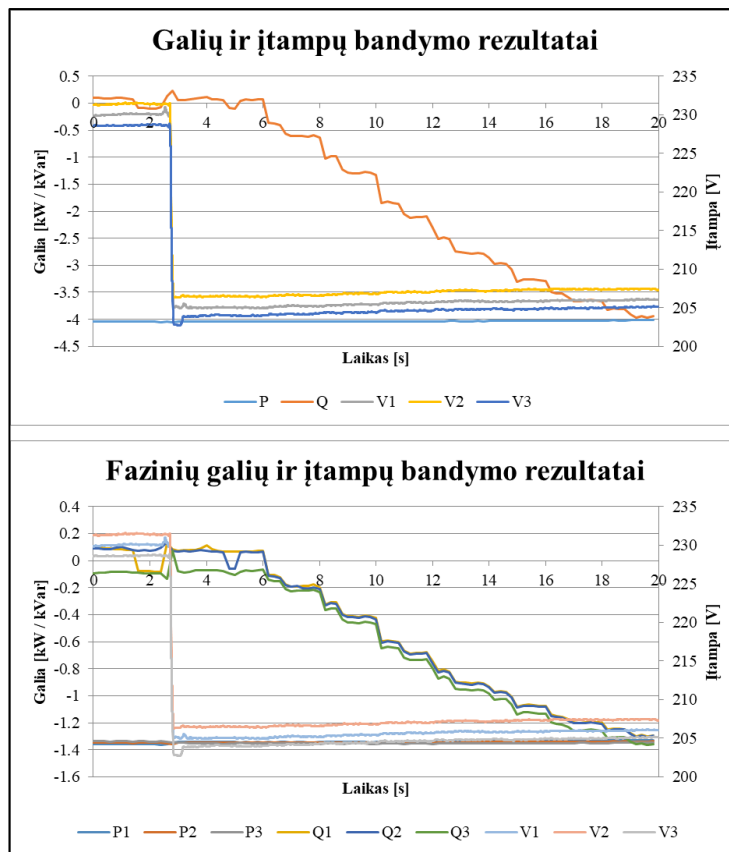
43 pav. „Išplėstinės kreivės“ režimo su modifikuota kreive testavimas įtampai krentant nuo 430V iki 400V



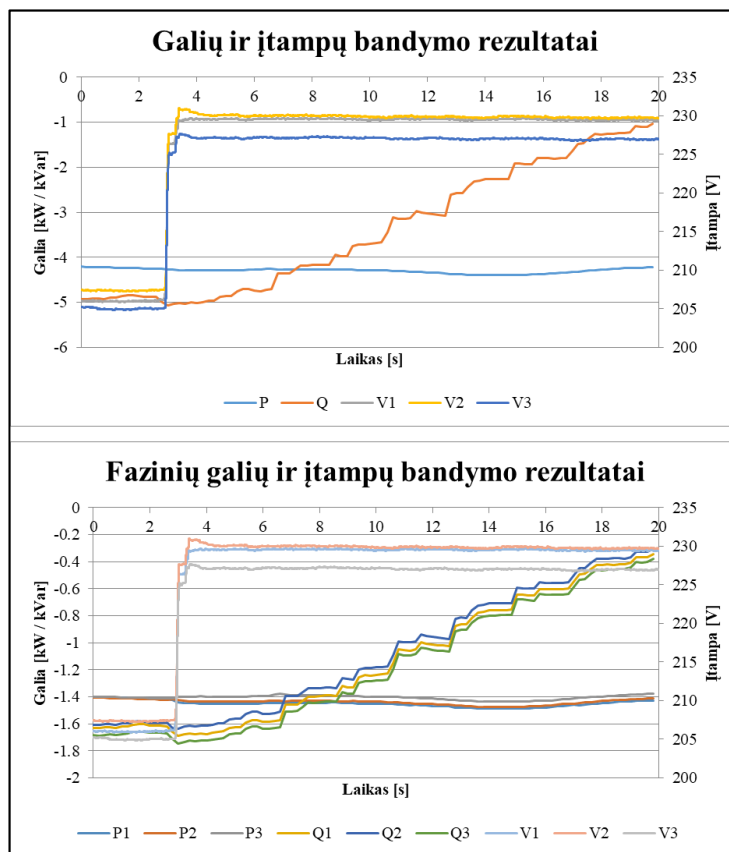
44 pav. Tikrinama keitiklio reakcija į lėtą įtampos žeminimą iki inverterio atsijungimo



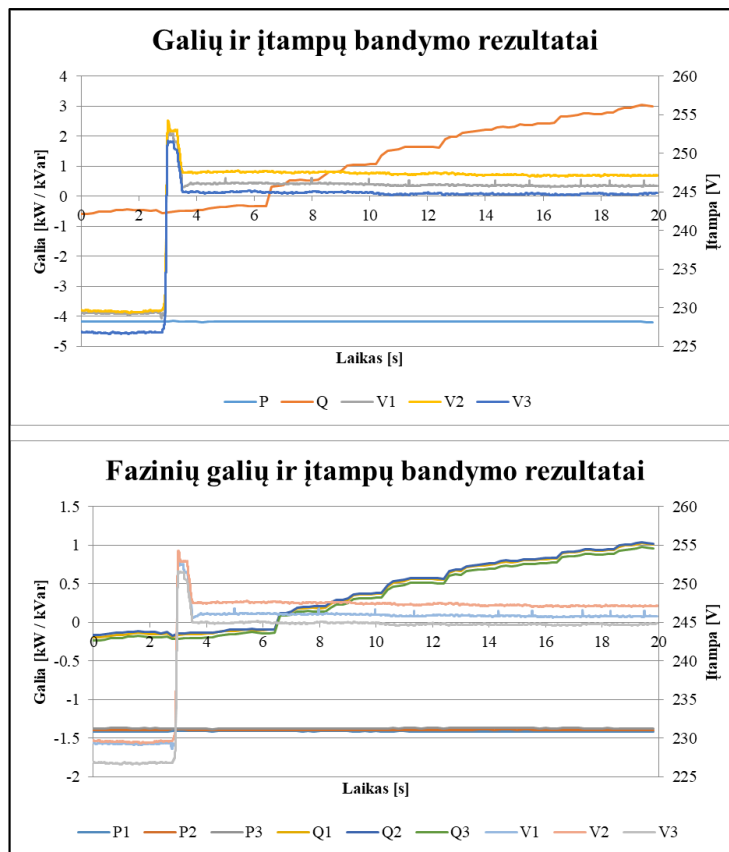
45 pav. Keitiklio reakcija į programinio apribojimo atšaukimą (maksimali galia 10 kW)



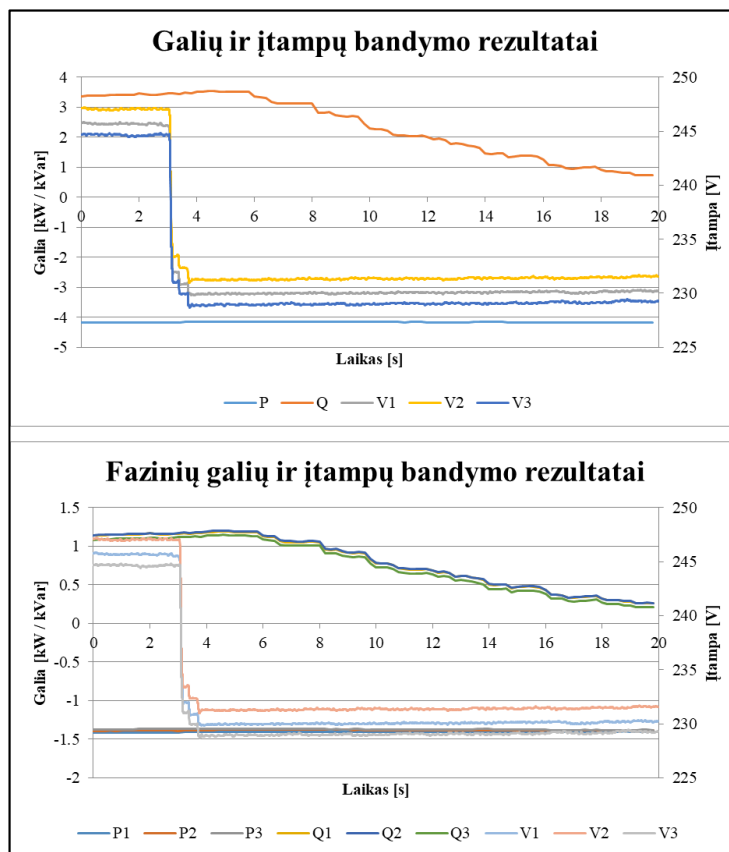
46 pav. Bazinio bandymo rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V



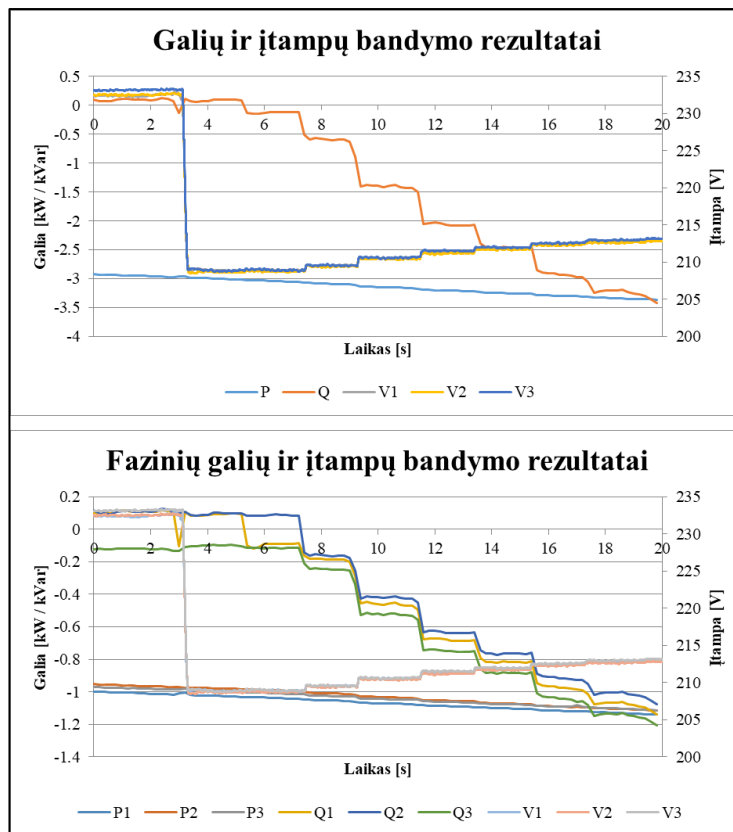
47 pav. Bazinio bandymo rezultatai keičiant įtampą iš 360 V iki 400 V



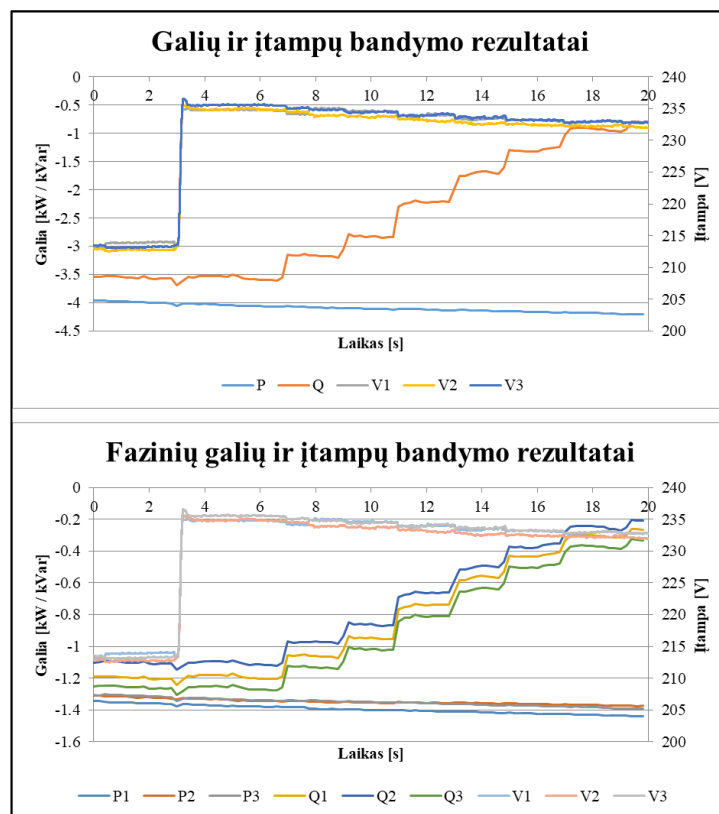
48 pav. Bazinio bandymo rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 430 V



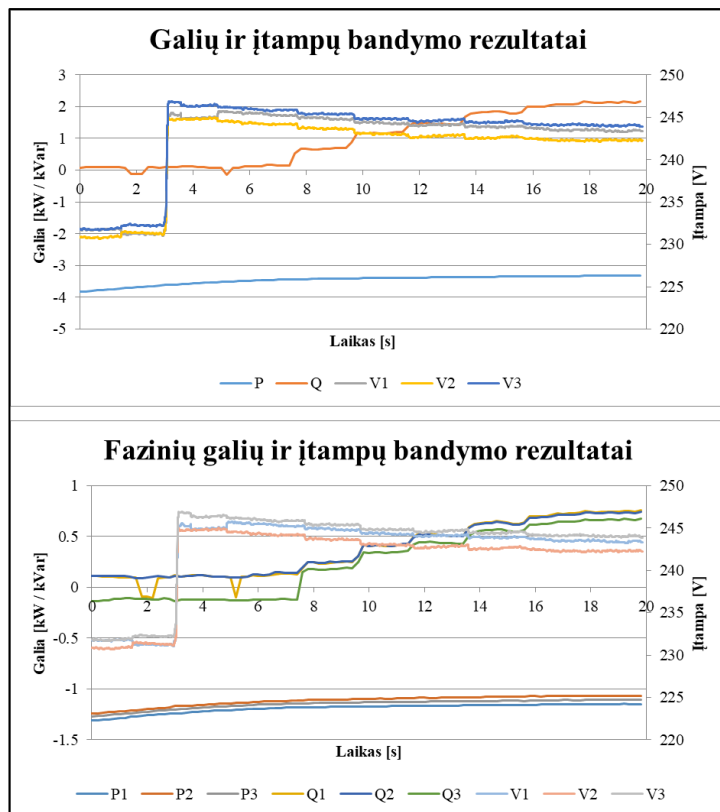
49 pav. Bazinio bandymo rezultatai keičiant įtampą iš 430 V iki 400 V



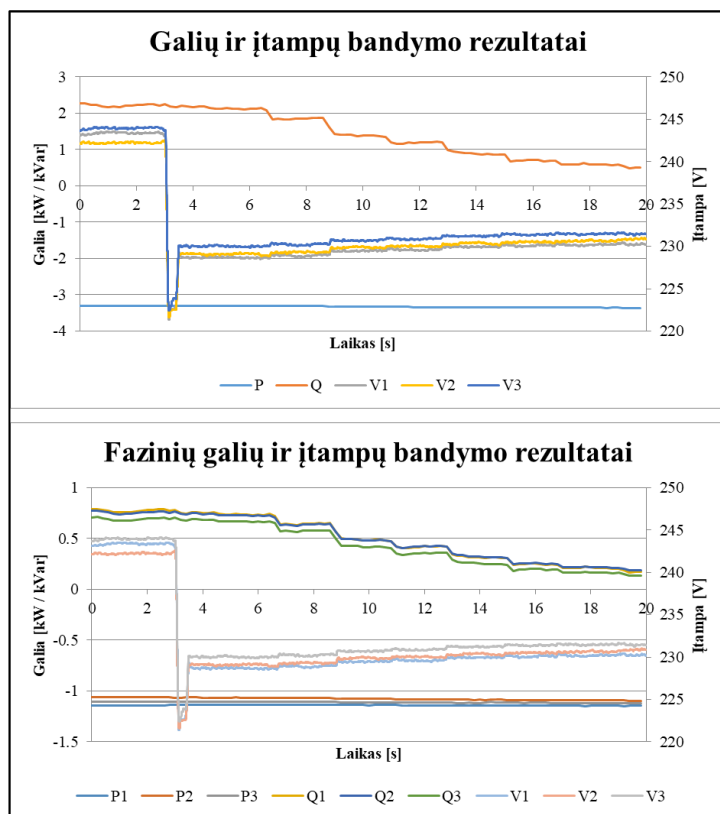
50 pav. Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 1,33 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V



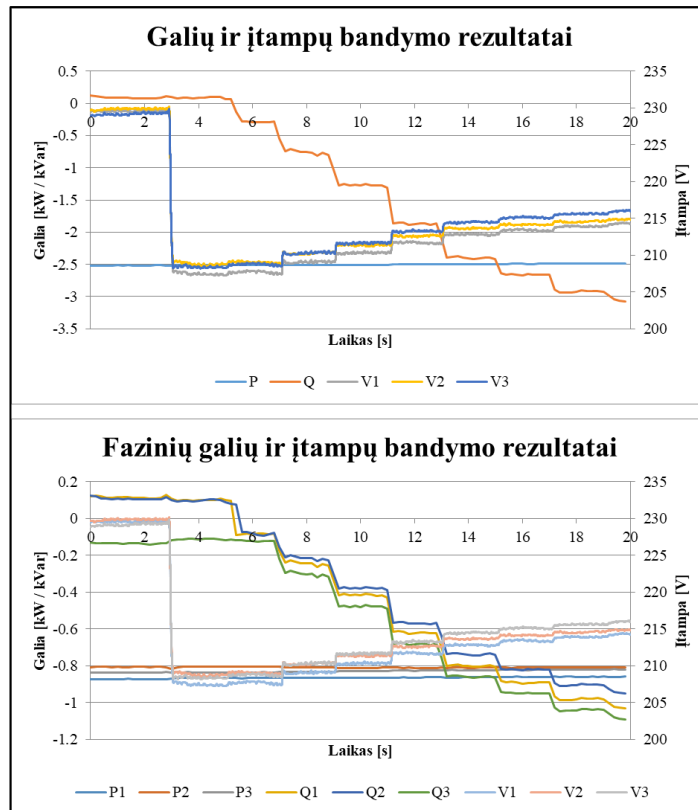
51 pav. Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 1,33 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 360 V iki 400 V



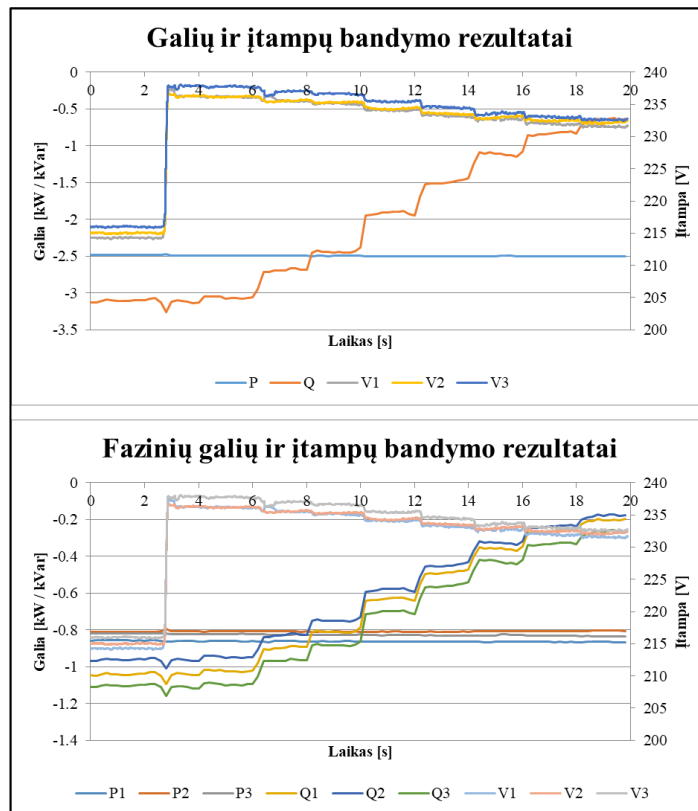
52 pav. Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 1,33 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 430 V



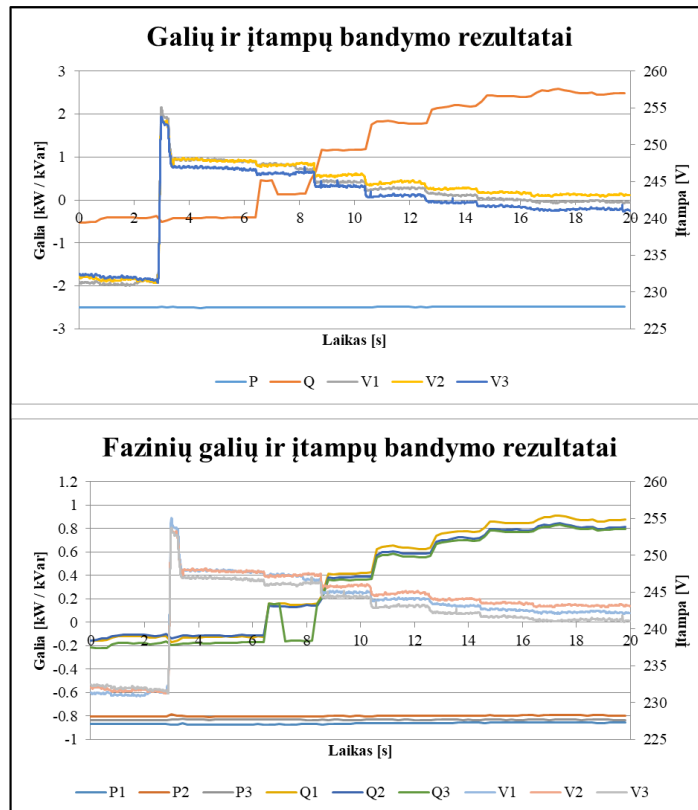
53 pav. Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 1,33 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 430 V iki 400 V



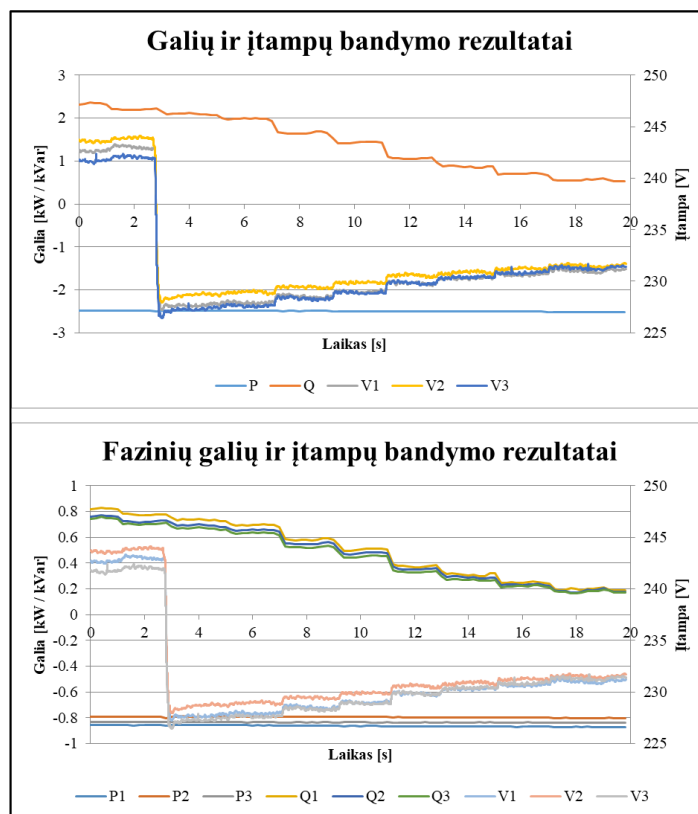
54 pav. Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 3,1 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V



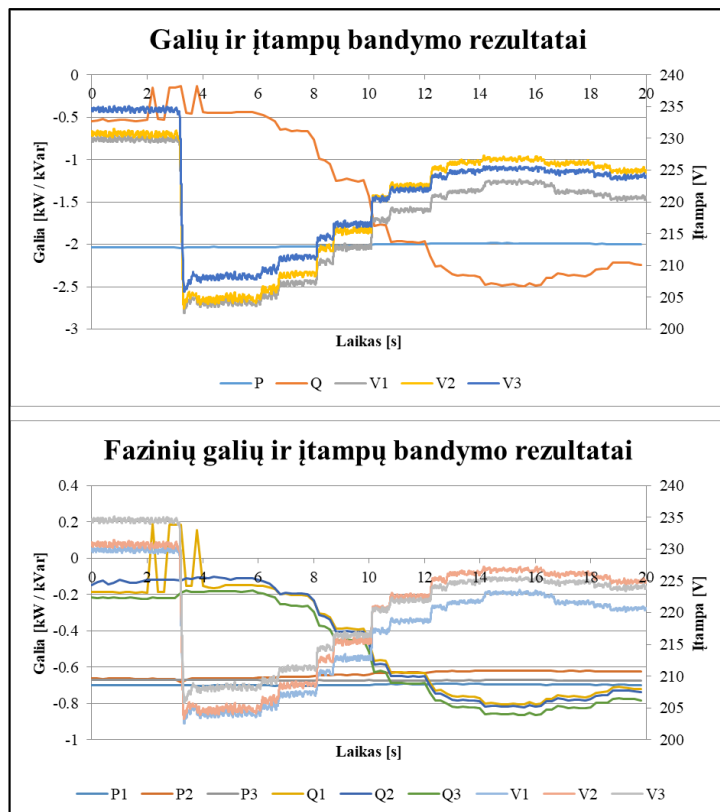
55 pav. Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 3,1 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 360 V iki 400 V



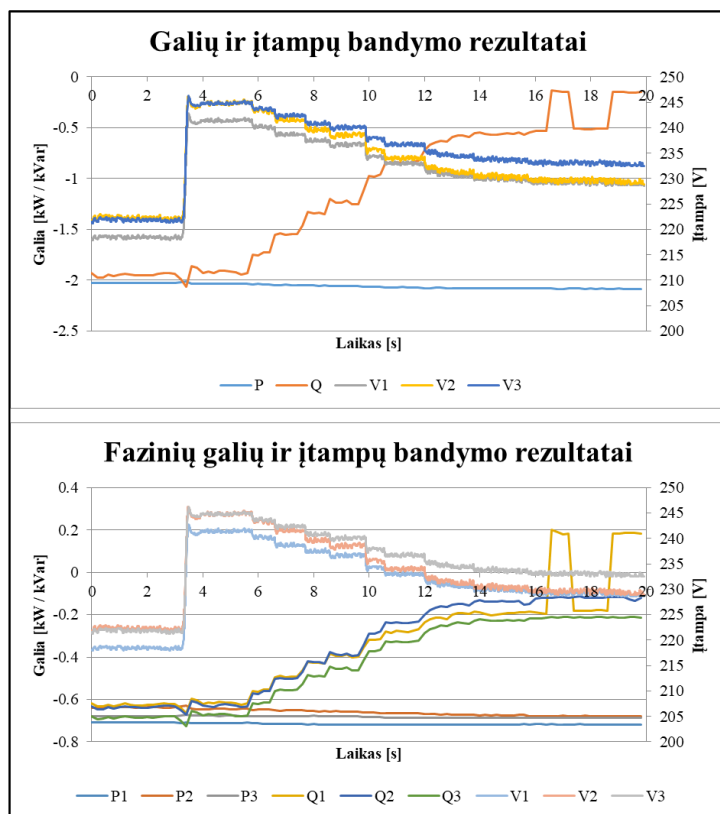
56 pav. Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 3,1 mH induktyvumu, rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 430 V



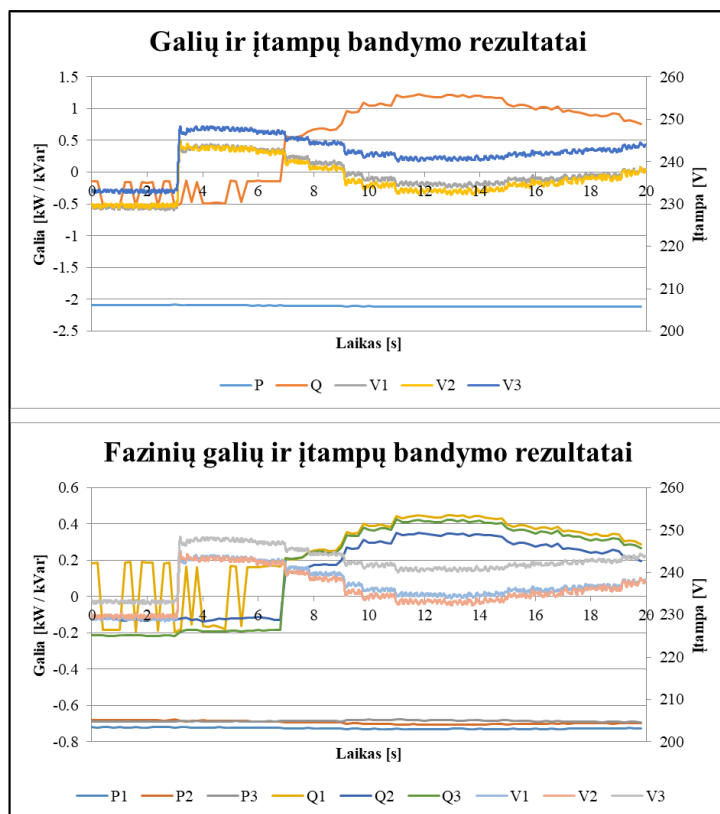
57 pav. Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 3,1 mH induktyvumu, rezultatai keičiant įtampą iš 430 V iki 400 V



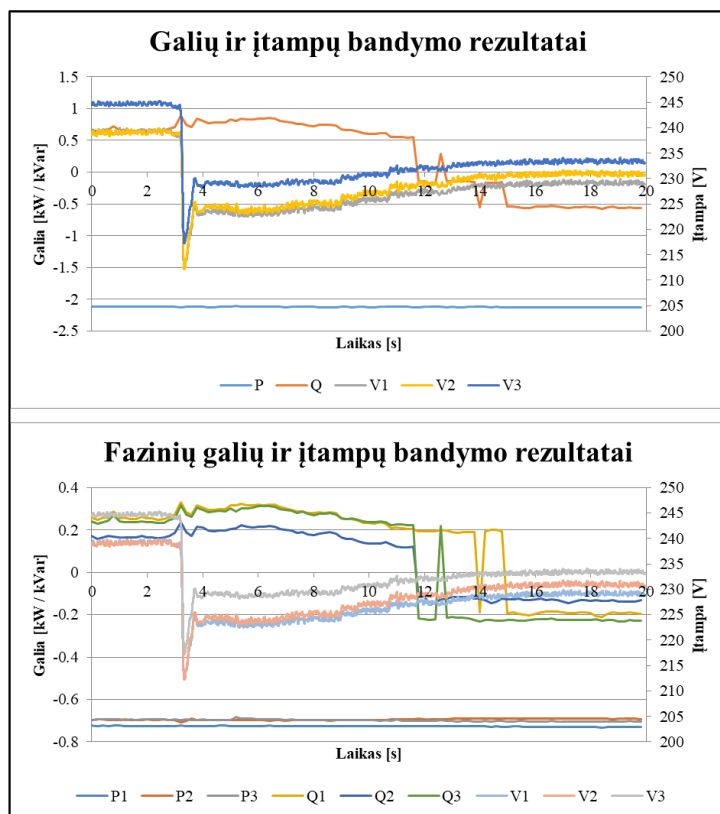
58 pav. Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 9,42 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 360 V



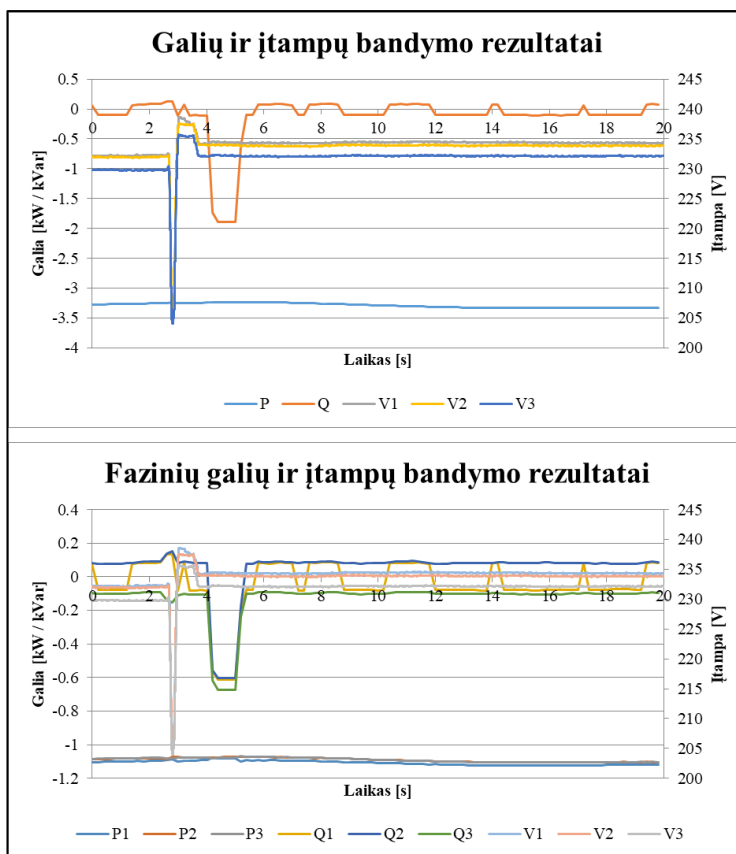
59 pav. Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 9,42 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 360 V iki 400 V



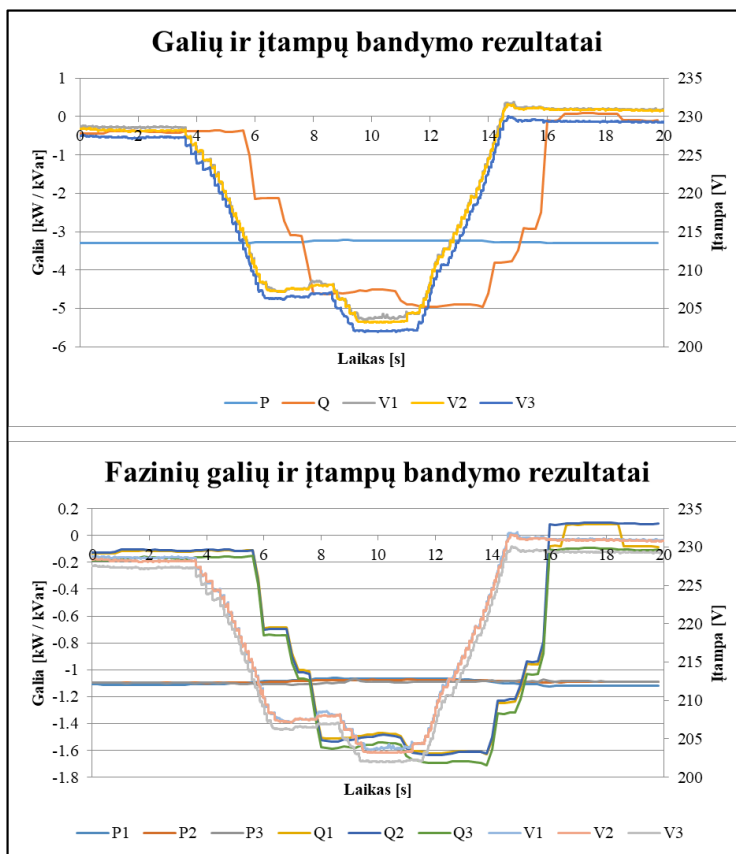
60 pav. Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 9,42 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 400 V iki 430 V



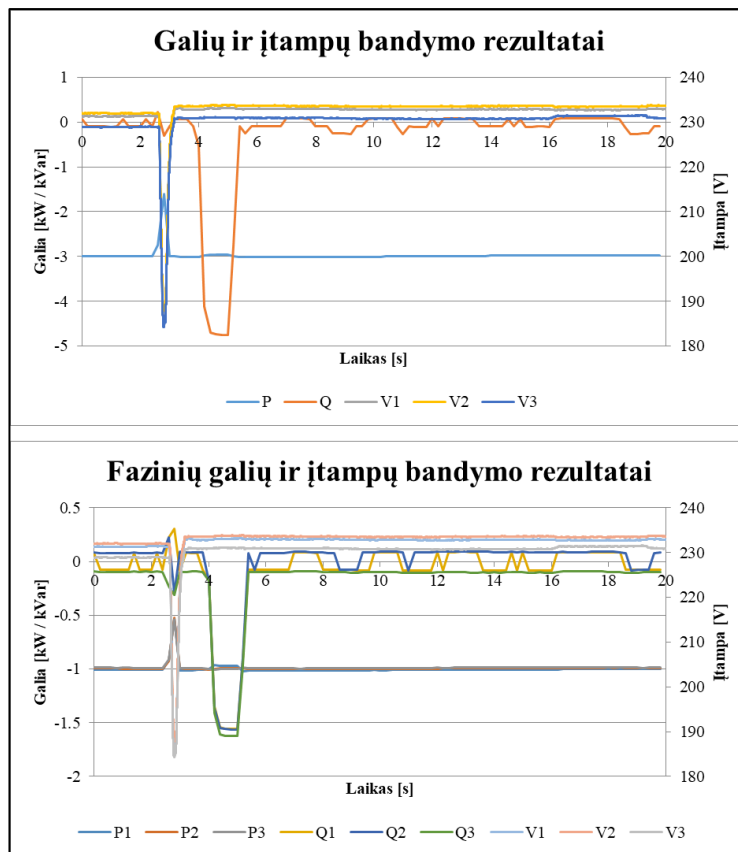
61 pav. Bandymo su trifaziu induktoriumi, su 9,42 mH induktyvumu ,rezultatai keičiant įtampą iš 430 V iki 400 V



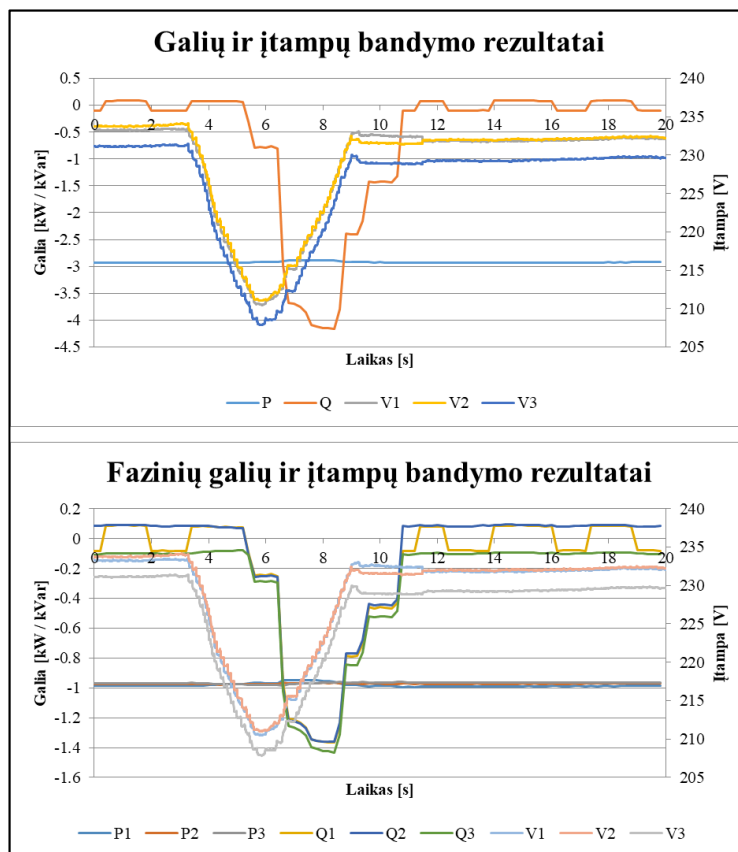
62 pav. PID kontrolės rezultatai esant trumpalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės:  $K=1$ ;  $I=5$ ;  $D=1$ .



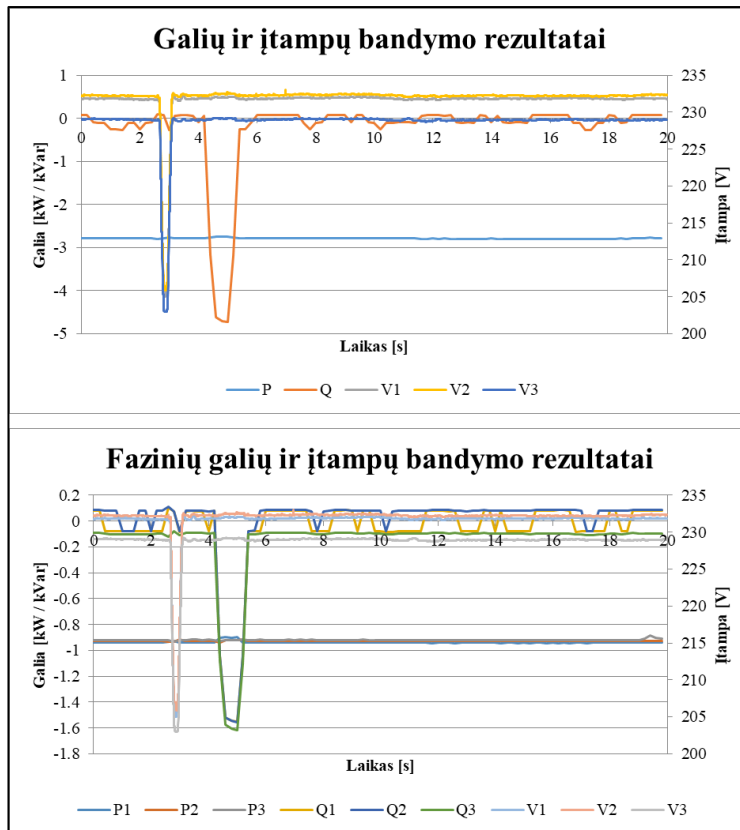
63 pav. PID kontrolės rezultatai esant ilgalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės:  $K=1$ ;  $I=5$ ;  $D=1$ .



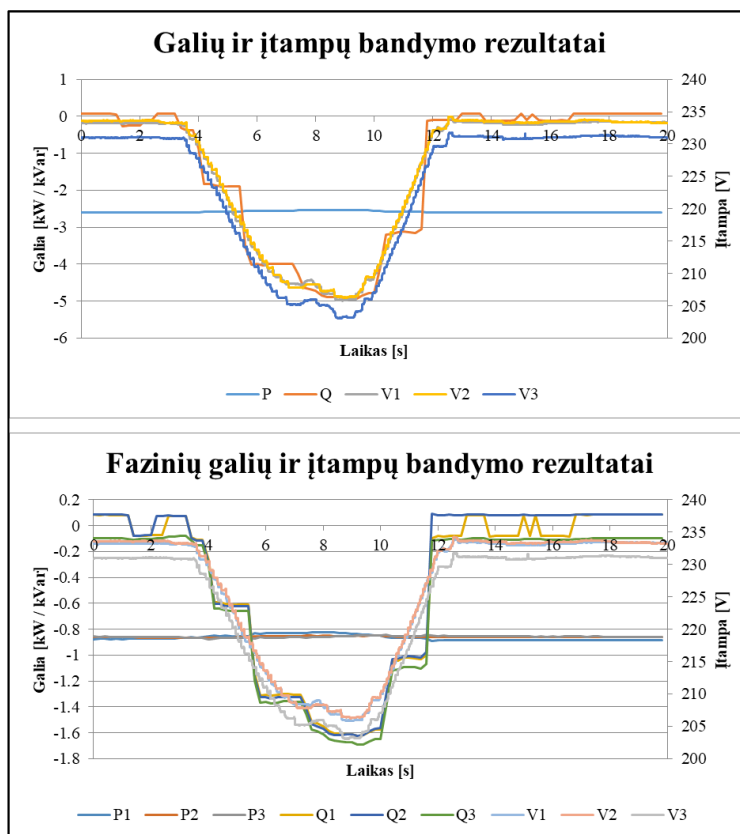
64 pav. PID kontrolės rezultatai esant trumpalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės:  $K=1$ ;  $I=0.5$ ;  $D=0.1$ .



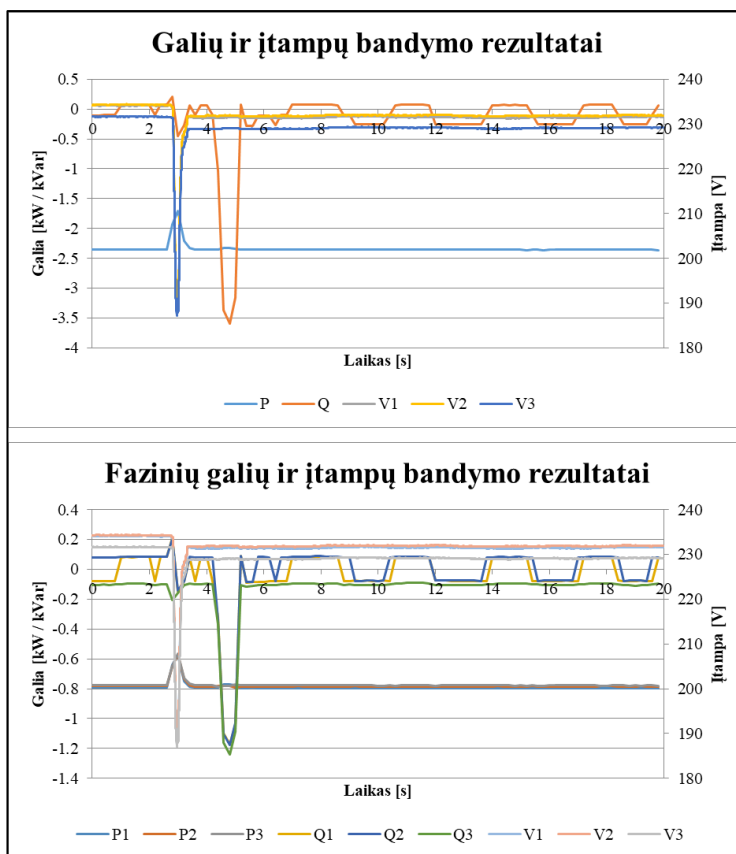
65 pav. PID kontrolės rezultatai esant ilgalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės:  $K=1$ ;  $I=0.5$ ;  $D=0.1$ .



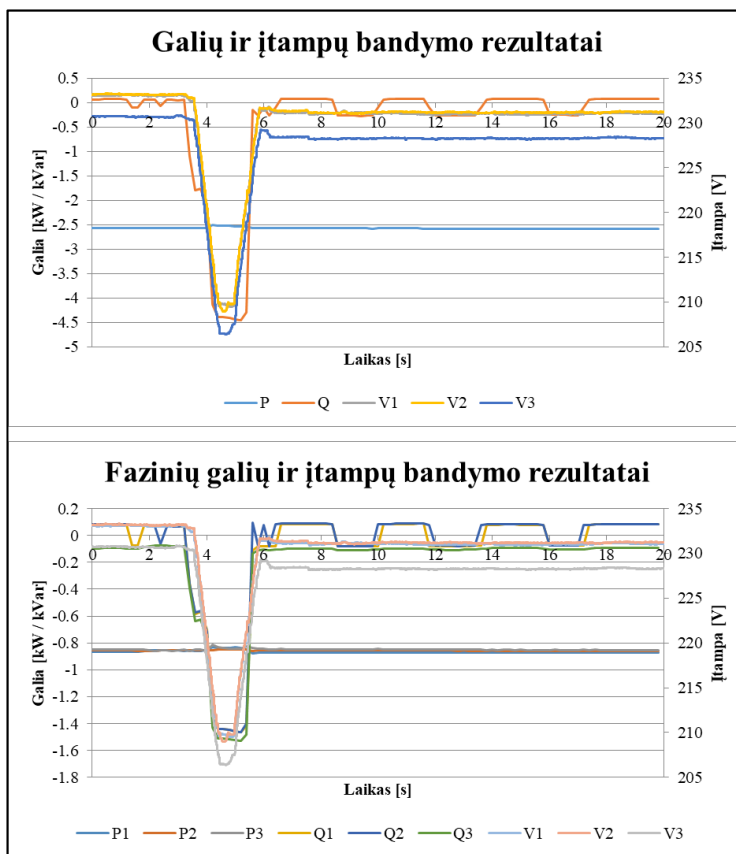
66 pav. PID kontrolės rezultatai esant trumpalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės:  $K=1$ ;  $I=0.05$ ;  $D=0.01$ .



67 pav. PID kontrolės rezultatai esant ilgalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės:  $K=1$ ;  $I=0.05$ ;  $D=0.01$ .



68 pav. PID kontrolės rezultatai esant trumpalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės:  $K=1$ ;  $I=50$ ;  $D=1$ .



69 pav. PID kontrolės rezultatai esant ilgalaikiam įtampos kritimui. Parametrų vertės:  $K=1$ ;  $I=50$ ;  $D=1$ .